

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MANEJO E PRODUÇÃO FLORESTAL
LINHA DE PESQUISA: MANEJO FLORESTAL
ÁREA DE ATUAÇÃO: GEOTECNOLOGIA APLICADA A CIÊNCIAS FLORESTAIS

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE
INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA
DIAMANTINA**

Antonio Igor Rios de Sousa

Mestrando

Dr. Odair Lacerda Lemos

Orientador

VITÓRIA DA CONQUISTA - BA

FEVEREIRO - 2025
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MANEJO E PRODUÇÃO FLORESTAL
LINHA DE PESQUISA: MANEJO FLORESTAL
ÁREA DE ATUAÇÃO: GEOTECNOLOGIA APLICADA A CIÊNCIAS FLORESTAIS

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE
INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA
DIAMANTINA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre

Antonio Igor Rios de Sousa

Mestrando

Dr. Odair Lacerda Lemos

Orientador

VITÓRIA DA CONQUISTA - BA
FEVEREIRO - 2025

S698i

Sousa, Antonio Igor Rios de.

Identificação e avaliação das áreas de risco de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada Diamantina. / Antonio Igor Rios de Sousa, 2025.

77f. : il. color.

Orientador(a): Dr. Odair Lacerda Lemos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referências F. 72 - 77

1. Queimadas. 2. Satélites. 3. Monitoramento remoto. 4. Densidade de Kernel. 5. Vegetação densa. I. Lemos, Odair Lacerda. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD 631.4

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB – Campus Vitória da Conquista - BA


Antônio Igor Rios de Sousa

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE
INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA
DIAMANTINA.**


Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2025

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOSELANE PRISCILA GOMES DA SILVA**
Data: 06/03/2025 16:09:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Joselane Priscila Gomes da Silva, (D.S.C. Ciências Florestais,) – UEAP

Documento assinado digitalmente
 **ALESSANDRO DE PAULA**
Data: 06/03/2025 18:24:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Alessandro de Paula, (D.S.C., Ecologia e Recursos Naturais,)

Documento assinado digitalmente
 **ODAIR LACERDA LEMOS**
Data: 06/03/2025 12:46:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Odair Lacerda Lemos, (D.S.C. Agronomia,) – UESB, Orientador

Dedico esta dissertação à minha família, que sempre esteve ao meu lado com amor, apoio e fé. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

*“Eu não falhei, acabei de encontrar
10.000 maneiras que não funcionam.”*

(Thomas A. Edson)

Agradecimento

Deus, por sempre iluminar minha vida e me dar aquela força (ou seria uma correção divina?) quando as coisas ficam apertadas!

À minha família – pai, mãe, irmã, sobrinha e cunhado – agradeço o amor incondicional, pelas risadas que, na maioria das vezes, só fazem sentido dentro do nosso círculo, pelas broncas que me fizeram crescer e nos unir. Se não fosse por vocês, eu seria uma versão muito mais sem graça de mim mesmo. Sério, nem 10% da pessoa que sou hoje. Na real, eu não sou nem 5% do que poderia ser se não fosse pela paciência, pelo apoio e, claro, pelas correções de rota que sempre vêm na hora certa (mesmo que eu nunca reconheça na hora). Enfim, sem todo esse caos maravilhoso, eu provavelmente estaria perdido, tentando entender qual é o sentido das coisas, mas com a certeza de que a pizza não ia ser tão boa sem vocês dividindo os pedaços.

Ao meu orientador, Odair Lacerda Lemos, que além de ser um monge da paciência (deve ter treinado com meditação intensiva durante anos ou, quem sabe, tem um contrato secreto com o Zen), virou amigo, psicólogo e terapeuta. Sua sabedoria é tão vasta que, sinceramente, acho que ele é o ChatGPT em versão humana: sabe tudo, responde a tudo, mas sem as falhas de "você errou" que o Google teima em me dar. E a cereja do bolo? Ele faz tudo isso de graça. O que, convenhamos, é um milagre, porque se fosse por mim, ele já teria faturado uma fortuna por pérola com quem eu compartilhei no caminho.

Aos amigos que estão longe: saudade das nossas conversas intermináveis que, no fundo, não levavam a lugar nenhum, mas eram incrivelmente épicas. Sinto falta das cervejas que começavam com “só uma” e terminavam comigo tentando lembrar onde deixei o carro.

Aos novos amigos aqui, que me receberam de braços abertos (provavelmente porque não sabiam direito no que estavam se metendo): muito obrigado por me ajudar a dar aquele empurrãozinho na adaptação. E, claro, um agradecimento extra por ainda sorrirem, ou pelo menos fingirem que gostaram, das minhas piadas polêmicas.

Aos professores, por me ensinarem não só o que está nos livros, mas também a arte da paciência e o valor do esforço.

À secretária Fabrícia, cuja paciência *infinita* e sorriso radiante tornaram os trâmites da vida acadêmica uma verdadeira brisa. Porque, é claro, nada diz 'paciência' como lidar com um mar de burocracia sem perder a calma... ou a vontade de sair correndo.

Ao laboratório, meu querido campo de batalha (ou campo de pesquisa, dependendo de quem sobreviveu ao dia). Agradeço pelos sorrisos em meio à agonia, pelas piadas tão impróprias que, se tivessem sido gravadas, com certeza renderiam um processo judicial coletivo, e, claro, pelos nossos 8 minutos diários de desabafo – aqueles raros momentos em que, pelo menos por um instante, tivemos alguém para ouvir e ver nossa sanidade indo embora sem fazer perguntas ou julgamentos.

Agradeço à CAPES pela concessão da bolsa, que foi essencial para o meu desenvolvimento acadêmico e para a realização deste projeto.

Agradeço ao programa PPGCIFLOR e à UESB pelo apoio e pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa, fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

E, claro, a mim mesmo, que, apesar dos tropeços, das horas perdidas e dos momentos de dúvida sobre o que diabos eu estou fazendo aqui, sempre encontro uma forma de me levantar, seguir em frente e fingir que tudo está sob controle – mesmo quando o café, a única coisa que ainda me mantém funcional, já não dá mais conta. Com um toque de carinho, uma pitada de ironia e uma boa dose de gratidão, agradeço a todos que fizeram essa jornada menos tortuosa e, quem diria, até um pouco divertida. Afinal, quem mais poderia lidar com tanta insanidade senão eu, não é mesmo? Esse é um momento de triunfo. E, se há algo que aprendi nesse tempo todo, é que a única coisa mais importante do que o diploma no final são as histórias hilárias e o conhecimento adquirido, mesmo que ele venha com a etiqueta “não aplicável em 99% dos casos práticos”.

Resumo

SOUSA, Antonio Igor Rios, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, fevereiro de 2025. **Identificação e avaliação de áreas de risco de incêndios florestais no Parque Nacional Da Chapada Diamantina.** Orientador: Odair Lacerda Lemos.

Os incêndios florestais representam uma grave ameaça à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos, especialmente em regiões sensíveis como o Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD). Este estudo teve como objetivo identificar e avaliar áreas propensas a incêndios na região, analisando padrões temporo-espaciais, fatores edafoclimáticos, topográficos e de uso do solo. Foram utilizados dados de focos de calor do INPE (2014-2023), imagens de satélites (NPP-375, GOES-16) e técnicas de geoprocessamento, como a densidade de Kernel, integradas a softwares como ArcGIS Pro e RStudio. Os resultados revelaram concentrações críticas de incêndios em municípios como Mucugé e Andaraí, associadas à vegetação densa, acúmulo de biomassa seca e atividades humanas, com picos em 2015 (3.638 focos) e 2020 (1.594 focos). A análise de risco destacou correlações negativas entre ocorrência de incêndios e declividade, indicando maior vulnerabilidade em áreas planas e de relevo suave. Conclui-se que a combinação de monitoramento remoto, políticas preventivas adaptadas às características locais e conscientização comunitária é essencial para mitigar impactos, proteger ecossistemas e promover o desenvolvimento sustentável na região.

Palavras-chave: Queimadas, satélites, monitoramento remoto, densidade de Kernel, vegetação densa.

ABSTRACT

SOUSA, Antonio Igor Rios, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, February, 2025. **Identification and Assessment of Fire Risk Areas in the Chapada Diamantina National Park.** Advisor: Odair Lacerda Lemos.

Forest fires pose a significant threat to biodiversity and ecosystem services, particularly in sensitive regions like Chapada Diamantina National Park (PNCD). This study aimed to identify and assess fire-prone areas in the region by analyzing spatiotemporal patterns, edaphoclimatic factors, topography, and land use. Data from INPE's fire hotspots (2014–2023), satellite imagery (NPP-375, GOES-16), and geoprocessing techniques such as Kernel density analysis, integrated with software like ArcGIS Pro and RStudio, were employed. Results revealed critical fire concentrations in municipalities such as Mucugé and Andaraí, linked to dense vegetation, dry biomass accumulation, and human activities, with peaks in 2015 (3,638 hotspots) and 2020 (1,594 hotspots). Risk analysis highlighted negative correlations between fire occurrence and slope, indicating higher vulnerability in flat and gently sloping areas. The study concludes that combining remote monitoring, locally adapted preventive policies, and community awareness is essential to mitigate impacts, protect ecosystems, and promote sustainable development in the region.

Keywords: Burned areas, Satellites, Remote monitoring, Kernel density, Dense vegetation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização do Parque Nacional da Chapada Diamantina e sua Zona de Amortecimento, Bahia, Brasil.	333
Figura 2. Uso e Cobertura do Solo no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia (2014-2023).....	35
Figura 3. Mapa de Densidade de Focos de Incêndios no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (2014-2023).....	48
Figura 4. Mapas da Densidade de Kernel de incêndios florestais na região de estudo de 2014 a 2023. As áreas em vermelho indicam uma alta densidade de incêndios, enquanto áreas em verde mostram menor densidade. 50Erro! Indicador não definido.	
Figura 5. Evolução da Média do Risco de Fogo ao Longo dos Anos.....	52
Figura 6. Tendência de Focos de Incêndio ao Longo dos Anos (2014 - 2023).....	54
Figura 7. Mapas de Densidade de Kernel para Período de Secura (PSE) entre 2014 e 2023, destacando áreas de maior secura acumulada e potencial risco de fogo no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.....	57
Figura 8. Distribuição Espacial do Risco de Fogo por Densidade de Kernel (2014-2023).....	59
Figura 9. Distribuição Espacial da Precipitação Acumulada por Análise de Densidade de Kernel (2014-2023)	61
Figura 10. Número de Focos de Incêndios por Município no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.....	64
Figura 11. Ocorrência de Incêndios por Faixas de Elevação no Parque Nacional da Chapada Diamantina.....	65
Figura 12. Incêndios por Classe de Relevô.....	66
Figura 13. Matriz de Correlação entre Focos, Média de Elevação e Média de Declividade.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Tipos de incêndios florestais	20
Quadro 2- Fatores ambientais associados aos incêndios florestais	21
Quadro 3. Distribuição de detecções de incêndios florestais por satélite em cada ano, com total acumulado por satélite ao longo do período de 2014 a 2023.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Municípios abrangidos pela Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD) e Percentuais.....	33
Tabela 2. Classificação do Risco de Fogo (RF) por Nível de Perigo.	44
Tabela 3. Tabela Distribuição de Uso da Terra e Focos de Incêndios (2014-2023).	663

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BDQueimadas- Banco de dados de Queimadas

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CSV - Comma-separated values

ESRI- Environmental Systems Research Institute

ha- Hectares

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

KDE - Densidade Kernel

Km²- Quilometro quadrado

m - Metro

MDT- Modelo Digital de Elevação

mm- Milímetro

NASA - National Aeronautics and Space Administration

PDI- Processamento Digital de Imagens

PNCD - Parque Nacional da Chapada Diamantina

PSE - Dias de Secura

SE - Dias de Secura

SIG- Sistema de Informações Geográfica

SR- Sensoriamento Remoto

SRTM- Shuttle Radar Topography Mission

SS - Severidade de Secura

UC- Unidade de Conservação

UTM- Universal Transversa de Mercator

ZA- Zona de Amortecimento

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS.....	18
	2.1 OBJETIVO GERAL	18
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
	3.1 TRIÂNGULO DO FOGO.....	18
	3.2 QUEIMADAS E INCÊNDIOS	19
	3.2.1 <i>Incêndios florestais</i>	20
	3.2.2 <i>Efeitos Ambientais</i>	22
	3.2.3 <i>Variáveis Climáticas</i>	23
	3.2.4 <i>Temperaturas</i>	23
	3.2.5 <i>Umidade Relativa do Ar</i>	23
	3.2.6 <i>Precipitação Pluviométrica</i>	24
	3.2.7 <i>Variáveis Topográficas</i>	24
	3.2.8 <i>Inclinação do Terreno</i>	25
	3.2.9 <i>Orientações de Encostas</i>	26
	3.2.10 <i>Variáveis Hidrográficas</i>	26
	3.3 SENSORIAMENTO REMOTO.....	27
	3.3.1 <i>Sensoriamento Remoto na detecção e monitoramento de</i> <i>incêndios florestais</i>	28
	3.4 IMAGENS DE SATÉLITES NA DETECÇÃO DE FOCOS DE CALOR E INCÊNDIOS FLORESTAIS 29	
	3.4.1 <i>Interpretação das imagens de satélites</i>	30
	3.4.2 <i>Processamento Digital nas Imagens</i>	31
4.	MATERIAL E MÉTODOS	32
	4.1 ÁREA DE ESTUDO	32
	4.1.1 <i>Localização</i>	32
	4.2 MEIO FÍSICO	34
	4.3 DADOS DOS FOCOS DE CALOR.....	34
	4.4 INFORMAÇÕES TOPOGRÁFICAS	35
	4.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	35
	4.6 AQUISIÇÃO DOS DADOS VETORIAIS	36

4.7	PREPARAÇÃO DE DADOS.....	37
4.7.1	<i>Análise Exploratória.....</i>	37
4.7.2	<i>Integração dos dados.....</i>	37
4.7.3	<i>Identificação dos padrões de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada Diamantina.....</i>	37
4.7.4	<i>Precipitação Acumulada.....</i>	38
4.7.5	<i>Fatores de Precipitação.....</i>	39
4.7.6	<i>Precipitação Efetiva (Fatores Climáticos).....</i>	40
4.7.7	<i>Fatores de Precipitação em Diferentes Modelos.....</i>	40
4.8	ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS.....	44
4.8.1	<i>Categorias de Risco de Fogo e Seus Valores Correspondentes..</i>	45
4.9	SOFTWARES.....	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	ANÁLISE ESPACIAL DOS PADRÕES DE INCÊNDIOS NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DIAMANTINA: DENSIDADE DE KERNEL (2014-2023).....	47
5.2	COMPARAÇÃO DA DENSIDADE DE FOCOS DE INCÊNDIOS (2014 – 2023).....	50
5.3	ANÁLISE DO RISCO DO FOGO NO PNCD.....	52
5.3.1	<i>Análise do Risco de Fogo.....</i>	52
5.4	ANÁLISE DA TENDÊNCIA DE FOCOS DE INCÊNDIOS POR ANO.....	54
5.5	DENSIDADE DE KERNEL PARA PERÍODO DE SECURA (PSE) ENTRE 2014 E 2023	57
5.6	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA POR ANÁLISE DE DENSIDADE DE KERNEL (2014-2023)	59
5.7	RISCO DE FOGO POR DENSIDADE DE KERNEL (2014-2023).....	61
5.8	DISTRIBUIÇÃO DE USO DA TERRA E FOCOS DE INCÊNDIOS (2014-2023).....	63
5.8.1	<i>Focos de Incêndios por Município no Parque Nacional da Chapada Diamantina</i>	65
5.8.2	<i>Distribuição de Incêndios por Faixas de Elevação.....</i>	66
5.8.3	<i>Incêndios por Classe de Relevo.....</i>	67
5.9	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS RELACIONADAS AOS FOCOS DE INCÊNDIO	68
6.	CONCLUSÃO.....	71
7.	REFERÊNCIAS.....	72

1. Introdução

Os incêndios sempre fizeram parte da história, atuando tanto como ferramenta de manejo quanto como ameaça ambiental. O uso controlado do fogo pode beneficiar ecossistemas adaptados, como o Cerrado, onde espécies vegetais desenvolveram adaptações fisiológicas para resistir ao fogo, mas sua má gestão, agravada pelas mudanças climáticas e pela intensificação das atividades humanas, tem aumentado a frequência e a gravidade dos incêndios, exigindo estratégias eficazes de mitigação que combinem conhecimento científico e técnicas avançadas para a identificação e avaliação de áreas de risco.

A Chapada Diamantina, na Bahia, é uma das regiões mais biodiversas do Brasil, abrigando uma grande variedade de ecossistemas que incluem formações vegetacionais xerofíticas, típicas da Caatinga e do Cerrado, além de matas secas e úmidas, e campos rupestres, que ocorrem em altitudes superior a mil metros. Sua riqueza natural é evidenciada pela presença de inúmeras espécies endêmicas, muitas ainda pouco estudadas. A importância biológica da Chapada Diamantina vai além de sua fauna e flora: a região é uma verdadeira "caixa d'água" do Nordeste brasileiro, com rios e nascentes que abastecem grande parte da população da região.

No entanto, essa riqueza natural está sob constante ameaça devido à ação antrópica, especialmente no que tange aos incêndios florestais, que têm se tornado cada vez mais frequentes. O Parque Nacional da Chapada Diamantina é a unidade de conservação de proteção integral do Brasil que registra o maior número de focos de incêndio por temporada (IBAMA, 2008). Este fato ressalta a necessidade urgente de ações efetivas para proteger este patrimônio natural.

A vulnerabilidade da Chapada Diamantina aos incêndios florestais resulta da interação entre fatores naturais e antrópicos. Embora possam ocorrer por causas naturais, como raios, a maioria dos focos é provocada pelo uso inadequado do fogo na agricultura e pela ocupação desordenada do solo. A topografia acidentada e a vegetação diversificada favorecem a rápida propagação das chamas, agravada por períodos de seca prolongada. Além disso, a falta de recursos das comunidades locais dificulta a prevenção e o combate aos incêndios, ampliando os danos

ambientais. Diante desse cenário, a região exige estudos e estratégias eficazes para identificar e mitigar áreas de risco.

Os incêndios florestais ameaçam a biodiversidade global, especialmente em ecossistemas ricos e únicos, como a Chapada. A fumaça gerada por esses incêndios libera uma variedade de componentes tóxicos, incluindo partículas ultrafinas, monóxido de carbono e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, que afetam diretamente a saúde dos ecossistemas. Espécies de animais, muitas vezes já vulneráveis, são expostas a altas concentrações desses componentes nocivos, resultando em sérios riscos à saúde, queda nas taxas de reprodução e até mesmo o declínio populacional.

A perda de biodiversidade não se limita a espécies isoladas, mas tem efeitos em cascata que perturbam o equilíbrio de todo o ecossistema. Isso pode levar à fragmentação de habitats, alteração nas cadeias alimentares e redução dos serviços ecossistêmicos, que são essenciais tanto para o meio ambiente quanto para o bem-estar humano. Além disso, o aumento da frequência e intensidade dos incêndios florestais está intensificando esses impactos, colocando diversas espécies em risco de extinção e exigindo esforços de conservação mais robustos e bem direcionados.

A adoção de práticas agrícolas inadequadas, como o uso indiscriminado do fogo para limpeza de áreas, eleva o risco de incêndios, ameaçando não apenas as áreas florestais, mas também as populações e atividades econômicas que dependem desses ecossistemas. Portanto, é crucial compreender e gerenciar esses fatores para reduzir os riscos e proteger áreas de alta biodiversidade. A capacidade do território de resistir ou se recuperar dos incêndios deve ser cuidadosamente avaliada, levando em conta tanto os aspectos ambientais quanto as intervenções humanas.

A identificação de áreas de risco para incêndios florestais apresenta desafios técnicos e logísticos, especialmente em territórios complexos como a Chapada Diamantina, onde a diversidade de ecossistemas e formações geográficas dificulta a criação de modelos preditivos precisos. A ausência de dados detalhados sobre condições edafoclimáticas e uso do solo agrava essa dificuldade, assim como a necessidade de integrar múltiplos fatores, incluindo aspectos sociais e econômicos, como a expansão agrícola e o crescimento urbano desordenado. Além disso, a fragmentação dos ecossistemas altera a propagação do fogo e a resposta das

espécies. Para enfrentar esses desafios, é essencial o uso de tecnologias capazes de processar grandes volumes de dados e identificar padrões de risco, aliadas a estratégias de ordenamento territorial que considerem a aptidão do solo e a mitigação dos incêndios.

HIPÓTESE CIENTÍFICA

H1 - A correlação entre variáveis edafoclimáticas (temperatura, precipitação, umidade), uso e ocupação do solo (tipos de vegetação, recursos hídricos, áreas antropizadas) e características topográficas (elevação, inclinação) demonstra influência significativa na suscetibilidade a incêndios florestais na Chapada Diamantina.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar e avaliar áreas propensas a incêndios florestais na Chapada Diamantina.

2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Analisar temporo-espacial dos padrões de incêndios;
- ❖ Avaliar de forma multifatorial as condições edafoclimáticas, topográficas e uso e ocupação de solo;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Triângulo do fogo

O fogo pode ser denominado como um processo físico decorrente da combinação entre o oxigênio, o combustível e uma fonte de calor (SOARES et. Al., 2008). Sendo assim, para dar início à combustão é necessária uma fonte de calor que aqueça os materiais combustíveis composto por toda matéria orgânica (folhas,

galhos, troncos, etc.), liberando gases de oxigênio que compõem o ar atmosférico aumentando a temperatura a ponto de ignição (VASCONCELOS, 2013).

O fogo tende a se comportar de diferentes formas dependendo das condições em que ele ocorre. Por exemplo, os combustíveis podem propiciar alterações na altura das chamas, na liberação de calor, na velocidade de queima, provocando, conseqüentemente, um dinamismo diferenciado que, sob influência de ventos, pode provocar colunas de convecção e aumentar a velocidade de propagação (ICMBio, 2010). A redução ou ausência de um desses três elementos proporciona a quebra do processo de combustão (SOARES, et al.,2008).

3.2 Queimadas e Incêndios

O uso das queimadas é uma forma de manejo comum em muitas regiões, usada devido à cultura do fogo, principalmente do agricultor ao desejar obter a renovação das pastagens e limpeza do terreno, com objetivo de facilitar o plantio. Este manejo do fogo refere-se ao conjunto de decisões técnicas e ações para evitar, preservar, controlar ou utilizar o fogo, em uma determinada paisagem (MYERS, 2006; SOARES; BATISTA, 2007).

No Brasil, a maior totalidade das queimadas é causada por atividades antrópicas, devido ao uso inadequado de recursos naturais, por exemplo, o desmatamento desordenado, as queimadas para limpeza de pasto e/ou preparo do terreno para plantio (SOUZA et al., 2004).

As queimadas são uma técnica agropastoril regulamentada, utilizada para a limpeza de áreas de plantio e pastagem. No entanto, quando mal planejadas, podem sair do controle e se transformar em incêndios florestais, causando danos ambientais e econômicos (VASCONCELOS, 2013; FAO, 2010). A queima controlada, quando realizada corretamente, segue diretrizes específicas para atingir objetivos de manejo, reduzindo os riscos associados à propagação do fogo (SOARES & BATISTA, 2007).

Diferentemente das queimadas planejadas, os incêndios florestais ocorrem de forma incontrolável. Para minimizar esses riscos, é essencial integrar o manejo do fogo às necessidades ecológicas e socioculturais da região, adotando abordagens tecnológicas adequadas (MYERS, 2006).

3.2.1 Incêndios florestais

Incêndio é o termo usado para definir o fogo sem controle que se propaga livremente e consome os diversos tipos de materiais combustíveis existentes (VASCONCELOS, 2013), em qualquer tipo de vegetação situada em áreas legalmente protegidas ou quando não se encontra em áreas sob proteção legal, que acarrete a queda da qualidade do ar (COBRADE, 2021).

Fonseca e Ribeiro (2003) conceituam incêndio florestal como a ocorrência de fogo em material combustível cujas causas vão de naturais a antrópicas, podendo ser classificados de duas formas: incêndios naturais, causados por descargas atmosféricas (raios) e geralmente ocorrendo fora do período de seca, e os incêndios antrópicos, que têm sua origem relacionada a causas humanas (SOARES; BATISTA, 2007).

Os incêndios florestais podem ocorrer em variados biomas, unidades de conservação, áreas de preservação, fazendas, margens de estradas, proximidades de aglomerados urbanos, áreas de reflorestamento, entre outras localidades (COSTA et al., 2009).

Os incêndios florestais são classificados de acordo com o grau com que os combustíveis, desde o solo até o topo das árvores, estão envolvidos na combustão. Sendo assim, estão classificados os incêndios florestais em incêndios de solo, superfície e de copa (SOARES; BATISTA, 2007), conforme o Quadro 1.

Quadro 1- Tipos de incêndios florestais

Incêndios de solo	São incêndios que se propagam de baixo da superfície terrestre, alimentados por matéria orgânica seca, raízes e turfas, matérias finas bem compactadas de combustão lenta e contínua (SOARES, et. al., 2008).
Incêndios de superfície	São caracterizados pela queima da vegetação morta e rasteira, como as herbáceas, árvores pequenas e qualquer tipo de material orgânico existente no solo. Estes incêndios não causam danos significativos em árvores de grande porte, porém são extremamente prejudiciais às vegetações rasteiras e plantas jovens, principalmente para sua regeneração (SOARES, 1985; VASCONCELOS, 2013).

Incêndios de copa	São os incêndios que avançam por meio das copas, independente do incêndio superficial, seu fator para a propagação do fogo é a presença de vento ou aclave acentuado que aproxima as copas facilitando a passagem do fogo de uma copa para outra (SOARES et.al., 2008).
--------------------------	---

A probabilidade de ocorrência do fogo é a razão da probabilidade de ocorrência de duas situações: fonte de fogo e condições favoráveis para sua propagação (SOARES, 1985; CARVALHO, 2006).

Diversas características do ambiente têm influência sobre o início, a propagação e a intensidade dos incêndios florestais (SOARES; BATISTA 2007). Os fatores que estão mais relacionados com os incêndios têm relação com as condições climáticas, a topografia e o tipo de cobertura vegetal (material combustível) (SOARES et. al., 2008; ASSIS et al., 2014), conforme o Quadro 2.

Quadro 2- Fatores ambientais associados aos incêndios florestais

Condições climáticas	Afetam o estado dos combustíveis pelo aumento da temperatura, que influencia o ressecamento da vegetação e facilita o início e a propagação do fogo; pelo vento, que, quanto mais forte, mais rapidamente espalha as chamas, além de fornecer oxigênio, favorecer o ressecamento da vegetação e determinar a direção da propagação; e pelas chuvas, que aumentam a umidade da vegetação, dificultando o início e a propagação do fogo (SOARES et al., 2008; ICMBio, 2010).
Topografia	Exerce grande influência sobre o clima, vegetação e conseqüentemente sobre o material combustível, criando uma tendência do fogo de se propagar mais rapidamente nos aclives e mais lentamente nos declives (RIBEIRO et al., 2008; SOARES et al., 2008).
Cobertura Vegetal	O tipo de cobertura florestal influencia no comportamento do fogo, pois implica em mudanças diversas por meio do material combustível e as condições climáticas (SOARES et.al., 2008).

A análise da influência do fogo, na estrutura da vegetação, por meio dos seus fatores, pode ser realizada tanto por sensores com alta resolução temporal, espacial e espectral (SILVA et al., 2013). Os dados produzidos pelo sensoriamento remoto são objeto de estudos desde as décadas de 1960 e 1970, e sua análise vem se tornando cada dia mais aplicada nas mais diferentes áreas do conhecimento (MENESES; ALMEIDA, 2012).

3.2.2 Efeitos Ambientais

Os incêndios florestais emergem como uma séria ameaça aos ecossistemas, impactando de maneira abrangente suas características físicas, biológicas e ambientais (AGBESHIE et al., 2022). Esses eventos deixam marcas profundas em diversas esferas do meio ambiente, abrangendo áreas terrestres, aquáticas e atmosféricas.

No contexto atmosférico, os incêndios florestais estão intrinsecamente ligados à emissão de carbono, contribuindo para mudanças climáticas. Estudos recentes indicam uma complexa interação, em que os incêndios e as alterações climáticas se influenciam mutuamente, resultando em um aumento notável nas ocorrências. Em 2021, os incêndios florestais liberaram quase o dobro de CO₂ comparado à aviação global, conforme pesquisa da University of California (2021).

Os incêndios florestais impactam diretamente o solo, promovendo a perda de nutrientes, erosão superficial e aumento da hidrofobicidade das partículas, o que compromete a infiltração da água e a qualidade do solo (AGBESHIE et al., 2022). Como consequência, a recarga do lençol freático é reduzida, afetando sua disponibilidade.

Na vegetação, o fogo contribui para a disseminação de espécies invasoras, causando alterações substanciais. Estudos revelam que uma porcentagem significativa de espécies de plantas e animais na Amazônia sofreram consequências de incêndios, conforme relato de Tyukavina et al. (2022) e Camargo (2021).

Na região da Chapada Diamantina, os incêndios têm impactos ambientais significativos. Um estudo do Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade (CECS) da Universidade do Minho destacou a importância de compreender a dinâmica do fogo para avaliar esses impactos (Santos et al., 2023).

A região do Cerrado, vital globalmente, enfrenta uma destruição sistemática devido à desflorestação, expansão agrícola e incêndios. Mais de 10 mil espécies de plantas, sendo 45% endêmicas, estão ameaçadas nessa área ecologicamente crucial, com uma taxa de destruição quase duas vezes maior que a Amazônia, conforme alertado por estudos da NASA (2017).

3.2.3 Variáveis Climáticas

Essas costumam ser analisadas em curtos períodos, demonstrando que se constitui em um parâmetro variável. Usualmente, são utilizadas em cálculos diários de probabilidade de ocorrência de incêndios florestais, mas também podem ser usadas médias anuais, em estudos espaciais. Segundo Soares (1984), a possibilidade e a frequência dos incêndios florestais estão fortemente relacionadas às condições atmosféricas locais, evidenciando, assim, a importância de serem estudadas.

3.2.4 Temperaturas

A temperatura do ar influi direta e indiretamente na combustão e propagação dos incêndios. Sua influência direta se refere à quantidade de calor necessária para elevar o combustível à temperatura de ignição, que depende da própria temperatura inicial do material combustível e do ar que está em volta. Indiretamente, a temperatura influencia outros fatores relacionados à propagação do fogo tais como vento, umidade do combustível e a estabilidade atmosférica (SOARES, 1985; apud NUNES, 2005). A temperatura do ar costuma ser avaliada no período mais quente do dia, que normalmente é no período das 13h às 15h.

3.2.5 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar está relacionada ao teor de umidade do material combustível. Quanto mais úmido estiver o ambiente, menor a possibilidade de combustão do material combustível e vice-versa.

A umidade relativa do ar é um importante elemento da biosfera. A baixa umidade causa ressecamento de material combustível morto, gerando ambientes propícios à ocorrência de incêndios florestais. Durante o aquecimento diário da superfície terrestre, a umidade relativa do ar é geralmente mais baixa no fundo dos vales ou nas faces diretamente expostas à incidência dos raios solares. À noite, as partes mais baixas, como o fundo dos vales, são relativamente mais úmidas e a

umidade relativa mínima ocorre na posição média do declive, onde as temperaturas são mais altas (NUNES, 2005).

3.2.6 Precipitação Pluviométrica

A precipitação é utilizada em diversos índices de determinação do risco de incêndio e a sua ausência, assim como a sua acumulação, está relacionada à ocorrência e diminuição dos riscos de incêndios, respectivamente. Longos períodos de estiagem afetam o potencial de propagação de diversas maneiras, principalmente pela secagem progressiva do material combustível morto, podendo inclusive afetar o teor de umidade da vegetação verde (SOARES, 1985; NUNES, 2005).

O estudo de Silva (2017) investigou a dinâmica dos incêndios florestais no estado do Acre e os fatores que os impulsionam ao longo de 33 anos (1984 a 2016), utilizando imagens do Landsat e o software CLASlite1. Santana et al. (2011) destacam que há um “tempo de resposta” entre o término do período chuvoso e o início das queimadas, influenciado pela variação da umidade do solo e do material combustível. O início e a redução dos incêndios estão diretamente ligados à perda ou recuperação progressiva da umidade nesses elementos.

Tendo-se o conhecimento das principais variáveis que influenciam o risco de incêndios florestais, dar-se-á a aplicação de sistemas de prevenção. Para a melhor utilização dos recursos de prevenção é interessante saber quais métodos estão disponíveis e quais os que funcionam melhor na região de interesse.

3.2.7 Variáveis Topográficas

Estudos recentes exploram a relação entre variáveis topográficas e fertilidade do solo, evidenciando que a maior variabilidade topográfica, especialmente em elevação e convexidade, desempenha um papel crucial na determinação da fertilidade do solo em detalhes (HUANG et al., 2023). A modelagem da probabilidade de incêndio destaca a influência de variáveis como climáticas, combustíveis, topografia e atividades humanas, ressaltando a importância das características temporais das variáveis climáticas na previsão da probabilidade de incêndios (BAILEY; YEO, 2019).

Um estudo de caso em terrenos montanhosos não manejados abordou os efeitos da estabilidade do declive pós-incêndio, confirmando a propensão da área a instabilidades relacionadas a incêndios e propondo soluções de mitigação (SANTOS; CORREIA; COELHO, 2020). Na interface urbana de Santa Barbara, um estudo sobre risco de incêndio durante ventos extremos destacou o perigo de ignições não planejadas, evidenciando a vulnerabilidade da região propensa a incêndios (DOERR et al., 2022).

A preocupação com o aumento do risco de incêndios florestais devido à mudança climática é abordada em vários estudos. As condições mais extremas, como secas, calor e baixa umidade, tornam a vegetação mais suscetível a incêndios perigosos, representando uma ameaça significativa para as paisagens (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021; CHUVIECO et al., 2023; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2023;).

3.2.8 Inclinação do Terreno

A inclinação do terreno desempenha um papel crucial na formação de microclimas e na determinação do tipo de vegetação, influenciando condições como vento, umidade do ar e material combustível (SPRINGER, 2007). Esta variável também impacta o acúmulo de água, com áreas planas mais suscetíveis a inundações em comparação com áreas íngremes (DE FRENNE et al., 2021), sendo relevante para gestão da água e planejamento do uso da terra.

No contexto de incêndios florestais, a inclinação pode dificultar as operações de supressão e combate ao fogo, com possíveis atrasos na chegada de brigadistas e uma propagação mais rápida do fogo em aclives acentuados em comparação com declives (JAISWAL et al., 2002; SECUNDO et al., 2019). O movimento convectivo das massas, onde o ar quente se eleva e o ar frio ocupa o espaço vazio formado, desempenha um papel vital na demanda de oxigênio na zona de combustão (REGO et al., 2021).

Especificamente em plantações de eucalipto na Austrália, a velocidade de propagação do fogo demonstrou aumentar em progressão aritmética com o aumento de 10 graus na inclinação do terreno (ADAB et al., 2013). Essas considerações são

fundamentais para compreender e enfrentar os desafios associados aos incêndios florestais em diferentes condições topográficas.

3.2.9 Orientações de Encostas

A orientação das encostas, também conhecida como aspecto ou iluminação, desempenha um papel crucial na propagação de incêndios, influenciando a facilidade de ignição do material combustível e a subsequente disseminação do fogo. A relação entre essa orientação e a propagação do fogo é proporcional à incidência solar na superfície, sendo maior a temperatura do ar e menor a umidade relativa do ar em locais com incidência solar direta, impactando a vegetação e a secura do material combustível (SOARES; BATISTA, 2007).

Torres et al. (2010) destacaram a relação inversa da umidade relativa do ar com a formação de nuvens e a incidência solar. Baixos níveis de umidade relativa resultam em menos nuvens e mais incidência solar, aumentando a predisposição à ignição e propagação do fogo. Estudos recentes, como o de Ribeiro et al. (2023), exploraram ainda mais essa dinâmica, investigando o efeito da inclinação na propagação do fogo com duas frentes de fogo não simétricas, observando uma dependência dos ângulos de inclinação e iniciais entre as frentes de fogo para taxas de propagação do ponto de interseção.

3.2.10 Variáveis Hidrográficas

A malha hidrográfica desempenha um papel ambíguo na propagação de incêndios florestais. Por um lado, fornece água para combate a incêndios e atua como barreira natural, inibindo a propagação do fogo, especialmente quando os rios têm largura suficiente em relação à vegetação circundante (SOARES, 2000). Por outro lado, a proximidade de comunidades humanas e atividades recreativas perto de corpos d'água aumenta o risco de ignição acidental de incêndios, pois as comunidades tendem a se desenvolver nessas áreas (RIBEIRO et al., 2008).

A análise da proximidade da malha hidrográfica é uma ferramenta útil na avaliação do risco de incêndio, exigindo informações detalhadas sobre córregos, incluindo fluxo de água, largura e natureza intermitente ou perene (SOARES;

BATISTA, 2019). A sazonalidade também é crucial, pois períodos secos aumentam o risco, com menos água disponível para combate a incêndios, enquanto períodos chuvosos reduzem o risco (Soares; Batista, 2019).

3.3 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto envolve um conjunto de técnicas que visa coletar, processar e analisar os dados da superfície terrestre a partir de informações provenientes da interação da radiação eletromagnética com os alvos terrestres, propiciando a identificação, descrição ou caracterização de padrões espaciais (LOMBARDI, 2005).

As imagens de sensores remotos, como fonte de dados da superfície terrestre, são cada vez mais utilizadas para a elaboração de diferentes tipos de mapas e vem sendo largamente aplicadas no monitoramento de coberturas vegetais (ABREU; COUTINHO, 2014). Nesse processo de interpretação, dados contidos em uma imagem são transformados em informação e apresentados em forma de mapa. Enquanto os mapas contêm informação, as imagens obtidas de sensores remotos contêm dados brutos, que só se tornam informação após a sua interpretação (FLORENZANO, 2002).

O sensoriamento remoto utiliza-se sensores de radiação eletromagnética (REM), fazendo com que uma informação seja transferida de um objeto ao sensor, no intuito de fornecer imagens que podem ser interpretadas e conseqüentemente fornecer informações úteis sobre o ambiente (NOVO, 2010). Elas registram a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre, utilizando sensores portáteis e instalados em plataforma. Os sensores são equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (BARROS; SILVA; COSTA, 2016). Entre os produtos gerados por sensores remotos, destacam-se as fotografias aéreas e as imagens de satélite, os quais podem ser obtidos em várias escalas e faixas de radiação (MORAES, 2002; PEIXE et al., 2011).

3.3.1 Sensoriamento Remoto na detecção e monitoramento de incêndios florestais

O avanço tecnológico das últimas décadas favoreceu o desenvolvimento de vários satélites de monitoramento terrestre, possibilitando assim estudos em escala global, regional ou local, a coleta de dados sobre o grau de degradação ao meio ambiente por meio de incêndios florestais, incluindo o acompanhamento de biomas ameaçados, alterações climáticas, níveis de poluição da água e da atmosfera, entre outras (MASCARENHAS et al., 2009).

A criação de políticas de prevenção e monitoramento de incêndios tem se tornado possível por meio da aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR), pois permitem extrair informações de forma rápida e eficiente, para serem utilizadas na identificação, controle e fiscalização de queimadas (SANTOS et al., 2020). A partir do sensoriamento remoto é possível mapear, monitorar e fiscalizar extensas áreas da superfície terrestre, com abordagem em diferentes escalas (MENESES; MADEIRA, 2001). Dessa forma, os dados de sensoriamento remoto fornecem um meio prático para o monitoramento e detecção de incêndios florestais, além de trazerem diversas contribuições importantes para os estudos ambientais (ROY et al., 2002).

De acordo com Santos et al. (2020), alguns dados extraídos da utilização do sensoriamento remoto podem auxiliar na detecção e na previsão de onde e quando haveria probabilidade de ação humana de usar o fogo. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental na geração de bancos de dados, por meio do uso de satélites que correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre. Na detecção por satélite, uma queimada é ou não registrada, dependendo da energia termal que emite e das condições atmosféricas entre a queimada e o sensor do satélite (SELHORST; BROWN, 2003).

A detecção de fogo a partir de sensoriamento remoto, pode ser realizada de duas formas específicas. A primeira por meio do padrão térmico dos alvos para detecção do fogo ativo, a partir dos sensores capazes de obter informações nos canais espectrais do infravermelho médio e termal. A segunda, por meio do mapeamento das cicatrizes de queimadas, realizada levando-se em conta as

alterações espectrais da vegetação, principalmente nos canais do visível e infravermelho próximo, relacionadas ao total de cinzas e carvão, solo exposto e à recuperação da vegetação (GITAS et al., 2012).

3.4 Imagens de satélites na detecção de focos de calor e incêndios florestais

O uso de imagens de satélite para detectar focos de incêndio e áreas queimadas tem sido amplamente adotado nas últimas décadas. Desde a década de 1980, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Earth Explorer do United States Geological Service (USGS) vêm aprimorando seus sistemas de detecção de queimadas por meio de sensores a bordo de satélites (GONTIJO et al., 2011). Há mais de 20 anos, mantém-se um sistema operacional de monitoramento do processo de queimadas para todo o Brasil e parte da América do Sul. Nesse período, diferentes metodologias e sistemas computacionais foram desenvolvidos para identificar focos de calor em imagens de satélites de baixa resolução, como os satélites polares da série NOAA, TERRA e AQUA, além dos satélites geoestacionários GOES e METEOSAT (SANTOS, 2010)

Os focos de calor, caracterizados por áreas de intensa emissão térmica, são detectados por sensores a bordo de satélites e geralmente estão associados a queimadas (AMBIENTEBRASIL, 2021). Para essa identificação, há uma ampla variedade de satélites em órbita terrestre, equipados com sensores de diferentes resoluções e técnicas para monitorar os impactos dos incêndios (FRANÇA; FERREIRA, 2005). Cada um desses sistemas possui características específicas, como resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica, que influenciam diretamente a qualidade dos dados obtidos (ARAUJO, 2015).

Alguns sensores de maior resolução espacial como o *Landsat* TM-5, são utilizados com frequência para estimar áreas queimadas em regiões relativamente pequenas e para estudos de casos (FRANÇA, 2001), onde tanto o sensor TM (*Thematic Mapper*) como o OLI (*Operational Land Imager*) presente no *Landsat* 8, têm mostrado grande aplicabilidade no mapeamento de queimadas, por oferecer uma série temporal mais longa de dados, além de uma resolução espacial que facilita a caracterização da cobertura da terra e por adquirir medições espectrais em

todas as grandes porções do espectro eletromagnético solar visível, infravermelho próximo, infravermelho médio (ARANTES, 2014).

3.4.1 Interpretação das imagens de satélites

De acordo com França (2001), existem duas abordagens no uso de dados orbitais em estudos de queimadas e incêndios florestais, em que se identifica o fogo ativo utilizando a informação adquirida na região do infravermelho médio e na outra, identificam-se as cicatrizes deixadas pelas queimadas, utilizando bandas espectrais adquiridas principalmente nas regiões visível e infravermelho próximo e médio (ANDERSON et al., 2005; ROY et al., 2005). A partir dos dados utilizando as tecnologias de Sensoriamento Remoto pode-se fazer a identificação de queimadas por meio da detecção de cicatriz e detecção de número de focos de calor (LOMBARDI, 2003; LIMA et al., 2013).

As detecções de cicatrizes deixadas pelos incêndios florestais apresentam uma variabilidade de resposta espectrais a depender do tipo de vegetação atingida, da eficiência da queimada, do substrato, entre outros fatores (FRANÇA; RIBEIRO, 2008). Assim, ao se realizar a composição colorida RGB, as áreas que apresentam a biomassa queimada tendem a absorver mais a radiação dos comprimentos de onda centrados no infravermelho próximo (NIR), fazendo com que o nível de cinza mais baixo corresponda à queimada recentes (LOMBARDI, 2003).

França et. al. (2007) destacaram que as áreas devastadas por incêndios podem ser identificadas pelas “cicatrizes” deixadas pelo fogo, uma vez que, logo após a passagem do fogo uma camada de carvão e cinzas, resultante da combustão da vegetação, é depositada sobre o solo. Tal camada, rica em carvão, tem a propriedade de absorver a radiação solar em uma ampla faixa do espectro ótico e, portanto, de refleti-la muito pouco.

Já a detecção por meio de focos de calor é realizada por meio da detecção de áreas que transmitem uma intensidade de calor elevada, sendo identificadas por sensores a bordo de satélites associadas a queimadas com temperatura acima de 47°C (OLIVEIRA, 2006). Entretanto, não devem ser considerados como foco de fogo ou incêndios florestais (RODRIGUES et al., 2011).

No Parque Nacional da Chapada Diamantina, esses dados estão disponíveis a partir de 1998, e trata-se do sistema de monitoramento espacial da ocorrência de fogo utilizando satélites com sensores óticos com faixa termal média de 4 μm , com atualização diária a cada três horas (INPE, 2020).

3.4.2 Processamento Digital nas Imagens

São técnicas de processamento digital de imagens aquelas voltadas para o pré-processamento, para realce visual e para as técnicas de classificação digital (PONZONI et al.,2012).

As técnicas de pré-processamento são o primeiro passo no tratamento de imagem e têm como finalidade a aplicação de algoritmos que visam corrigir imperfeições, atenuando os efeitos da atmosfera e remover ruídos. Somente após essas correções, as imagens devem ser submetidas a processamentos digitais ou à análise visual (PONZONI et al.,2012).

A correção atmosférica das imagens está entre as técnicas de pré-processamento e consiste na atenuação dos efeitos atmosféricos ocorridos durante a captura da cena, ou seja, o espalhamento, a absorção e a refração da energia eletromagnética causados pelos gases, aerossóis e vapor d'água presentes na atmosfera (JENSEN, 2009).

Segundo Florenzano (2011), as técnicas de realce visual têm finalidade de melhorar a qualidade visual das imagens e facilitar o trabalho de interpretação de modo permanente ou momentâneo, em que são aplicadas pelos usuários mediante processamento de aplicativos específicos e incluem: ampliação linear de contraste; Operações aritméticas; Geração de composições coloridas; entre outros. A composição colorida é realizada para melhorar a visualização dos diferentes objetos terrestres na imagem, podendo ser considerada como uma forma de realce de imagens (MENESES; MADEIRA, 2001), associando duas ou três imagens às cores primárias azul, verde e vermelho (FLORENZANO, 2011). E, por fim, vem a técnica de classificação digital, que tem como resultado um mapa temático, com processo de mapeamento quantitativo e rápido (PONZONI et al., 2012).

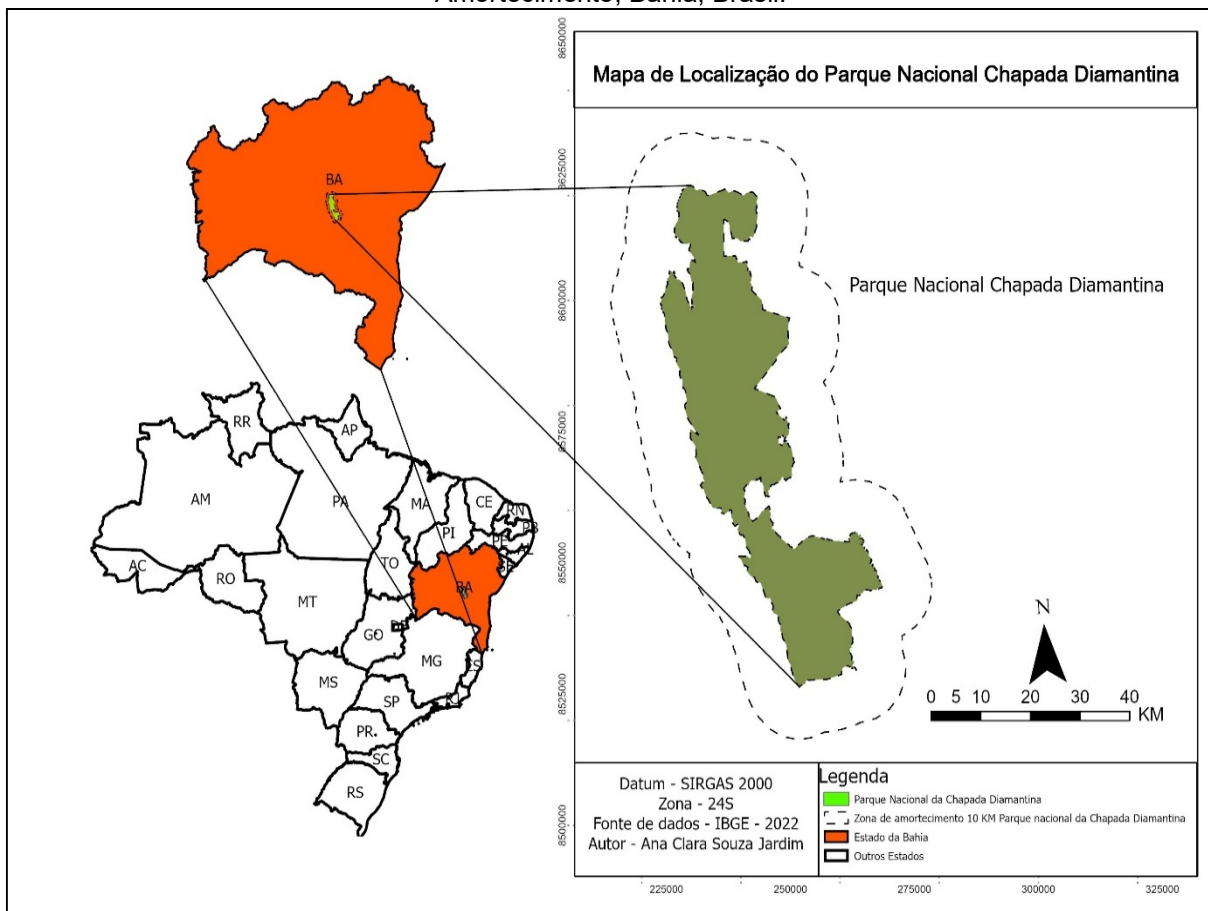
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

4.1.1 Localização

O Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD) está localizado na parte central do estado da Bahia, entre os paralelos 12°24'23" e 13°11'57"S e entre os meridianos 41°35'38" e 41°05'45"O. Apresenta uma área de 151.818 hectares, cerca de 0,30% do estado da Bahia, e sua zona de amortecimento, com aproximadamente 445.456 hectares, totalizando 597.274 hectares de área de estudo. O PNCD foi criado a partir do Decreto nº 91.655, de 17 de setembro de 1985, administrado desde a sua criação até hoje pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (MMA, 2007), (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização do Parque Nacional da Chapada Diamantina e sua Zona de Amortecimento, Bahia, Brasil.



Fonte: Jardim, 2025.

O PNCD abrange parte dos municípios de Andaraí, Ibicoara, Itaetê, Lençóis, Mucugê e Palmeiras, tendo sua maior porcentagem inserida no município de Mucugê com 32,4% do território, seguido pelo município de Palmeiras com 27,7%, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Municípios abrangidos pela Parque Nacional da Chapada Diamantina (PNCD) e Percentuais.

MUNICÍPIOS	% MUNICIPAL INSERIDO NO PNCD
Andaraí	18,6%
Ibicoara	2,7%
Itaetê	0,2%
Lençóis	18,4%
Mucugê	32,4%
TOTAL	100%

Fonte: MMA, 2007.

4.2 Meio Físico

O clima da Chapada Diamantina é tipicamente semiárido, com uma estação chuvosa que vai de novembro a janeiro, trazendo entre 500 e 1.000 mm de chuvas ao longo do ano. As temperaturas variam entre 21°C e 28°C, e a umidade relativa do ar fica entre 60% e 70% (LIMA e LIMA, 1998). No parque, é possível encontrar características de três biomas brasileiros: a Caatinga, o Cerrado e a Mata Atlântica, e a região apresenta uma variação de altitudes que vai de 300 a 1.700 metros, o que contribui para a diversidade do ambiente (MMA, 2007). Quanto à geologia, a Chapada Diamantina é formada por rochas sedimentares e vulcânicas, datadas do Proterozóico Médio (MMA, 2007). Em relação aos solos, a área abriga uma diversidade, incluindo neossolos, latossolos, cambissolos e argissolos, que ajudam a moldar o ecossistema local (MMA, 2007).

4.3 Dados dos Focos de calor

Para identificar e avaliar as áreas propensas a incêndios florestais na Chapada Diamantina baseou-se na análise dos dados dos focos de calor disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do Banco de Dados Queimadas (BDQUEIMADAS). Esses dados foram obtidos no formato CSV, que contém informações essenciais sobre cada foco de calor, como: coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos focos de calor; Data do foco de calor (dia, mês e ano); Município afetado; Tipo de satélite utilizado para o monitoramento; Condições meteorológicas associadas ao evento, como o número de dias sem chuva e a precipitação observada na região; Risco de fogo indicado pelos modelos de previsão de incêndio.

Os dados coletados abrangem o período de 2014 a 2023, escolhido para permitir uma análise ampla sobre a dinâmica dos incêndios florestais na região ao longo dos anos.

A área de estudo abrange o Parque Nacional da Chapada Diamantina e sua Zona de Amortecimento, onde os dados dos focos de calor foram organizados e tabulados em planilhas eletrônicas no Excel. Após a obtenção dos dados, foram gerados tabelas e gráficos que permitem uma visualização clara dos dados tanto

anuais quanto mensais. Essa organização facilitou a análise temporal e espacial dos focos de calor, permitindo identificar padrões de ocorrência ao longo do tempo, além de auxiliar na comparação entre diferentes períodos e variáveis como precipitação, risco de fogo e as condições meteorológicas associadas a cada evento. As tabelas e gráficos produzidos serviram como base para a análise detalhada da distribuição e intensidade dos incêndios florestais na Chapada Diamantina.

4.4 Informações Topográficas

A análise dos dados topográficos foi realizada a partir do download das curvas de nível da área de estudo, obtidas do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), utilizando o mosaico de imagens do projeto da NASA, disponibilizado gratuitamente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) por meio do Monitoramento por Satélite, com resolução espacial de 90 m, por meio do site: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1008583/1/4368.pdf>.

Optou-se pela utilização da representação digital do terreno, por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) e do Modelo Digital de Terreno (MDT), amplamente usados, especialmente em Ciências Geodésicas, por permitirem a derivação de diversos produtos, como mapas de declividade, curvas de nível, cálculos de corte/aterro, entre outros (CRUZ et al., 2011). Isso se deve ao fato de que esses modelos consideram apenas as características do relevo, desconsiderando os objetos localizados sobre ele, como vegetação e construções (ARAKI, 2005).

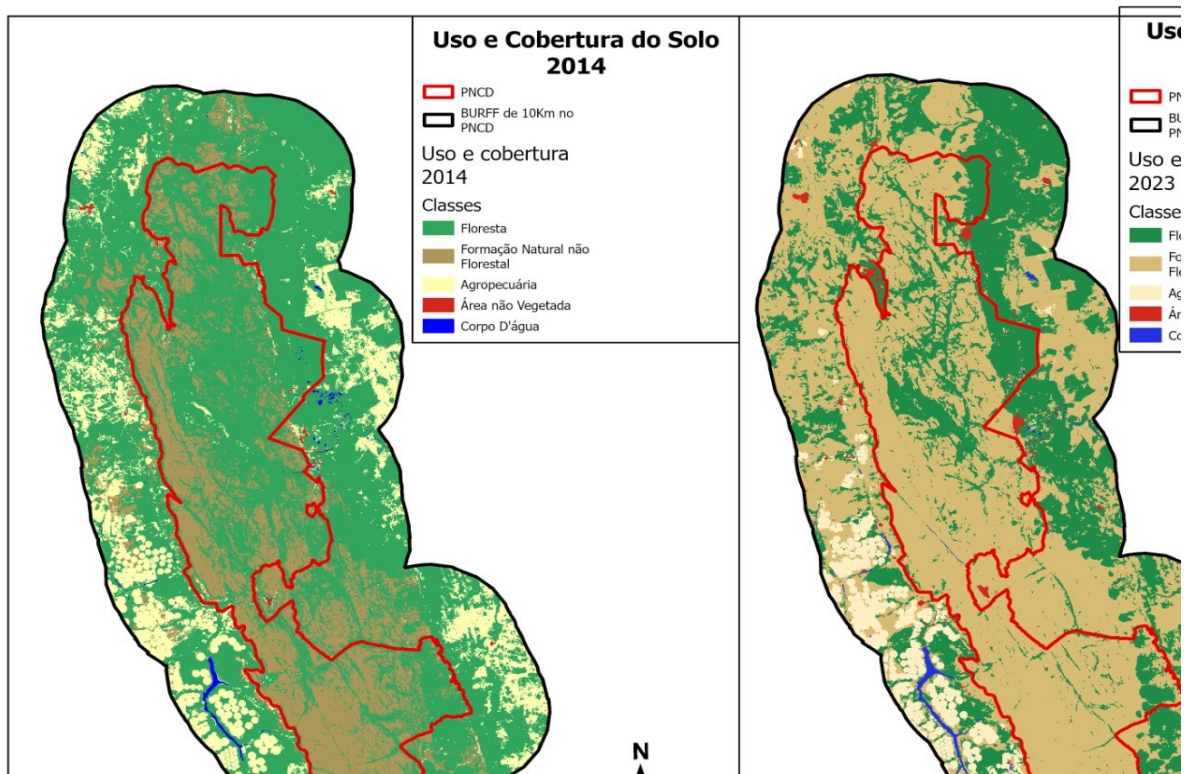
4.5 Uso e ocupação do solo

As informações sobre uso e ocupação do solo foram obtidas por meio da Coleção 6 do MapBiomias, em formato raster, acompanhadas de uma planilha eletrônica (.xlsx) com as referências dos códigos de legenda.

A construção do mapa de uso e ocupação do solo utilizou dados referentes aos anos de 2014 e 2023 (Figura 2), que foram baixados e processados no software ArcGISPRO. O processamento envolveu o recorte de cinco arquivos raster, com base na área de estudo e sua zona de amortecimento, além da reprojeção para o

Datum oficial do Sistema Geodésico Brasileiro SIRGAS 2000, no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) 23S.

Figura 2. Uso e Cobertura do Solo no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia (2014-2023).



Fonte: Autor, 2024.

4.6 Aquisição dos Dados Vetoriais

Os dados espaciais, tanto municipais quanto estaduais, no formato shapefile, utilizados nesta pesquisa foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no site: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>, enquanto o shapefile referente ao Parque Nacional da Chapada Diamantina foi adquirido junto ao Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade (ICMBio), disponível no site: <https://sange.icmbio.gov.br/>.

A delimitação dos limites da Zona de Amortecimento (ZA) foi realizada utilizando o software ArcGISPRO, onde foi criado um dado vetorial por meio da aplicação de um buffer de 10 km. O buffer é uma ferramenta geoespacial que cria uma área de "zona tampão ou amortecimento" ao redor de um determinado objeto ou área, neste caso, em torno da área central do Parque Nacional da Chapada Diamantina. Esse buffer de 10 km tem o objetivo de representar a região de

influência direta do parque, considerando as possíveis interferências e impactos das atividades humanas realizadas nas áreas adjacentes.

4.7 Preparação de Dados

4.7.1 Análise Exploratória

Foram executados a limpeza e o tratamento dos dados, com foco na identificação de valores ausentes, inconsistentes ou duplicados. Utilizou-se o Excel para inspecionar e corrigir esses problemas, garantindo a integridade e a confiabilidade dos dados. Durante essa análise, os dados foram examinados em busca de erros evidentes, como valores fora do padrão para corrigir as falhas.

4.7.2 Integração dos dados

Foi criada a integração de dados, que envolveu a combinação de diferentes conjuntos de informações no Excel, utilizando funções para unir dados com base em chaves comuns. O processo incluiu a construção de um Banco de Dados Georreferenciado, com dados extraídos do IBGE, INPE e fontes topográficas. A integração desses dados permitiu combinar informações de diversas fontes, criando uma visão mais completa. Foram utilizadas chaves comuns, como coordenadas geográficas, identificadores regionais e outros parâmetros de associação, para conectar corretamente as diferentes fontes de dados.

Além disso, a criação do Banco de Dados Georreferenciado visou possibilitar a visualização dessas informações por meio de mapas, gráficos e outras representações visuais.

4.7.3 Identificação dos padrões de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada Diamantina

Para identificar os padrões de ocorrência de incêndios, foi realizada a análise de Densidade de Kernel em uma área específica. Inicialmente, os dados georreferenciados dos incêndios, como os pontos de ignição, foram importados. Em

seguida, a ferramenta de Densidade de Kernel foi aplicada para gerar uma superfície de densidade, destacando as áreas com maior concentração de incêndios. Todo o processamento dos dados foi realizado no software ArcGIS Pro.

O cálculo da densidade de Kernel leva em consideração parâmetros como o raio de pesquisa, que define a área de influência dos pontos de incêndio. A escolha do tamanho do raio é essencial, pois ele determina a suavização da distribuição dos pontos e influencia diretamente a análise dos padrões. Com isso, é possível identificar as regiões com maior risco de incêndio e as áreas mais afetadas ao longo do tempo.

A visualização dos resultados é feita por meio de um mapa com cores que variam de acordo com a intensidade dos incêndios, permitindo a rápida identificação de pontos. Para melhorar a análise, as camadas de dados, como clima, vegetação e uso do solo, também foram combinadas fornecendo uma visão mais detalhada dos fatores que influenciam a distribuição dos incêndios. A comparação de mapas de diferentes períodos permite observar tendências temporais e identificar se há aumento ou diminuição no número e nas áreas atingidas pelos incêndios.

4.7.4 Precipitação Acumulada

A precipitação acumulada representa o total de chuva, neve, granizo ou outras formas de precipitação registradas em um determinado período. Esse dado é essencial para avaliar o balanço hídrico de uma região e compreender os padrões de precipitação em diferentes escalas temporais, como mensal, sazonal ou anual.

A precipitação acumulada para um período específico pode ser calculada por:

$$P_{acumulada} = \sum_{i=1}^n P_i$$

Onde:

- $P_{acumulada}$ é a precipitação acumulada (geralmente expressa em milímetros).
- P_i é a precipitação registrada no dia i (ou unidade temporal definida) durante o período de interesse.
- n é o número de períodos (dias, meses, anos) dentro do intervalo de tempo analisado.

4.7.5 Fatores de Precipitação

Os fatores de precipitação referem-se a variáveis que influenciam a quantidade, a distribuição e a intensidade da precipitação em uma determinada região. Esses fatores podem incluir fenômenos atmosféricos, geográficos e temporais que afetam diretamente o comportamento das chuvas.

Principais Fatores de Precipitação:

- **Topografia:** Regiões montanhosas ou elevações podem ter mais precipitação devido ao efeito orográfico, onde o ar úmido é forçado a subir, resfriando-se e condensando-se em forma de precipitação.
- **Latitude:** A posição geográfica em relação ao equador afeta os padrões de precipitação, com regiões tropicais sendo mais úmidas do que as regiões temperadas ou polares.
- **Temperatura:** A temperatura do ar influencia a capacidade de retenção de umidade; quanto mais quente maior é a capacidade do ar de reter umidade, o que pode resultar em chuvas mais intensas quando a umidade é liberada.
- **Pressão atmosférica:** Áreas de baixa pressão (sistemas de depressão) tendem a ser mais propensas à formação de chuvas, enquanto áreas de alta pressão geralmente têm climas secos.
- **Fluxos atmosféricos:** Ventos e correntes atmosféricas (como os ventos alísios) podem trazer umidade de uma região para outra, influenciando os padrões de precipitação.

Fatores Matemáticos de Precipitação: Em estudos quantitativos, pode-se usar diferentes índices e coeficientes para avaliar a influência desses fatores na precipitação. Um exemplo é a equação de precipitação em áreas montanhosas (efeito orográfico), que pode ser descrita como:

$$P = P_0 + k \cdot (h - h_0)$$

Onde:

- P: Precipitação estimada em função da altura (mm);
- P0: Precipitação em uma área de referência ou nível do mar (mm);

- k: Coeficiente de aumento de precipitação devido à elevação (mm/m);
- h: Altura do local onde a precipitação é estimada (m);
- h0: Altura de referência (geralmente 0 m, nível do mar).

Portanto, a precipitação estimada devido ao efeito orográfico seria de 200 mm, considerando a elevação da estação meteorológica.

4.7.6 Precipitação Efetiva (Fatores Climáticos)

Outro fator importante que pode ser abordado é a precipitação efetiva, que corresponde à quantidade de água que realmente contribui para o solo e os corpos d'água, descontando as perdas por evaporação e outros processos naturais. A precipitação efetiva pode ser estimada como:

$$P_{efetiva} = P_{acumulada} - E$$

Onde:

- $P_{efetiva}$: Precipitação efetiva (mm), ou seja, a quantidade de água que realmente contribui para o solo ou recursos hídricos após considerar perdas.
- $P_{acumulada}$: Precipitação acumulada (mm), total de chuva registrada em um período.
- E : Evapotranspiração (mm), representando a perda de água para a atmosfera por evaporação do solo e transpiração das plantas.

4.7.7 Fatores de Precipitação em Diferentes Modelos

Nos modelos climáticos e hidrológicos, os diferentes fatores que influenciam a precipitação podem ser combinados para uma estimativa mais precisa da sua distribuição espacial e temporal. Uma abordagem comum é o uso de coeficientes de correção, baseados em dados históricos ou modelos de previsão climática, para ajustar as estimativas de precipitação de acordo com variações de altitude e outras condições ambientais.

A relação matemática utilizada para essa estimativa pode ser representada por:

$$P = P_0 + k \cdot (h - h_0)$$

Onde:

- P: Precipitação estimada em função da altura (mm);
- P0: Precipitação em uma área de referência ou nível do mar (mm);
- k: Coeficiente de aumento de precipitação devido à elevação (mm/m);
- h: Altura do local onde a precipitação é estimada (m);
- h0: Altura de referência (geralmente 0 m, nível do mar).

Um exemplo seria um modelo de previsão climática baseado em uma análise de regressão, onde os fatores de precipitação (latitude, altitude, temperatura, etc.) são usados para prever a precipitação em uma área específica:

$$P_{\text{previsão}} = \alpha + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot A + \beta_3 \cdot L$$

Onde:

- $P_{\text{previsão}}$: Precipitação prevista (em mm ou unidade equivalente);
- α : Constante do modelo, que representa o valor base da precipitação quando todas as variáveis independentes são zero;
- T : Temperatura média anual (em °C);
- A : Altitude do local (em metros);
- L : Latitude do local (em graus);
 - $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Coeficientes de regressão que quantificam a influência individual de cada fator (temperatura, altitude e latitude) sobre a precipitação.

4.7.7.1 Dias de Secura (PSE)

Os Dias de Secura (PSE), ou *Dry Days*, constituem uma metodologia utilizada para quantificar a duração e a intensidade de períodos secos em uma região específica, sendo comumente aplicada em estudos climáticos e hidrológicos. Esse índice tem ampla aplicação em áreas como a agricultura, a gestão de recursos hídricos e os estudos sobre mudanças climáticas.

A metodologia dos Dias de Secura (PSE) baseia-se, geralmente, na observação de períodos consecutivos sem precipitação significativa, sendo útil para avaliar os impactos das secas e o comportamento das chuvas ao longo do tempo.

A definição de *secura* depende do valor de precipitação mínima que é considerado como não suficiente para “quebrar” um período seco. Para o *Dias de Secura* ser registrado, a precipitação diária deve ser inferior a um valor específico (*P*).

Onde (*P*) é Precipitação mínima em milímetros para definir um dia seco. Frequentemente, um valor de 1 mm ou 0,5 mm é utilizado, mas pode variar conforme a área de estudo.

4.7.7.2 Cálculo do Índice Dias de Secura (PSE)

Depois de definir o critério de precipitação, o PSE foi calculado com base na quantidade de dias consecutivos sem precipitação ou com precipitação abaixo do valor definido (*P*). O PSE foi então calculado em dois níveis:

- PSE *i* (número de dias secos consecutivos em um período específico)
- Um período de *secura* é identificado quando a precipitação é inferior ao valor *P* para um determinado número de dias consecutivos.

Fórmula para PSE:

$PSE = \Sigma(\text{dia seco})$, onde:

- Um "dia seco" é aquele com precipitação diária inferior a *P* (geralmente 1mm ou 0,5mm);
- O somatório abrange o período de análise, podendo ser de dias, meses ou anos, dependendo da escala do estudo.

Por exemplo, se o critério é $P = 1 \text{ mm}$ e temos uma série de dados de precipitação, seria contado o número de dias consecutivos em que a precipitação foi inferior a 1 mm. Cada sequência de dias consecutivos sem chuva contaria como um período de *secura*.

4.7.7.3 Cálculo da Intensidade de Secura (Duração e Severidade)

Para tornar a análise mais detalhada, o índice de secura pode ser modificado para incluir a intensidade da secura, que envolve a duração do período seco e a quantidade de precipitação registrada.

- Série temporal de precipitação (P_t): Cada valor de precipitação é registrado para cada dia (ou outra unidade de tempo) durante o período de estudo.
- Intensidade de Secura (IS): Uma maneira de calcular a intensidade é por meio da quantidade total de precipitação acumulada durante o período seco, comparado ao total de precipitação possível em um determinado período.

4.7.7.4 Fórmula para Intensidade de Secura (IS)

Em que a "precipitação total durante o período seco" seria a quantidade de chuva registrada após o fim do período seco, ou durante o início dele, dependendo do critério do estudo.

$$IS = \frac{\textit{Precipitação total durante o período seco}}{\textit{Número de dias secos}}$$

Onde:

- IS: Intensidade de Secura (mm/dia), indicando a média de precipitação por dia seco em um período específico;
- Precipitação total durante o período seco: Soma da chuva ocorrida nos dias classificados como "secos" (mm);
- Número de dias secos: Quantidade de dias no período analisado que foram considerados sem chuva significativa.

4.7.7.4 Índice de Severidade de Secura (SS)

Este índice mede a severidade da seca e pode ser calculado a partir do número de dias secos consecutivos e a quantidade de precipitação abaixo do valor de referência P.

$$ss = f(\textit{número de dias secos, intensidade da seca})$$

A função $f()$ pode ser uma fórmula ajustada ao estudo específico, em que uma maior severidade é dada pela maior quantidade de dias sem precipitação significativa e pela baixa quantidade de precipitação durante os dias subsequentes.

4.7.7.5 Aplicação do Modelo em um Período

Depois de definir e calcular os índices de secura, é possível aplicar essa metodologia para diferentes escalas temporais, como:

- **Escala Mensal:** Para avaliar os períodos secos ao longo de um mês.
- **Escala Anual:** Para avaliar secas que afetam uma estação ou um ano inteiro.

Os dados de precipitação podem ser extraídos de séries temporais históricas de observações climáticas (ex.: de estações meteorológicas) ou modelos climáticos.

4.8 Análise de Risco de Incêndios Florestais

Para identificar áreas de alto risco de incêndios florestais, utilizou-se o software RStudio, que proporcionou a criação de uma série de análises visuais, como gráficos e figuras, para explorar e compreender melhor os padrões espaciais e temporais dos incêndios. O processo iniciou com a coleta de dados geoespaciais detalhados, que incluíam informações sobre pontos de ignição, clima, vegetação, uso do solo, topografia e outros fatores relevantes. Esses dados foram integrados ao RStudio para análise de risco.






Primeiramente, os dados foram importados para o RStudio em um formato adequado, como CSV, garantindo uma análise consistente e estruturada. Com os dados carregados, foi realizada uma análise exploratória por meio de gráficos de dispersão, histogramas e análise temporal, a fim de compreender a distribuição de variáveis individuais, como a frequência de incêndios em diferentes tipos de vegetação ou em regiões com condições climáticas específicas.

Essas visualizações iniciais auxiliaram na identificação de possíveis correlações e padrões. A partir disso, a análise de risco de incêndios foi conduzida considerando múltiplas variáveis e suas interações.

4.8.1 Categorias de Risco de Fogo e Seus Valores Correspondentes

A classificação do risco de fogo apresentada na tabela segue uma escala baseada no valor do Risco de Fogo (RF), que é calculado a partir de vários fatores meteorológicos e ambientais. O sistema utiliza uma escala de 0 a 1 para classificar o risco de incêndio em diferentes níveis. A tabela define cinco categorias de risco, conforme descrito abaixo:

Tabela 2. Classificação do Risco de Fogo (RF) por Nível de Perigo.

Risco	Valores do Risco de Fogo (RF)	Cor
Mínimo	$RF < 0,15$	
Baixo	$0,15 < RF \leq 0,40$	
Médio	$0,40 < RF \leq 0,70$	
Alto	$0,70 < RF \leq 0,95$	
Crítico	$RF > 0,95$	

Fonte: BDQueimadas(2022).

Essa classificação ajuda na gestão de riscos e na prevenção de incêndios, fornecendo informações sobre as condições ideais para que ocorra uma queimada, considerando fatores como a secura da vegetação e as condições climáticas, como a temperatura e a umidade do ar.

4.9 Softwares

Para realização da pesquisa, foram necessários os *softwares* ArcGIS PRO, versão mais recente da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), disponibilizado gratuitamente por um ano para estudantes e pesquisadores e o QGIS 3.18, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU, e o Rstudio versão 4.2.1, para construção de gráficos e tabelas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados sobre a frequência de detecção de incêndios florestais por satélites nos permite observar tendências valiosas na utilização dessas tecnologias ao longo dos anos. Em uma análise geral, destacaram-se três satélites com maior frequência de detecção: NPP-375, NPP-375D e GOES-16. O satélite NPP-375 demonstrou consistência significativa, detectando incêndios em todos os anos analisados, acumulando um total impressionante de 2.545 detecções de acordo com o quadro 3. Esse satélite, especializado em observações de alta resolução e sensibilidade para detecção de calor, revelou-se um recurso confiável e fundamental na observação de eventos de incêndio, oferecendo dados robustos, pois sua tecnologia avançada permite a detecção precisa de focos de calor, mesmo em condições adversas, garantindo informações detalhadas, consistentes e abrangentes para análises anuais. O NPP-375D também apresentou desempenho elevado com 1.537 detecções, mostrando-se um satélite complementar relevante. O GOES-16, com uma capacidade de monitoramento contínuo da atmosfera, registrou 1.482 detecções, refletindo sua importância em detectar incêndios de grandes proporções em tempo real.

Quadro 3. Distribuição de detecções de incêndios florestais por satélite em cada ano, com total acumulado por satélite ao longo do período de 2014 a 2023.

Registro Anual de Incêndios Florestais Monitorados por Satélites (2014-2023)											
Satélites	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
AQUA_M-M	1	62	17		11	1	21	3	5	15	136
AQUA_M-T	18	225	26	11	26	11	45	51	32	26	471
GOES-13	25	269	11	7							312
GOES-16				23	184	46	597	377	110	145	1482
METOP-B			1	43	19	7	34	8		8	120
METOP-C							9			2	11
MSG-03	9	310	7		7	2	38	11	1	1	386
NOAA-15		13	1	11	44	4					73
NOAA-18	7	195	62	48	20	12					344
NOAA-18D		7					15	10	17		49
NOAA-19		131	30	12	54		59	51	14	1	352
NOAA-19D		52	3								55
NOAA-20						109	309	369	260	262	1309
NPP-375	120	1239	143	88	135	77	226	216	146	155	2545
NPP-375D	16	863	68	33	107	39	192	102	38	79	1537
TERRA_M-M	11	163	27	13	34	5	31	27	19	34	364
TERRA_M-T	2	109	14	11	18	7	18	35	15	9	238
Total	209	3638	410	300	659	320	1594	1260	657	737	9784

Fonte: Autor, 2024.

Observando a performance ano a ano, os mesmos satélites mantiveram destaque, mas com nuances. O NPP-375 liderou em frequência de detecção de incêndios, sendo mais ativo em anos críticos de secas. O GOES-16, especialmente eficaz durante os anos mais recentes, capturou picos de incêndios, o que coincide com seu foco em monitoramento atmosférico e climático em alta resolução. O satélite NPP-375D demonstrou certa estabilidade, registrando também um número significativo de detecções a cada ano, ainda que em menor escala que o NPP-375. Essa regularidade indica uma cobertura contínua e confiável, essencial para o monitoramento sazonal.

Entre os satélites com menor frequência, os dados apontam o METOP-C, NOAA-15 e NOAA-19D como os que menos registraram detecções ao longo do período. O METOP-C, com apenas 11 detecções, teve uma atuação muito restrita, possivelmente por sua limitada capacidade de detecção em áreas críticas de incêndio ou por suas especificidades orbitais. O NOAA-15, com 73 detecções, e o NOAA-19D, com 55, apresentam desempenhos modestos e intermitentes, sugerindo que suas missões talvez não estejam centradas na detecção contínua de incêndios florestais, mas em outros tipos de monitoramento climático ou atmosférico.

A análise anual também revela que esses satélites de menor frequência mantiveram uma regularidade baixa, não conseguindo captar incêndios de forma abrangente ao longo dos anos. Essa limitação reforça a importância de satélites com alta capacidade de detecção e cobertura ampla, como os destacados entre os três principais. A baixa frequência observada para satélites como METOP-C pode ser uma barreira para o monitoramento eficaz, pois restringe o fluxo contínuo de dados, especialmente durante anos de alta atividade de incêndios.

5.1 Análise Espacial dos Padrões de Incêndios no Parque nacional da Chapada Diamantina: Densidade de Kernel (2014-2023)

A densidade de focos de incêndios por quilômetro quadrado na região do Parque Nacional da Chapada Diamantina, utilizando a técnica de Estimção de Densidade Kernel (KDE) para o período de 2014 a 2023. A escala de cores transita do verde ao vermelho, representando um aumento na densidade de incêndios. Este

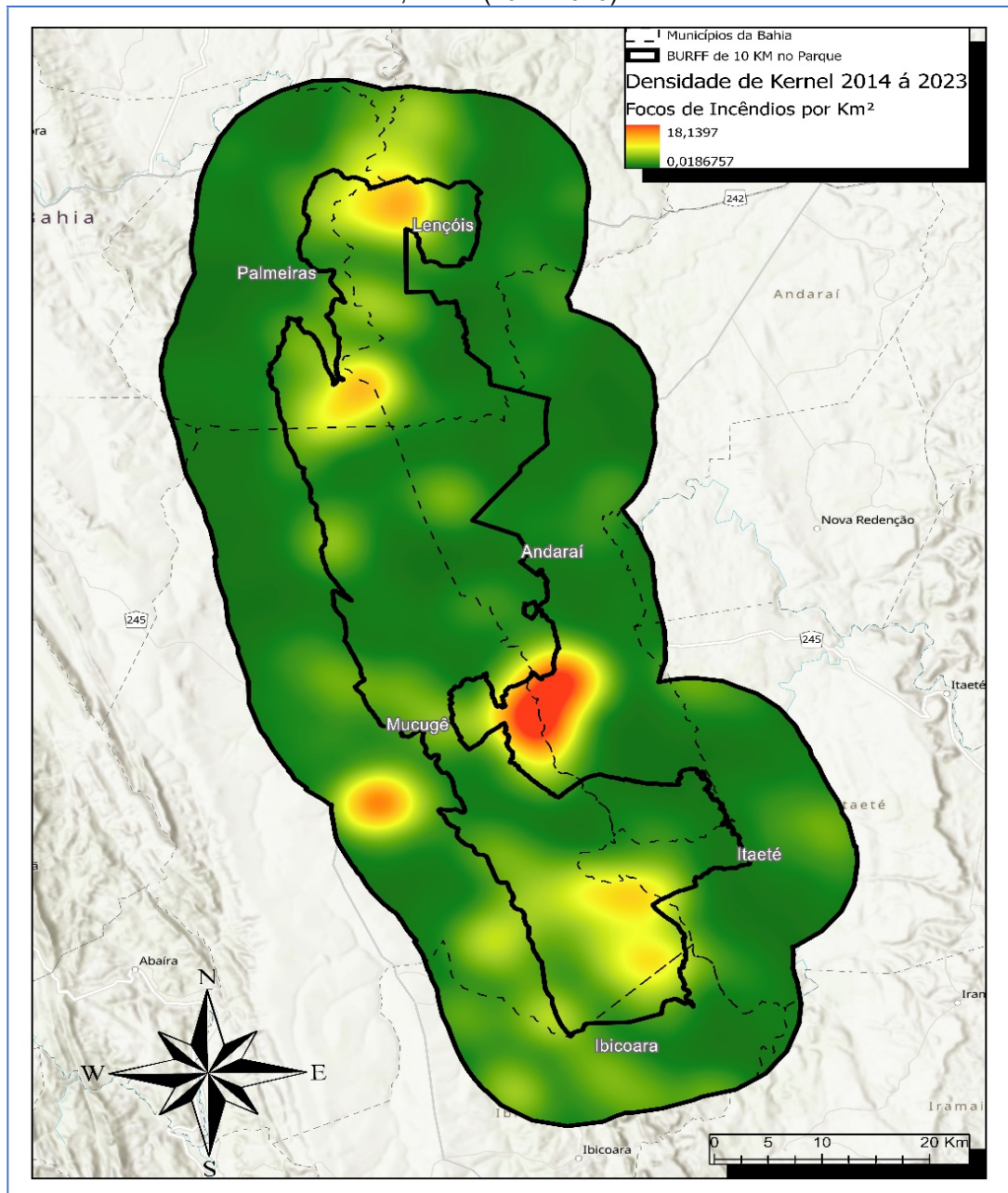
método de visualização destaca áreas com maior frequência e intensidade de incêndios, facilitando a identificação de regiões críticas que exigem atenção para mitigação e controle de incêndios florestais.

Os valores de densidade no mapa variam de 0,018 a 18,139 focos de incêndios por km² (Figura 3). As áreas com tons de laranja e vermelho, especialmente próximas aos municípios de Mucugê e Andaraí, indicam concentrações elevadas de incêndios, enquanto áreas em verde demonstram uma menor incidência.

A Figura 3 destaca, por meio de linhas pontilhadas, os limites dos municípios da Bahia, incluindo áreas como Lençóis e Palmeiras, e demarca a área de amortecimento de 10 km ao redor da unidade de conservação, uma zona essencial para proteger o ecossistema local e reduzir os efeitos negativos dos incêndios nas proximidades. Esta área de buffer, uma medida crítica para a conservação da biodiversidade e a manutenção da qualidade ambiental, funciona como uma barreira que visa mitigar os impactos de atividades humanas e eventos adversos sobre a área protegida, garantindo a integridade dos recursos naturais da região.

Além de servir como ferramenta para visualização do padrão espacial dos incêndios, o uso de KDE no mapa permite uma análise detalhada sobre a distribuição dos incêndios, facilitando a identificação de padrões ao longo do tempo. Este tipo de análise é essencial para entender as tendências de longo prazo e para o desenvolvimento de estratégias de gestão ambiental que visem à redução dos riscos e impactos associados aos incêndios florestais, como demonstrado em estudos que utilizam técnicas de geoprocessamento para mapear o risco de incêndios e analisar a distribuição espacial de áreas queimadas (TORRES et al., 2017).

Figura 3. Mapa de Densidade de Focos de Incêndios no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (2014-2023).



Fonte: Autor

As regiões de Mucugê e Andaraí poderiam ser pontos críticos que necessitam de atenção especial no que diz respeito à prevenção e ao combate de incêndios. A alta densidade em tais áreas pode indicar condições locais propícias para a ocorrência de incêndios, como vegetação densa e seca, práticas agrícolas de queimada, ou até mesmo a ação de piromaníacos.

A análise também sugere que ações preventivas devem ser intensificadas nessas regiões, o que poderia incluir o gerenciamento de combustível vegetal, campanhas educativas para a população local e turistas, e o fortalecimento das

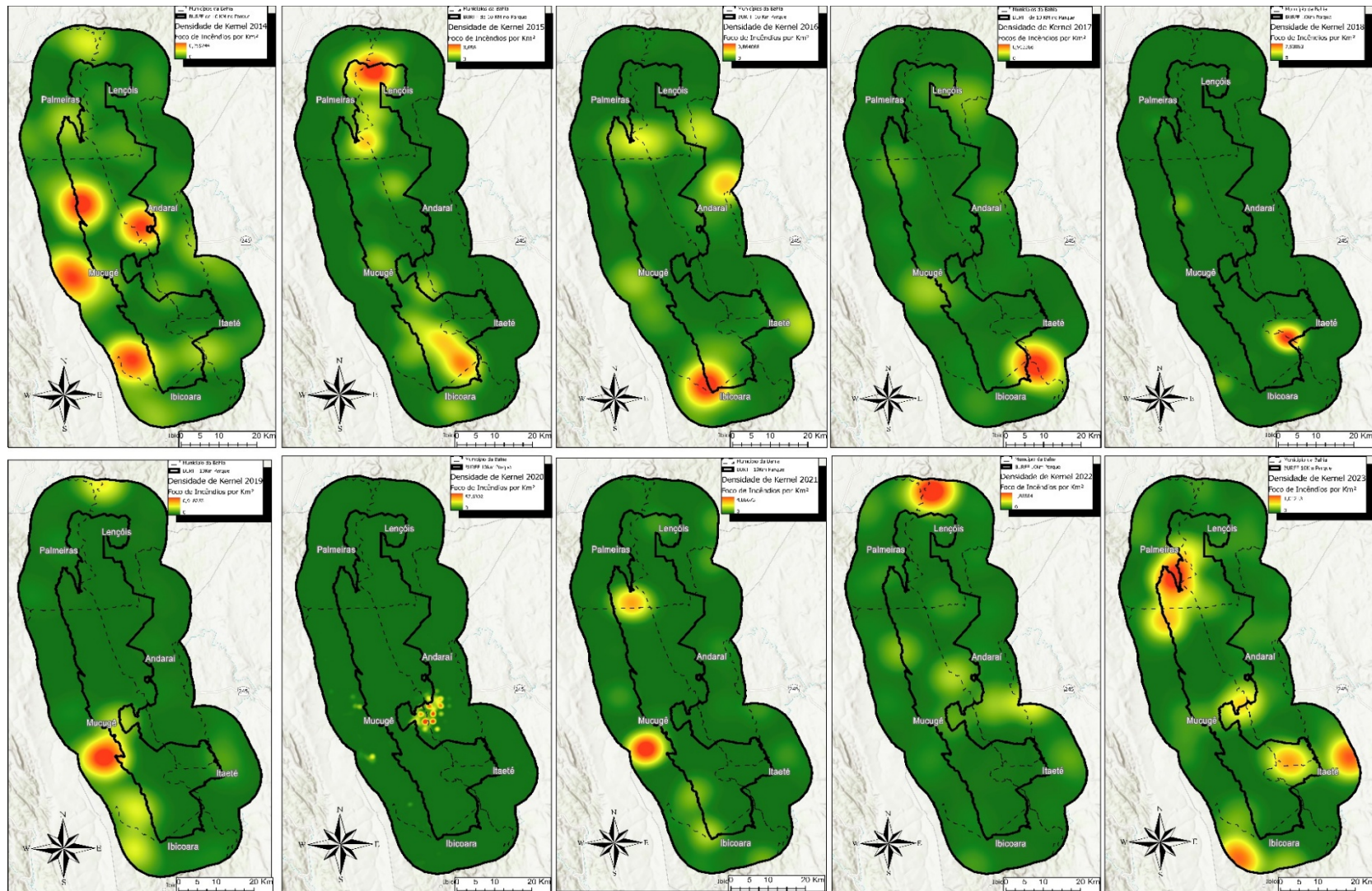
equipes de resposta rápida a incêndios. Estas medidas, juntamente com um monitoramento contínuo, podem ser cruciais para a redução do número de incêndios e de sua densidade em anos futuros.

É importante mencionar que um mapa de calor por si só não pode explicar as causas dos incêndios, mas fornece um ponto de partida para investigações mais profundas e para o desenvolvimento de estratégias de gestão do território e de recursos naturais.

5.2 Comparação da Densidade de Focos de Incêndios (2014 – 2023)

A análise da densidade dos incêndios florestais de 2014 a 2023 revela uma variabilidade significativa na distribuição e intensidade dos incêndios, influenciada por fatores climáticos, vegetação e atividades (Figura 4). Períodos de redução na densidade, como em 2014, 2016 e 2019, podem ser interpretados como momentos de sucesso nas estratégias de prevenção ou como resultado de condições climáticas menos favoráveis à propagação do fogo (Beutling et al., 2005). Anos com aumento na densidade, como 2015, 2018, 2020 e 2021, destacam a natureza cíclica dos incêndios, ressaltando a necessidade de uma abordagem preventiva contínua e adaptativa, levando em consideração não só os fatores climáticos, mas também práticas inadequadas de manejo e o aumento da disponibilidade de material combustível devido a secas prolongadas e vegetação seca (Oliveira et al., 2017).

Figura 4. Mapas da densidade de kernel de incêndios florestais na região de estudo de 2014 a 2023. As áreas em vermelho indicam uma alta densidade de incêndios, enquanto áreas em verde mostram menor densidade.



A análise de densidade de kernel é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para identificar padrões espaciais de eventos, como incêndios florestais, permitindo a identificação de áreas prioritárias para ações preventivas e a alocação eficiente de recursos. Estudos demonstram que a aplicação dessa técnica facilita a visualização de concentrações de focos de incêndio, auxiliando na elaboração de estratégias de gestão ambiental mais eficazes.

O estudo realizado por De La Riva et al. (2015) utilizou o estimador de densidade de kernel para analisar a distribuição espacial de queimadas no Bioma Cerrado, evidenciando a eficácia dessa metodologia na identificação de áreas de risco e na orientação de políticas de prevenção.

Além disso, a pesquisa de Silva et al. (2017) aplicou a análise de densidade de kernel para mapear a distribuição de focos de calor na Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú, destacando a importância dessa técnica na compreensão dos padrões espaciais de incêndios e na implementação de medidas de controle mais direcionadas.

Esses estudos evidenciam que a análise de densidade de kernel é fundamental para a conservação dos ecossistemas florestais e a proteção das comunidades que dependem desses ambientes, pois permite uma compreensão mais aprofundada dos padrões espaciais dos incêndios e contribui para a formulação de estratégias de gestão mais eficazes.

5.3 Análise do Risco do Fogo no PNCD

A Figura 5 apresenta a média do risco de incêndio nos municípios ao longo dos anos, destacando uma tendência de valores elevados. O menor valor registrado ocorreu em 2023, com uma média de 0,79, enquanto o mais alto foi em 2018, atingindo 0,97. Essa variação reflete a influência de fatores meteorológicos, como o número de dias sem chuva, a temperatura máxima diária e a umidade relativa do ar, que impactam diretamente o índice de risco de fogo.

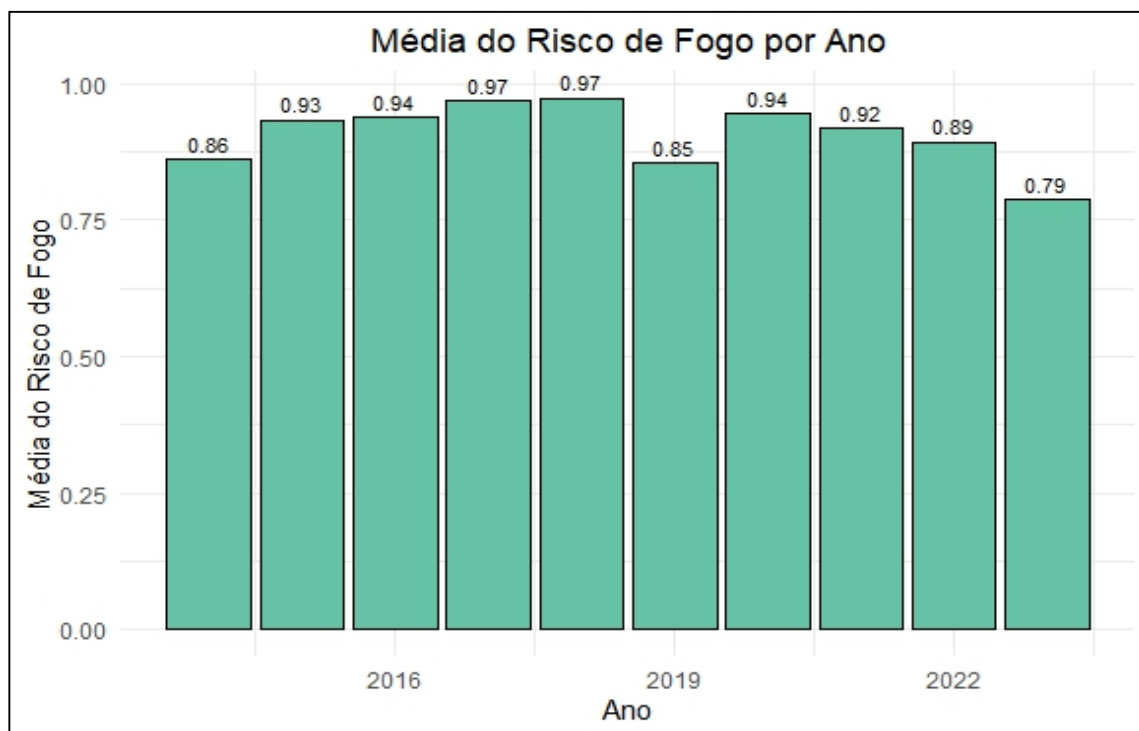
5.3.1 Análise do Risco de Fogo

Ao analisar o gráfico (Figura 5) e considerando as informações adicionais, podemos observar que o aumento no risco de incêndios florestais entre 2016 e

2018, com picos de 0,97 em 2018, pode ser explicado por uma série de fatores climáticos. A sequência de condições climáticas adversas, como a estiagem prolongada e altas temperaturas, favoreceu a propagação do fogo, especialmente em 2017 e 2018, quando o risco de incêndio estava no seu ponto mais alto. As secas são um fator significativo na intensificação do risco de incêndios florestais, já que a vegetação seca e a falta de umidade tornam os ambientes mais suscetíveis ao fogo.

Além disso, fenômenos climáticos como El Niño, conhecidos por aumentar a temperatura e reduzir a umidade, amplificam essas condições. O El Niño contribui para aumentar a intensidade e a frequência dos incêndios em áreas já vulneráveis", o que explica, em parte, a elevação do risco de incêndios durante esses anos. Estudos como o de Seneviratne et al. (2018) também reforçam a relação entre a seca prolongada e o aumento da vulnerabilidade da vegetação, o que corroboraria os dados observados na figura 5.

Figura 5. Evolução da Média do Risco de Fogo ao Longo dos Anos.



Fonte: Autor, 2024.

Em 2019, a queda no risco para 0,85 pode ser um indicativo de melhorias nas condições climáticas, possivelmente devido a um aumento nas precipitações e a uma redução nas temperaturas. Esse fenômeno pode ter contribuído para diminuir o

risco de incêndios, já que a chuva tem um efeito mitigador, reduzindo a secagem da vegetação e tornando os combustíveis menos suscetíveis à ignição. A análise de Boulanger et al. (2020) aponta que "a presença de chuvas mais consistentes é um fator crítico para controlar a intensidade dos incêndios florestais". No entanto, em 2020 e 2021, o risco aumentou novamente, refletindo a deterioração das condições climáticas, com a ascensão de novas secas e temperaturas elevadas.

A tendência de crescimento do risco de incêndios, observada nesses anos, pode estar relacionada a outra sequência de fenômenos climáticos, como o El Niño, que exacerba as condições favoráveis ao alastramento do fogo, como descrito por Jolly et al. (2017). Essa análise reforça a importância de monitorar as condições climáticas para uma melhor previsão e gestão do risco de incêndios.

De acordo com a classificação de risco de fogo do INPE, que varia de Mínimo a Crítico, os valores observados no gráfico indicam que a maioria dos anos se encontra nas categorias "Alto" e "Crítico", com valores acima de 0,70. Isso reflete uma situação preocupante, em que as condições ambientais tornam grande parte do território monitorado suscetível à ocorrência de queimadas (INPE, 2023).

O gráfico destaca a importância do monitoramento contínuo e das previsões de risco de fogo, especialmente em um cenário onde mudanças climáticas podem exacerbar a frequência e a intensidade dos incêndios. O declínio nos valores recentes é um dado positivo, mas ainda é necessário manter políticas de prevenção e resposta a incêndios, considerando que o risco permanece elevado na maioria dos anos analisados.

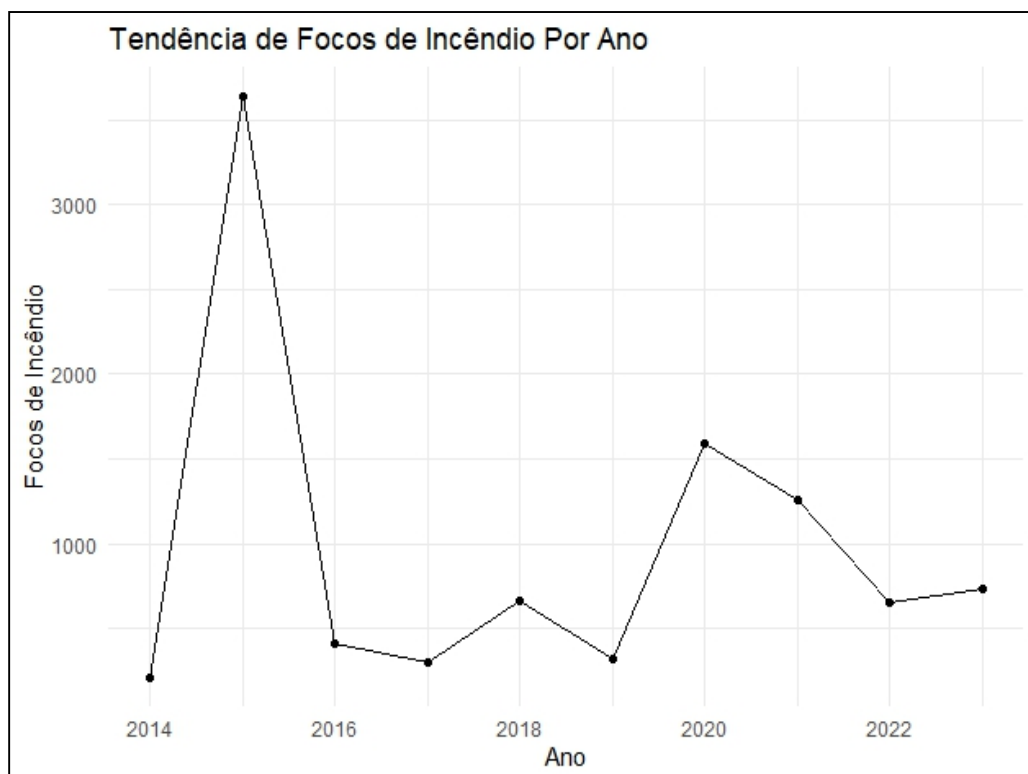
5.4 Análise da Tendência de Focos de Incêndios por Ano

A Figura 6, "Total de Incêndios por Ano", revela variações expressivas no número de incêndios entre 2014 e 2023, destacando a influência de diversos fatores, tanto climáticos quanto ambientais e humanos. Além dos fenômenos climáticos como o El Niño, que, em 2015, impulsionou o maior pico com mais de 3.000 ocorrências, há outras variáveis que precisam ser consideradas para entender completamente essa flutuação.

A vegetação densa e seca, muitas vezes com alto teor de matéria orgânica, também desempenha um papel crucial. Essas áreas, quando submetidas a longos períodos sem precipitação, tornam-se altamente inflamáveis, aumentando o risco de incêndios. Esse cenário é comum em regiões com práticas agrícolas que utilizam queimadas para preparar o solo, uma prática amplamente observada em certas áreas do Brasil. Além disso, ações humanas deliberadas, como as de incendiários ou piromaníacos, não podem ser ignoradas ao se analisar o aumento no número de incêndios.

Após o grande aumento em 2015, a figura 6 mostra uma queda acentuada em 2016, associada à transição para condições mais úmidas com o fim do El Niño e a chegada de La Niña. No entanto, as variáveis mencionadas, como a prática de queimadas agrícolas e a presença de vegetação propícia à propagação de fogo, continuam influenciando as tendências, como vemos em 2020, quando houve um novo aumento no número de incêndios, aproximando-se de 2.000 ocorrências.

Figura 6. Tendência de Focos de Incêndio ao Longo dos Anos (2014 - 2023).



Fonte: Autor, 2024.

O gráfico do período de 2014 a 2018 destaca uma variação significativa nos focos de incêndio, com um pico em 2015. Uma possível explicação para essa

explosão de focos de incêndio está relacionada não apenas às condições ambientais, como o El Niño, que afetou a América do Sul, mas também à possibilidade de acúmulo de biomassa. A vegetação seca em grande quantidade, que não foi consumida por incêndios nos anos anteriores, acumulou-se e aumentou a intensidade dos incêndios em 2015. A biomassa não manejada, combinada com condições climáticas adversas, cria um cenário ideal para a propagação rápida e intensa do fogo. Vale lembrar que o aumento observado pode também ser influenciado por uma melhoria nos sistemas de monitoramento por satélite. Se, em 2015, novos sensores ou melhorias nas resoluções espaciais dos satélites passaram a ser utilizados, como o caso do VIIRS, com maior precisão, é possível que parte desse aumento reflita uma maior capacidade de detectar focos menores que, anteriormente, não seriam visíveis.

Após o pico de 2015, há uma queda abrupta nos anos seguintes, o que pode ser resultado tanto da exaustão de biomassa disponível quanto da implementação de políticas ambientais mais rigorosas. A redução drástica dos focos de incêndio em 2016 pode ser reflexo de um maior controle sobre o uso do fogo e de medidas preventivas para evitar a repetição do cenário de 2015. No entanto, mesmo com essas medidas, é interessante notar que a estabilização de 2017 e 2018, com os focos variando em números mais baixos, pode ser parcialmente explicada pelo fato de que, com menos biomassa acumulada após o grande incêndio de 2015, as condições para novos grandes incêndios podem não ter sido tão favoráveis. A detecção mais eficaz de satélites com alta resolução ainda seria relevante para identificar focos menores que, sem essa tecnologia, poderiam passar despercebidos.

Além disso, a oscilação entre os anos reforça a ideia de que os incêndios florestais são fenômenos cíclicos, muitas vezes dependentes da interação entre políticas de uso da terra, manejo de biomassa e condições climáticas. A presença de uma biomassa acumulada maior em anos anteriores pode tornar determinadas áreas mais suscetíveis a grandes incêndios, como visto em 2015. Já a ausência desse acúmulo, somada a políticas públicas de prevenção e combate a queimadas, pode resultar em quedas nos números de incêndios nos anos seguintes, como demonstrado após 2016.

Na Figura 6, referente ao período de 2019 a 2023, há um padrão um pouco diferente em relação ao anterior, com um aumento mais moderado em 2020. Embora o número de focos tenha subido significativamente em comparação a 2019, o pico de 2020, com aproximadamente 1.600 focos, ainda é inferior ao grande pico de 2015. Isso sugere que, apesar de as condições climáticas e ambientais terem contribuído para um aumento no número de incêndios, o impacto foi menos dramático, possivelmente devido a intervenções mais eficientes no controle de queimadas e ao manejo da biomassa. Mesmo assim esse aumento em 2020 pode estar relacionado a um acúmulo de biomassa que, não sendo adequadamente gerenciada nos anos anteriores, serviu como combustível para o aumento dos focos de incêndio. Além disso, mudanças nas políticas ambientais ou enfraquecimento na fiscalização podem ter contribuído para essa elevação.

A variação observada no período também pode ser influenciada pela capacidade de detecção dos satélites. Com a introdução de tecnologias mais avançadas e sensores de maior resolução, como o VIIRS e o uso contínuo de satélites geoestacionários como o GOES, é possível que os focos de incêndio detectados em 2023 incluam pequenos incêndios que antes passariam despercebidos. Essa melhoria na capacidade de monitoramento, combinada com o impacto das mudanças climáticas e a presença de biomassa acumulada, gera um cenário de oscilação constante, que exige uma abordagem contínua para o combate aos incêndios florestais.

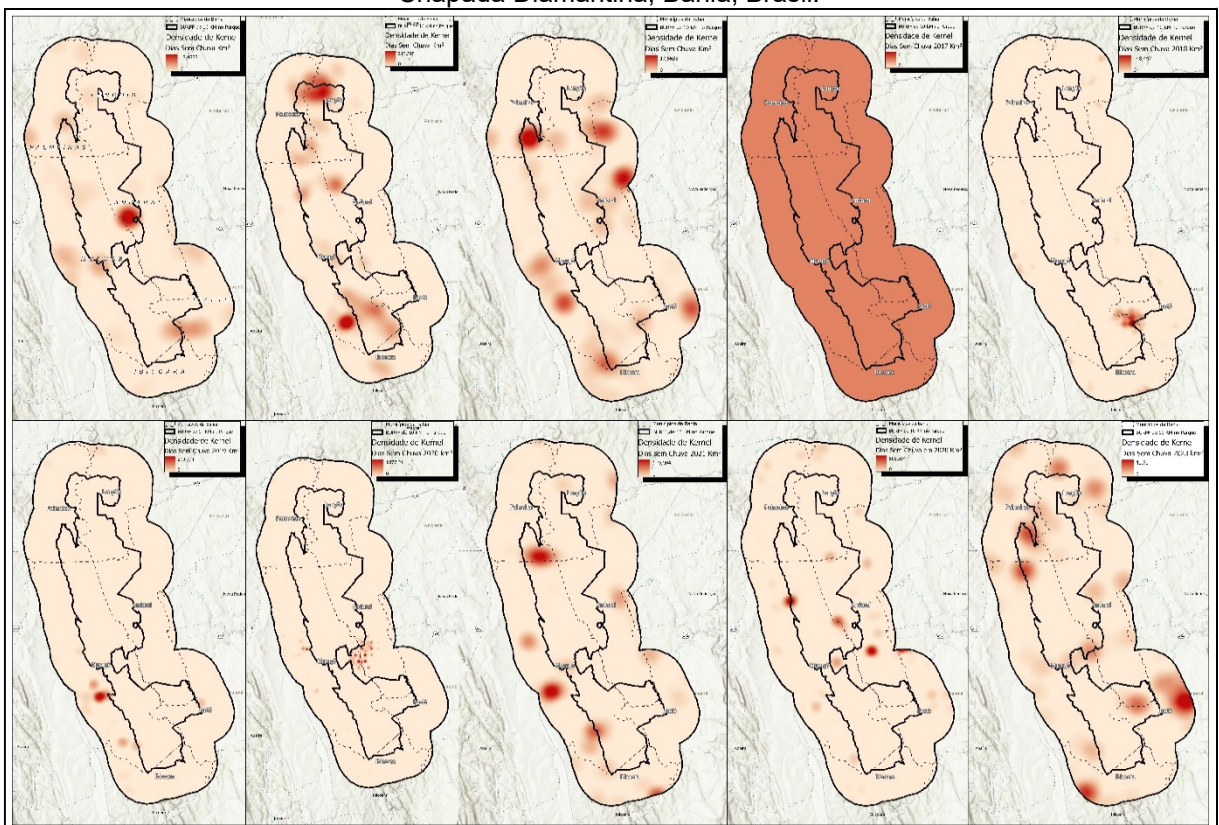
5.5 Densidade de Kernel para Período de Secura (PSE) entre 2014 e 2023

Os resultados apresentados a partir da aplicação da metodologia de cálculo dos Período de Secura (PSE), integrados à densidade de Kernel, revelam padrões críticos de vulnerabilidade ambiental associados à ocorrência de queimadas e incêndios florestais. A análise detalhada destaca como a densidade de Kernel traduz a secura acumulada em uma visualização espacialmente contínua, permitindo identificar zonas sensíveis (hotspots) que requerem ações imediatas de mitigação. Essa abordagem fornece não apenas um retrato das condições meteorológicas e

ambientais, mas também ferramentas de gestão essenciais para o manejo do fogo em regiões vulneráveis.

O primeiro resultado é a capacidade da densidade de Kernel de identificar áreas com alta concentração de PSE, que refletem secura extrema em períodos prolongados sem precipitação efetiva. O valor calculado de PSE incorpora a ponderação da precipitação passada, indicando como as chuvas recentes influenciam a secura atual. Isso é crucial em regiões onde chuvas ocasionais não conseguem reverter totalmente o déficit hídrico acumulado, tornando essas áreas mais suscetíveis a incêndios. Os mapas gerados mostram uma correlação clara entre essas áreas críticas e zonas conhecidas de maior incidência de queimadas (Figura 7).

Figura 7. Mapas de Densidade de Kernel para Período de Secura (PSE) entre 2014 e 2023, destacando áreas de maior secura acumulada e potencial risco de fogo no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.



Fonte: Autor, 2025

A integração dos dados de PSE na densidade de Kernel permite também um diagnóstico dinâmico, no qual mudanças interanuais na distribuição espacial do risco de fogo podem ser monitoradas. Isso é evidente nos mapas de densidade

apresentados, que mostram uma expansão e intensificação progressiva das áreas de risco em determinados anos. Este comportamento reflete não apenas a variabilidade climática, mas também o impacto cumulativo da pressão ambiental sobre os ecossistemas locais, exigindo intervenções mais direcionadas e estratégicas.

A espacialização dos “PSE” no contexto do cálculo do Risco de Fogo pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) demonstra a importância de considerar fatores como tipo de vegetação, latitude e elevação topográfica na modelagem do risco. De acordo com Souza e Lima (2021), a análise dessas variáveis ambientais é essencial para melhorar a precisão das previsões de incêndios, pois áreas com vegetações mais inflamáveis, como savanas e áreas de pastagem, apresentam um risco mais elevado de propagação do fogo. A utilização de mapas de densidade, como mencionados pelo INPE, permite identificar essas áreas críticas, que muitas vezes coincidem com vegetações de alta combustibilidade (INPE, 2020). Esses mapas são uma ferramenta valiosa, pois fornecem informações detalhadas sobre as zonas mais vulneráveis, permitindo ajustes específicos na metodologia de cálculo do risco, conforme sugerido por estudos de modelagem de risco de incêndio em diferentes tipos de vegetação (Souza & Lima, 2021).

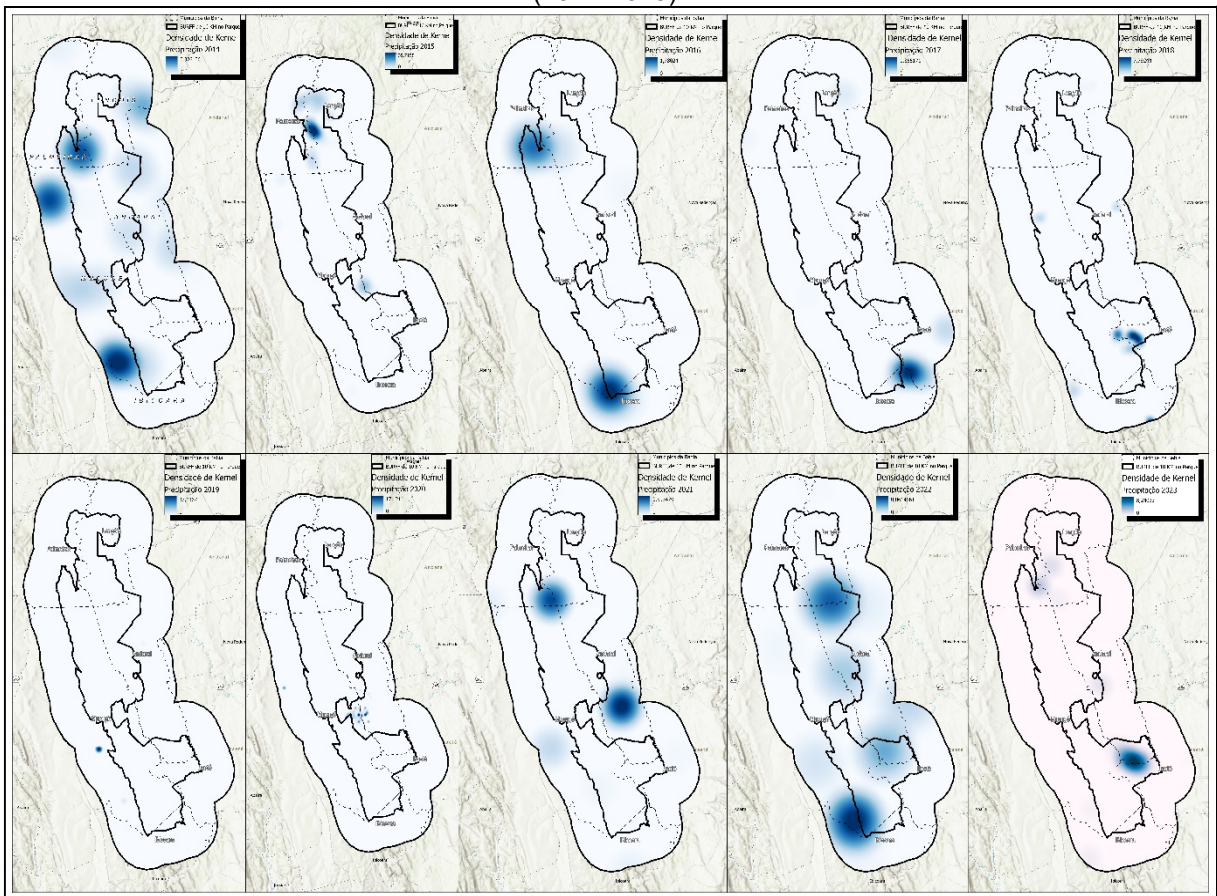
A latência topográfica e a latitude também desempenham um papel crucial, como apontado por Lima et al. (2019), já que essas variáveis podem afetar a intensidade e a velocidade de propagação das chamas, alterando o comportamento do fogo em diferentes regiões. Por exemplo, áreas de maior altitude tendem a apresentar diferentes padrões de vento e umidade que influenciam diretamente na probabilidade de incêndios. Essas considerações são fundamentais na hora de ajustar os modelos de risco, garantindo que sejam mais precisos e adequados para cada tipo de vegetação e contexto geográfico (Lima et al., 2019).

5.6 Precipitação Acumulada por Análise de Densidade de Kernel (2014-2023)

Os mapas de densidade de kernel mostram padrões espaciais da precipitação acumulada ao longo dos anos analisados. A influência dos eventos climáticos sobre

uma área espacial definida mostra que, em alguns anos, há menor concentração de focos de incêndio nas regiões sul e central da área delimitada. Nos anos de 2014, 2016, 2017, 2021 e 2022, observa-se uma distribuição mais homogênea ou com menores concentrações detectadas (Figura 8). Destacam-se os anos de 2015 e 2022, que registraram o maior número de focos de incêndio.

Figura 8. Distribuição Espacial da Precipitação Acumulada por Análise de Densidade de Kernel (2014-2023).



Fonte: Autor, 2024.

Os valores representados pelos mapas, na figura 8, (diferenciados pela escala de intensidade de azul) indicam onde as chuvas foram mais intensas ou concentradas em termos espaciais. Áreas com tons mais escuros apresentam maior densidade de precipitação, sugerindo maior impacto pluviométrico nesses locais. Por exemplo, em anos como 2014 e 2022, há regiões com densidades claramente elevadas, contrastando com anos como 2019 e 2020, nos quais as áreas de alta densidade são menores ou inexistentes. Esses valores não são a precipitação direta

(como mm), mas uma estimativa ponderada que combina a precipitação acumulada com a influência espacial (VIGANÓ et al., 2018).

A precipitação acumulada está diretamente relacionada à vulnerabilidade para a ocorrência de incêndios. Em anos ou regiões com menor densidade de precipitação, o risco de fogo pode ser significativamente maior devido ao aumento da secura do solo e da vegetação. A análise espacial da densidade por kernel permite identificar áreas prioritárias para monitoramento e gestão de risco de incêndios, principalmente em regiões onde os padrões mostram consistentemente baixa precipitação acumulada ao longo de vários anos (SILVA; VASCONCELOS; COSTA, 2022).

Os resultados apontam a importância de entender a dinâmica espacial da precipitação para a gestão ambiental da área de estudo. Regiões que apresentam baixa densidade de precipitação pode ser mais suscetíveis a impactos ecológicos, como perda de biodiversidade e degradação do solo. Já áreas com alta concentração de precipitação acumulada podem enfrentar desafios relacionados à erosão, enchentes e mudanças no ciclo hidrológico local. A análise anual desses padrões permite traçar estratégias de conservação e mitigação adequadas às necessidades específicas de cada região.

A análise da densidade de kernel aplicada à precipitação acumulada demonstra ser uma ferramenta valiosa para compreender a distribuição espacial das chuvas e sua relação com o ambiente. No entanto, para uma interpretação mais robusta, seria ideal complementar esses dados com informações adicionais, como a frequência de eventos extremos e a sazonalidade das chuvas. Além disso, o cruzamento desses resultados com dados sobre vegetação e incêndios pode oferecer insights mais aprofundados sobre a dinâmica ambiental e os desafios enfrentados pela região ao longo do tempo.

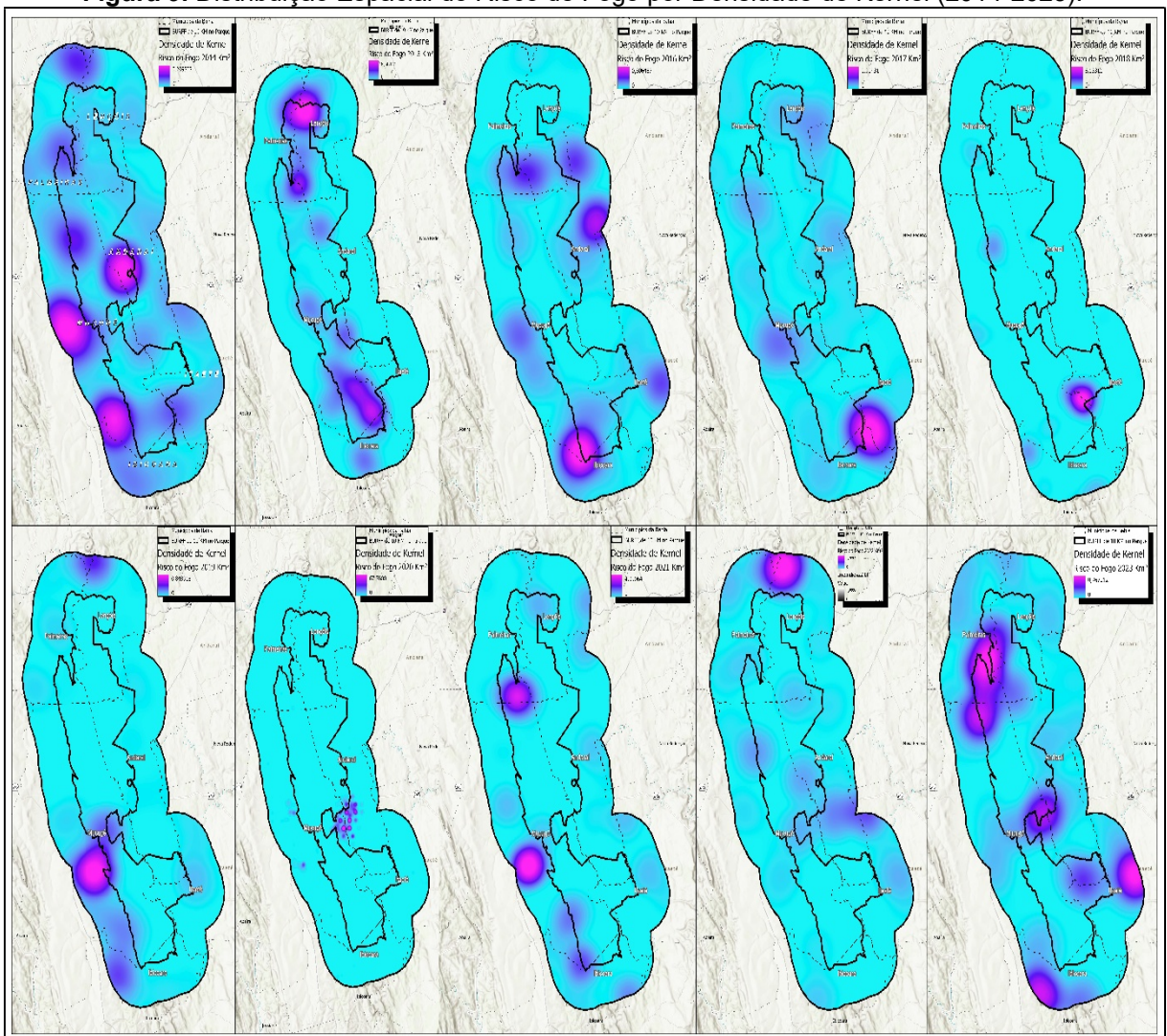
5.7 Risco de Fogo por Densidade de Kernel (2014-2023)

A Figura 9 mostra que os valores médios de densidade variam entre 0,21 (2014) e 67,77 (2020), evidenciando uma oscilação significativa no risco de fogo ao longo do período analisado. Esses valores representam a intensidade relativa do risco, suavizada espacialmente pela metodologia de Kernel. Anos com valores mais

baixos, como 2014, 2016 e 2023, indicam uma menor concentração de risco, enquanto anos como 2020, com um valor de 67,77, apresentam um risco altamente concentrado em determinadas áreas, especialmente nos municípios de Mucugê e Andaraí.

Os anos de 2015, 2018 e especialmente 2020 apresentaram os maiores valores, com 8,56, 8,13 e 67,77, respectivamente. Esses picos indicam condições climáticas mais críticas, como períodos de seca prolongada e altas temperaturas, que aumentaram a vulnerabilidade da vegetação ao fogo. O ano de 2020, em particular, destaca-se como o período mais crítico, provavelmente associado a eventos climáticos extremos, como ondas de calor ou redução acentuada de precipitação (SILVA; VASCONCELOS; COSTA, 2022).

Figura 9. Distribuição Espacial do Risco de Fogo por Densidade de Kernel (2014-2023).



Fonte: Autor, 2025.

Por sua vez, anos como 2014 (0,21), 2016 (0,81), 2019 (0,84) e 2023 (0,77) apresentam valores muito menores, indicando uma distribuição mais homogênea e menos intensa do risco.

5.8 Distribuição de Uso da Terra e Focos de Incêndios (2014-2023)

Os dados analisados apresentam um panorama das áreas impactadas por incêndios ao longo de 10 anos, considerando a área total em hectares, a intensidade dos focos de incêndio (variando de baixa a alta intensidade) e as classes de uso do solo. Essa abordagem permite identificar padrões e compreender como os incêndios afetam a cobertura terrestre, desde florestas e formações naturais não florestais até áreas agrícolas e corpos d'água. Anos de alta intensidade, como 2020, destacam-se pelo impacto amplo e generalizado, enquanto anos menos intensos, como 2014 e 2017, apresentam danos localizados e focos de baixa intensidade.

Tabela 3. Tabela de Distribuição de Uso da Terra e Focos de Incêndios (2014-2023)

ANO	Área/ha	Foco de Incêndios km ²	CLASSES				
			Floresta %	Formação Natural não Florestal %	Agropecuária %	Área não vegetada %	Corpo D'água %
2014	5.020	$\leq 0,2 \hat{a} \leq 0,259$	48,52%	27,91%	23,50%	0,02%	0,04%
2015	10.040	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 8,657$	56,08%	43,10%	0,82%	0,01%	0,00%
2016	2.510	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 0,864$	58,69%	16,27%	24,84%	0,07%	0,12%
2017	1.225	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 0,913$	98,84%	0,99%	0,17%	0,00%	0,000%
2018	7.530	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 7,930$	48,06%	37,55%	13,27%	0,33%	0,80%
2019	1.255	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 0,918$	61,88%	0,05%	25,09%	0,03%	12,94%
2020	100.925	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 57,630$	62,98%	13,38%	22,64%	0,32%	0,68%
2021	26.272	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 4,886$	62,22%	20,69%	16,63%	0,23%	0,23%
2022	3.765	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 1,855$	79,86%	16,88%	2,97%	0,21%	0,08%
2023	7.530	$\leq 0,5 \hat{a} \leq 1,012$	23,06%	66,55%	7,43%	2,95%	0,00%

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados mostram que as classes "Floresta" e "Formação Natural não Florestal" são frequentemente impactadas, refletindo a vulnerabilidade dessas áreas a incêndios. Contudo, a análise destaca que as porcentagens de impacto devem ser

interpretadas em conjunto com a área total e a intensidade dos focos. Por exemplo, um ano como 2017, com uma área pequena impactada, pode apresentar altos percentuais em uma classe específica, mas isso não significa um impacto generalizado ou severo. A integração desses fatores fornece uma visão mais precisa da dinâmica dos incêndios.

Em 2015, a área impactada foi de 10.040 hectares, com uma densidade de focos muito elevada ($\leq 0,5$ a $\leq 8,657997$). "Floresta" foi a classe mais impactada (56,078%), seguida por "Formação Natural não Florestal" (43,098%). Esse padrão reflete um impacto concentrado em áreas naturais e florestais, com menor impacto em "Agropecuária" (0,816%). Apesar da menor área total comparada a 2020, a alta densidade de focos torna 2015 um dos anos mais severos, com danos significativos em regiões ecologicamente sensíveis.

O ano de 2020 foi o mais crítico, com uma área total impactada de 100.925 hectares, a maior densidade de focos de incêndio ($\leq 0,5$ a $\leq 57,63$) e um impacto distribuído entre múltiplas classes. "Floresta" registrou 62,98% de impacto, a maior entre as classes, mas "Agropecuária" também foi fortemente afetada (22,64%). A formação natural não florestal sofreu um impacto de 13,38%. Essa distribuição sugere que os incêndios foram amplos e atingiram regiões diversas, indicando tanto queimadas agrícolas como incêndios florestais descontrolados. O impacto combinado nas florestas e áreas agrícolas evidencia a necessidade de ações preventivas para mitigar os danos em momentos de alta intensidade.

Comparando os anos críticos (2015 e 2020) com os tranquilos (2014 e 2017), nota-se que a severidade dos impactos depende da combinação de área total, densidade dos focos e distribuição entre classes. Em 2020, os incêndios foram amplos e dispersos, enquanto em 2015 os danos foram concentrados em áreas florestais e naturais. Em contraste, 2014 e 2017 apresentaram áreas impactadas menores e focos de menor intensidade, com impactos localizados principalmente em florestas.

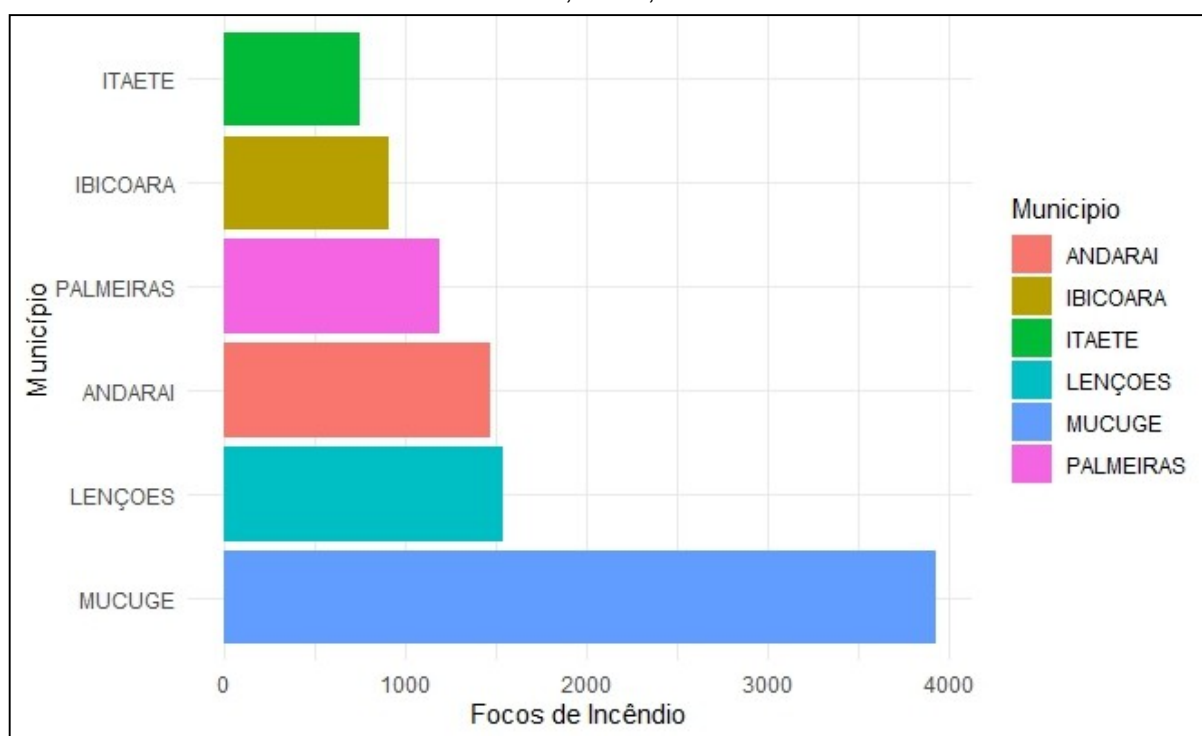
Fatores climáticos, como secas prolongadas, podem ter exacerbado os incêndios em anos críticos, enquanto condições climáticas mais favoráveis contribuíram para reduzir os impactos em anos tranquilos. A ação humana, como queimadas controladas ou manejo inadequado, também desempenha um papel

significativo, especialmente em áreas agrícolas. A interação entre fatores climáticos e humanos exige uma abordagem integrada para mitigação.

5.8.1 Focos de Incêndios por Município no Parque Nacional da Chapada Diamantina

A Figura 10 mostra disparidades na distribuição dos focos de incêndio entre os municípios, com Mucugê apresentando o maior número de ocorrências. Essa predominância pode ser explicada pela extensão territorial do município, que abriga áreas densamente vegetadas e atrai alto fluxo turístico. Além disso, práticas agrícolas que utilizam fogo como manejo podem intensificar os riscos, conforme destacado por De La Riva et al. (2015), por sua vez, municípios como Itaitê e Ibicoara apresentam números menores, reflexo de iniciativas locais de conscientização ambiental e menor densidade populacional

Figura 10. Número de Focos de Incêndios por Município no Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.



Fonte: Autor, 2024.

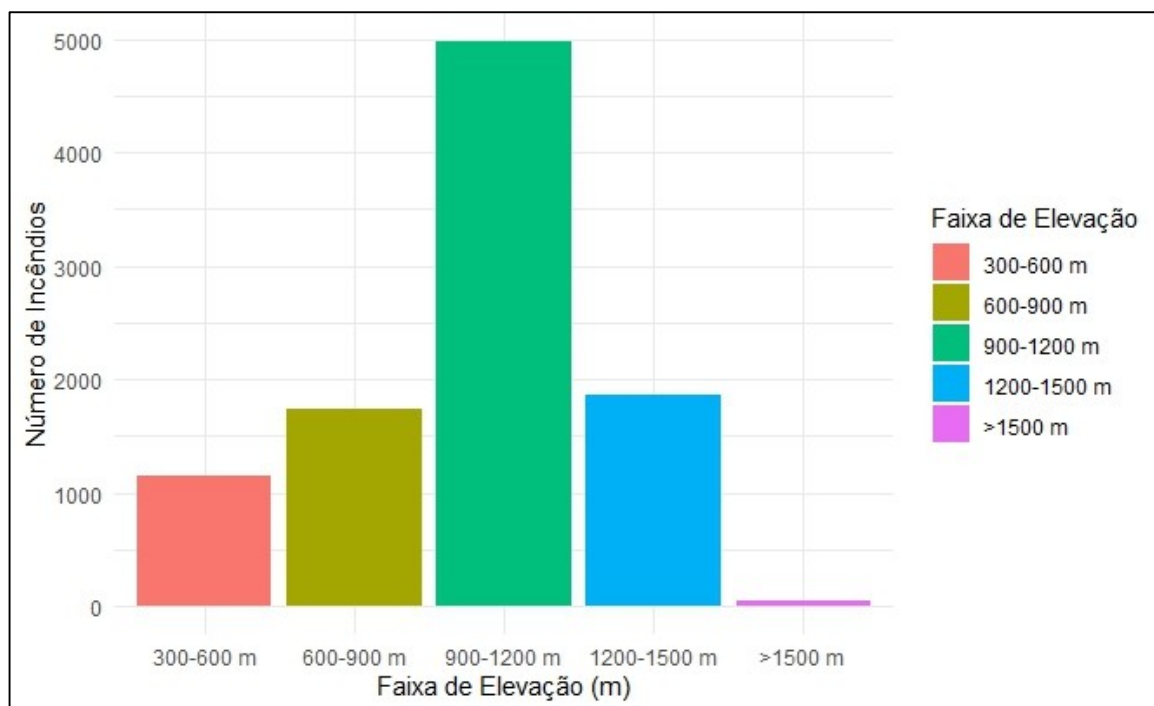
Os incêndios em Mucugê geram impactos críticos para a biodiversidade e os ecossistemas locais. A região abriga diversas espécies endêmicas que estão ameaçadas pela destruição de seus habitats. Além disso, a degradação do solo e o

comprometimento de nascentes afetam a qualidade dos serviços ambientais, como a regulação hídrica e a oferta de recursos naturais. De acordo com Santos e Silva (2023), essas perdas impactam negativamente a economia local, especialmente o ecoturismo.

5.8.2 Distribuição de Incêndios por Faixas de Elevação

A Figura 11 revela que a maior concentração de incêndios ocorre na faixa de elevação de 900-1200 metros. Essa tendência pode ser explicada pela presença de vegetação densa e combustível, como os campos rupestres e as florestas de altitude, além de uma maior atividade humana nessas áreas. Segundo Barni et al. (2020), o turismo desordenado e a prática de queimadas agrícolas na região contribuem para o aumento do número de incêndios nessa faixa latitudinal.

Figura 11. Ocorrência de Incêndios por Faixas de Elevação no Parque Nacional da Chapada Diamantina.



Fonte: Autor, 2024.

Por sua vez, faixas latitudinais mais baixas (300-600 m) apresentam menor número de incêndios. Essa diferença pode estar associada à menor densidade populacional e à predominância de vegetação menos inflamável nessas altitudes, como a caatinga arbustiva, que acumula menos biomassa seca durante a estiagem.

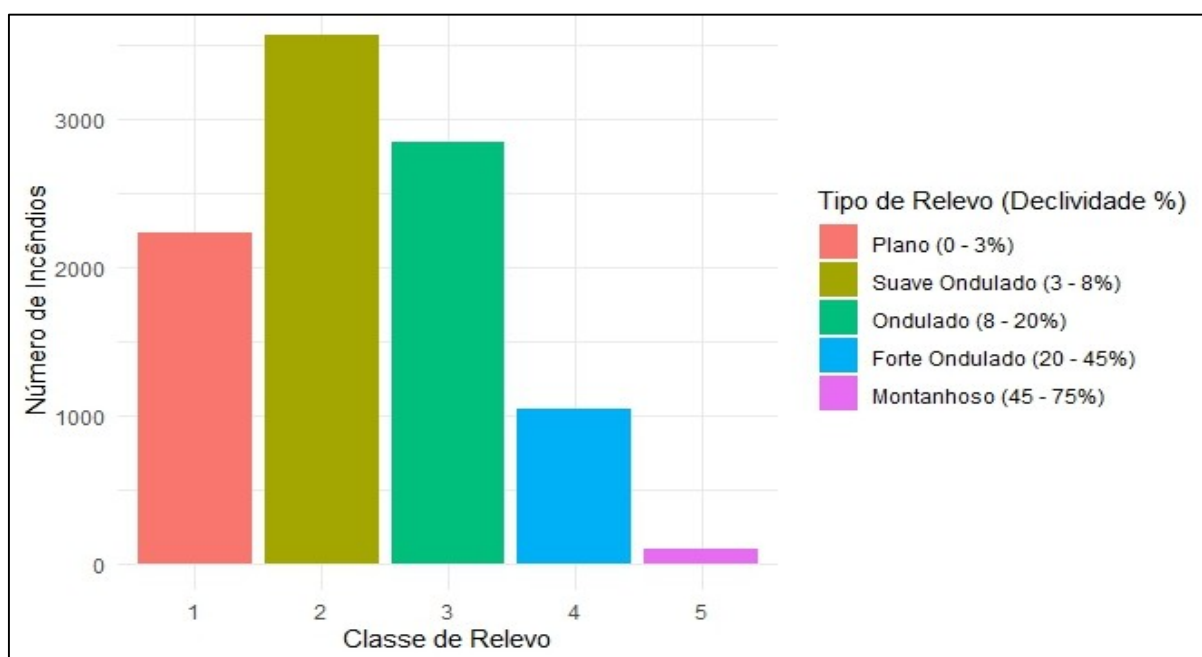
Conforme estudos recentes de (BARNI et al., 2020), a combinação de fatores ecológicos e climáticos torna essas áreas menos propensas à propagação do fogo.

As estratégias de combate e prevenção devem ser ajustadas conforme a altitude. Para a faixa de 900-1200 metros, onde os incêndios são mais frequentes, é necessário investir em monitoramento remoto, formação de brigadas comunitárias e campanhas educativas voltadas para turistas e moradores. Já em altitudes superiores, a preservação deve focar no monitoramento constante e no controle de atividades humanas (TORRES et al., 2014).

5.8.3 Incêndios por Classe de Relevo

A figura 12 evidencia que os incêndios ocorrem predominantemente em áreas com relevo suave ondulado (3.565) e ondulado (2.847) focos. Essa alta incidência pode ser explicada pela maior acessibilidade dessas regiões para atividades humanas. Conforme Barni et al. (2020), terrenos com declividades moderadas favorecem o turismo, a agricultura e o uso do fogo, que muitas vezes é mal controlado, aumentando o risco de incêndios. Além disso, essas áreas possuem uma vegetação que acumula biomassa seca durante períodos de estiagem, tornando-as mais suscetíveis a combustões.

Figura 12. Incêndios por Classe de Relevo.



Fonte: Autor, 2024.

Os impactos ambientais dos incêndios em áreas de relevo suave a ondulado são severos, afetando diretamente o equilíbrio ecológico do Parque Nacional da Chapada Diamantina. A degradação do solo é um dos principais problemas, levando à erosão e à redução da capacidade de infiltração de água, o que compromete as nascentes locais (TORRES et al., 2014). Ademais, a biodiversidade sofre com a perda de espécies endêmicas e habitats, prejudicando também o ecoturismo, uma das principais atividades econômicas da região.

5.9 Análise de Correlação entre Variáveis Relacionadas aos Focos de Incêndio

A matriz de correlação (Figura 13) apresentada ilustra a relação entre as variáveis "Focos de Incêndio", "Média de Elevação" e "Média de Declividade". Esses coeficientes indicam a força e a direção da relação estatística entre as variáveis, variando de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita). Com base nos valores destacados no gráfico.

Figura 13. Matriz de Correlação entre Focos, Média de Elevação e Média de Declividade.



Observa-se uma correlação negativa muito forte entre os focos de incêndio e a declividade média. Isso significa que à medida que a inclinação do terreno aumenta, o número de focos de incêndio diminui de forma significativa. Essa relação é consistente com a dificuldade de acesso humano a terrenos inclinados e a menor presença de atividades humanas, como o uso do fogo para limpeza agrícola ou turismo desordenado. Além disso, terrenos mais inclinados frequentemente possuem vegetação menos contínua, o que dificulta a propagação do fogo. De acordo com (BARNI et al., 2020), a inclinação do terreno é um fator crucial para limitar a ocorrência de incêndios, pois restringe a interação humana direta.

Existe uma correlação negativa moderada a forte entre os focos de incêndio e a média de elevação. Isso indica que locais com maior altitude apresentam menos focos de incêndio. A razão por trás dessa relação é que áreas mais altas geralmente possuem climas mais frios e úmidos, condições que dificultam a ignição e propagação do fogo. Além disso, a acessibilidade diminui em altitudes maiores, reduzindo a intervenção humana. (SILVA; PINHEIRO; PEREIRA, 2024) ressaltam que altitudes elevadas têm ecossistemas mais frágeis e vegetação adaptada, o que limita os impactos de incêndios, embora esses possam ser mais devastadores quando ocorrem.

A correlação positiva muito forte entre elevação e declividade reflete uma relação intrínseca das características geográficas. Áreas de maior elevação geralmente apresentam terrenos mais íngremes. Essa relação reforça a tendência de que locais mais altos, devido à sua maior inclinação, têm menor propensão a incêndios. No entanto, o monitoramento constante é necessário para essas áreas, pois incêndios naturais, como os causados por raios, podem ocorrer em condições adversas.

5.9.1 Implicações Práticas

Os resultados indicam que ações de prevenção e combate a incêndios devem ser priorizadas em áreas de menor elevação e declividade, como terrenos planos e suave ondulados, que concentram a maior parte dos focos de incêndio. Nessas regiões, estratégias como o uso de aceiros, campanhas de conscientização e fortalecimento das brigadas locais podem ser eficazes. Em áreas montanhosas e de

maior declividade, o foco deve estar no monitoramento remoto, proteção de ecossistemas frágeis e controle de causas naturais de incêndios, como raios, conforme destacado por (SILVA; PINHEIRO; PEREIRA, 2024).

6. Conclusão

A análise dos incêndios florestais nos últimos dez anos revelou que os anos de 2015 e 2020 foram os mais críticos, com 3.638 e 1.594 focos registrados, respectivamente. Esses eventos foram impulsionados por condições climáticas adversas, grande acúmulo de biomassa seca e práticas humanas, como queimadas agrícolas e incêndios criminosos. As áreas mais afetadas compartilham características como vegetação densa, alta disponibilidade de material combustível e intensa atividade humana, reforçando a necessidade de estratégias específicas de prevenção e controle.

A relação entre incêndios e variáveis geográficas, como elevação e declividade, demonstra que diferentes tipos de terreno exigem abordagens distintas. Em regiões de relevo suave, ações educativas e monitoramento contínuo se mostram essenciais, enquanto em áreas inclinadas, o controle da vegetação e a mitigação dos efeitos climáticos devem ser priorizados. Além disso, é fundamental combater incêndios intencionais por meio de vigilância e punições rigorosas, minimizando a influência de ações criminosas.

Diante desse cenário, torna-se crucial fortalecer o monitoramento e a resposta rápida a incêndios, além de investir em pesquisas que aprofundem o entendimento das condições ambientais que favorecem sua propagação. O uso de tecnologias de sensoriamento remoto e análise geoespacial, aliado a estratégias de gestão adaptativa, pode ser decisivo para reduzir riscos e minimizar danos. Ademais, a conscientização da população e a colaboração entre governos, pesquisadores e comunidades locais são fundamentais para o desenvolvimento de soluções eficazes. Por fim, a adoção de práticas sustentáveis e a proteção dos ecossistemas mais vulneráveis são medidas indispensáveis para reduzir os impactos das queimadas e garantir a preservação ambiental no Brasil.

7. Referências

- ABREU, K. M. P. de; COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, RJ, v. 16, n. 1, p. 173-198, jan. 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Sensoriamento-remoto-aplicado-ao-estudo-da-com-em-e-Abreu-Coutinho/8c1167253471c25c12a06b4ccfeed51c7562a653>. Acesso em: 3 jan. 2021.
- AGBESHIE, A. A.; ABUGRE, S.; ATTA-DARKWA, T.; AWUAH, R. A review of the effects of forest fire on soil properties. **Journal of Forestry Research**, 33(4), 1419–1441, 2022.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, **Amazônia brasileira**. Acta Amazonica, vol. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.
- ARANTES, T. B. **Análise de séries temporais compostas por imagens sintetizadas a partir da fusão de dados MODIS - TM. 2014**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.
- ARAÚJO, F. M. **Avaliação da área queimadas no bioma cerrado: proposições para o monitoramento e conversação**. 2015. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- BAILEY, R.; YEO, J. **The Burning Issue: Managing Wildfire Risk**. Marsh & McLennan Insights, outubro de 2019.
- BARROS, A. C. de; SILVA, T. J. da; COSTA, D. de M. **Sensoriamento remoto na análise ambiental da microbacia do Córrego da Água Amarela**, Itaberá/SP. Holos Environment, Rio Claro, SP, v. 16, n. 1, p. 27-35, 2016. ISSN 1519-8634 (On-line).
- BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; VITORINO, M. D. **Quantificação de material combustível superficial em reflorestamentos de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze**. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 35, n. 3, p. 465-477, set./dez. 2005. DOI: [10.5380/ufv.v35i3.5187](https://doi.org/10.5380/ufv.v35i3.5187).
- CARVALHO, A. **Investigação de incêndios. Metodologias de Investigação Criminal**. Escola de Polícia Judiciária, Loures, 2006.
- CHUVIECO, E.; YEBRA, M.; MARTINO, S.; THONICKE, K.; GÓMEZ-GIMÉNEZ, M.; SAN-MIGUEL, J.; OOM, D.; VELEA, R.; MOUILLOT, F.; MOLINA, J. R.; MIRANDA, A. I.; LOPES, D.; SALIS, M.; BUGARIC, M.; SOFIEV, M.; KADANTSEV, E.; GITAS, I. Z.; STAVRAKOUDIS, D.; EFTYCHIDIS, G.; BAR-MASSADA, A. Towards an Integrated Approach to When, Where, **What and How May the Landscapes Burn**. Fire, v. 6, n. 5, 2023.

Classificação E Codificação Brasileira De Desastres - COBRADE. Disponível em http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=2a09db34-e59a-4138-b568-e1f00df81ead&groupId=185960 . Acesso: 04 de abril de 2021.

COSTA, E. P.; FIEDLER, N. C.; MEDEIROS, M. B.; WANDERLEY, F. B. Incêndios florestais no entorno de Unidades de Conservação-estudo de caso na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Distrito Federal. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 195-206, 2009.

DE FRENNE, P. et al. Microclimas florestais e mudanças climáticas: importância, impulsionadores e agenda de pesquisa futura. **Global Change Biology**, v. 27, n. 11, p. 2279-2297, 2021.

DOERR, Stefan H.; SANTÍN, Cristina; ABATZOGLOU, John; JONES, Matthew William; CANADELL, Pep. **Climate change is increasing wildfire risk - here's how.** World Economic Forum, 7 de julho de 2022.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 97p.,2002.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos,123 p., 2011.

FRANÇA, D. de A.; FERREIRA, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Goiânia, Brasil, INPE. p. 3017-3023, 2005.

FRANÇA, H. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA. 2001. 133f.** Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FRANÇA, H.; RIBEIRO, K. T. Mapeamento de queimadas no Parque Nacional da Serra do Cipó e na Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira, MG: 1984–2007. **Relatório Técnico**, 2008.

GITAS, I.; MITRI, G.; VERAVERBEKE, S.; POLYCHRONAKI, A. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring - A Review. In: FATOYINBO, L. (Ed.). **Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications.** 1. ed. InTech, 2012.

GONTIJO, G. A; PEREIRA, A. A; OLIVEIRA, E. D. S; JUNIOR, F. W. A Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba/PR. São Jose dos Campos: INPE, 2011.

HUANG, Q.; CHEN, S.; TAN, J. TSRC: A Deep Learning Model for Precipitation ShortTerm Forecasting over China Using Radar Echo Data. **Remote Sensing**, v. 15, n. 1, 2023.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE- ICMBio. **Apostila para Formação de Brigadistas de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais. Diretoria de Unidades de Conservação de Proteção Integral, Coordenação Geral de Proteção Ambiental, Brasília, 87 p., 2010.**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE. Disponível em: < <http://www.inpe.br/queimadas/>> Acesso em: 12 de setembro de 2023

JAISWAL, R. K.; MUKHERJEE, S.; RAJU, K. D.; SAXENA, R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p. 1-10, 2002.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 604 p., 2009.

LIMA, V. S.; NASCIMENTO, F. H.; COELHO, A. N.; MIRO, J. M. R. Análise de áreas sazonalmente inundáveis com uso de técnicas de sensoriamento remoto: o caso da lagoa Feia, região Norte do estado do Rio de Janeiro. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, v. 13, p. 1822- 1829, 2013.

LOMBARDI, R. J. R. **Estudo da recorrência de queimadas e permanências de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do Cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat.** 2005. 175f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

LOMBARDI, R. J. R. Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat. São José dos Campos: **INPE**, 2003. 172p. – (INPE-12663-TDI/1006).

MASCARENHAS, L. M. D. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. **Sociedade & natureza**, v. 21, p. 5-18, 2009.

MENESES, P. R.; MADEIRA, J. S. **Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais.** Universidade de Brasília. Brasília – DF. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, 262p.,2001.

MORAES, E. C. de. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto.** Capítulo 1. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 22 f. 2002.

MYERS, R. L.; BATALHA, M. Convivendo com o Fogo-Manutenção dos ecossistemas e subsistência com o manejo integrado do fogo. **The Nature Conservancy**-Iniciativa Global para o Manejo do Fogo: Tallahassee, USA, 2006.

NUNES, J. R. S. FMA+ - **Um Novo Índice de Perigo de Incêndios Florestais para o Estado do Paraná** – Brasil. Doutorado em Engenharia Florestal. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 150f.

NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Estimativa da umidade relativa das 13:00 h, com base nos dados das 9:00 h e das 15:00 h, para o Estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 35, n. 2, p. 247-258, 2005.

OLIVEIRA, A. L. S. de. **Evaluation of EOS/ MODIS and NOAA/ AVHRR sensors in the detection and reporting of fires and burnings**, 2006. 105f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

OLIVEIRA, A. L. S. et al. **Comparação e validação da modelagem espacial de riscos de incêndios considerando diferentes métodos de predição**. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 23, n. 4, p. 556-577, out./dez. 2017. DOI: [10.1590/S1982-21702017000400037](https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000400037)

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO (FAO). **Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010**: informe principal. Roma: FAO, 2010. 381 p. Estudio FAO: Montes 163

PEIXE, A. S. M.; OLIVEIRA, T. H. de; TORRES, M. F. A. **Mapeamento do uso e ocupação do solo do Jardim Botânico do Recife e entorno/PE através de fotografias aéreas**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, INPE. p.1563-1569. 2011.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., KUPLISH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 160 p., 2012.

REGO, Francisco Castro; MORGAN, Penelope; FERNANDES, Paulo; HOFFMAN, Chad. Fire Propagation. In: Fire Science from Chemistry to Landscape Management. **Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment**, 2021. Cap. 7, p. 115-174.

RIBEIRO, L.; KOPROSKI, L. de P.; STOLLE, L.; LINGNAU, C.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Zoneamento de riscos de incêndios florestais para a fazenda experimental do Canguiri, Pinhais (PR). **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 3. p.561-572, 2008.

RODRIGUES, R. R.; BORGES, E. F.; FRANCAROCHA, W. J. S. Identificação das zonas de ocorrência de incêndios no Parque Nacional da Chapada Diamantina - BA. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. **Anais...** Curitiba: INPE, p. 8043-8050, 2011.

ROY D. P.; LEWIS P. E.; JUSTICE C. O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data - a bi-directional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 83, p. 263-286, 2002.

ROY, D. P.; JIN, Y.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 97, p. 137-162, 2005.