



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE BACHARELADO EM GEOGRAFIA

FELIPE DE LIMA BRITO

**IMPACTO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CONECTIVIDADE NO
SEMIÁRIDO**

JOÃO PESSOA, PARAÍBA

2022

FELIPE DE LIMA BRITO

**IMPACTO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CONECTIVIDADE NO
SEMIÁRIDO**

Monografia apresentada à
coordenação do curso de Geografia
na Universidade Federal da Paraíba,
para a obtenção do grau de bacharel
em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Jonas Otaviano
Praça de Souza

JOÃO PESSOA, PARAÍBA

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B862i Brito, Felipe de Lima.

Impacto de incêndios florestais na conectividade no
semiárido / Felipe de Lima Brito. - João Pessoa, 2022.
38 p. : il.

Orientação: Jonas Otaviano Praça de Souza.
Monografia (Curso de Bacharelado em Geografia) -
UFPB/CCEN.

1. Incêndios. 2. Caatinga. 3. Conectividade
sedimentológica. 4. Geografia. I. Souza, Jonas Otaviano
Praça de. II. Título.

UFPB/CCEN

CDU 91(043.2)

ANEXO 4



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE GEOGRAFIA

Resolução N.01/2021/CCBLG/CCEN/UEPB

PARECER DO TCC

Tendo em vista que o aluno (a) Felipe de Lima Brito

() cumpriu () não cumpriu os itens da avaliação do TCC previstos no artigo 25º da Resolução N. 01/2021/CCBLG/CCEN/UEPB somos de parecer () favorável ou () desfavorável à aprovação do TCC intitulado:

IMPACTO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NA CONECTIVIDADE NO SEMIÁRIDO

Nota final obtida: 9,0

João Pessoa, 14 de Junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Professor Orientador

Prof. Dr. Jonas Otaviano Praça de Souza

Membro Interno Obrigatório (Professor vinculado ao Curso)

Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho

Membro Interno ou Externo

Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria José Batista de Lima Brito e José Carlos de Brito, por me apoiarem durante toda a graduação e também na decisão de trocar de curso, que aparentemente foi a escolha certa.

Ao professor Dr. Jonas Otaviano Praça de Souza por aceitar me orientar na monografia e pelos últimos três anos.

Aos professores Dr. Bartolomeu Israel de Souza e Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho por aceitarem fazer parte da banca.

Aos meus colegas de turma Alessandro, Danilo, Elen, Eduardo, Pedro e Daniel por serem recorrentemente em trabalhos que eram entregues sempre em cima do prazo. A João Carlos, que sempre falou a verdade. Cassiano e Micaele que foram os veteranos. A Ellen que eu conheci à pouco mais de um ano, mas parece serem cinco. A Ana Melo que conheci no ônibus. A Marias Carolina, Maria Beatriz e Welligton que me divertem.

Aos meus colegas do GEAFS, Camila, Gabriel e Adonai que me levaram pra campo. A André, Stephanie, Fábio e Daniel que me divertiram bastante. Agradeço aos meus outros colegas do GEAFS por recorrentemente me ajudarem no trabalho e serem seres humanos extremamente divertidos.

Por último agradeço minha grande amiga Maria Júlia, que sempre me ajudou nos meus piores e melhores momentos.

RESUMO

Os incêndios florestais estão, por intermédios das ações humanas, transformando-se em desastres ambientais e afetando biomas que não são naturalmente adaptados ao fogo, como no caso da caatinga. O advento das mudanças climáticas e o aumento da quantidade de incêndios, surge a necessidade de entender qual o impacto deles na dinâmica ambiental geral. Uma das maneiras de analisar essas mudanças é através da conectividade sedimentológica, que pode ser explicada como as ligações físicas para a potencial transferência de sedimentos ao longo do canal. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo, analisar os impactos de incêndio a partir da conectividade sedimentológica, através de análises de imagens de sensoriamento remoto de antes e depois dos incêndios e, da aplicação de índices de conectividade e vegetação. Os resultados mostram um aumento na dinâmica da conectividade da área, sendo proporcionais ao nível de intensidade do fogo. As imagens com aplicação do índice de vegetação mostram uma dificuldade na recuperação da área. Por último, foram observadas as limitações da utilização dos valores de entrada da rugosidade propostos para incêndios.

Palavras-chave: Incêndios; Caatinga; Conectividade Sedimentológica.

ABSTRACT

Forest fires are, as a result of human actions, becoming environmental disasters affecting biomes that are not naturally adapted to fire, such as the caatinga. As a result of climate change and the increase in the number of fires, there is a need to understand their impact on the overall environmental dynamics. One way to analyze these changes is by the concept of sedimentological connectivity, which can be explained as the physical links for the potential transfer of sediments along the channel. To this end, the present work aims at analyzing the impacts of wildfires on sedimentological connectivity using remote sensing images from before and after wildfires, and applying connectivity and vegetation indexes. The results show an increase in the dynamics of connectivity in the area, being proportional to the level of fire intensity. The images with application of the vegetation index show a difficulty in the recovery of the area. Finally, the limitations of using the roughness input values proposed for fires were observed.

Keywords: Wildfires; Caatinga; Sedimentological Connectivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1: Mosaico de Mapas de Localização, Modelo Digital de Elevação e Declividade.....	19
Figura 2: Mapas de Uso e Cobertura do solo (2019) e das Bacias Hidrográficas.	20
Figura 4: Mosaico com o uso e ocupação do solo em 2019 e 2020.....	25
Figura 5: Mosaico do NBR dos dias 30/10/2019 (A), 16/11/2019 (B) e dNBR (C).	26
Figura 6: Mosaico com os mapas de conectividade em 31/10/19 (A), 16/11/2019 (B) e a diferença de conectividade (C).	30
Figura 7: Mosaico com os mapas de NDVI em 16/11/2019 (A), 02/07/2020 (B), 18/02/2023 (C).	32

GRÁFICOS

Gráfico 1: Mosaicos dos gráficos do total de chuva anual, eventos extremos e médias mensais.	25
Gráfico 2: Precipitação 120 dias após o evento.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de aridez.	14
Tabela 2: Valores para o W.....	23
Tabela 3: Dados de uso do solo nas imagens de 2019 e 2020 do MAPBIOMAS.	26
Tabela 4: Valores de uso do solo anteriores e posteriores.	27
Tabela 5: Valores da conectividade.	28

LISTA DE EQUAÇÕES E FÓRMULAS

Equação 1: Índice Normalizado de Incêndios (NBR).	22
Equação 2: Delta NBR (dNBR).	22
Equação 3: Índice de Conectividade (IC).	23
Equação 4: EQUAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO NDVI.....	24

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IC – Índice de Conectividade

dNBR – Delta Índice Normalizado de Incêndios

NBR – Índice Normalizado de Incêndios

NDVI – Índice de Diferença Normalizada da Vegetação

SRTM – Missão Topográfica de Radar Embarcado

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

WPM – Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3. MATERIAS E MÉTODOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
6. REFERÊNCIAS	34

INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro possui uma extensão de 900 mil km², englobando os estados do Nordeste brasileiro e municípios do norte de Minas Gerais, como todo o mundo vem sofrendo com alterações na dinâmica ambiental, uma dessas é o aumento dos incêndios florestais, causados majoritariamente por ações antrópicas (SANTANA *et al.*, 2011).

Incêndios florestais estão, por intermédios das ações humanas, transformando-se em desastres ambientais, afetando biomas que não são naturalmente adaptados ao fogo, como o caso da caatinga. Esses incêndios são capazes de alterar a dinâmica natural da paisagem, afetando a vegetação, o solo e a disponibilidade de água (HALLEMA *et al.*, 2017; LÓPEZ-VICENTE *et al* 2021).

Com o aumento da quantidade de incêndios, surge a necessidade de entender qual o impacto deles na dinâmica ambiental em geral. Na caatinga, existem poucos estudos que visam relacionar os incêndios e seus impactos nos padrões de erosão, embora os impactos dos incêndios sejam longamente reconhecidos na literatura internacional.

Esses impactos sobre o meio podem ser analisados utilizando a conectividade sedimentológica, definida como as ligações físicas para a potencial transferência de sedimentos de uma área a outra através do canal.

A identificação dos padrões de conectividade após eventos extremos é útil para comunidades próximas e distantes às áreas queimadas. A diminuição da quantidade de água disponível e enchentes são possíveis consequências e os motivos da necessidade que comunidades locais têm de compreender os impactos dos incêndios.

O presente trabalho tem como objetivo analisar os impactos de um incêndio no semiárido a partir da conectividade sedimentológica. Para isso, foram utilizadas imagens de sensoriamento remoto antes e depois do incêndio e, bem como aplicados índices de severidade de incêndios e de conectividade hidrológica lateral.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sistema ambiental

A Teoria Geral dos Sistemas, é entendida como uma visão da natureza onde os seus aspectos como: matéria, a energia e a estrutura são vistos de forma integrada, com o todo sendo maior que a somas das partes (SOUZA, 2013). Dentro da geografia, umas das formas em que a Teoria Geral dos Sistemas é utilizada são nos estudos sobre Sistemas Ambientais, definido como: um conjunto de parcelas (formas, massa, energia e eventos) conectados entre si por fluxos de matérias e energia (PHILLIPS, 2012). Christofolletti apresenta o sistema ambiental físico como sendo sinônimo de geossistema:

[...] os geossistemas, também designados como sistemas ambientais físicos, representam a organização espacial resultante da interação dos elementos físicos e biológicos da natureza (clima, topografia, geologia, águas, vegetação, animais, solos). É o campo de ação da geografia física. (CHRISTOFOLETTI, 2002, p. 37).

Para abarcar a perspectiva sistêmica, surge a necessidade de encontrar um recorte espacial para a análise integrada. Um recorte espacial são os conceitos de bacias drenagem, definido por Coelho Netto (1998) como: “*Áreas da superfície terrestre que drenam água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial*”.

No estudo dos sistemas, é importante compreender a composição de cada um, para isso é necessário entender alguns aspectos, como: a matéria, correspondendo ao material mobilizado dentro do sistema; a energia, representada na força (potencial ou cinética) que faz com que o sistema realize trabalho; e estrutura, é relacionado com os elementos e suas relações; e arranjo dos componentes do sistema (CHRISTOFOLETTI, 1979, SOUZA, 2013).

A relações no sistema são complexas e não lineares, assim mudanças em forma, alteram os processos; mudanças nos processos, alteram as formas. Essas mudanças podem afetar os próprios elementos, suas relações, como também a perspectiva do equilíbrio e o limiar de mudança em eventos futuros (SOUZA e ALMEIDA, 2015). Essa característica é conhecida como retroalimentação, existindo quatro tipos: retroalimentação direta, quando há relacionamento direto de ida e vinda entre duas componentes; retroalimentação em circuito, quando envolve mais de duas componentes; e a retroalimentação é

cíclica, voltando ao ponto inicial; retroalimentação negativa, quando envolve uma alteração externa, levando a uma estabilidade e retroalimentação positiva, quando a alteração reforça a mudança, não levando ao equilíbrio (SACO *et al*, 2007).

Dinâmica ambiental de Terras Secas e conectividade

As terras secas estão presentes em todos os continentes, porém diferem na quantidade de água disponível. A relação entre precipitação e evapotranspiração é base para determinar o suprimento de água em cada região, assim é possível criar um índice de aridez e classificar as áreas (MIDDLETON & STERNBERG, 2013). Para ser classificada como terra seca, o valor do índice deve ser menor que 0.65. O PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), (tabela 1) classifica as terras secas em: sub-úmido, semiárido, árido e hiperárido

Tabela 1: Índice de aridez.

Tipos	Índice de aridez	Tamanho
		milhões km ²
Hiperárido	<0.05	9.8
Árido	0.05 - 0.20	15.7
Semiárido	0.20 - 0.50	22.6
Subúmido Seco	0.50 - 0.65	12.8
Total		60.9

Fonte: Adaptado de Middleton & Sternberg, 2013.

O semiárido brasileiro tem como característica possuir a estação chuvosa, controlada pela ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), entre os meses de fevereiro e maio, com a maior parte do volume concentrada nesse período (CARVALHO, 2020; HASTENRATH, 2012). Assim, os rios do semiárido acabam ficando a maior parte do ano sem um fluxo permanente de água, são chamados rios efêmeros, canais que possuem água apenas em precipitações; já os canais que permanecem com água durante a estação chuvosa são chamados de rios intermitentes (SOUZA e ALMEIDA, 2015).

Essa dinâmica climática acaba afetando diretamente o bioma predominante do semiárido brasileiro que é a Caatinga, classificada como uma floresta neotropical sazonalmente seca, localizada em áreas de alta evapotranspiração (1.500 – 2.000 mm/ano), baixa precipitação (300 – 1000 mm/ano), em solos férteis, levemente ácidos (DRYFLOR, [s.d.]; LIMA et al., 2018a). A precipitação, em escala regional, é o principal controlador para o comportamento caducifólio/semicaducifólio da vegetação da caatinga, com a biomassa podendo variar entre um nível próximo ao de savana ($NDVI \pm 0.2$) ou próximo ao de Florestas Úmidas ($NDVI \pm 0.8$) (FERNANDES *et al.*, 2022; SOUZA e HOOKE, 2021).

A sazonalidade afeta a conectividade, um conceito teórico ideal para estudos geomórficos, que se inicia na ecologia para definir o transporte de matéria, energia e organismo por meio da água (LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2020). O termo conectividade acabou sendo utilizado, primeiro, na análise fluvial para determinar quais partes do sistema fluvial estão conectadas. Já a conectividade sedimentológica é o transporte, por meio da água, de solo e sedimentos ao longo da paisagem, e pode ser medido com base na relação entre a fonte dos sedimentos e o local de depósito temporário e permanente (HOOKE, 2003).

A encosta, enquanto fonte de sedimentos, difere do canal na dinâmica e nos controladores. Essa relação vai ser chamada de ligações laterais, aqui o transporte de sedimentos é relacionado à estabilidade da encosta e dos movimentos de massa. Enquanto os principais controladores da dinâmica são a declividade e a morfologia da encosta, a geologia, a vegetação e as atividades animais e antrópicas (BRIERLEY e FRYIRS, 2006; LU et al., 2019).

Assim, a conectividade é controlada, principalmente, por uma relação entre precipitação - escoamento superficial – “discharge”, que acabam sendo os responsáveis pelo comportamento de rios efêmeros e intermitentes (SOUZA e HOOKE, 2021). A conectividade, no semiárido, ainda pode ser dividida em processos de encosta e processos fluviais. Em encostas, a densidade da vegetação e o uso do solo são os principais controladores de fluxo; nos ambientes fluviais o fluxo ocorre em enchentes, nos rios efêmeros e com o nível do lençol aluvial. Essa dinâmica de chuvas e sua influência na vegetação

produzem grandes níveis de escoamento superficial, consequentemente maiores índices de conectividade (SOUZA e ALMEIDA, 2015).

Incêndios e dinâmica ambiental

Incêndios são considerados como um fator abiótico e também antrópico, capaz de influenciar e ser influenciado pelo entorno. Fatores como temperatura, vento e topografia são determinantes para a duração e recorrência dos incêndios. Já para o início do fogo é necessário algum tipo de ignição, normalmente causada por raios e mais comumente fatores antrópicos (90%), como afirma Santos *et al* (2006).

O fogo pode acarretar diversas alterações ambientais, a mais visível é a redução da biomassa, formando cinzas e carvão. Alterações nas propriedades químicas do solo, criando uma camada impermeável que varia de tamanho de acordo com o tipo de solo e intensidade do fogo (BOND e KEANE, 2017; HALLEMA., 2017; STAVI, 2019). Esses fatores vão causar elevações no escoamento superficial e transporte de sedimentos, diretamente aumentando a conectividade.

A dinâmica da conectividade, em uma floresta como a caatinga que está localizada em uma região caracterizada por uma distribuição irregular da chuva, baixa umidade e altas temperaturas, fatores que são determinantes para a ocorrência de incêndios florestais (ALVES *et al.*, 2021). Somando-se a estes fatores está a grande disponibilidade de combustível que uma floresta neotropical seca contém, levando a incêndios de grande intensidade (SILVA JUNIOR e PACHECO, 2021; STAVI, 2019).

Assim, a caatinga sofre com incêndios e sua maioria de causa antrópica, pois não é um bioma naturalmente adaptado ao fogo e suas árvores lenhosas são advindas de área de cerrado (LIMA *et al.*, 2018). Enquanto alguns biomas, como o cerrado, são adaptados ao fogo por meio de vários artifícios, como cascas mais grossas e protegidas por cortiças (LIMA *et al.*, 2018).

TABELA 2: Focos de queimadas na caatinga entre 2000 e 2020.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Máximo	1283	335	404	259	283	370	704	1907	7234	8722	8451	7400
Média	506	154	136	84	94	141	325	1022	3380	4985	3955	2597
Mínimo	16	30	5	28	15	34	73	292	1117	2080	984	494

Fonte: INPE.

Os dados obtidos entre os anos de 1998 e 2022, no monitor de queimadas para a cantiga, do INPE (Tabela 2), colocam os meses de agosto a dezembro como os com as maiores quantidades de focos de queimadas, corroborando com os dados de risco de incêndios obtidos por SANTANA et al. (2011). Os dados também coincidem com os meses historicamente mais secos do semiárido brasileiro.

As alterações que os incêndios florestais causam na vegetação e no solo, levam a uma redução nas taxas de interceptação da chuva e elevação nas taxas de escoamento superficial, afetando diretamente o transporte de sedimentos, proporcionando maior fluxo no canal e ocasionando um aumento na conectividade (HALLEMA, 2017; STAVI, 2019).

Os impactos na conectividade podem ser analisados com a aplicação de fórmulas matemáticas sobre dados de altimetria e uso do solo, resultando em index que determinam os padrões de conectividade da área. Para incêndios também são utilizados dados de severidade do fogo. Alguns trabalhos que produziram dados sobre o impacto de incêndios na conectividade são: (LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2020; MARTINI *et al.*, 2020; ORTÍZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2019.)

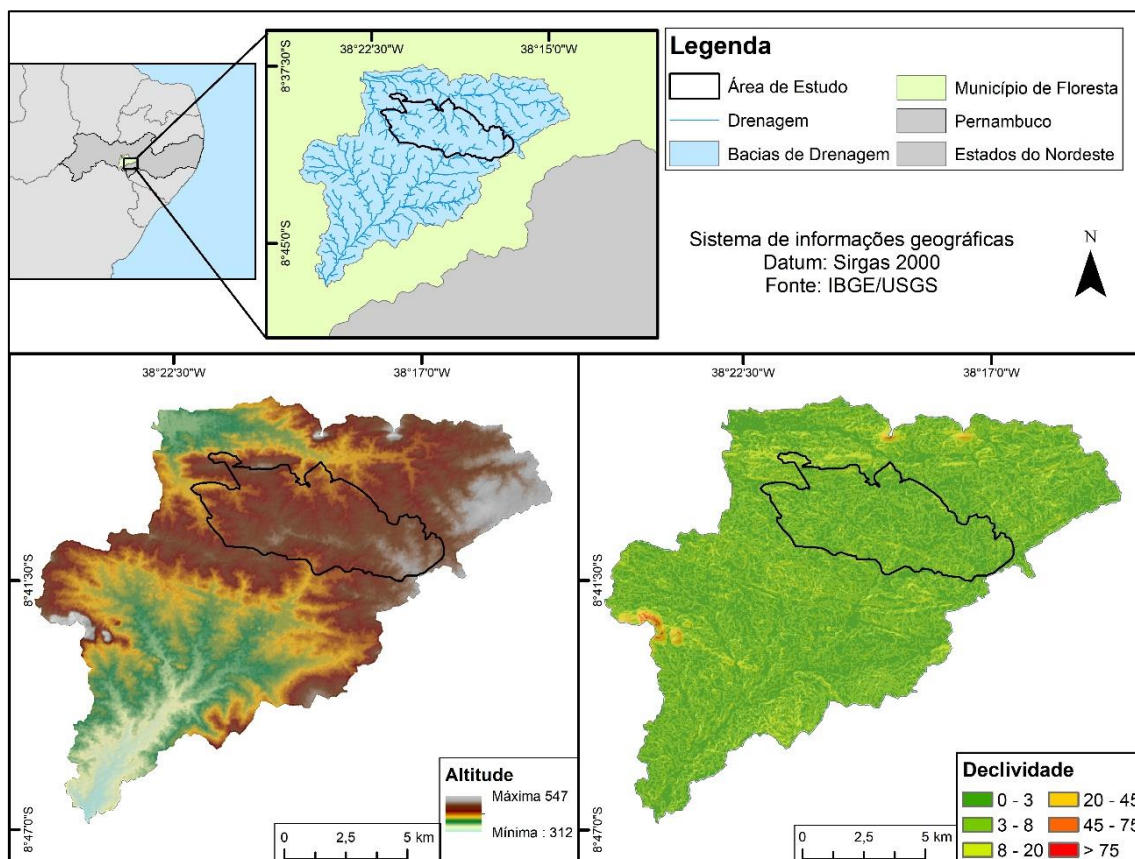
As respostas de órgãos governamentais aos incêndios são as aplicações das Práticas de Manejo Pós Fogo, técnicas de manejo que visam reduzir a velocidade do escoamento superficial, a erosão dos solos, a remoção de sementes e o transporte partículas, reduzindo a conectividade (LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2021; LÓPEZ-VICENTE, 2018). A construção de barragens de base zero, barreiras com troncos, são algumas técnicas utilizadas, que reduzem conectividade. Porém, outras técnicas são a remoção de árvores mortas de florestas queimadas (*Post Fire Logging*) e a criação de estradas temporárias para a remoção desta madeira (*Skid Trails*) (NEMENS *et al.*, 2019). Estas aplicações, porém, acabam provocando um aumento nos índices de erosão devido a compactação do solo e fluxos superconcentrados que acabam

aumentando à conectividade por toda a bacia (LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2021; NEMENS *et al.*, 2019). De maneira geral, tanto a própria dinâmica natural, quanto a resposta antrópica após o fogo são fatores na alteração da conectividade.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está localizada no município de Floresta, no semiárido pernambucano. A área foi afetada por um incêndio (Figura 1) entre os dias 4 e 9 de novembro de 2019, afetando, aproximadamente, 29 km².

Figura 1: Mosaico de Mapas de Localização, Modelo Digital de Elevação e Declividade.



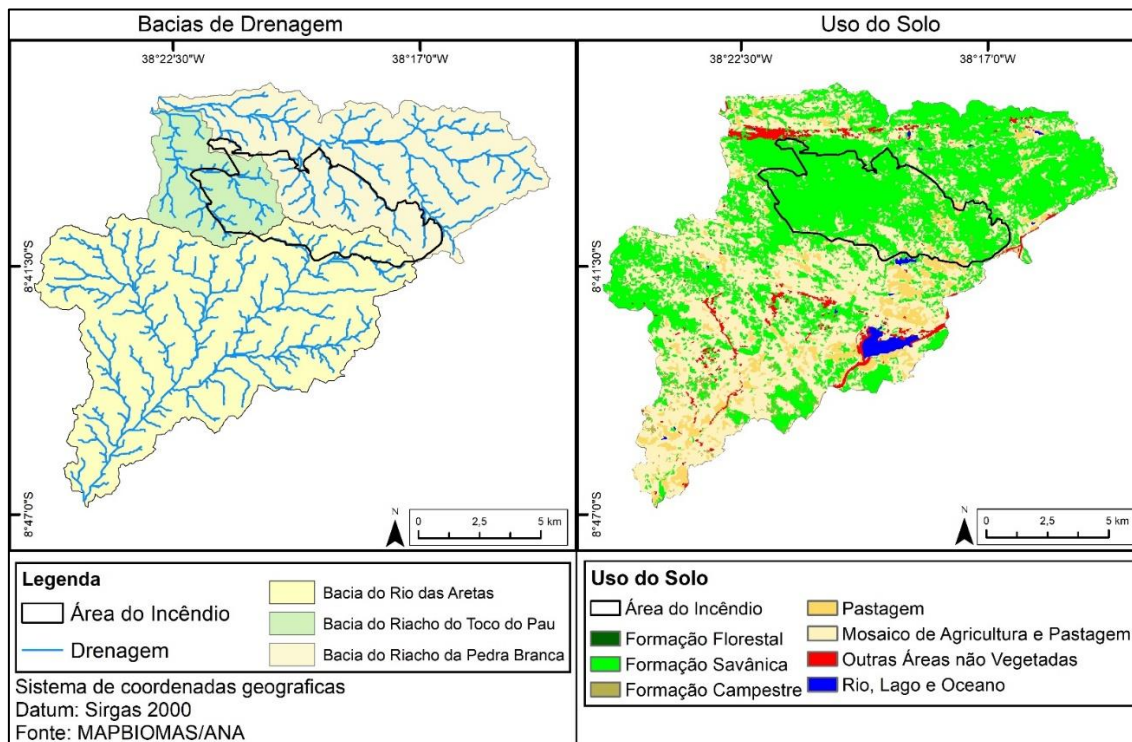
Fonte: Autor.

A área apresenta altitude entre 358 e 414m e amplitude altimétrica de 56m. Enquanto a declividade apresenta valores baixos entre 0 e 8% na maior parte da área, com poucos trechos ultrapassando os 8%. A dinâmica geológica é composta por rochas metamórficas do tipo gnaiss e ortognaiss do complexo Belém do São Francisco.

Segundo os dados do MAPBIOMAS (Figura 2), a maior parte da área de estudo é formada por formações savânica e campestre que vão ser trabalhadas, respectivamente, como caatinga arbustiva densa e caatinga arbustiva esparsa, com alguns trechos compostos por agricultura e pastagem. Além disso, a área

está dentro da delimitação de três diferentes sub-bacias, que são: a bacia do Riacho Aretas, ao sul; e as bacias do Riacho Toco do Pau e da Pedra Branca, que fazem parte da sub-bacia do Riacho do Navio, ao norte (Figura 3).

Figura 2: Mapas de Uso e Cobertura do solo (2019) e das Bacias Hidrográficas.

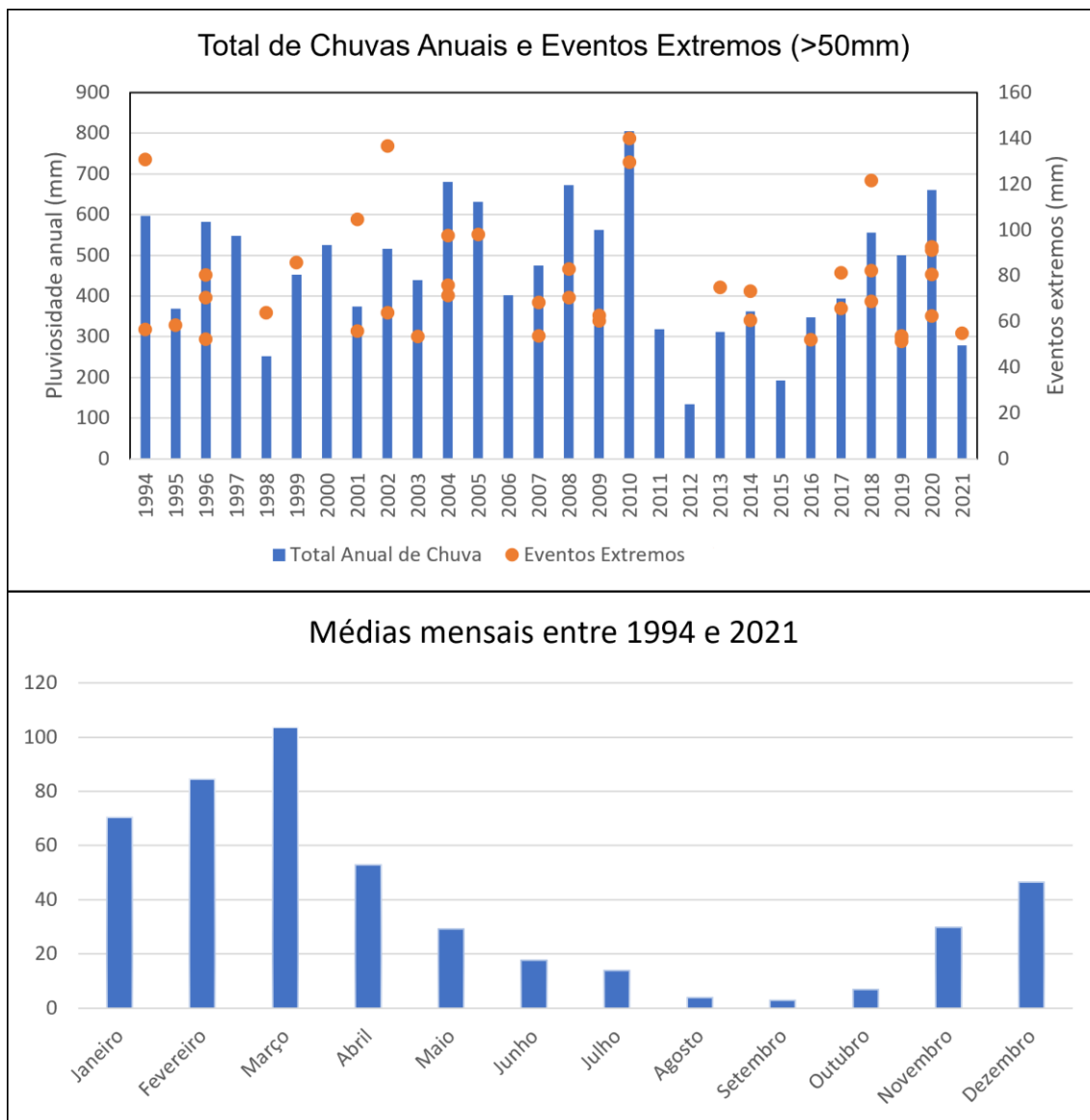


Fonte: Autor.

Utilizando os dados pluviométricos do município de Floresta-PE, obtidos no site da ANA, foi possível obter os gráficos da média mensal de chuva total, do total de chuva anual e a ocorrência de eventos extremos (Figura 3), maiores que 50mm em um período de 24 horas, entre 1994 e 2021.

A pluviosidade anual entre os anos analisados variou entre 800mm no ano de 2010 e aproximadamente 125mm no ano de 2012. A média da amostra atingiu os 462mm. Já os eventos extremos (maiores que 50mm e que podem produzir escoamento superficial) ocorreram em 24 dos 28 anos analisados.

Gráfico 1: Mosaicos dos gráficos do total de chuva anual, eventos extremos e médias mensais.



Fonte: Autor.

Durante o período do incêndio, entre 4 e 9 de novembro de 2019, não foram registrados eventos de chuva. A precipitação em todo o mês de novembro foi 36mm, ocorrendo 17 dias após o incêndio, em 26 de novembro.

As maiores médias mensais foram entre os meses de janeiro a março, com o último ultrapassando os 100mm. As menores médias estão nos meses de agosto e setembro, atingindo aproximadamente 4mm.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para entender o impacto do incêndio sobre a conectividade, é necessário delimitar o local das drenagens e as áreas das respectivas bacias de hidrográficas existentes na área de estudo. Com esse objetivo, foram utilizadas as imagens do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para obtenção, com auxílio do software ArcMap 10.8, da declividade, com resolução espacial de 30m.

A obtenção dos dados da área queimada foi obtida utilizando imagens, das bandas 4 e 5, providas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), do sensor OLI, presente no satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros. Seguindo a metodologia proposta por Key e Benson (2006) foram coletadas imagens do período pré-fogo (31/10/2019) e pós-fogo (16/11/2019). Logo após, utilizando os índices de *normalized burn ratio* - NBR (Equação 1) (KEY e BENSON, 2006) e *delta NBR* (Equação 2) (PARKS; DILLON; MILLER, 2014), foi obtido a delimitação da área de incêndio.

Equação 1: Índice Normalizado de Incêndios (NBR).

$$NBR = (B5 - B7) / (B5 + B7)$$

Equação 2: Delta NBR (dNBR).

$$dNBR = (NBR_{(pré-fogo)} - NBR_{(pós-fogo)})$$

Para o NBR são utilizadas as bandas do infravermelho próximo (B5) e do infravermelho de ondas curtas 2 (B7). As respectivas bandas são escolhidas por terem respostas opostas ao fogo, enquanto a B5 tende a diminuir a refletância após o fogo, a B7 aumenta a reflectância após o fogo.

O delta NBR (dNBR) é utilizado para identificar a severidade do fogo na área, para isso é obtido a diferença entre o NBR anterior ao fogo e o NBR posterior ao fogo. Para classificar a intensidade, foi utilizando da classificação supervisionada e o algoritmo de distância mínima presentes no software arcmap 10.8.

A severidade do fogo foi aferida utilizando o dNBR, com o objetivo de obter maior precisão dos dados em escalas espaciais (MILLER e THRONE, 2007; MARTINI et al, 2020). O mapeamento de uso do solo foi obtido através da coleção 7, fornecida pelo MAPBIOMAS, com resolução espacial de 30 metros.

Para o cálculo do índice de conectividade foi utilizado o programa SedinConnect v2.3 (CREMA e CAVALLI, 2018), com a fórmula (Equação 3) proposta pelo (BORSELLI *et al*, 2008) relacionando a parte superior da encosta (numerador) com a parte inferior da encosta (denominador). Os valores variam de $-\infty$ a $+\infty$, com os valores menores significando menor capacidade do ambiente gerar escoamento superficial e reduzida conexão entre a área produtora de sedimentos e o canal fluvial.

Equação 3: Índice de Conectividade (IC).

$$IC = \log_{10}\left(\frac{w \times s \times \sqrt{A}}{\sum \frac{d}{W \times S}}\right)$$

Os elementos presentes no numerador da Equação 3 são: “w” que representa a resistência da rugosidade da superfície, no caso valores relacionados ao fator C; o “s” é a média da declividade da área contribuinte (m/m); o “A” representa a área contribuinte (m²). O denominador estima a distância de viagem do sedimento, utilizando os seguintes dados: o “W” é o coeficiente de uso do solo; o S representa a declividade (m/m); e o “d” representa a distância até a drenagem principal.

O “W” tem os valores variando entre 0,001 e 1 (Tabela 2), relacionando a capacidade da cobertura do solo influenciar no aumento ou diminuição da conectividade. As áreas com menores valores são referentes ao solo coberto por vegetação e áreas expostas tendem a valores maiores (ORTÍZ-RODRÍGUEZ *et al*, 2019).

Tabela 2: Valores para o W.

Formação Florestal	0.001
Caatinga Arbustiva Densa	0.045
Caatinga Arbustiva Esparsa	0.040
Pastagem	0.150
Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.125
Outras Áreas Não Vegetadas	0.900
Incêndios de Alta Severidade	0.950
Incêndios de Média Severidade	0.056
Incêndios de Baixa Severidade	0.001

Para a obtenção dos valores do “W” foram utilizados os valores obtidos por ORTÍZ-RODRÍGUEZ *et al.* (2019), seguindo valores distintos para as áreas de uso e cobertura do solo e áreas que sofreram queimadas. Estas vão produzir valores menores para as áreas com baixa severidade e maiores nas áreas de maior severidade.

Para compreender os impactos do fogo na resposta da vegetação, foram utilizados os satélites Landsat-8, sensor OLI, nas bandas do vermelho (B3) e infravermelho próximo (B4), com resoluções de 30, respectivamente, nessas imagens foi aplicado o índice normalizado diferencial de vegetação (NDVI) (equação 4).

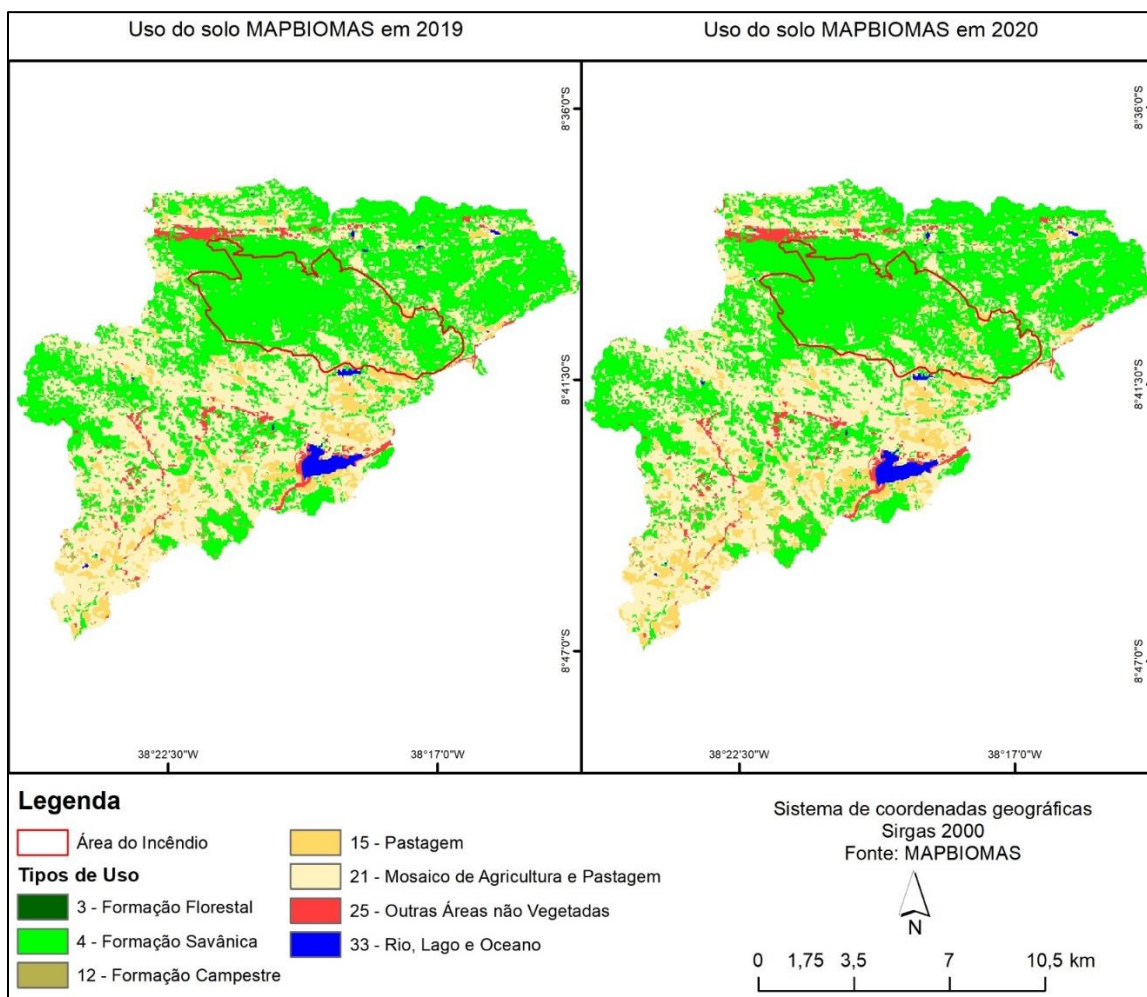
Equação 4: EQUAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO NDVI.

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de uso do solo fornecidos pelo MAPBIOMAS nos anos de 2019 e 2020 (Figura 3) demonstram diferença praticamente nula entre os anos. As variações podem, inclusive, serem atribuídas a erros dos próprios instrumentos de medição e/ou metodologia. A área que sabidamente foi afetada pelo incêndio no ano de 2019, não apresenta nenhum tipo de alteração.

Figura 3: Mosaico com o uso e ocupação do solo em 2019 e 2020.



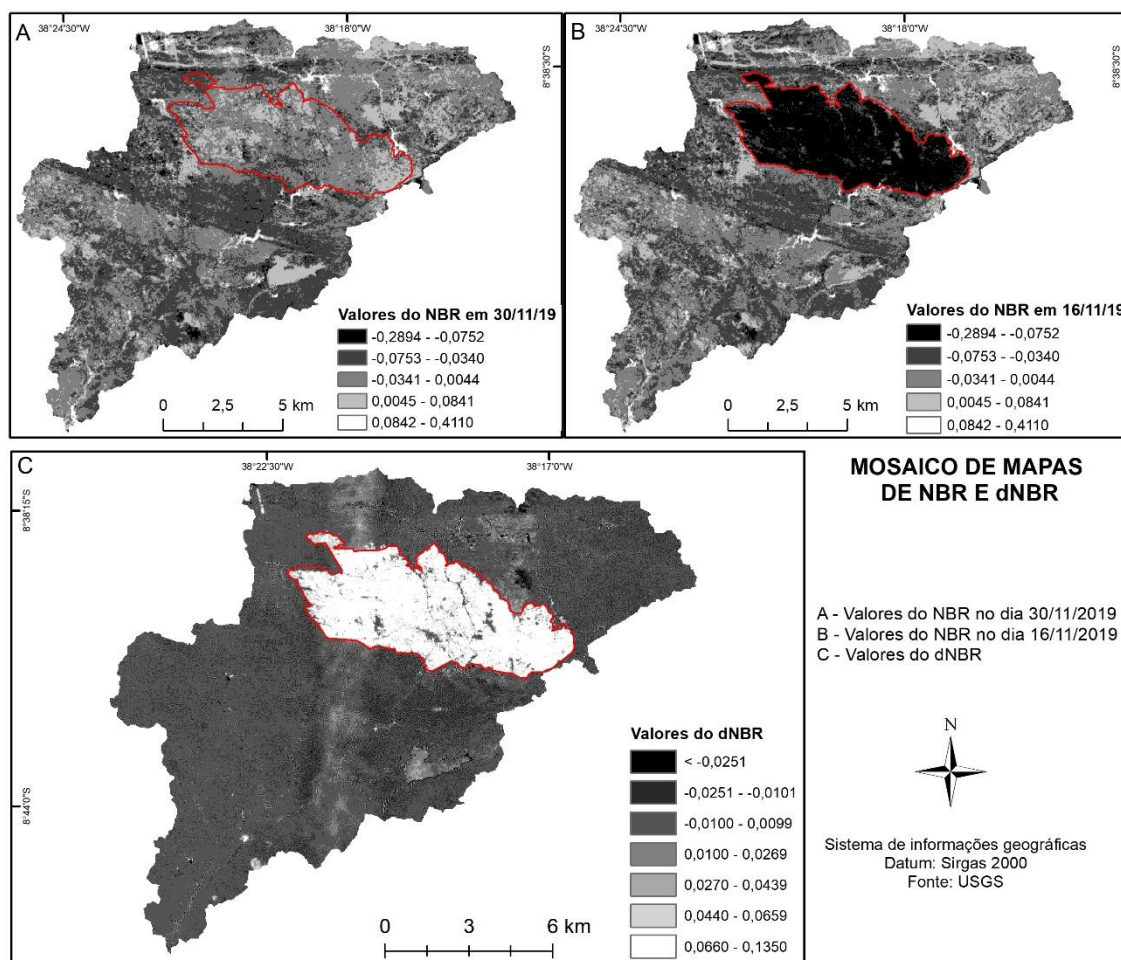
Na Tabela 3, estão os valores em km² e porcentagem dos usos do solo obtido nas imagens do MAPBIOMAS. A variação entre as imagens atinge um máximo de 0,98% para o uso do tipo pastagem e -0,97 para o uso do tipo mosaico de agricultura e pastagem, variações estas que não demonstram a existência do incêndio que atingiu 29,1 km².

Tabela 3: Dados de uso do solo nas imagens de 2019 e 2020 do MAPBIOMAS.

Uso do Solo 2019			Uso do Solo 2020			Diferença	
Tipo de Uso	Area km ²	%	Tipo de Uso	Area km ²	%	Área km ²	%
Formação Florestal	0,0126	0,01%	Formação Florestal	0,0135	0,01%	0,0009	0,00%
Formação Savânica	86,9031	47,89%	Formação Savânica	86,9724	47,93%	0,0693	0,04%
Formação Campestre	1,9044	1,05%	Formação Campestre	1,9089	1,05%	0,0045	0,00%
Pastagem	13,0977	7,22%	Pastagem	14,868	8,19%	1,7703	0,98%
Mosaico de Agricultura e Pastagem	73,3446	40,42%	Mosaico de Agricultura e Pastagem	71,5932	39,45%	-1,7514	-0,97%
Outras Áreas Não Vegetadas	4,4964	2,48%	Outras Áreas Não Vegetadas	4,4865	2,47%	-0,0099	-0,01%
Rio, Lago e Oceano	1,7112	0,94%	Rio, Lago e Oceano	1,6272	0,90%	-0,084	-0,05%
Total	181,47	100%	Total	181,47	100%		

As imagens geradas através do NBR e dNBR (Figura 4) mostram as mudanças ocorridas por influência do evento. Os valores de NBR anterior ao evento variam entre 0.42 e -0.19, após o evento os valores mínimos atingem -0.28. Essa alteração é mais notável no dNBR, com as duas classes com valores mais baixos representando os valores positivos que segundo KEY e BENSON (2006) são as áreas de incêndios.

Figura 4: Mosaico do NBR dos dias 30/10/2019 (A), 16/11/2019 (B) e dNBR (C).



Fonte: Autor.

Estes valores também são utilizados para estimar a intensidade do fogo, a qual foram encontradas intensidades médias e altas, representando os valores positivos que, segundo KEY e BENSON (2006) são as áreas de incêndios. Valores que também são utilizados para estimar a intensidade do fogo, a qual foram encontradas intensidades médias e altas, baseado nos valores propostos pelo USGS Firemom program.

Após estimar a intensidade do fogo, foi feita uma comparação entre os valores de uso do solo da bacia anterior e posterior ao evento e suas diferenças (Tabela 3). Os principais usos do solo encontrados foram caatinga arbustiva densa (47,97%), mosaico de agricultura e pastagem (40,62%) e apenas pastagem (7,11%).

Tabela 4: Valores de uso do solo anteriores e posteriores.

Valores Pré Incêndio			Valores Pós Incêndio			Diferença Entre Pós-Pré	
Tipo de Uso do Solo	Área Km ²	%	Tipo de Uso do Solo	Área Km ²	%	Área Km ²	%
Formação Florestal	0,01	0,01%	Formação Florestal	0,01	0,01%	0	0,00%
Caatinga Arbustiva Densa	87,15	47,97%	Caatinga Arbustiva Densa	64,4	35,45%	-22,75	-12,52%
Caatinga Arbustiva Esparsa	1,73	0,95%	Caatinga Arbustiva Esparsa	1,53	0,84%	-0,2	-0,11%
Pastagem	12,92	7,11%	Pastagem	11,92	6,56%	-1	-0,55%
Mosaico de Agricultura e Pastagem	73,79	40,62%	Mosaico de Agricultura e Pastagem	68,7	37,82%	-5,09	-2,80%
Outras Áreas Não Vegetadas	4,36	2,40%	Outras Áreas Não Vegetadas	4,36	2,40%	0	0,00%
Água	1,7	0,94%	Água	1,7	0,94%	0	0,00%
			Incêndios de Alta Severidade	17,54	9,66%	17,54	9,66%
			Incêndios de Média Severidade	11,5	6,33%	11,5	6,33%
Total	181,66	100%	Total	181,66	100%		

Fonte: Autor.

Os valores posteriores sofreram a alteração de 15,99% que são referentes ao incêndio, desses 9,66% foi considerado de alta intensidade e 6,33% de média intensidade. A área que sofreu a maior redução foi a caatinga arbustiva densa, com redução de 12,52%, o que é explicado por este uso ser o predominante dentro da área do incêndio de fato.

Essa consideração acaba sendo importante por ser dentro da caatinga arbustiva densa onde os incêndios mais intensos foram localizados. Os mosaicos de agricultura e pastagem e áreas não vegetadas acabaram respondendo com severidades mais baixas. Na caatinga, historicamente, os períodos no final da estação seca e no início da estação chuvosa, justamente os momentos de coivara e rebrota.

A relação direta entre intensidade do fogo e as áreas com a cobertura arbustivo-arbórea mais densa são determinantes para o resultado do índice de conectividade, pois vão possuir a maior diferença, 0.905, no dado de entrada (W).

Como já esperado, os valores de conectividade tenderam para um aumento após o evento. O índice de conectividade mantém aproximadamente os mesmos valores mínimos, mas sofre um aumento considerável dos valores maiores, com um aumento de 28% nos valores máximos, após o evento (Tabela 4). A média dos valores de conectividade aumentou à medida que a amplitude dos resultados foi maior.

Tabela 5: Valores da conectividade.

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
IC pré incêndio	-11,9728	1,4852	-7,7422	0,7558
IC pós incêndio	-11,9731	1,9077	-7,5944	0,7852

Fonte: Autor.

Corroborando com a tendência acima, estão os valores encontrados ao fazer a diferença entre pós e pré evento, onde tudo, exceto a área do evento, sofre pouca ou nenhuma variação. Enquanto as regiões afetadas pelo incêndio sofrem as maiores diferenças, atingindo picos de 2.96 (Figura 6), justamente onde a vegetação arbustiva densa foi removida devido à alta intensidade do fogo.

A parte oeste foi a mais atingida por incêndios severos, sofrendo a maior redução de dossel, além dos fatores naturais da vegetação xerófila não possuir cobertura foliar anterior à chuva. O impacto sobre os solos acaba sendo reduzido por se tratar de um solo tipo luvisolo crômico, que possui alto teor de argila, sendo menos propício a sofrer selagem, principalmente nos locais de incêndios de média intensidade (STAVI, 2019).

Os resultados envolvendo o índice de conectividade hidrológica demonstram a tendência ao aumento da conectividade nas áreas afetadas pelo fogo, resultados semelhantes aos resultados que foram obtidos por (MARTÍNEZ-MURILLO e LÓPEZ-VICENTE, 2016; ORTÍZ-RODRÍGUEZ *et al*, 2019). A relação entre quantidade, potencial de poder calorífico e distribuição contínua do combustível são os fatores que controlam a intensidade do fogo.

Entre os dias de obtenção dos dados de satélite não ocorreram eventos de chuva. O evento mais próximo ocorreu no dia 26 de novembro, 17 dias após o evento (Gráfico 1), impactando as áreas que sofreram a remoção do dossel e remobilizando detritos derivados do incêndio, como carvão e cinzas, além de sedimentos. O transporte de detritos não queimados e cinzas são elementos com potencial de reduzir a conectividade a jusante, entretanto não é possível determinar sua influência sua via sensoriamento remoto.

Gráfico 2: Precipitação 120 dias após o evento.



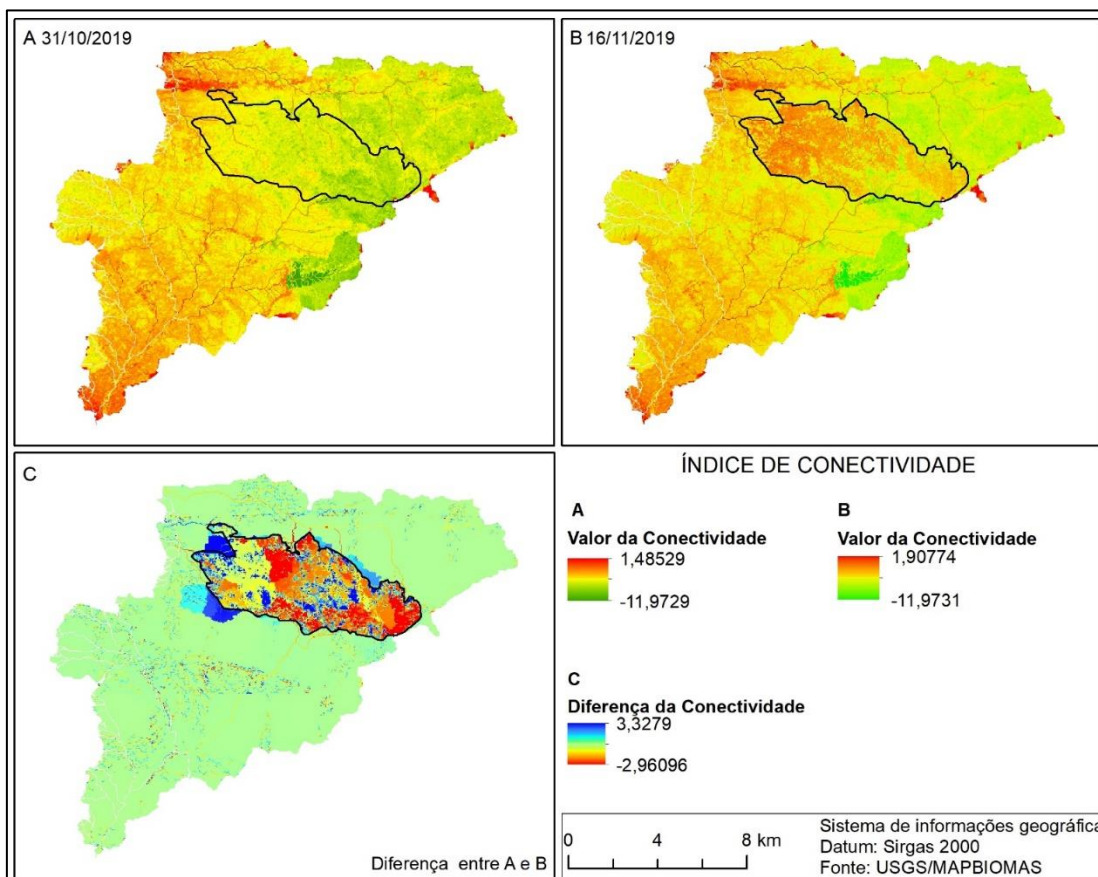
Fonte: Autor.

Segundo SOUZA e HOOK (2021), a conectividade aumenta principalmente em áreas degradadas. A remoção da vegetação e não adaptabilidade do bioma ao fogo são os principais agentes para o impacto do período chuvoso.

O impacto do período chuvoso foi extremo, já que nos meses que sucedem o evento (dezembro, janeiro, fevereiro e março) são encontrados as maiores médias de chuva (Figura 3) e os maiores eventos extremos. Tudo isso em uma área que não é mais capaz de recuperar a cobertura foliar mesmo na quadra chuvosa.

Além de tudo, a diferença da conectividade (Figura 6) espacializa e corrobora fato de toda a área do incêndio sofrer alteração para positiva nos valores de conectividade na maior parte e negativa em menor quantidade, com valores próximos de zero praticamente não existindo dentro do polígono.

Figura 5: Mosaico com os mapas de conectividade em 31/10/19 (A), 16/11/2019 (B) e a diferença de conectividade (C).



Fonte: Autor

A Figura 7 mostra o resultado do NDVI para a bacia em três momentos distintos: A, logo após o incêndio; B, 9 meses após o incêndio; C, 3 anos após o incêndio. Os resultados mostram um certo grau de recuperação da vegetação, com as áreas que possuíram os incêndios mais intensos possuindo as taxas de recuperação mais lenta.

Esse resultado concorda com o obtido por SAMPAIO (1998), que ao estudar a recuperação da caatinga após a remoção sem fogo e com fogo, demonstra a dificuldade da vegetação de caatinga se recuperar quando sofre esse tipo de impacto, principalmente em intensidades mais altas. No seu trabalho, mesmo após seis anos, a caatinga não demonstra a mesma densidade de indivíduos, muito embora algumas espécies como a *Mimosa tenuiflora*

(Jurema Preta) e o *Bauhinia cheilanta* (Mororó) apresentem respostas mais rápidas ao fogo.

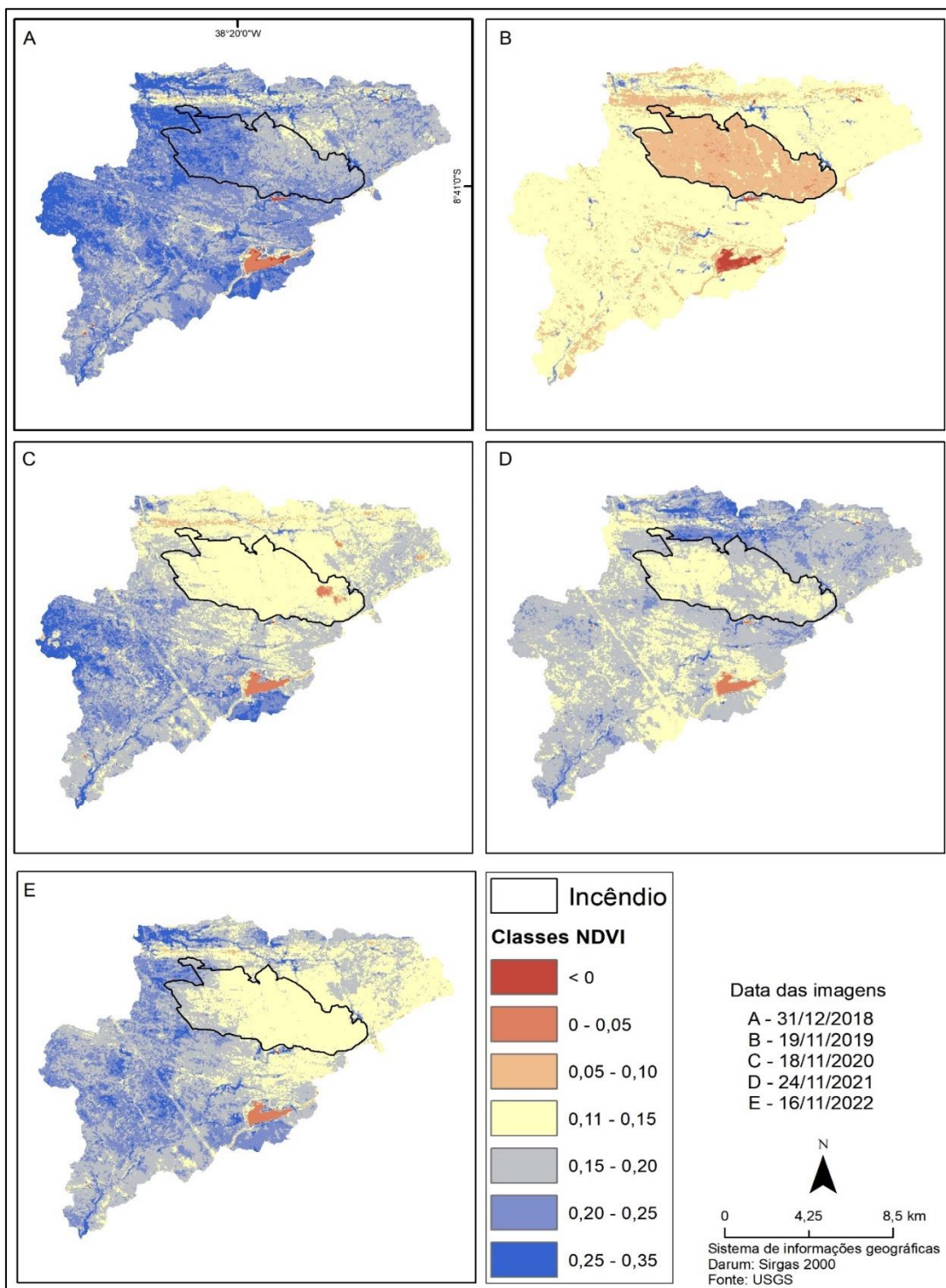
Para efeito de comparação, os trabalhos de SAMPAIO (1998) e ALVES *et al* (2013) demonstram a capacidade de recuperação natural da vegetação natural caatinga, com valores de densidade entre 25% e 40% da quantidade original dentro de um período de 6 anos. Embora ocorra certa recuperação de densidade arbórea, a diversidade de espécies se torna reduzida, sendo a *Poincianella bracteosa* (Catingueira), a *Croton sonderianus* (Marmeleiro) e a *Bauhinia cheilanta* (mororó) as espécies que tiveram recuperações mais relevantes (ALVES, 2013).

Quando comparado com as áreas que sofreram incêndio, a densidade das espécies em geral não ultrapassa os 15% (SAMPAIO *et al*, 1998). Esse valor ainda sofre a variação de acordo com a intensidade do incêndio, assim como espécies que tendem a se recuperar.

Em incêndios de baixa e média intensidade, a Jurema Preta e a Catingueira são as espécies que mais tem aumento da densidade. Em incêndios de alta intensidade, a única espécie que sofre aumento de densidade é o Mororó, atingindo mais que o dobro dos valores iniciais (SAMPAIO *et al*, 1998).

Os valores de NDVI mais elevados em 2023 (Figura 7) se dão por uma maior taxa de pluviosidade nos meses de janeiro e fevereiro. Dentro do polígono do incêndio ocorreu um aumento dos valores de NDVI, possivelmente causados pela rebrota de gramíneas, mas ainda com valores muito abaixo dos anteriores.

Figura 6: Mosaico com os mapas de NDVI em 31/12/2018 (A), 19/11/2019 (B), 18/11/2020 (C), 24/11/2021(D), 16/11/2023 (E).



Fonte: Autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No incêndio estudado, prevaleceram as intensidades médias e altas, que podem ser explicadas pelo alto poder calorífico das plantas, velocidade de propagação, elevada presença de biomassa e baixa pluviosidade.

Como consequência da intensidade do fogo, os valores de conectividade tiveram mudanças em todo o polígono, normalmente tendendo para o aumento de conectividade. No trabalho ficou constatada a limitação dos valores de entrada de rugosidade, foram criados para áreas de florestas contínuas, alguns usos possuem valores de entrada para rugosidade do terreno maiores que os valores de incêndio de intensidade média, por exemplo.

A capacidade de recuperação da caatinga para áreas afetadas pelo fogo foi lenta na medida que em quase quatro anos após o incêndio os valores não retornaram para níveis pré-incêndio. Na literatura, existe pouquíssimos trabalhos sobre a temporalidade para a recuperação da caatinga, os trabalhos encontrados atingem os seis anos de monitoramento e a o nível de biomassa muito abaixo dos valores anteriores.

REFERÊNCIAS

Alves, F. T. "Regeneração natural de uma área de caatinga no sertão Pernambucano, nordeste do Brasil." **Cerne** **19**, v. 19, n. 2, p. 229-235, abr-jun. 2013.

ALVES, J. M. B. Um Estudo de Focos de Calor no Bioma Caatinga e suas Relações com Variáveis Meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 513–527, set. 2021.

BOND, W.J.; KEANE, R.E., 2017. Fires, ecological effects of. **Reference module in life sciences**, p. 435-442, 2013.

BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 268–277, nov. 2008.

BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, n. 2, p. 165–174, jun. 2006.

CARVALHO, A. T. F. Caracterização climática da quadra chuvosa de município do semiárido brasileiro, entre os anos de 2013 a 2017. **Geografia em Atos (Online)**, v. 2, n. 17, p. 04–23, 10 abr. 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2ª edição, São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2002

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 3. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93 – 148.

CREMA, S.; CAVALLI, M. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. **Computers and Geosciences**, v. 111, p. 39–45, 1 fev. 2018.

DRYFLOR. Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/>>.

FERNANDES, M. F. et al. The Origins and Historical Assembly of the Brazilian Caatinga Seasonally Dry Tropical Forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 10, fev. 2022.

HALLEMA, D. W. Regional patterns of postwildfire streamflow response in the Western United States: The importance of scale-specific connectivity. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 14, p. 2582–2598, 1 jul. 2017.

HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: A review. **Climatic Change**, v. 112, p. 243-251, maio 2012.

HOOKE, J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: A conceptual framework and methodology. **Geomorphology**, v. 56, n. 1–2, p. 79–94, 15 nov. 2003.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. **LA-1 Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods**. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/>>.

LIMA, N. E. DE et al. Caracterização e história biogeográfica dos ecossistemas secos neotropicais. **Rodriguésia**, v. 69, n. 4, p. 2209–2222, 2018.

LÓPEZ-VICENTE, M.; GONZÁLEZ-ROMERO, J.; LUCAS-BORJA, M. E. Forest fire effects on sediment connectivity in headwater sub-catchments: Evaluation of indices performance. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 1-16, 2020.

LÓPEZ-VICENTE, M.; KRAMER, H.; KEESSTRA, S. Effectiveness of soil erosion barriers to reduce sediment connectivity at small basin scale in a fire-affected forest. **Journal of Environmental Management**, v. 278, p. 1-14, 2021.

LU, X. et al. Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope. **Science of the Total Environment**, v. 655, p. 1479–1494, mar. 2019.

MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; LÓPEZ-VICENTE, M. Modelling hydrological connectivity in burned areas: A case study from South of Spain. **FLAMMA**, v. 7, n. 3, p. 5-9, 2016.

MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; LÓPEZ-VICENTE, M. Effect of Salvage Logging and Check Dams on Simulated Hydrological Connectivity in a Burned Area. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 3, p. 701–712, 1 mar. 2018.

MARTINI, L. et al. Assessing the effect of fire severity on sediment connectivity in central Chile. **Science of the Total Environment**, v. 728, ago. 2020.

MIDDLETON, N. J.; STERNBERG, T. **Climate hazards in drylands: A review**. **Earth-Science Reviews**, nov. 2013.

Nemens, Deborah G.; Varner, J. Morgan; Johnson, Morris C. Environmental effects of postfire logging: an updated literature review and annotated bibliography. U.S. Department of Agriculture, 2019. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/>>.

ORTÍZ-RODRÍGUEZ, A. J.; MUÑOZ-ROBLES, C.; BORSELLI, L. Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, Mexico. **Science of the Total Environment**, v. 655, p. 112–128, 10 mar. 2019.

PARKS, S. A.; DILLON, G. K.; MILLER, C. A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1827–1844, 2014.

PHILLIPS, J. D. Synchronization and scale in geomorphic systems. **Geomorphology**, n. 137, p. 150-158, 2012.

SACO, P. M.; WILGOOSE, G. R.; HANCOCK, G. R. Eco-geomorphology of banded vegetation patterns in arid and semi-arid regions. **Hidrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1717-1730, 2007.

Sampaio, E.V.S.B., Araújo, E.L., Salcedo, I. H. & Tiessen, H. Regeneração da vegetação de caatinga após corte e queima em Serra Talhada, PE. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 5, p. 621-632, 1998.

SANTANA, J. A. S. Determinação dos períodos críticos de ocorrência de incêndios florestais na estação ecológica do seridó, Serra Negra do Norte-RN 1. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 1, p. 43-47, 2011.

SOUZA, J. O. P. DOS SISTEMAS AMBIENTAIS AO SISTEMA FLUVIAL-UMA REVISÃO DE CONCEITOS. **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 47, 2013.

SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. M. Processos fluviais em terras secas: uma revisão. **Revista OKARA: Geografia em debate** v. 9, n. 1, p. 108-122, 2015.

SOUZA, J.; HOOKE, J. Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 11, 2021.

SILVA, J. A.; PACHECO, A. DA P. Fire analysis in the caatinga environment from landsat-8 images, enhanced vegetation index and analysis by the main components. **Ciencia Florestal**, v. 31, n. 1, p. 417–439, 2021.

STAVI, I. Wildfires in grasslands and shrublands: A review of impacts on vegetation, soil, hydrology, and geomorphology. **Water**, v.11, n. 5, 1042-1062, 2019.