



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Análise da Eficiência de Índices Espectrais no Domínio Fitogeográfico Caatinga, Nordeste Brasileiro

Sara Sebastiana Nogueira¹, Sthéfany Carolina de Melo Nobre Alves², Christhian Santana Cunha³, Emanuel Araújo Silva⁴, Duberli Geomar Elera Gonzales⁵, Marco Antonio Diodato⁶, Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira⁷

¹Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – PPGCF, Laboratório de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manoel de Medeiros, s/n Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil, E-mail: sarassn7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9836-3894>;

²Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – PPGCF, Laboratório de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manoel de Medeiros, s/n Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil, E-mail: sthefanynobre.20@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1572-5579>;

³Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – PPGSR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 44202, Setor 5, 90501-900 - Porto Alegre, RS - Brasil, E-mail: christhianscunha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0755-6760>;

⁴Prof. Dr. Departamento de Ciência Florestal - DCFL, Área de Manejo Florestal e Utilização de Produtos Florestais, Laboratório de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manoel de Medeiros, s/n Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil, E-mail: emmanuel.araujo@ufrpe.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0711-5954>;

⁵Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – PPGCF, Laboratório de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manoel de Medeiros, s/n Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil, E-mail: dubereleira@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9854-840X> ;

⁶Prof. PhD. Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, BR 110 - Km 47 Costa e Silva, 59625900 - Mossoró, RN – Brasil, E-mail: diodato@ufersa.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9088-836X>;

⁷Prof. PhD. Departamento de Ciência Florestal - DCFL, Área de Manejo Florestal e Utilização de Produtos Florestais, Laboratório de Manejo Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Manoel de Medeiros, s/n Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil, E-mail: rinaldo.ferreira@ufrpe.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7349-6041>.

Artigo recebido em 03/04/2024 e aceito em 29/01/2025

RESUMO

A baixa precipitação favorece a propagação de queimadas, intensificando-se durante longos períodos de seca. O Sensoriamento Remoto é crucial para monitorar queimadas e incêndios florestais por meio de índices espectrais. Este estudo objetivou determinar e validar o Normalized Burn Ratio (NBR), no domínio fitogeográfico caatinga, em Floresta, Pernambuco. Foram avaliados quatro anos (2019-2022), considerando o período seco, chuvoso e a transição entre estes períodos. Utilizou-se imagens de satélite do Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. O processamento das imagens foi realizado no Google Earth Engine (GEE) e no Google Colaboratory (Colab). A severidade do fogo foi avaliada por meio do NBR antes e após os incêndios. O Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) foi usado como informação complementar ao NBR, com a finalidade de auxiliar no entendimento sobre os processos de recuperação da vegetação. A Análise de Variância foi aplicada aos índices SAVI e NBR com um nível de significância de 5%, seguida pelo Teste de Tukey para verificar diferenças entre os índices ao longo dos anos. O NBR variou entre -0,1067 a 0,3017, com índices mais baixos ou negativos no período seco e mais altos no chuvoso. O SAVI seguiu o mesmo padrão, variando entre 0,1207 e 0,4990. Observou-se diferença estatística significativa para 2022, tanto para o SAVI quanto para o NBR. Variáveis climáticas como altas temperaturas e baixas precipitações influenciaram na obtenção dos índices, que variaram ao longo dos meses. Ademais, as ações antrópicas contribuem na ocorrência de incêndios e alterações do meio, que são detectados e expressados pelos índices.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Queimadas; Incêndio florestal; Semiárido; Fogo.

Analysis of the Efficiency of Spectral Indices in the Caatinga Phytogeographic Domain, Northeastern Brazil

ABSTRACT

Low precipitation favors the spread of wildfires, intensifying during long periods of drought. Remote Sensing is crucial for monitoring wildfires and forest fires through spectral indices. This study aimed to determine and validate the Normalized Burn Ratio (NBR) in the Caatinga phytogeographic domain, in Floresta, Pernambuco. Four years (2019-2022) were evaluated, considering the dry, rainy, and transition periods. Satellite images from the Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A were used. Image processing was carried out in Google Earth Engine (GEE) and Google Colaboratory (Colab). Fire severity was assessed using the NBR before and after fires. The Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) was used as complementary information to the NBR to assist in understanding vegetation recovery processes. Analysis of Variance (ANOVA) was applied to the SAVI and NBR indices with a significance level of 5%, followed by Tukey's test to verify differences between indices over the years. The NBR ranged from -0.1067 to 0.3017, with lower or negative indices during the dry period and higher during the rainy period. The SAVI followed the same pattern, ranging from 0.1207 to 0.4990. A statistically significant difference was observed for 2022, both for SAVI and NBR. Climatic variables such as high temperatures and low precipitation influenced the indices obtained, which varied over the months. Furthermore, anthropogenic actions contribute to the occurrence of fires and environmental changes, which are detected and expressed by the indices.

Keywords: Remote Sensing; Wildfires; Forest fire; Semi-arid; Fire.

Introdução

O nordeste brasileiro, especificamente a região semiárida, apresenta como principal característica a sazonalidade das chuvas (Althoff et al., 2016). Em algumas regiões, os períodos de estiagem podem se estender por muitos meses. Na época em que as chuvas se encontram escassas ou mesmo nulas, a vegetação de caatinga possui peculiaridades, perdendo suas folhas e mantendo a biomassa remanescente com baixo teor de umidade, reduzindo a evapotranspiração (Brito et al., 2017; Henrique et al., 2016).

A baixa precipitação pluviométrica proporciona condições que podem vir a favorecer a propagação de queimadas (Vidal-Riveros et al., 2023). Comumente entre os meses de outubro e novembro acontece o aumento de áreas afetadas, pois neste período existem elementos climatológicos que influenciam neste aspecto (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [INPE], 2021). Podendo ainda ser evidenciado no período anual de estiagem, agravando-se nos longos períodos de seca (Minaki & Montanher, 2020). Segundo Eugenio e Santos (2021), quando se registra altas temperaturas do ar e de material combustível, aumenta-se a probabilidade de incêndios florestais, logo, fatores como umidade, temperatura e precipitação estão intimamente correlacionados com o acontecimento desses eventos.

Contudo, de acordo com Pivello et al., (2021) a Caatinga independe do fogo, pois a característica da vegetação em perder suas folhas, não proporciona fontes de ignição suficiente para que isto ocorra. Assim, um dos elementos que mais influenciam são as atividades antrópicas (Silva & Pacheco, 2021), por intermédio de queimadas

aplicadas de forma não manejada para o preparo e limpeza de áreas, que em grandes dimensões provocam a degradação dos solos e da cobertura vegetal, prejudicando a fauna e a biodiversidade local (Marques & Costa, 2020), podendo vir ainda a tornar-se em grandes proporções um incêndio florestal (Sausen & Lacruz, 2015).

Ademais, os incêndios florestais são caracterizados pela queima não controlada de combustíveis naturais, em grande propagação, consumindo os recursos provenientes da floresta como folhas, troncos, galhos, serrapilheira e a vegetação viva (Eugenio & Santos, 2021). Neste contexto, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza um sistema de detecção de queimadas por meio de imagens de sensores a bordo de satélites polares e geoestacionários, que se baseiam na identificação de “focos de calor”, utilizando pontos captados em uma área mínima de 900 m², com temperaturas superiores a 47 °C (Lazzarini et al., 2016).

Dado que os incêndios florestais são uma preocupação mundial, diversas entidades realizam o levantamento diário sobre os focos de incêndio, alguns ao nível nacional, como é o caso do INPE no Brasil e outros a nível global, exemplo disso é a Global Forest Watch (GFW, 2021). Neste aspecto, a utilização de técnicas de mapeamento, visando identificar a susceptibilidade de áreas a incêndios florestais, permite atenuar e prevenir possíveis danos provocados pelo fogo (Piao et al., 2022).

Dessa forma, utiliza-se satélites para o monitoramento e detecção de queimadas, por meio dos focos de calor produzidos na superfície terrestre, verificando-se a resposta espectral específica que as áreas afetadas emitem (Teobaldo & Baptista, 2016). Nesse contexto, o uso de

imagens de Sensoriamento Remoto, geradas por satélites, se torna uma imprescindível ferramenta, permitindo monitorar a vegetação, identificar as áreas queimadas e ainda dimensionar o dano provocado (Silva & Beltrão, 2021).

Ademais, aliado a isso, pode-se utilizar a plataforma do Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com>) em conjunto com o Google Colaboratory (Colab, <https://colab.research.google.com/>), que permitem o processamento de imagens de satélite por meio da nuvem, baseando-se em códigos, mediante um serviço de livre acesso, com facilidade para realização de upload de dados e funções, sem a necessidade de comprometer computadores locais, além de apresentar uma alta gama de aplicações em diversas áreas de estudo (Brandolini et al., 2021; Jardim et al., 2022; Li, 2022; Piao et al., 2022).

Conforme INPE (2021), no Brasil, em dezembro de 2021, o domínio fitogeográfico Caatinga, foi um dos mais afetados por incêndios, com 2.714 km² de área queimada em um total de 4.233 km² em todo o território brasileiro. Para o estado de Pernambuco, registrou-se, o equivalente a 840 e 1.017 focos de calor nos anos de 2019 e 2020, respectivamente. Pautado nas condições climáticas semiáridas em Pernambuco e das peculiaridades da vegetação de caatinga, principalmente em período de estiagem, se faz necessário a realização de estudos sobre a ocorrência histórica de queimadas e possivelmente de incêndios florestais na região.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é determinar e validar o índice de queimada Normalized Burn Ratio (NBR), no domínio

fitogeográfico Caatinga, no estado de Pernambuco, município de Floresta. Os objetivos específicos são: i) Estimar o índice de queimada para o município de Floresta, nos anos 2019, 2020, 2021 e 2022; ii) Verificar a ocorrência de incêndios na área e elaborar os mapas pré e pós incêndio, evidenciando as cicatrizes na referida área; iii) Quantificar o tamanho das áreas queimadas; iv) Realizar uma análise temporal de riscos de incêndios na região de estudo.

Material e Métodos

Área de Estudo

O trabalho foi realizado no município de Floresta (Figura 1) situada na região semiárida do estado de Pernambuco, na mesorregião do São Francisco Pernambucano, distante a 433 km da capital, Recife. Abrangendo uma área territorial de 3.604,948 km², com 30.137 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2022).

Conforme classificação climática de Köppen o clima é do tipo BSw'h', o qual é tido como muito quente, apresentando uma temperatura média anual de 26,1°C, com a estação chuvosa entre os meses de dezembro e abril e precipitação anual média de 500 mm. A vegetação corresponde ao domínio fitogeográfico da Caatinga, denominada Savana Estépica Arborizada (Brito et al., 2017). Caracterizando-se por duas formações, uma hiperxerófila arbustiva-arbórea, de forma densa e irregular, e outra floresta caducifólia, proveniente de áreas de brejo de altitude (Silva et al., 2013).

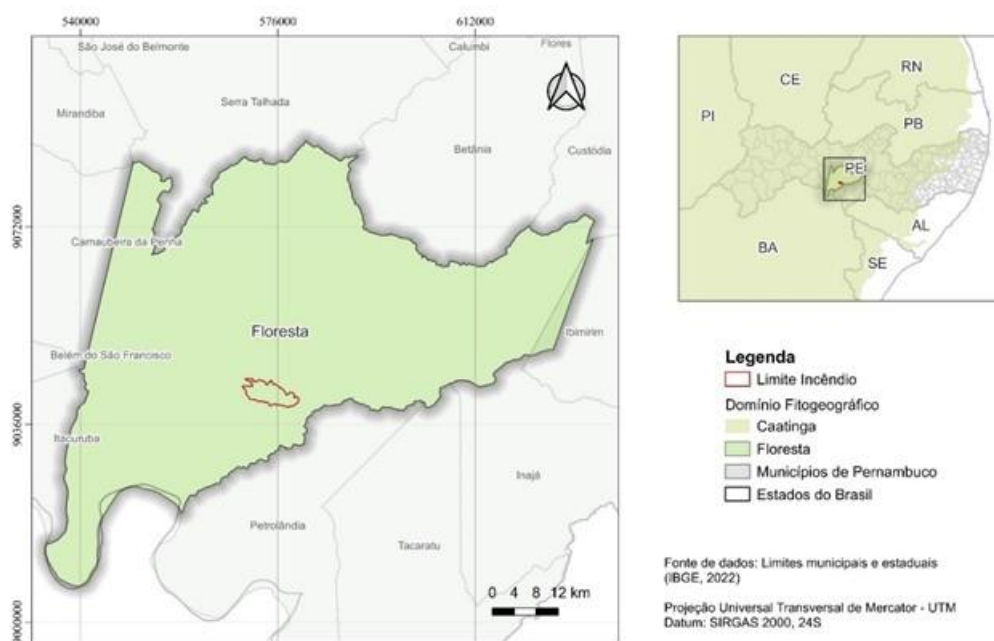


Figura 1. Localização da área de estudo, município de Floresta/PE.

Base de dados

Para realização do estudo, selecionou-se o município de Floresta, tendo em vista que este foi acometido por um incêndio em novembro de 2019, percorrendo uma área de aproximadamente 15 km², iniciando em 04/11/2019 até o dia 08/11/2019.

A motivação do incêndio ainda é desconhecida, acredita-se que esteja relacionado a queima de uma colmeia de abelhas dentro da mata em que características típicas do domínio Caatinga podem ter influenciado na sua propagação, como a intensidade dos ventos, altas temperaturas e vegetação seca (Fantini & Grilli, 2019; Silva & Pacheco, 2021).

O estudo levou em consideração para base de dados todas as cenas disponíveis para o período de estudo compreendido entre os anos 2019 até 2022. As análises foram feitas para o período chuvoso entre os meses de janeiro a abril e o período seco de junho a novembro. Foram obtidos ainda dados referentes aos períodos de transição entre o período chuvoso e o seco (mês de maio) e entre o seco e chuvoso (dezembro).

Verificou-se assim o comportamento anual e mensal das variáveis precipitação e temperatura nos diferentes períodos dentro dos anos estudados por meio do Google Earth Engine analisando a influência destas variáveis no município de Floresta.

Coleta de dados

Para análise da variável precipitação foi empregado o satélite Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) por meio da coleção do GEE *ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY")*, utilizando 4 cenas para precipitação anual e 48 cenas para precipitação mensal. Fornecendo informações desde 1999, as imagens disponíveis deste satélite possibilitam a criação de séries temporais de precipitação analisando tendências e auxiliando no monitoramento de secas sazonais (Funk et al., 2015; Climate Hazards Center, 2024).

Para obtenção de dados referente a temperatura anual e mensal foi aplicado o MOD11A1.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km utilizando a banda LST_Day_1km com a coleção *ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A1")*.

Ademais, foram utilizadas imagens de satélite do Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A para detecção da vegetação e queimadas e posteriormente realizar a classificação das imagens para o índice Kappa. Por meio da coleção do GEE

ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED"). Utilizando as bandas multiespectrais Blue, Green, Red, NIR e SWIR 2, respectivamente B2, B3, B4, B8 e B12.

Utilizou-se as imagens que estavam disponíveis para cada período (chuvoso, seco e transição entre os períodos) dentro dos anos estudados (2019-2022), tanto para o índice SAVI quanto para o índice NBR. Neste aspecto, observou-se ausência de imagens para o índice SAVI na transição período chuvoso-seco em 2020 e 2022 e para o NBR para o mesmo período em 2022.

Processamento dos Dados

Utilizou-se como suporte a linguagem Java Script por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE) para o pré-processamento e processamento das imagens de satélite, para obtenção de dados do índice SAVI, juntamente com todo o processo de organização, geração e interpretação dos dados a serem utilizados neste trabalho, por meio de bandas que proporcionaram os pixels "optima" (ou seja, livres de nuvens, sombras e água) em cada janela pré e pós-incêndio. Além disso, foi usado a linguagem Python por meio da ferramenta Google Colab com a mesma finalidade de obtenção de dados referente aos índices de queimadas (NBR). Para a elaboração dos mapas dos índices de vegetação e queimada antes e após o incêndio, utilizou-se o software QGIS Development Team (QGIS, 2023) versão 3.30.0. Todos os dados geoespaciais foram reprojatados para o sistema de referência SIRGAS 2000.

Dados Climatológicos

Dentro dos períodos estabelecidos para os anos estudados (2019-2022) também foram obtidos dados mensais referentes a precipitação e temperatura, expressados nas Figuras 2 e 3.

Em seguida, os dados foram compilados e analisados sua precipitação e temperatura anualmente por meio de um Climograma, representado na Figura 4. Com a obtenção dos dados anuais para o município de Floresta referente as variáveis precipitação e temperatura foram observados sua distribuição em toda a área de estudo visando verificar o comportamento desses fatores por todo o município nos diferentes anos estudados.

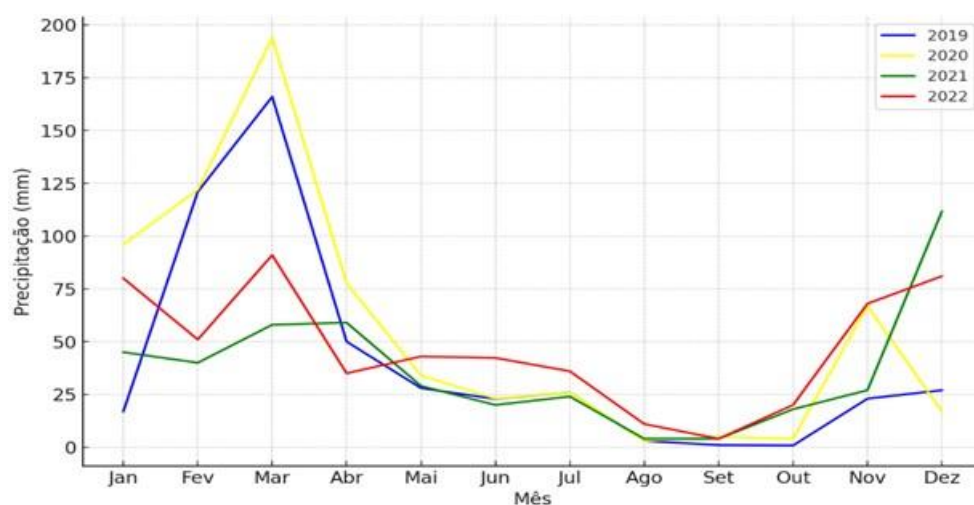


Figura 2. Precipitação mensal acumulada (2019-2022) para o município de Floresta/PE.

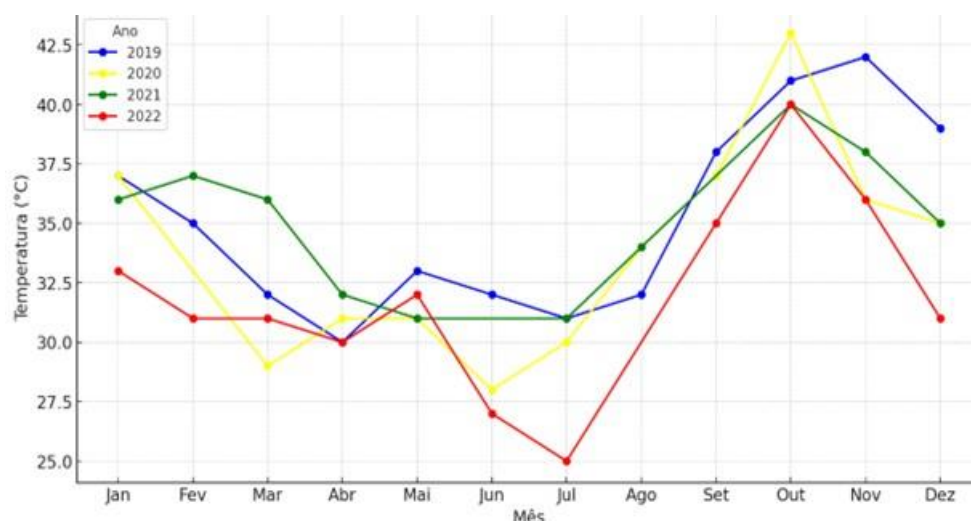


Figura 3. Temperatura média mensal (2019-2022) para o município de Floresta/PE.

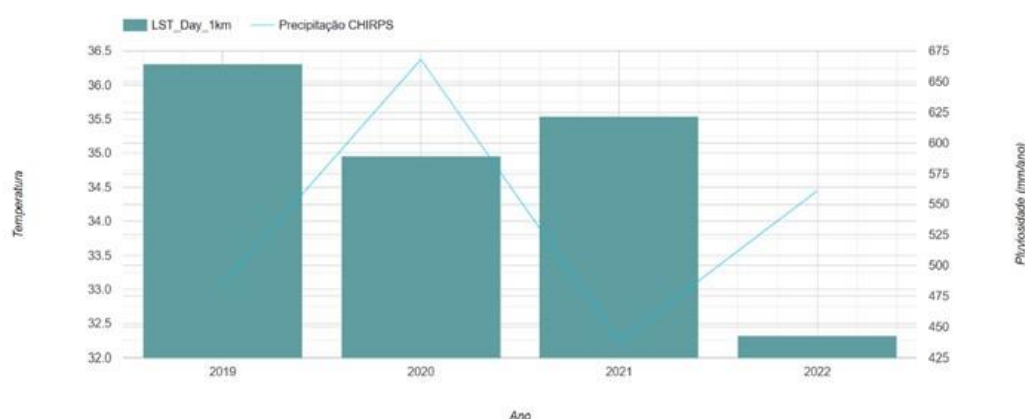


Figura 4. Climograma para o município de Floresta/PE ao longo dos anos (2019-2022).

Legenda: LST_Day_1km: Banda utilizada para obter informações de temperatura anual referente ao MOD11A1.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km; Precipitação CHIRPS: Precipitação anual obtida por meio do satélite Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS).

Análise dos Índices NBR e SAVI

Para compreender o efeito das queimadas sobre a vegetação de caatinga o trabalho teve foco numa área afetada por incêndio no município de Floresta, no ano de 2019, analisando o comportamento espectral desta área em 2020, 2021 e 2022, com o apoio do Índice de Vegetação ajustado ao Solo (SAVI). Assim, as datas das imagens de satélite corresponderão a períodos imediatamente anterior e posterior a ocorrência do

fogo. Realizou-se uma análise de variação temporal do índice SAVI entre 21/01/2019 e 21/12/2022, compreendendo um período de quatro anos. O incêndio na área analisada ocorreu entre 4 e 8 de novembro de 2019, a data pré-incêndio foi definida 20/02/2019 e 17/11/2019 como pós-incêndio. Além disso, verificou-se ainda a recuperação da vegetação após esse período, considerando 16/12/2022 como sendo o período de rebrota da vegetação na área danificada (Figura 5).

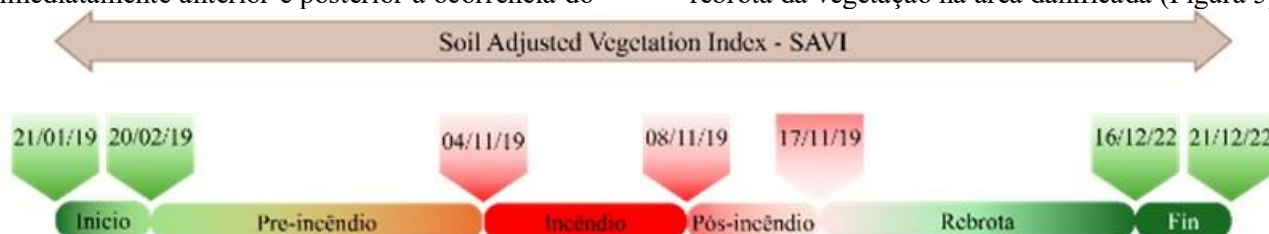


Figura 5. Linha do tempo de avaliação do SAVI.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) é um ajustamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator L (Huete, 1988). Para a vegetação de caatinga recomenda-se o valor 0,5 para o fator L (Jardim et al., 2022; Melo et al., 2022). Segundo, Braz et al. (2015) o índice minimiza a resposta espectral do solo, por meio do fator de ajuste.

A equação para a obtenção do SAVI é a seguinte:

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \cdot (1 + L)$$

SAVI: Índice de Vegetação ajustado ao Solo.

R: banda correspondente ao vermelho.

NIR: banda correspondente ao Infravermelho Próximo (Near Infra Red).

L: Fator de ajuste.

Em que:

L = 1 para cobertura vegetal muito baixa;

L = 0,5 para cobertura vegetal intermediária;

L = 0,25 para cobertura de alta densidade.

O Índice de Vegetação ajustado ao Solo (SAVI) é usado como informação complementar ao Índice de Queimada por Razão Normalizada (NBR), com a finalidade de auxiliar no entendimento sobre os processos de recuperação da vegetação na área de estudo.

Posteriormente, foi utilizado o índice NBR pré e pós incêndio visando avaliar a severidade do fogo na vegetação. O índice NBR resulta da combinação de duas bandas espectrais, em que a banda NIR irá diminuir conforme o desaparecimento da vegetação (Riet & Veraverbeke, 2022) e ocorrerá a elevação da banda SWIR com os fatores solo exposto, sombreamento da vegetação e área desmatada (Carballo et al., 2022).

Para o índice NBR foi realizada a análise de variação temporal para o período de quatro anos entre 01/01/2019 e 31/12/2022. O índice foi analisado considerando o período antes e após o incêndio, ocorrido entre 4 e 8 de novembro de 2019, estabelecendo a data 21/01/2019 como pré-fogo e 17/11/2019 como pós-fogo (Figura 6).

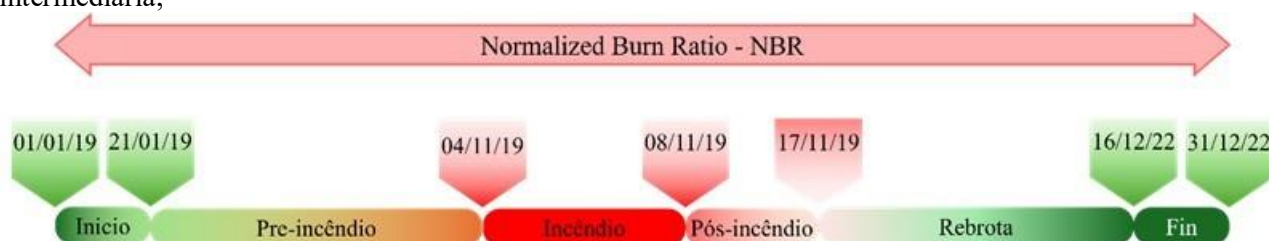


Figura 6. Linha do tempo de avaliação do NBR.

O Índice de Queimada por Razão Normalizada (NBR) foi proposto por Koutsias e Karteris (1998) e é dado pela seguinte equação:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Em que:

NBR = Índice de Queima por razão Normalizada;

NIR = Banda do Infravermelho próximo;

SWIR = Banda do infravermelho de ondas curtas.

Análise estatística

Foram obtidas variáveis estatísticas como Média, Mediana, Máximo, Mínimo, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação para verificar a variação dos índices durante os meses dentro dos períodos estabelecidos (seco, chuvoso e transição entre os períodos) e ao longo dos anos. Foi realizada a Análise de Variância para os índices SAVI e NBR a um nível de significância de 5%. Realizou-se ainda o Teste de Tukey para estas variáveis a um nível de significância de 5%, verificando a diferença destes índices ao longo dos anos. As análises estatísticas foram desenvolvidas por meio do Microsoft Excel Versão 2019 (16.0) e da linguagem Python no Google Colab.

Validação dos Índices NBR e SAVI

Verificou-se a confiabilidade da classificação digital do uso e cobertura do solo da área de estudo utilizando a matriz de confusão das

áreas de treinamentos que foram classificadas aplicando-se o coeficiente de Kappa (K), em processamento no software GEE para obtenção de relatórios dos anos estudados que compreendia as datas pré-fogo e pós-fogo.

Foram estabelecidas duas classes (0 e 1) para os índices SAVI pré e pós fogo e para o NBR pré-fogo, sendo estas classes denominadas área vegetada e área não vegetada, atribuídas como vegetada para presença de vegetação e não vegetada para ausência de vegetação, solo exposto, rochas e corpos hídricos. Já para a variável NBR pós-fogo foi atribuída duas classes (0 e 1) área queimada e área não queimada, a classe queimada compreendia áreas em que foram detectados queimadas e possíveis incêndios e para a classe não queimada se atribuí a presença de vegetação e corpos hídricos.

Desta forma, o coeficiente Kappa (K) foi utilizado para avaliação da eficiência dos índices SAVI e NBR, permitindo avaliar a qualidade da classificação das imagens obtidas, para validação do mapeamento de cicatrizes antes e após os incêndios.

Segundo Silva (2011) avaliar a acurácia dos dados obtidos permite ratificar a qualidade do mapeamento realizado. O índice de Kappa (K) apresenta uma variação entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor será a acurácia. Assim, esses valores são definidos conforme Fonseca (2000) na Tabela 1.

Tabela 1. Avaliação do desempenho da classificação segundo intervalos do índice Kappa.

Índice Kappa	Desempenho
< 0	Péssima
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Boa
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Fonseca (2000).

Resultados e Discussão

Índice SAVI

Realizada a análise temporal do índice SAVI (2019-2022) foram obtidas as cenas pré-fogo

(20/02/2019), pós-fogo (17/11/2019) e rebrota (16/12/2022) para o município de Floresta. Conforme Figura 7.

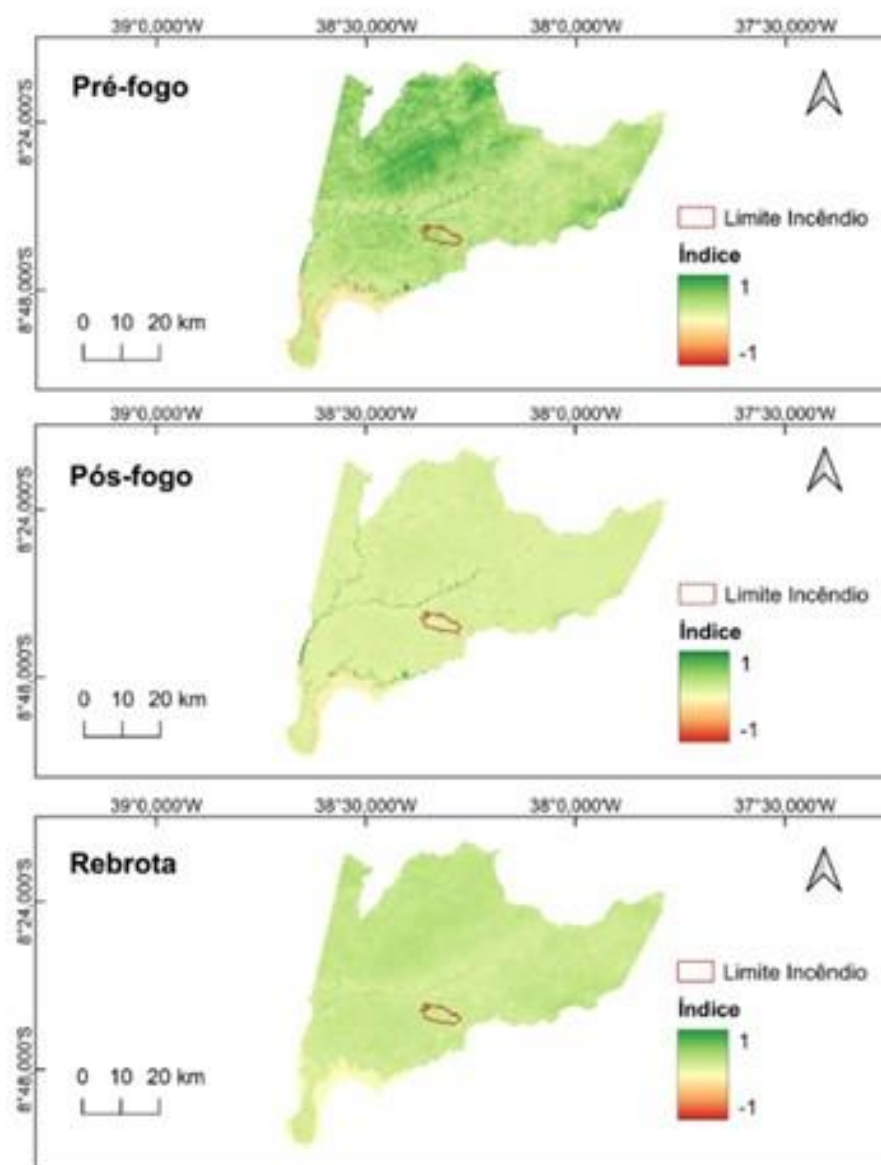


Figura 7. Pré-fogo, pós-fogo e rebrota do índice SAVI para o município de Floresta/PE.

Para a análise temporal obtida entre 2019 e 2022 o índice SAVI variou entre 0,1207 e 0,4990, com maiores valores detectados entre os meses de abril a maio e menores valores entre setembro e dezembro, o que influencia nos valores obtidos também para as cenas de pré-fogo, pós-fogo e rebrota, que foram adquiridas em diferentes meses do ano, caracterizando assim a região de estudo nos diferentes períodos.

O município de Floresta apresentou para as cenas pré-fogo um índice alto (0,3795) quando comparado ao período pós-fogo (0,183) e rebrota (0,2705), o que pode ser atribuído a época estudada para as respectivas cenas, tendo em vista que nos meses de janeiro apresentam maiores precipitações pluviométricas quando comparado aos meses de novembro e dezembro. No município, os meses chuvosos, ocorrem de janeiro a maio, com maior

precipitação para os meses de março e abril (Santos et al., 2020).

Para a rebrota, a cena estabelecida para estudo foi referente ao mês de dezembro, que se encontra em transição entre o período seco e o período chuvoso, demonstrando a influência deste no índice obtido, apresentando valores mais baixos quando comparado ao pré-fogo. Em vegetação de caatinga, o SAVI expressa informações de forma precisa na região semiárida, sobretudo no período seco, detectando uma variação do índice de -0,299 a 0,787 (Silva et al., 2019).

A Caatinga é muito sensível as variações climáticas, principalmente no que diz respeito a precipitação, em que as espécies mantêm suas folhas no período chuvoso e perdem suas folhas no período seco (Pereira et al., 2020). Tais fatores podem influenciar no verdor da vegetação e

consequentemente na obtenção dos índices, tendo em vista que a depender da época do ano, ao perder suas folhas, não necessariamente se caracteriza como ausência de vegetação, mas uma peculiaridade do domínio frente as condições climáticas locais.

Destaca-se a eficiência da utilização do índice SAVI neste tipo de vegetação para analisar as suas características, tendo em vista que considera um fator de correção L, verificando a resposta espectral e desconsiderando os possíveis efeitos do solo, ademais ressalta-se a importância de verificar as condições pluviométricas do período estudado para saber qual fator de correção aplicar e averiguar a acurácia ratificada em campo (Ribeiro et al., 2016).

Santos et al. (2022) abordaram a importância do fator de correção L, especialmente no período seco, tendo em vista que este possibilitou detectar as diferenças dos níveis de solo exposto, inclusive na agricultura, em áreas de lavouras de cana-de-açúcar, em que algumas delas são alvo da queima controlada nesse período para facilitar no processo de colheita.

Analizou-se os valores médios mensais para os anos 2019, 2020, 2021 e 2022 (Figura 8), observando a variação do índice SAVI, a resposta da vegetação e a sazonalidade existente durante os diferentes períodos do ano, além de se determinar o risco de incêndio na região de Floresta.

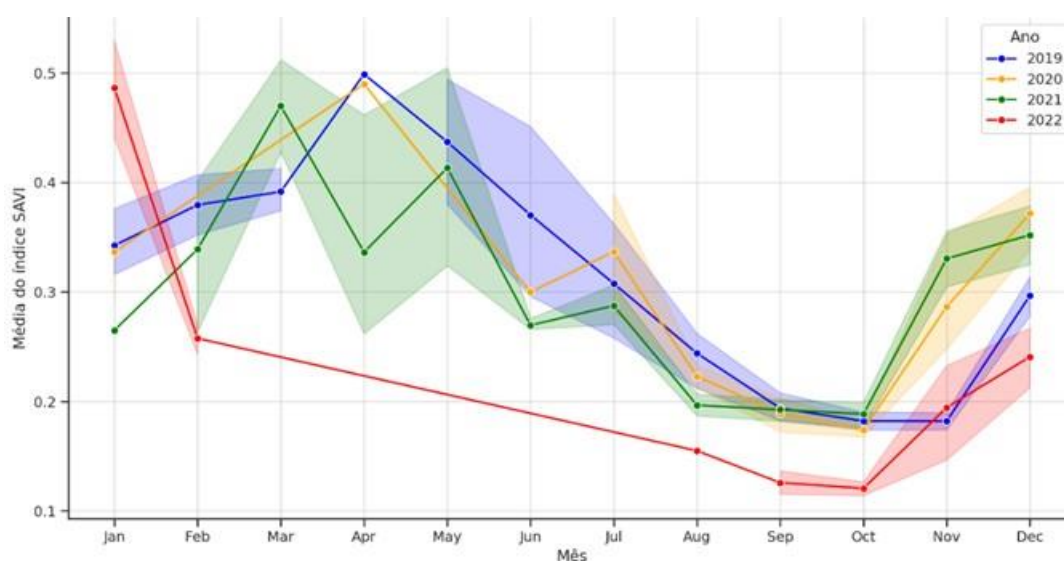


Figura 8. Valores médios mensais do índice SAVI por ano para o município de Floresta/PE.

Para o ano de 2019, o índice começa relativamente alto em janeiro (0,3425) e atinge um pico em abril (0,499). Depois de abril, há uma tendência de queda acentuada até outubro (0,1821), o que pode ser um indicativo de maior risco de incêndio, já que a vegetação pode estar mais seca e suscetível. Assim, índices mais altos é indicativo de presença de vegetação sadia pela ocorrência de chuvas constantes nesse período, seguidos de índices mais baixos provenientes de baixas precipitações e altas temperaturas característicos do período seco.

Pereira et al., (2020) analisando a cobertura do solo por meio do SAVI e NDWI na microrregião do Cariri Oriental (APA das Onças) em 2019 para vegetação de caatinga, com maiores precipitações nos meses de janeiro a maio, observaram um índice SAVI que variava entre -0,155 a 0,732 apresentando-se alto quando maior teor de umidade era detectado pelo NDWI, já quando esse se

expressava baixo, consequentemente o NDWI detectava um baixo teor de umidade.

No ano de 2020 detectou-se que o índice tem valores similares aos de 2019 em meses correspondentes. No entanto, houve um aumento notável em dezembro (0,3717) em comparação com novembro (0,2867). Já para o ano de 2021 o índice começa mais baixo em janeiro (0,265) em comparação com os anos anteriores. Há um pico em março (0,4700), seguido de uma queda acentuada em junho (0,2697), seguindo pelos próximos meses até outubro (0,1886).

Nesse aspecto, os menores valores do índice SAVI registrados nos meses de setembro e outubro são indicativos de um período anual mais seco, caracterizando-se pela perda das folhas pela vegetação em decorrência das altas temperaturas e baixas precipitações. Em estudos no Nordeste de Minas Gerais, Marinho et al., (2021) identificaram que os meses de outubro e agosto foram detectados

maiores registros de focos de incêndio, avaliou-se também as precipitações anuais acumuladas entre 1998-2015, com um déficit entre 75,0 e 225,0 mm⁻¹ em áreas que apresentavam alta densidade de focos de fogo.

Em 2022, nota-se um valor alto em janeiro (0,4867), que cai drasticamente em fevereiro (0,2577). Os meses de agosto a outubro de 2022 apresentam um risco elevado, com os valores mais baixos de SAVI registrados inclusive comparado com todos os anos analisados (abaixo de 0,2), indicando uma vegetação menos densa, que pode estar atribuído as características da vegetação nesse período. A Caatinga apresenta entre os meses de junho e julho um solo mais seco, fator que influencia em um padrão fenológico da vegetação quanto a perda das folhas (Pinheiro et al. 2017).

O índice SAVI apresentou durante o período seco, valores inferiores a 0,5 sugerindo a influência da zona fitogeográfica dominada pela caatinga hiperxerófila, que possui espécies adaptadas ao semiárido, com características como espinhos, perda total ou parcial das folhas, sinais de envelhecimento e atividade fotossintética reduzida (Caetano et al., 2022). Estes fatores resultam em uma região com vigor vegetativo mais baixo e, portanto, menores valores do índice.

A queda acentuada do índice SAVI durante certos meses (como visto em 2019 e em 2020 após abril) é indicativo de uma vegetação menos vigorosa, associado a perda de folhas, redução de atividade fotossintética, inclusive déficit hídrico devido a diminuição da disponibilidade de água no solo. Nota-se que o índice de vegetação SAVI tende a apresentar valores mais altos no início do ano e diminui no decorrer do ano, isso está associado à sazonalidade das chuvas ou outros fatores climáticos que afetam a resposta espectral da vegetação.

O índice SAVI, que varia de -1 a 1, expressa a sazonalidade da vegetação de caatinga, apresentando valores inferiores a 1 durante todos os anos estudados. Os resultados indicam variações significativas no SAVI que são tanto sazonais quanto anuais. A tendência de declínio ao longo dos anos pode ser preocupante e sugere a necessidade de monitoramento contínuo e possíveis medidas corretivas, tendo em vista que as condições climáticas proporcionam condições mais suscetíveis a propagação de incêndios.

Além disso, é importante destacar a influência das ações antrópicas, especialmente na agricultura, em que o pequeno agricultor costuma utilizar a queimada como técnica para deixar a área pronta para o plantio e receber as primeiras chuvas em determinados períodos do ano. A prática de

queima é empregada para a limpeza inicial e, quando aplicada de forma não controlada, apresenta alto risco de ocasionar incêndios de grandes proporções (Marinho et al., 2021).

Desta forma, pode-se verificar o comportamento do índice ao longo dos anos, analisando o comportamento da vegetação em diferentes épocas. O uso de satélites como o Sentinel-2a e o Landsat pode ser empregado realizando análises temporais, comparando as imagens obtidas nos diferentes períodos e avaliando a degradação causada, detectando incêndios e demais perturbações (Hirschmugl et al., 2017; Perea-Ardila et al., 2023).

Índice NBR

Foi realizada uma análise de variação temporal para o índice NBR, considerando o período antes (21/01/2019) e após o incêndio (17/11/2019), conforme Figura 9.

O índice NBR varia entre -1,0 a 1,0 (Santos et al., 2020), em que pixels positivos e próximos a 1 indicam uma vegetação saudável, representados pela cor verde, já os valores próximos de zero podem sinalizar a ocorrência de nuvens, gramíneas e solo exposto, representados pela cor amarela, já valores de NBR negativos, são indicadores de estresse hídrico na vegetação e a ocorrência de incêndios na área, indicados pela coloração vermelha.

A Figura 9 demonstra o potencial do NBR em expressar alterações da área de estudo, em que o polígono delimitado da área de limite de incêndio expressou uma variação nos seus valores dentro do limite do incêndio na imagem pré-fogo e pós-fogo. O pré-fogo demonstra uma variação entre 0 e 0,5 expressados pela coloração amarela e verde claro, respectivamente. O pós-fogo está representado por cores alaranjadas, que indicam valores mais próximos de -1.

Na área estudada foi possível detectar índices baixos para a data estabelecida como pré-fogo (0,0362), o que se atribui as condições climáticas locais da região, em que apesar de ser atribuída dentro do período chuvoso, a região conta com irregularidade das chuvas o ano todo, influenciando na sazonalidade da vegetação.

O satélite CHIRPS, em 2019, registrou uma precipitação pluviométrica anual de 484,37mm, com maiores precipitações mensais nos meses de janeiro e abril e menores precipitações de agosto a outubro. Detectou-se ainda por meio da banda LST_Day_1km aplicado ao MOD11A1.061 temperaturas anuais de 36,31°C.

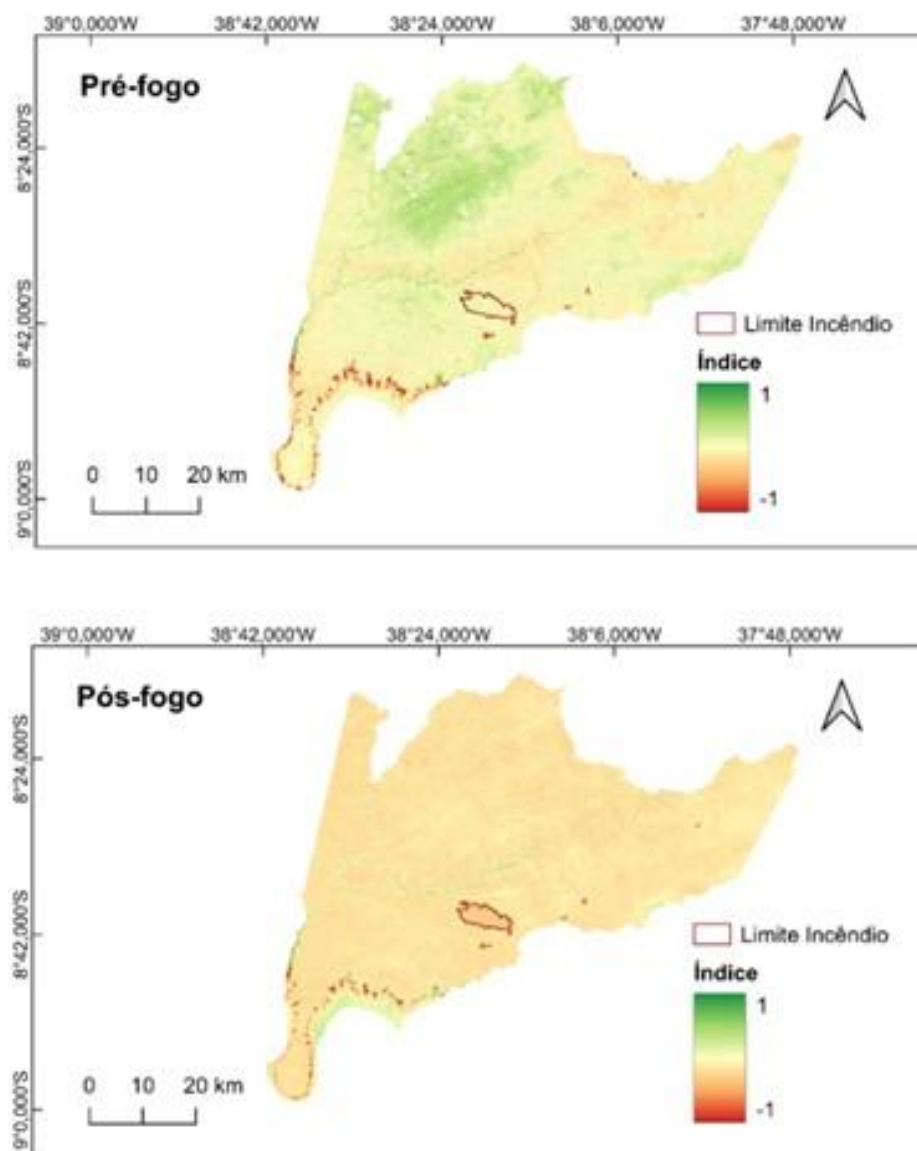


Figura 9. Pré-fogo e pós-fogo do índice NBR para o município de Floresta/PE.

Na Caatinga, particularmente no período seco, ocorre a perda de suas folhas como estratégia frente a essas condições climáticas. Estes fatores podem influenciar no aumento da evapotranspiração, o que proporciona um material combustível disponível para queima, características estas que podem vir a tornar o ambiente mais susceptível a condições que influenciam na propagação do fogo.

As cenas obtidas na região de estudo para o pós-fogo, apresentaram valores negativos de NBR (-0,1178), indicando, portanto, a presença de alterações na área, expressando assim a ocorrência de incêndio na região de estudo. Os incêndios florestais têm maior probabilidade de ocorrência em todo o Brasil entre os meses de agosto a

novembro, com os maiores focos de calor registrados na região nordeste neste mesmo período (Pinto et al., 2021).

Neste aspecto, condições climáticas, evidenciadas por condições secas prolongadas, precipitação reduzida e a sazonalidade das chuvas favorecem a ocorrência de incêndios, especialmente quando estas áreas têm o fogo utilizado para o preparo da terra, facilitando ainda na propagação de queimadas para áreas que não foram afetadas anteriormente por tais fenômenos (Huijnen et al., 2016).

Verificou-se para os anos 2019, 2020, 2021 e 2022 os valores médios mensais do índice NBR e a viabilidade deste na detecção de incêndios na

região de Floresta, além de verificar as variações ao longo de diferentes anos (Figura 10).

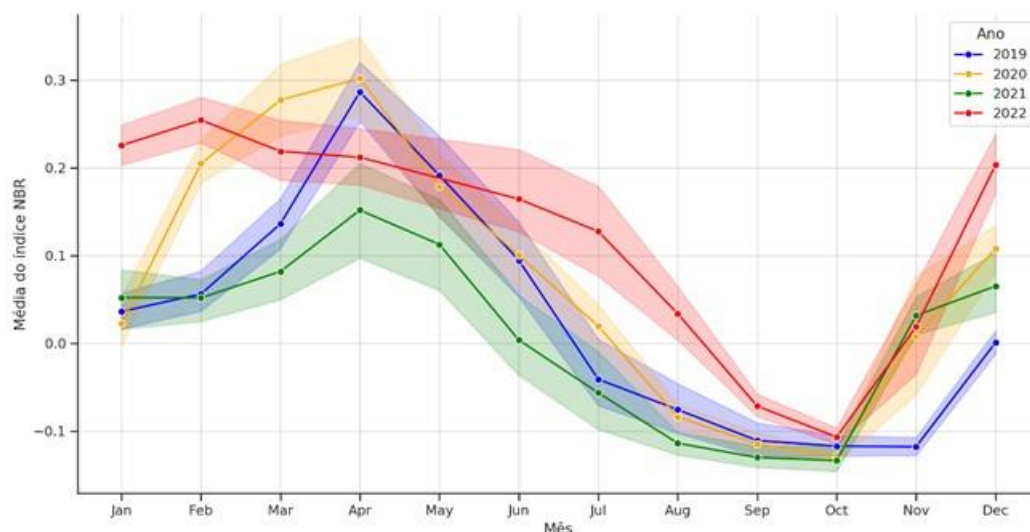


Figura 10. Valores médios mensais do índice NBR por ano para o município de Floresta/PE.

O índice NBR variou de -0,1067 a 0,3017 entre 2019 e 2022 com maiores valores detectados no período chuvoso entre os meses de janeiro a abril e menores valores no período seco, entre julho e novembro, indicando assim a presença de possíveis incêndios e queimadas, susceptibilidade da ocorrência de tais fenômenos e redução do vigor vegetativo, caracterizado pela diminuição da disponibilidade hídrica no solo.

O ano de 2019 apresentou uma tendência que começa com valores mais altos, registrando um aumento do índice de janeiro até maio, com um alto índice em abril (0,2864), indicando uma cobertura vegetal mais vigorosa. A tendência declina em certos meses, registrando um declínio significativo, com valores negativos durante os meses de julho (-0,041) a dezembro (0,001), refletindo o comportamento da vegetação no período de seca.

Ademais, vale salientar que o incêndio registrado em 2019 ocorreu dentro deste período, em novembro de 2019 (-0,1178), demonstrando assim a eficiência do índice em refletir as condições climáticas locais ou ainda na detecção da ocorrência de possíveis alterações mais brandas, como é o caso do incêndio ocorrido neste período, expressado em valores baixos e negativos no índice.

Gonçalves e Dias (2020) estudando a correlação existente a focos de calor e variáveis meteorológicas detectaram maiores números de focos de calor nos meses que apresentaram características como precipitações pluviométricas reduzidas e baixa umidade relativa do ar,

contribuindo para que o material combustível fique propício a ocorrência de incêndios.

Além disso, detecta-se a influência das atividades antrópicas na ocorrência de incêndios no domínio fitogeográfico Caatinga, tal cenário evidencia a importância da realização e divulgação de pesquisas que objetivem verificar e retratar a sensibilidade da região semiárida na recuperação após a ocorrência destes fenômenos (Silva & Pacheco, 2021).

Em 2020, há uma variação mensal significativa com alguns picos notáveis, que podem indicar uma recuperação rápida da vegetação ou períodos alternados de ausência de vegetação e recuperação. Observa-se índices maiores no início do ano, entre fevereiro (0,2047) a abril (0,3017) e posterior declínio, com menores índices registrados entre os meses de agosto (-0,0839) a novembro (0,0078), seguido de uma breve recuperação em dezembro (0,108).

O município de Floresta apresentou uma precipitação média anual em 2020 de 668,2mm, com temperatura média anual de 34,96°C, apresentando maiores precipitações mensais entre os meses de janeiro a abril e menores entre agosto e outubro, com uma breve recuperada em novembro, o que pode influenciar na obtenção dos índices no mês subsequente.

Analisando-se o comportamento do índice no decorrer dos meses, observa-se as variações de precipitação, além de ser possível observar o comportamento da vegetação nos diferentes períodos. Ademais, verifica-se a susceptibilidade

desta ao fogo, principalmente quando manejada de forma inadequada.

No aspecto ecológico, áreas que apresentam uma menor precipitação tendem a possuir uma cobertura vegetal irregular, com menor atividade fotossintética, tais características dependem do clima e irão se apresentar de diferentes formas por meio de sinais espectrais, refletidas por meio de índices que irão variar de acordo com as características visualizadas na área de estudo (Liu et al., 2023).

O ano de 2021 começou com um dos valores mais baixos do índice para o mês de janeiro (0,0521), sugerindo uma menor densidade vegetativa ou alguma pequena alteração. No entanto, vemos uma recuperação nos meses subsequentes, o que pode estar relacionado a um período chuvoso detectando maiores índices para os meses de abril (0,1517) e maio (0,1127), com menores índices registrados novamente de julho (-0,0564) e outubro (-0,1334).

Para o ano de 2021 registrou-se uma precipitação acumulada anual de 438,43mm, as mais baixas precipitações tanto anuais quanto mensais registradas dentro dos quatro anos analisados, que se manteve por todo o ano, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco. Apresentando ainda uma temperatura anual média de 35,55°C, uma das maiores temperaturas anuais registradas no decorrer dos anos estudados.

Em 2022 há uma tendência relativamente estável com menos flutuações extremas em comparação com os anos anteriores, um pequeno declínio registrado entre agosto (0,0338) e novembro (0,0188), o que sugere a influência do período no índice, tendo em vista que essa época do ano apresenta precipitações reduzidas e a vegetação fica mais seca. Verifica-se também que o período compreendido entre os meses de setembro e outubro apresenta os menores valores do índice de todos os anos avaliados, indicativo da época do ano mais seca e portanto de maior risco de ocorrência e propagação de incêndios.

Foram observados maiores focos de queimadas e calor na mesorregião do Sertão da Paraíba que se atribui às condições climáticas locais associado às ações antrópicas, por meio do uso da queimada como uma técnica de manejo para o plantio e limpeza das áreas (Pereira & Silva, 2016). Deste modo, pode-se destacar a influência destas duas variáveis na detecção de índices mais baixos em determinados períodos do ano.

Em 2022, o município de Floresta apresentou uma precipitação acumulada anual de 560,94mm, se destacando, portanto, como a segunda maior precipitação anual avaliada ao

longo dos anos. Apresentando uma precipitação mensal acumulada de forma constante tanto para o período chuvoso, quanto para o seco, mantendo-se por todo ano. A temperatura anual para este ano foi a menor detectada, com 32,32°C.

Ademais, com base na análise dos diferentes anos, observa-se que as variações ocorridas no decorrer de quatro anos são influenciadas pelas condições climáticas e pelo ciclo de crescimento da vegetação na Caatinga. Além disso, vale salientar que a largura das linhas em cada mês indica a variação entre os meses dos valores do índice NBR. Meses com linhas mais largas indicam maior variação diária, o que pode ser devido a mudanças rápidas nas condições ambientais ou eventos esporádicos que afetam a vegetação.

De acordo com o INPE (2023) para os respectivos anos estudados no estado de Pernambuco detectou-se um aumento gradual para os focos de calor ativos, registrando-se para o ano de 2019 o equivalente 840 focos, em 2020 foram registrados 1017, já 2021 apresentou 1192, com um pequeno declínio em 2022 constatando-se um total de 1155 focos ativos. Ademais, vale salientar que o período apresentado com maiores focos está entre os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

Logo, verificar a distribuição destes focos para todo o estado, visando a compreensão da sua dinâmica nas diversas regiões que o abrange ao longo dos anos se faz necessário para melhor compreensão da distribuição destes eventos e os fatores que influenciam neste aspecto. Além de ser possível estudar o índice NBR dentro das áreas mais propensas e na época mais susceptível, verificando sua eficiência na detecção de incêndios.

Análise estatística dos índices SAVI e NBR

Foi realizada a Análise de Variância a um nível de significância de 5% para os índices SAVI e NBR ao longo dos anos (2019-2022) cujos resultados são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Análise de Variância do índice SAVI ao longo dos anos (2019-2022) no Município de Floresta/PE.

FV	Quadrado Médio					
	GL	SQ	QM	F	Valor P	F Crítico
Anos	3	0,1611	0,0537	5,2502*	0,0017	2,6527
Resíduo	188	1,9234	0,0102			
Total	191	2,0845				

Legenda: FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado médio; F: F Calculado; Valor P: Valor de probabilidade; F Crítico: Valor crítico tabelado; (*): Nível de significância a 0,05 de probabilidade.

Tabela 3. Análise de Variância do índice NBR ao longo dos anos (2019-2022) no Município de Floresta/PE.

FV	Quadrado Médio					
	GL	SQ	QM	F	Valor P	F Crítico
Anos	3	0,6289	0,2097	10,937*	5,811720 ⁻⁰⁷	2,6233
Resíduo	485	9,2967	0,0192			
Total	488	9,9257				

Legenda: FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado médio; F: F Calculado; Valor P: Valor de probabilidade; F Crítico: Valor crítico tabelado; (*): Nível de significância a 0,05 de probabilidade.

Efetuada a análise observou-se que para ambos os conjuntos de dados (SAVI e NBR), o P-valor é menor que o nível de significância de 0,05, o que indica que há uma diferença significativa nos valores dos índices entre os anos avaliados. O F calculado é maior que o F crítico para ambos os índices, o que também indica que há diferença

significativa para cada índice estudado ao longo dos anos.

Realizou-se ainda o teste Tukey a um nível de significância de 5% para os índices SAVI e NBR, verificando a diferença destes ao longo dos anos estudados (2019-2022) representados nas Figuras 11 e 12.

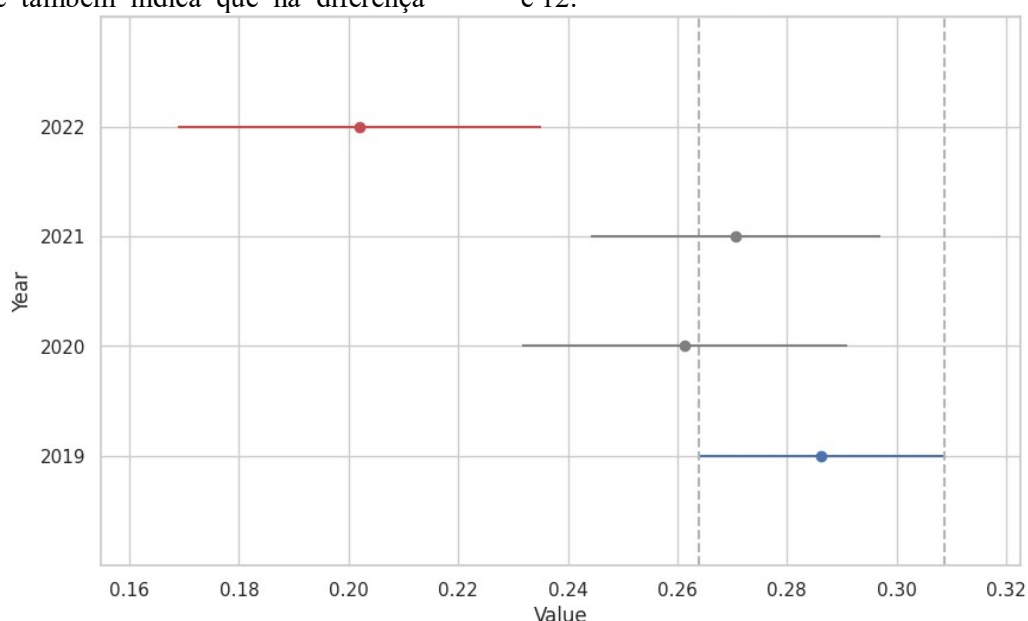


Figura 11. Múltiplas comparações entre todos os pares (Tukey) do índice SAVI.

Legenda: Year: Ano; Value: Valor.

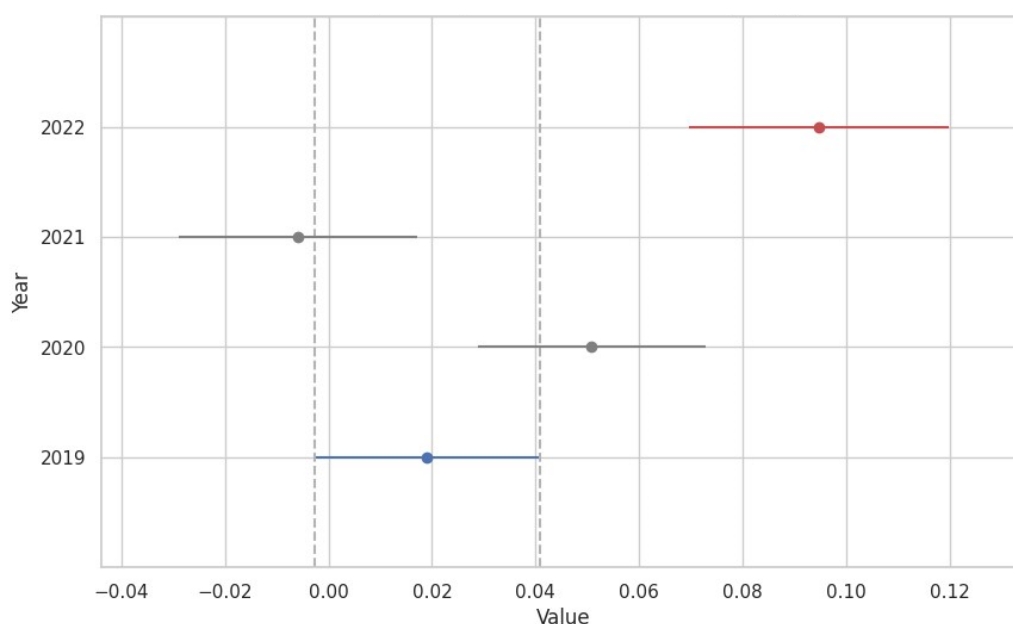


Figura 12. Múltiplas comparações entre todos os pares (Tukey) do índice NBR
Legenda: Year: Ano; Value: Valor; As linhas horizontais nos gráficos representam os intervalos de confiança para as médias dos anos.

Observou-se os intervalos de confiança para os anos estudados, se os anos não se sobrepõem, indica que há uma diferença significativa entre as médias desses anos. Nesse contexto, os resultados fornecem uma visão mais detalhada de como os índices SAVI e NBR diferem entre os anos, indicando assim que tanto o índice SAVI quanto o NBR apresentou diferença estatística, em que o ano de 2022 diferiu estatisticamente dos demais (2019, 2020, 2021).

Esta diferença pode estar atribuída a uma menor ocorrência de queimadas e risco de incêndio para o ano de 2022 quando comparado aos anos de 2019, 2020 e 2021, apresentando um índice NBR maior em relação aos demais, que apresentaram valores baixos e ou negativos. Ademais, observou-se um comportamento de maiores precipitações e menores temperaturas para o ano de 2022, o que pode indicar uma influência dessas variáveis no comportamento dos índices ao longo dos anos, expressando-se assim no respectivo índice.

Argibay, Sparacino e Espindola (2020) analisaram padrões de ocorrência de incêndios em um ecótono semiárido Caatinga-Cerrado na Região Nordeste do Brasil, caracterizando sua dinâmica espaço-temporal associada às condições climáticas, dentro de um período de dezoito anos (1999-2017), constatando que a variação temporal e espacial da ocorrência do fogo estava associada a variáveis climáticas, para os períodos com

precipitação acima da média identificaram baixa área queimada, consequentemente anos com precipitação abaixo da média apresentaram grandes extensões de área queimada.

Para o índice SAVI, os anos de 2019, 2020 e 2021 apresentaram valores maiores quando comparados a 2022, porém o índice no geral expressou valores baixos para todos os anos estudados, indicando assim o comportamento do índice na região semiárida, que se demonstra evidenciado pela sazonalidade da vegetação de caatinga. Ademais, o ano 2022 apresentou indisponibilidade de cenas em determinados períodos, o que pode ter influenciado nos valores obtidos.

Utilização do Kappa para validação dos Índices SAVI e NBR

Realizou-se a classificação do uso e ocupação do solo por meio do GEE e obtiveram-se os seguintes resultados, referente ao índice SAVI pré e pós fogo (Figura 13) e NBR pré e pós fogo (Figura 16). Ademais, também foram obtidos o total de área em km² para cada classe estabelecida em cada índice estudado (SAVI e NBR) dentro dos períodos estabelecidos (pré e pós fogo).

Para o índice SAVI pré e pós fogo obtiveram-se os seguintes resultados referente a classificação e aplicação do índice Kappa, representados a seguir (Figura 14 e 15).

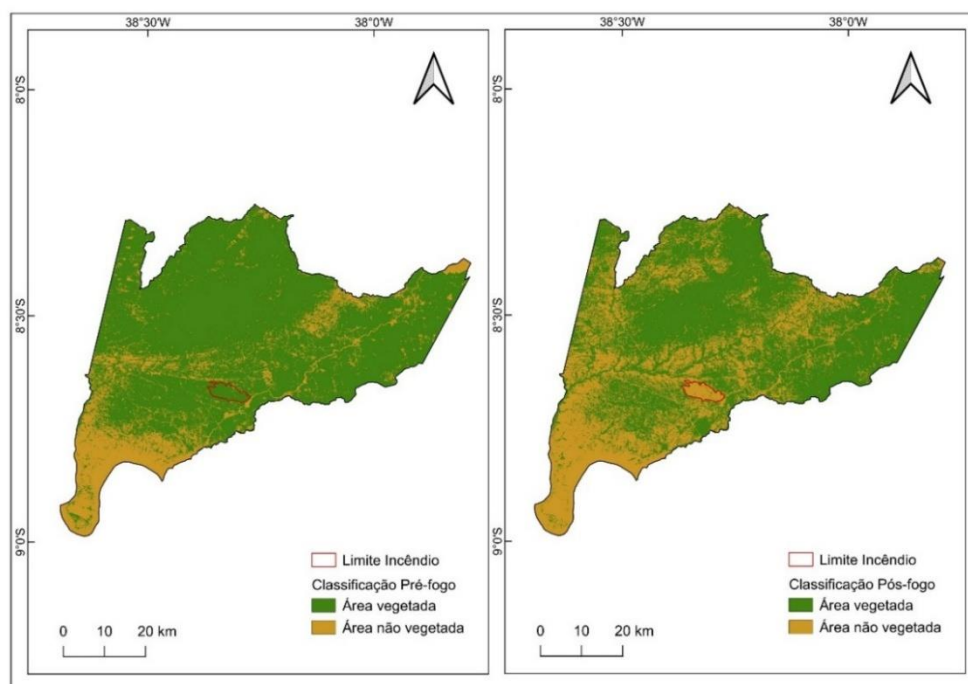


Figura 13. Classificação do uso e ocupação do solo no município de Floresta/PE utilizando SAVI.

Realizado a classificação foi obtido um valor do índice Kappa para o SAVI pré-fogo de 0,9936, indicando assim um desempenho excelente, o mesmo foi notado para o SAVI pós-fogo, que obteve um valor de 0,9696 para o índice. Para o índice SAVI pré-fogo foram obtidos 2.948,96 km² de áreas vegetadas e 655,68 km² de áreas não vegetadas, expressadas na Figura 14.

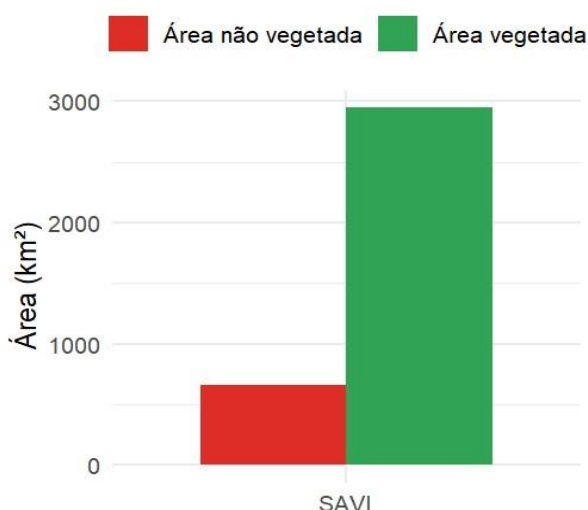


Figura 14. Área (km²) por classe do índice SAVI pré-fogo no município de Floresta/PE.

Para o SAVI pós-fogo detectou-se um total de 2.443,30 km² de áreas vegetadas e 1.161,53 km² de áreas não vegetadas no município de Floresta, expressando assim as alterações na referida área determinados tanto pelo período seco quanto pela influência da sazonalidade da vegetação e possíveis perturbações antrópicas no local, exemplo disso é o incêndio ocorrido no município (Figura 15).

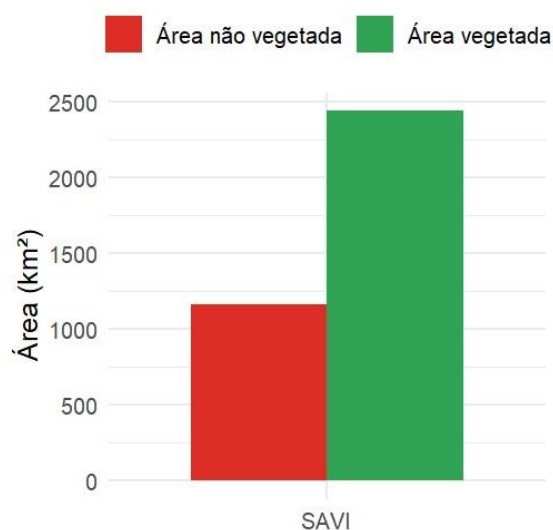


Figura 15. Área (km²) por classe do índice SAVI pós-fogo no município de Floresta/PE.

Após aplicação do índice Kappa nas imagens classificadas a partir do uso do índice NBR pré e pós fogo foram obtidos os resultados, representados a seguir (Figura 16).

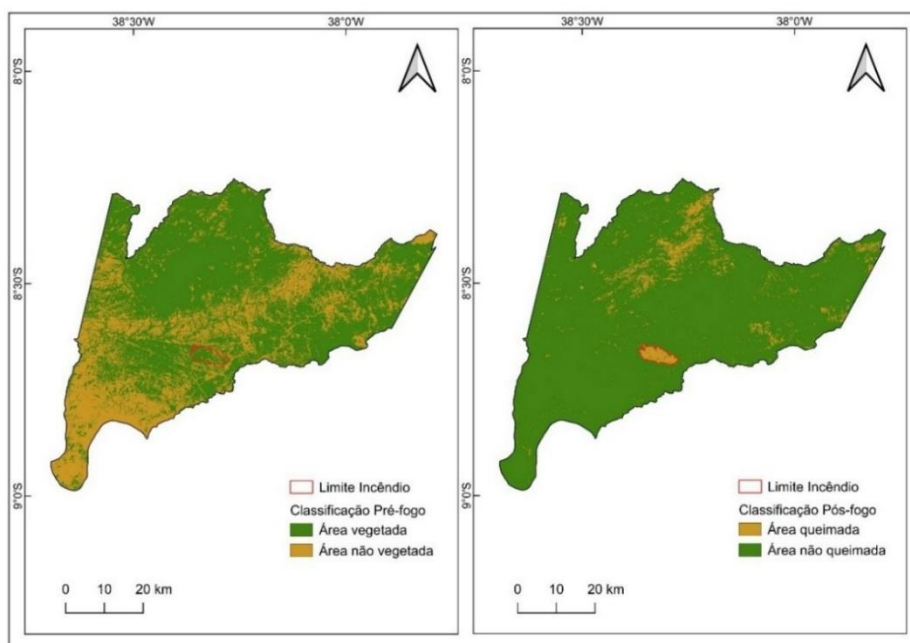


Figura 16. Classificação do uso e ocupação do solo no município de Floresta/PE utilizando NBR.

Para o NBR pré-fogo obteve-se um valor do índice Kappa de 0,9863, já para o NBR pós-fogo de 0,9932, indicando um desempenho excelente para ambas as classificações. O índice NBR no período pré-fogo registrou um total de 2.444,97 km² de áreas vegetadas e 1.155,17 km² de áreas não vegetadas (Figura 17).

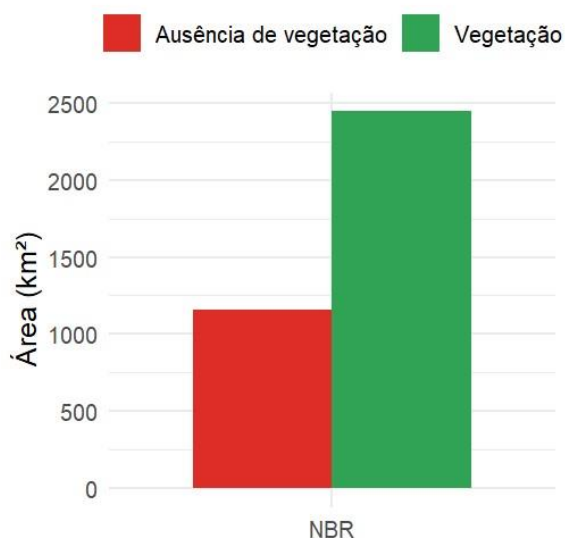


Figura 17. Área (km²) por classe do índice NBR pré-fogo no município de Floresta/PE.

Para o índice NBR pós-fogo registrou-se um total de 3.434,42km² de áreas caracterizadas na classe área não queimada e 170,42 km² em área queimada, visualizados na Figura 18.

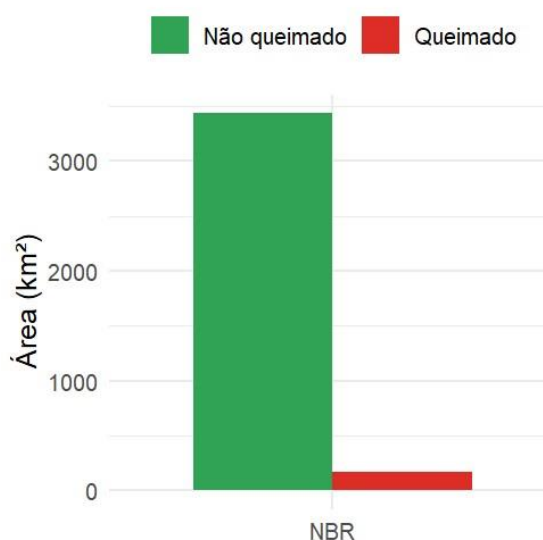


Figura 18. Área (km²) por classe do índice NBR pós-fogo no município de Floresta/PE.

Desta forma, observa-se um indicativo de alterações mais brandas no município, que pode ser determinado pela influência de ações antrópicas neste período especialmente para a limpeza e preparo de áreas para plantio, além de ratificar o incêndio ocorrido na área de estudo, auxiliando na determinação da influência do período seco na propagação de possíveis incêndios.

Conclusão

O índice NBR é eficiente para analisar e quantificar a severidade dos incêndios em áreas de vegetação de caatinga, bem como avaliar as alterações provocadas ao longo do tempo no período estudado (2019-2022). O SAVI pode ser utilizado visando acompanhar a regeneração da vegetação e a recomposição das espécies diante dos incêndios florestais.

Foi observada diferença estatística para os anos analisados, em que o ano de 2022 apresentou-se estatisticamente diferente dos demais (2019, 2020, 2021) tanto em relação ao índice SAVI, quanto o NBR. O ano de 2022 apresentou maiores precipitações e menores temperaturas, o que pode influenciar na obtenção dos resultados adquiridos para o respectivo índice.

Além disso, detectou-se a influência de variáveis climáticas como altas temperaturas e baixas precipitações na obtenção dos índices, apresentando variações ao longo dos meses em decorrência desses fatores. Ademais, as ações antrópicas contribuem na ocorrência de incêndios e alterações do meio, que são detectados e expressados pelos índices.

É necessário constatar a importância de se aplicar técnicas de manejo no município de Floresta e no seu entorno, especialmente no período seco, que proporcionam condições suficientes para a propagação e expansão do fogo, afetando a vegetação e ocasionando problemas nas esferas ambientais, sociais e econômicas.

Nesse contexto, é imprescindível a aplicação destas em conjunto com a comunidade para enfrentar as condições propícias ao fogo, atentando-se quanto ao manuseio das práticas, o período, época adequada e a conscientização quanto ao seu uso de forma correta, visando uma maior assistência técnica voltada ao meio rural.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante o mestrado, com duração de 2 anos, fornecendo-me subsídios para executar e conclusão deste trabalho.

Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto (LASER), o qual fiz parte no mestrado e permaneço no doutorado, contribuindo academicamente nas minhas produções científicas.

Referências

Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., Carvalho, A. L., Pinto, A. S., Santiago, G. A. C. F., Ometto, J. P. H. B., Randow, C. V., Sampaio, E. V. D. S. B.

(2016). Climate change impacts on the 3082arvest3082bility of the firewood 3082arvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 360, p. 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.001>

Argibay, D. S., Sparacino, J., Espindola, G. M. (2020). A long-term assessment of fire regimes in a Brazilian ecotone between seasonally dry tropical forests and savannah. *Ecological Indicators*, v. 113, p. 106151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106151>

Brandolini, F., Domingo-Ribas, G., Zerboni, A., Turner, S. (2021). A Google Earth Engine-enabled Python approach for the identification of anthropogenic palaeolandscape features. *Open Research Europe*, v. 1, p. 22. <http://dx.doi.org/10.12688/open-research.13135.2>

Braz, A. M., Águas, T. A., Garcia, P. H. M. (2015). Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e índice de área foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Córrego Ribeirãozinho, município de Selvíria–MS. *Revista Percurso*, v. 7, n. 2, p. 5-22. [10.4025/revpercurso.v7i2.28758](https://doi.org/10.4025/revpercurso.v7i2.28758)

Brito, P. V. S., Moraes, Y. C. B., Ferreira, H. S., Silva, J. F., Galvêncio, J. D. (2017). Análise comparativa da umidade da vegetação de áreas de caatinga preservada, agricultura irrigada e sequeiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 3, p. 493-498. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1481.493-498>

Caetano, R., Silva, T. B., Castro, D. R., Benfica, N. S. (2022). Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 2, p. 28-43. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID26864>

Carballo, F. M., Montero, L. B., Mero, P.C., Montoya, A.V., Berrezueta, E. (2022). Forest fire assessment using remote sensing to support the

- development of an action plan proposal in Ecuador. *Remote Sensing*, v. 14, n. 8. <https://doi.org/10.3390/rs14081783>
- Climate Hazards Center. (2024). CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations. University of California, Santa Barbara. Disponível em: <<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>> Acesso: 28 Jan. 2024.
- Google Colaboratory, (2023). Disponível em: <<https://colab.research.google.com/>> Acesso em: 20 Mai. 2023.
- Eugenio, F. C. & Santos, A. R. *Incêndios florestais em florestas plantadas [livro eletrônico]: uma análise temporal, espacial e causal de suas ocorrências*. Alegre, ES: Caufes, 2021.
- Fantini, M. & Grilli, M. (2019, 7 de Novembro). Incêndio descontrolado atinge zona rural de Floresta, no sertão de Pernambuco. GLOBO RURAL. Disponível em: <<https://globo.rural.globo.com/Noticias/Sustentabilidade/noticia/2019/11/incendio-descontrolado-atinge-zona-rural-de-floresta-no-sertao-de-pernambuco.html>> Acesso em: 20 Set. 2023.
- Fonseca, L. M. G. (2000). Processamento digital de imagens. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, p. 105.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, p. 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Google Earth Engine. (2024). A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Disponível em: <<https://earthengine.google.com/>> Acesso em: 12 Jan. 2024.
- Global Forest Watch. (2021). Monitoramento de Florestas Projetado para a Ação. Disponível em: <<https://www.globalforestwatch.org/topics/fires/>> Acesso em: 14 Out. 2021.
- Gonçalves, D. M. & Dias, D. P. (2020). Eficiência de cinco índices de perigo de incêndios para o município de Jataí - GO. *Scientia Forestalis*, v. 48, n. 127, p. 3362. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.24>
- Henriques, I. G. N., Souto, J. S., Souto, P. C., Santos, W. S., Henriques, I. G. N., Lima, T. S. (2016). Acúmulo, deposição e decomposição de serrapilheira sob dinâmica vegetacional da Caatinga em Unidade de Conservação. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, n. 1, p. 84-89. <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i1.4523>
- Hirschmugl, M., Gallaun, H., Dees, M., Datta, P., Deutscher, J., Koutsias, N., Schardt, M. (2017). Methods for Mapping Forest Disturbance and Degradation from Optical Earth Observation Data: a review. *Current Forestry Reports*, v. 3, n. 1, p. 32-45. <http://dx.doi.org/10.1007/s40725-017-0047-2>.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, *Elsevier Science Publishing Co.* New York, v. 25, n.3, p. 295-309.
- Huijnen, V., Wooster, M. J., Kaiser, J. W., Gaveau, D. L. A., Flemming, J., Parrington, M., Iness, A., Murdiyarso, D., Main, B., Van Weele, M. (2016). Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific reports*, v. 6, n. 1, p. 26886. <https://doi.org/10.1038/srep26886>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/floresta.html>> Acesso em: 11 Ago. 2022.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2021). Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>> Acesso em: 14 Out. 2022.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2023). Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais. Disponível em: <http://terraBrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/> Acesso em: 14 Nov. 2023.
- Jardim, A. M. R. F., Araújo, G. N., Silva, M. V., Santos, A., Silva, J. L. B., Pandorfi, H., Oliveira,

- J. F., Teixeira, A. H. C., Teodoro, P. E., Lima, J. L. M. P., Silva, C. A., Souza, L. S. B., Silva, E. A., Silva, T. G. F. (2022). Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. *Remote Sensing*, v. 14, n. 8. <https://doi.org/10.3390/rs14081911>
- Koutsias, N. & Karteris, M. (1998). Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, v.19, n.18, p. 3499-3514.
- Lazzarini, G. M. J., Ferreira, L. C. C., Felicíssimo, M. F. G., Oliveira, L. N., Alves, M. V. G. (2016). Análise da detecção e ocorrência de queimadas em áreas urbanizadas e entorno. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria v. 38, n. 3.10.5902/2179460X21536
- Li, Z. (2022). Forecasting Weekly Dengue Cases by Integrating Google Earth Engine-Based Risk Predictor Generation and Google Colab-Based Deep Learning Modeling in Fortaleza and the Federal District, Brazil. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, v. 19, n. 20, p. 13555. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph192013555>.
- Liu, X., Hao, Y., Zhou, Z., Hua, L., Cao, W., Zhang, R., Yu, T. (2023). Inversion of soil moisture and its feedback on ecological restoration in arid and semi-arid areas of northwest China. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220113>
- Marinho, A. A. R., Gois, G., Oliveira, J. F., Correia, W. L. F., Santiago, D. B., Silva, C. A., Teodoro, P. E., Souza, A., Silva, G. F. C., Freitas, W. K. (2021). Temporal record and spatial distribution of fire foci in State of Minas Gerais, Brazil. *Journal Of Environmental Management*, v. 280, p. 111707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111707>
- Marques, R. J. & Costa Sobrinho, W. F. R. (2020). Detecção das Ocorrências de Focos de Queimadas e Produção de Mapas de Calor em Timon, Ma: Detection of burnt focuses and heat map production in Timon, MA. *Revista Geonorte*, v. 11, n. 37, p. 210-228. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2020.V.11.N.37.210.228>
- Melo, M. V. N., Oliveira, M. E. G., Almeida, G. L. P., Gomes, N. F., Morales, K. R. M., Santana, T. C., Silva, M. V. (2022). Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 26. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100756>
- Minaki, C. & Montanher, O. C. (2020). Variáveis climáticas e os registros de incêndios em Maringá-Pr. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.74403>
- Perea-Ardila, M.A., Muñoz, S.I., Sopchaki, C.H. (2023). Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.4, n.3, p.67-83.
- Pereira, J. A. V. & Silva, J. B. (2016). Detection of heat spots in the state of Paraíba: A study about the burnings/Detecção de Focos de Calor no estado da Paraíba: um estudo as queimadas/Deteccion de focos de calor en el estado de Paraíba: Un estudio sobre las quemadas. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 10, n. 1, p. 5-17.
- Pereira, J. A. V., Souza, Y. G., Correia, I. M. G., Souza, B. I. (2020). Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na área de proteção ambiental das Onças, Paraíba, Brasil. *Revista de Geografia*, v. 37, n. 2.
- Piao, Y., Lee, D., Park, S., Kim, H. G., Jin, Y. (2022). Forest fire susceptibility assessment using google earth engine in Gangwon-do, Republic of Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 13, n. 1, p. 432-450. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2030808>.
- Pinheiro, E. A. R., Lier, Q. J. V., Bezerra, A. H. F. (2017). Hydrology of a Water- Limited Forest under Climate Change Scenarios: the case of the caatinga biome, brazil. *Forests*, v. 8, n. 3, p. 62. <http://dx.doi.org/10.3390/f8030062>.

- Pinto, D. L., Spletozer, A. G., Barbosa, S. G., Lima, G. S., Torres, C. M. M. E., Torres, F. T. P. (2021). Periods of highest occurrence of forest fires in Brazil. *Floresta*, v. 51, n. 2, p. 484-491. [10.5380/rf.v51i2.7028](https://doi.org/10.5380/rf.v51i2.7028)
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. V., Ribeiro, D. B., Menezes, L. S., Berlinck, C. N., Melo, F. P. L., Marengo, J. A., Tornquist, C. G., Tomas, W. M., Overbeck, G. E. (2021). Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 19, n. 3, p. 233-255. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>.
- QGIS Development Team. (2023). QGIS Versão 3.30.0. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Ribeiro, G. A., Silva, J. N.C., Silva, J. B. (2016). Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI): estado da arte e suas potencialidades. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 6, p. 2054-2074.
- Riet, M. & Veraverbeke, S. (2022). How Much of a Pixel Needs to Burn to Be Detected by Satellites? A Spectral Modeling Experiment Based on Ecosystem Data from Yellowstone National Park, USA. *Remote Sensing*, v. 14, n. 9. <https://doi.org/10.3390/rs14092075>.
- Santos, J. E. B., Monteiro, K. A., Nascimento, M. C. (2022). Avaliação de desempenho dos índices de NDVI, SAVI e EVI na análise da cobertura de uso do solo em um setor do município de Jequiá da Praia, Alagoas. *Revista Geonordeste*, v. 33, n. 1, p. 208-226.
- Santos, J. M., Pessoa, M. M. D. L., Ferreira, R. L. C., Silva, E. A. (2020). Land-use and coverage in the structure of the landscape in a tropical dry forest in northeast Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 1, p. 88-97. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2675.088-097>
- Santos, S. M. B. D., Bento-Gonçalves, A., Franca-Rocha, W., Baptista, G. (2020). Assessment Of Burned Forest Area Severity And Postfire Regrowth In Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using Dnbr And Rdnbr Spectral Índices. *Geosciences*, v. 10, n. 3, p. 106. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030106>.
- Sausen, T. M.; Lacruz, M. S. P. (2015). *Sensoriamento Remoto para desastres*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Silva, A. B. N. & Beltrão, N. E. S. (2021). Metodologias de sensoriamento remoto para análise de queimadas com base em índices espectrais e diagnóstico de severidade. *Ciência Geográfica*, Bauru - SP. Vol. XXV.
- Silva, C. V. S., Silva, J. L. B., Moura, G. B. A., Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., Silva, L. C. (2019). Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. *Nativa*, v. 7, n. 6, p. 708. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>
- Silva, E. A., Ferreira, R. L. C., Silva, J. A. A., Sá, I. B., Araújo, S. (2013). Dinâmica do uso e cobertura da terra do município de Floresta, PE. *Floresta*, Curitiba, v. 43, n. 4, p. 611 - 620.
- Silva, E. A. *Mapeamento do uso e cobertura vegetal do Município de Floresta/PE*. (2011). Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 56.
- Silva, J. A. & Pacheco, A. P. (2021). Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por componentes principais. *Ciência Florestal*, v. 31, n.1, p. 417-439. <https://doi.org/10.5902/1980509843818>.
- Teobaldo, D. & Baptista, G. M. M. (2016). Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 1 p. 250-264.
- Vidal-Riveros, C., Souza-Alonso, P., Bravo, S., Laino, R., Bieng, M. A. N. (2023). A review of wildfires effects across the Gran Chaco region. *Forest Ecology And Management*, v. 549, p. 121432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121432>.