

DOI: 10.7127/rbai.v1501164

**MAPEAMENTO ESPECTRAL DE CICATRIZES DE QUEIMADAS NA CAATINGA
ATRAVÉS DE DADOS ORBITAIS MODIS E LANDSAT****SPECTRAL MAPPING OF BURNING SCARS IN CAATINGA THROUGH ORBITAL DATA
MODIS AND LANDSAT****José Galdino de Oliveira Júnior^{1*}**, **Jadiene Moura dos Santos²**, **Julyane Silva Mendes Polycarpo³**, **Pabrcio Marcos Oliveira Lopes⁴**, **Geber Barbosa de Albuquerque Moura⁵**, **Cristina Rodrigues Nascimento⁶**¹ Mestrando em Engenharia Agrícola, PGEA - DEAGRI/UFRPE, Recife, PE, Brasil.² Engenheira Florestal, DCFL - UFRPE, Recife, PE, Brasil.³ Mestranda em Engenharia Ambiental, PPEAMB - DTR/UFRPE, Recife, PE, Brasil.⁴ Doutor em Sensoriamento Remoto, Professor associado, DEPA - UFRPE, Recife, PE, Brasil.⁵ Doutor em Oceanografia, Professor Titular, DEPA - UFRPE, Recife, PE, Brasil.⁶ Doutora em Engenharia Agrícola, Professora associada, DEPA - UFRPE, Recife, PE, Brasil.

RESUMO: A mesorregião do Sertão Pernambucano apresenta condições climáticas que afetam diretamente a produção agrícola, pois apresenta um clima quente, seco e regime pluvial irregular. Em função dessas características, o bioma predominante da região, a Caatinga, torna-se mais vulnerável à ocorrência de queimadas, utilizadas historicamente como um meio prático para expansão da fronteira agrícola da região, acarretando, porém, em uma perda gradativa dos recursos naturais presentes no solo. Com o intuito de mapear e monitorar a incidência de focos de calor nessa mesorregião durante o período de 8 anos (2010-2017), este artigo teve como objetivo caracterizar o perfil de cicatrizes de queimadas e acompanhar o processo de regeneração natural da superfície vegetal ao longo do tempo. Baseado nos resultados do processamento digital das imagens de satélite (produtos MCD64A1, MOD13A3 e LANDSAT 8/OLI), de dados pluviométricos mensais locais e de arquivos vetoriais dos focos de calor no software de mineração de dados “WEKA”, encontrou-se uma correlação de 0,792 entre os dados dos índices mensais NDVI no momento da queima com aqueles obtidos após o evento e a capacidade de regeneração natural da vegetação, onde os pixels susceptíveis ao fogo variaram numa faixa espectral de NDVI entre 0,39 e 0,61. Quando foi avaliada diretamente a capacidade de recuperação natural da vegetação após o evento de queimada, foi observado que tal processo somente ocorreria se dois critérios fossem atendidos: uma pluviosidade crítica de 50,55 mm e um NDVI posterior mínimo de 0,41. Quanto à validação desses dados encontrados, esse mapeamento alcançou valores médios de eficácia de detecção de 48,92% e de erro de omissão local de 51,08% para as áreas de queima.

Palavras-chave: Árvore de decisão, focos de calor, índices pluviométricos, índices de vegetação, sensoriamento remoto

ABSTRACT: The Sertão Pernambucano mesoregion has climatic conditions that directly affect agricultural production, as it has a hot, dry climate and irregular rainfall. Due to these characteristics, the region's predominant biome, the Caatinga, becomes more vulnerable to the occurrence of fires, historically used as a practical means to expand the agricultural frontier of the region, causing, however, a gradual loss of the present natural resources in the soil. In order to map and monitor the incidence of hot spots in this mesoregion over the period of 8 years (2010-2017), this article aimed to characterize the profile of scars from burning and monitor the process of natural regeneration of the plant surface at the over time. Based on the results of digital processing of satellite images (MCD64A1, MOD13A3 and LANDSAT 8 / OLI products), of local monthly rainfall data and of heat source vector files in the “WEKA” data mining software, a correlation was found 0.792 between the data of the monthly NDVI indices at the time of burning with those obtained after the event and the capacity of natural vegetation regeneration, where the pixels susceptible to fire varied in a spectral range of NDVI between 0.39 and 0.61. When the capacity for natural recovery of vegetation after the burning event was directly assessed, it was observed that such a process would only occur if two criteria were met: a critical rainfall of 50.55 mm and a minimum subsequent NDVI of 0.41. As for the validation of these data, this mapping reached average values of detection efficiency of 48.92% and local omission error of 51.08% for the burning areas.

Key words: Decision tree, heat sources, rainfall indexes, vegetation indexes, remote sensing

INTRODUÇÃO

A mesorregião do Sertão Pernambucano está inserida em uma região com predominância da Caatinga, bioma que, apesar de ter um longo histórico de alterações ecossistêmicas causadas por ações antrópicas que visaram à expansão gradativa das fronteiras agrícolas (principalmente através de práticas como o desmatamento e queimadas), atualmente ainda resguarda um número expressivo de espécimes faunísticos e florísticos endêmicos raros (GUILIETTI et al., 2003; ALVES et al., 2009; LOURENÇO et al., 2017).

Tal bioma distingue-se por está situado predominantemente em condições de clima Semiárido – quente, seco e regime pluvial irregular (SILVA et al., 2017). Devido a estas condições meteorológicas e climáticas naturalmente adversas, essa região torna-se mais suscetível à ocorrência de queimadas nos períodos anuais onde são observados os menores índices pluviométricos (PINHEIRO et al., 2017).

Diferentes autores destacaram a relevância do uso de geotecnologias para a realização de estudos ambientais, especificadamente, relacionados à identificação dos efeitos causados por queimadas à vegetação (MIRANDA et al., 2015; SOUSA et al., 2015; SCHROEDER et al., 2016; SOUZA et al., 2016; RAMO; CHUVIECO, 2017; GIGLIO et al., 2018).

Nesse sentido, alguns estudos relacionam o uso de produtos do sensor orbital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) ao estudo e análise de áreas de queimadas em escala local, regional e global com resultados satisfatórios (RUIZ et al., 2014a; LIBONATI et al., 2015; MIRANDA et al., 2016; ZHU et al., 2017). Essas imagens correspondentes às áreas de queima, mesmo de baixa resolução espacial, possibilitaram o entendimento do comportamento dinâmico desses episódios de queimadas ocorridos no campo.

Dentre os indicadores mais empregados nesse tipo de estudo, tem-se o índice espectral NDVI (*Normalized Difference Vegetation*

Index), que é capaz de determinar os perfis sazonal e temporal da variação da vegetação em relação aos eventos de queimada, por deter informações referentes às faixas espectrais do vermelho (0,63 – 0,69 μ m) e do infravermelho próximo (0,78 – 0,90 μ m) – intervalo do espectro eletromagnético que contém a maior variação de resposta da vegetação à radiação solar (PONZONI, 2002; FERNANDES et al. 2016).

Assim, através de ferramentas como o Sensoriamento Remoto e técnicas de análise por mineração de dados (*data mining*), torna-se possível a obtenção de informações espaço-temporais que possibilitam, por exemplo, o diagnóstico das implicações ecológicas, climáticas e químicas geradas por tais eventos ao meio ambiente (LATORRE et al., 2007; SOUSA et al., 2015; SILVA; BAPTISTA, 2015). Possibilitando assim, a criação estratégias mais eficientes de combate à ação do fogo (MIRANDA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016).

Portanto, o objetivo do artigo foi caracterizar e mapear a incidência de focos de calor na mesorregião do Sertão Pernambucano, com a finalidade de se determinar uma metodologia alternativa de análise espectral de queimadas, a partir de dados orbitais de baixa resolução espacial. Almeja-se ainda identificar a área efetivamente afetada pelo fogo e acompanhar o processo de regeneração natural da superfície vegetal, tomando como referência os padrões com que as cicatrizes de queimadas ocorreram no campo e a influência da precipitação pluviométrica local sob tal processo.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo. A mesorregião do Sertão Pernambucano limita-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba, e a oeste com o de Piauí; onde representa aproximadamente 39% da área total do Estado (38.477 km²), com uma população estimada de 1.078.962 de habitantes (IBGE, 2020).

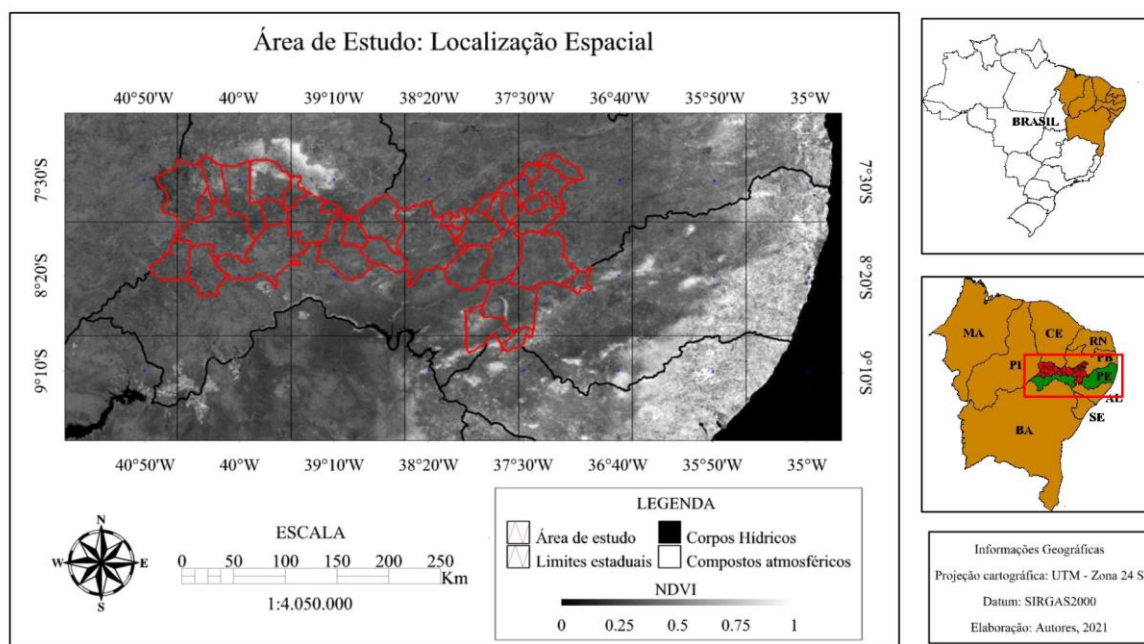


Figura 1. Localização Espacial da mesorregião do Sertão Pernambucano em uma imagem MOD13A3 do mês de outubro de 2012.

A fim de realizar a identificação dos meses mais secos do ano (aqueles que apresentariam um maior potencial para eventos de queimadas), foram utilizados dados de precipitação pluviométrica mensal da série temporal de 2010 a 2017, de dez municípios distribuídos espacialmente na mesorregião do Sertão Pernambucano, sendo eles: Araripina, Arcoverde, Exu, Flores, Ibimirim, Ouricuri, Parnamirim, Salgueiro, São José do Egito e Serra Talhada.

Os dados pluviométricos foram obtidos do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico da EMBRAPA (AGRITEMPO), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Posteriormente, executou-se uma análise climática baseada na média de trinta anos de dados de pluviosidade (1985 – 2015) tomando-se como referência três cidades: Arcoverde, Ouricuri e Triunfo (sendo escolhidas por serem os únicos municípios, entre todos os 41 componentes pertencentes à área de estudo, que apresentaram tais Normais Climatológicas).

Utilizou-se a técnica de “Quantis” nesses dados, de acordo com a metodologia de Xavier e Xavier (1999), para subdividir os

anos estudados (2010 a 2017) quanto à precipitação anual (PA): em anos secos, normais e chuvosos. Tal classificação obedeceu às ordens quantílicas de $Q(0,33)$ e $Q(0,66)$ e aos respectivos intervalos de frequência acumulada de probabilidade de ocorrência de evento (P): $P \leq 25\%$, $25\% < P \leq 75\%$ e $P > 75\%$.

Para a análise e monitoramento das áreas de queimadas foram utilizados os seguintes dados e etapas:

Imagens do produto MCD64A1: Compostas por dados de um algoritmo que detecta áreas de queimadas em escala mensal com resolução espacial de 500 m, sendo essas informações expressas em valores digitais relacionados à data de ocorrência da queima (com precisão média de 1 a 2 dias) (GIGLIO et al., 2018);

Arquivos vetoriais relacionados à ocorrência de focos de calor disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);

Imagens do produto MOD13A3: Utilizadas para o cômputo do índice espectral NDVI mensal relativo às áreas de queimadas, com resolução de espacial 1 km através das regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. Foi preciso empregar

um fator de escala de 0,0001, para a obtenção dos valores NDVI médios em números decimais, pois, este produto os apresenta originalmente em números digitais (ND) variantes de 0 a 10000 (DIDAN et al., 2015).

Imagens LANDSAT 8/OLI: Utilizadas no processo de validação do algoritmo MODIS quanto à sua eficácia de detecção das áreas de queima, por se tratar de um produto de melhor resolução espacial (30 m) e de boa aplicabilidade ao diagnóstico de queimadas, pois, apresenta a possibilidade de fusão da composição RGB (bandas 2, 3 e 4) à banda pancromática (banda 8) para a obtenção da resolução de 15 m (SILVA; BAPTISTA, 2015; SCHROEDER et al., 2016; GIGLIO et al., 2018).

Todas as imagens de satélite foram adquiridas gratuitamente junto à base de dados do *United States Geological Survey* (USGS) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para as imagens provenientes do sensor MODIS, foram utilizados os tiles h13v09 e h14v09 e para as LANDSAT, as cenas compreendidas entre as órbitas (215 a 217) e os pontos (65 e 66), todas referentes à localização espacial da área de estudo.

As imagens dos meses de julho a novembro, período detectado como mais seco do ano, foram analisadas levando-se em consideração os seguintes parâmetros: Maior quantidade mensal de focos de calor e de área queimada, menor presença de nuvens e o comportamento da vegetação antes e após a ocorrência desse evento mensalmente. Foi necessário realizar a correção geométrica das imagens MODIS em relação às imagens LANDSAT, padronizando esses dados para o sistema de coordenadas geográficas: Projeção UTM – Zona 24 S e Datum SIRGAS2000.

O processamento digital das imagens de satélite e dos arquivos vetoriais foi realizado no software ENVI (*Environment for Visualizing Images*) – versão 4.5, sendo as imagens do sensor MODIS convertidas outrora do formato *Hierarchical Data Format*

(*HDF) para *.GEO TIFF, utilizando-se para isso o aplicativo MODIS Reprojection Tool (MRT). Esta etapa do estudo consistiu em avaliar a associação dos pontos de calor com a área queimada detectada pelas imagens MCD64A1.

Após esta associação, avaliou-se a superfície vegetal afetada pelo fogo através do seu comportamento espectral (expresso nas imagens MOD13A3) de acordo com o quantitativo da precipitação média mensal (PMM) ocorrido no local, em três intervalos temporais definidos: Antes, Durante e Após o evento de queimada (PMM_Antes, PMM_Durante e PMM_Depois, respectivamente).

Para caracterização espectral das áreas susceptíveis à queima, foi utilizada a técnica de mineração de dados por “árvore de decisão” (AD) que, de acordo com Latorre et al. (2007) e Sousa et al. (2015), consiste em uma metodologia de interpretação hierárquica de valores que tem a função de dividir um volume de dados em subconjuntos até que estes contenham apenas casos de uma única classe comum, através de um processo de crescimento-poda-validação.

Ruiz et al. (2014b) ressaltaram a boa eficácia dessa ferramenta, devido a sua praticidade de execução, em vários estudos sobre classificação de dados relacionados à área de Sensoriamento Remoto.

Nesse contexto, esta técnica foi usada na busca de padrões nos pixels correspondentes às áreas de queima considerando as informações do índice NDVI e da precipitação pluviométrica ocorrida no local, ambos nos intervalos temporais mensais: antes, durante e após a queima.

Para a construção das árvores foi utilizado o algoritmo de classificação “REPTree”, lotado dentro do software de mineração de dados WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*) – versão 3.9.2., onde fora utilizado o coeficiente de correlação (R) como indicador da acurácia dos resultados de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1. Algoritmo REPTree: Coeficiente de correlação entre valores (R).

Coeficiente de Correlação (R)	Conceito de correlação
0	Péssima
$0 < C \leq 0,20$	Ruim
$0,21 < C \leq 0,40$	Razoável
$0,41 < C \leq 0,60$	Boa
$0,61 < C \leq 0,80$	Muito Boa
$0,81 < C \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Adaptada de Latorre et al. (2007).

Posteriormente, foi executada a validação da eficácia de detecção dessas áreas mapeadas pelo sensor MODIS através das imagens LANDSAT, através da fusão de 15m (bandas 2, 3, 4 e 8) em quatro anos específicos: 2013, 2015, 2016 e 2017 (municípios de Inajá, Triunfo, Flores e Itapetim, respectivamente). Tais anos foram escolhidos especificadamente entre os demais, devido à presença de nuvens e ruídos, ambos os fatores encontrados em alguns dos dados orbitais LANDSAT durante o estudo (ALMEIDA et al., 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a precipitação pluviométrica mensal da série temporal de 2010 a 2017, baseada na média aritmética das

dez cidades utilizadas no estudo, onde se verifica que o período mais seco do ano compreende os meses de junho a outubro (PINHEIRO et al., 2017). Característica esta, que torna essa área mais susceptível à incidência de focos de calor.

Observou-se também que o período chuvoso da região é concentrado entre os meses de janeiro a abril, com redução da pluviosidade a partir de maio.

A pré-estação chuvosa, por sua vez, inicia-se no mês de novembro (LOURENÇO et al., 2017).

A Tabela 2 apresenta a categorização obtida a partir da técnica de “Quantis” aplicada aos dados pluviométricos anuais (PA) das normais climatológicas envolvidas no estudo, baseando-se na metodologia proposta por Xavier e Xavier (1999).

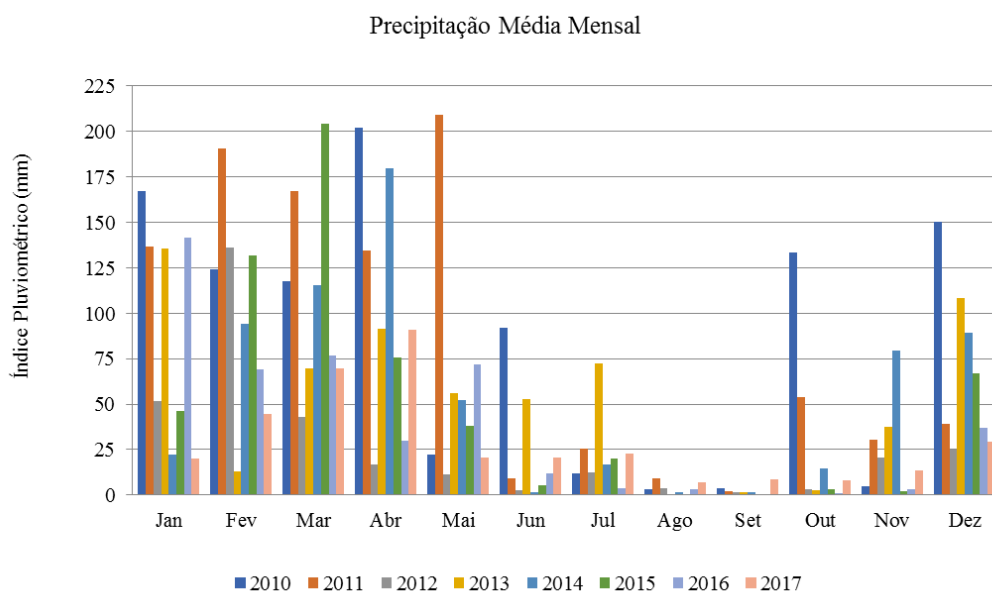


Figura 2. Distribuição temporal da precipitação pluviométrica média mensal gerada a partir da série anual de 2010 a 2017 para os 10 municípios analisados no estudo.

Tabela 2. Classificação pluviométrica anual – Normais climatológicas.

Classe Anual	Intervalo de valores de precipitação pluviométrica anual (PA)	Intervalo de frequência acumulada de probabilidade de ocorrência (P)
	mm	%
Anos “SECOS”	PA ≤ 543,3	P ≤ 25
Anos “NORMAIS”	543,3 < PA ≤ 855,4	25 < P ≤ 75
Anos “CHUVOSOS”	PA > 855,4	P > 75

Valores semelhantes foram encontrados por Monteiro et al. (2012) quando analisaram durante o mesmo intervalo de tempo (30 anos – 1980 a 2009), a região do baixo curso do Rio Apodi localizado no município de Mossoró/RN: região essa que também apresenta o clima

semiárido, ressaltando assim, a característica espaço-temporal de baixos índices pluviométricos anuais pertencente a ambas as regiões.

A Tabela 3 demonstra a classificação, quanto aos períodos acima relacionados, para os anos analisados no estudo.

Tabela 3. Classificação pluviométrica da série temporal de 2010 a 2017 através da análise de Quantis.

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Precipitação Média Anual (mm)	1.031,8	1.007,2	327,2	641,1	668,1	593,7	434,7	430,3
Classe	C	C	S	N	N	N	S	S

*Onde: “C” – Ano Chuvoso, “N” – Ano Normal, “S” – Ano Seco.

Após a execução dessa análise climática, pôde-se avaliar a associação dos pontos de calor (vetores espaciais) com as possíveis áreas queimadas identificadas nas imagens MCD64A1.

Foram utilizados os vetores representativos dos meses que apresentaram maior incidência de focos de calor localizados pelos satélites, a fim de que fosse identificado o maior quantitativo de áreas de queimadas.

Na Figura 3, apresenta-se a localização espacial das áreas de queimadas detectadas no ano de maior ocorrência mensal de focos de calor na série estudada: 2011. Em destaque, também são demonstradas seis áreas confirmadas e uma que não coincidiu com qualquer um dos focos de calor do mês de novembro, que, como ocorrido em outros casos dentro da série analisada, optou-se por descartá-las do estudo devido à possibilidade

de terem sido mapeadas erroneamente, expressando assim, um possível erro de comissão do algoritmo MODIS (LIBONATI et al., 2015; GIGLIO et al., 2018).

Vale ressaltar que para a série temporal analisada, o mês de maior ocorrência de queimadas foi novembro, seguido por outubro.

A Figura 4A discrimina as áreas identificadas pelo algoritmo de detecção territorial desenvolvido através do produto MCD64A1, em relação ao ano e ao tamanho da área afetada pelo fogo.

Foi observado que esse produto foi capaz de mapear com maior precisão anual, os focos de calor que pertenceram a áreas de extensão espacial inferior a 200 ha (aproximadamente 57,8% dos dados analisados), como foi descrito por Zhu et al. (2017) e Giglio et al (2018) em seus estudos.

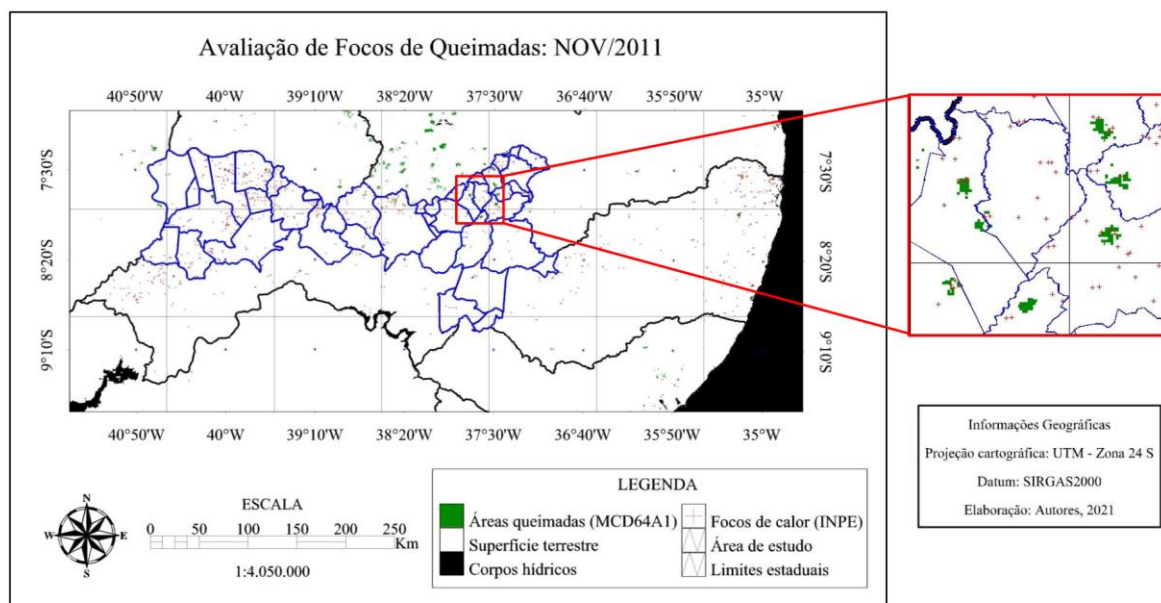


Figura 3. Imagem MCD64A1 do mês de novembro de 2011, em destaque: áreas com potencial de pertencerem a áreas de queimadas (em verde) e os focos de calor ocorridos no mesmo mês (em vermelho).

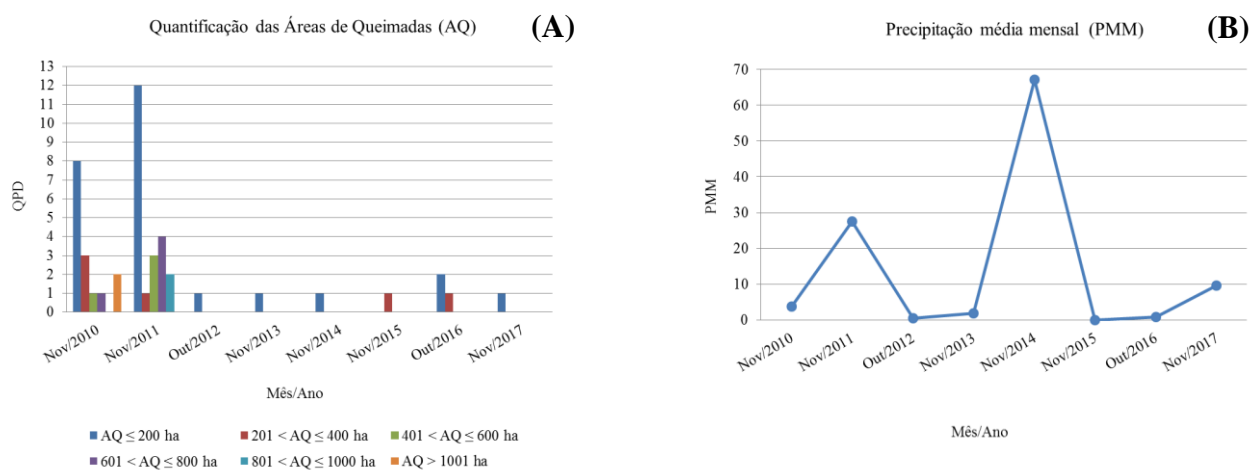


Figura 4. Análise espaço-temporal das áreas queimadas ocorridas de 2010 a 2017. *Onde: QPD – Quantidade de Polígonos Detectados.

Referente às outras classes delimitadas pelo estudo ($201 < x \leq 400$ ha, $401 < x \leq 600$ ha, $601 < x \leq 800$ ha, $801 < x \leq 1000$ ha e $x > 1001$ ha), encontrou-se os percentuais de 13,3%, 8,9%, 11,1%, 4,4% e 4,4%, respectivamente. Entre os anos mais afetados pelo fogo, destacaram-se 2010 e 2011, representando juntos aproximadamente 82% dos dados detectados. A classificação climatológica feita nesse estudo, estes anos (2010 e 2011) apresentaram uma baixa precipitação no mês de ocorrência das queimadas semelhante aos outros anos; exceto o ano de 2014 (Figura 4B).

Fato este, que evidencia tanto a ação antrópica como principal fonte de ignição como um possível erro de detecção no ano de 2014, pela presença de nuvens na imagem orbital gerada (ALMEIDA et al., 2019). Foi realizado o processamento das imagens MOD13A3 e dos focos de calor confirmados (vetores), almejando-se caracterizar essas áreas de queima em relação à capacidade de regeneração da vegetação ligada à influência da precipitação pluviométrica ocorrida no local. A Figura 5 apresenta essa relação associada ao ano de ocorrência do foco de calor desses locais afetados pelo fogo.

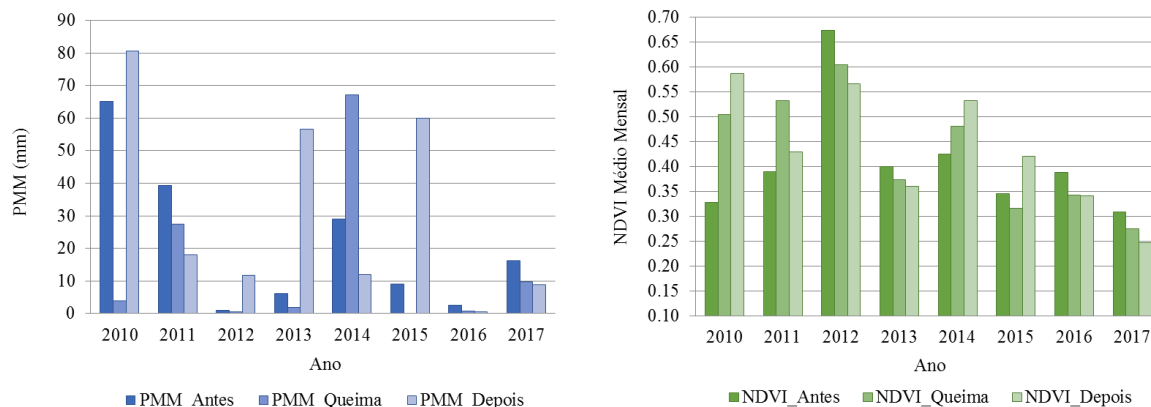


Figura 5. Análise das médias mensais da precipitação pluviométrica e do NDVI para os municípios analisados antes, durante e após a ocorrência dos focos de calor. *Onde: PMM – Precipitação Média Mensal (mm).

De acordo com a Figura 5, somente o ano chuvoso de 2010 e os anos normais (2014 e 2015) exibiram um comportamento espectral de expressiva progressão no NDVI após o processo de queima, devido à pluviosidade ocorrida no local. Tal comportamento foi também evidenciado por Pinheiro et al. (2017), onde destacaram essa intrínseca relação da vegetação da Caatinga com a variabilidade temporal da pluviosidade local, denotando que esse bioma apresenta variação rápida quanto aos primeiros indícios de precipitação na área, estendendo-se a uma escala bimensal.

Por outro lado, de uma maneira geral, esse contexto ocorreu inversamente quando não houve a presença suficiente de chuvas no local durante os períodos da queima e posterior a esta, cenário este que se sucedeu na maioria das cidades atingidas (PINHEIRO et al., 2017).

No caso dos anos secos (2012, 2016 e 2017), especificamente, a pluviosidade alcançou os menores índices mensais nos três períodos estudados (antes, durante e após a queima). Lourenço et al. (2017) perceberam que a variação do NDVI se torna mais abrupta em períodos de transição entre épocas secas e chuvosas, reforçando essa característica de adaptação fotossintética à deficiência hídrica local pertencente a esse tipo de vegetação: a caducifólia.

Dito isso, foi observado que a precipitação pluviométrica é um fator importante que está diretamente relacionado

com o processo de regeneração da vegetação na área analisada.

Através da análise desses dados no *software* WEKA, baseando-se especificamente no conceito de correlação entre valores apresentado pelo classificador “REPTree” (Tabela 3), foi observada uma relação ($R = 0,792$) entre o NDVI mensal no momento da queima, o NDVI posterior a esta e o processo de regeneração vegetal.

Os valores encontrados no NDVI dos pixels pertencentes às áreas de queimadas variaram entre 0,39 e 0,61. Faixas espectrais de valores semelhantes foram encontradas por Miranda et al. (2015) e Souza et al. (2016) quando analisaram áreas do Cerrado Brasileiro, a partir de produtos orbitais MODIS de resolução espacial de 250m: MOD09 (0,44 a 0,51) e MOD13Q1 (0,15 a 0,40), respectivamente. Lourenço et al. (2017) classificaram espacial e temporalmente, em função do Índice NDVI, áreas de Caatinga natural através de imagens LANDSAT 5/TM e observaram valores que variaram de 0,13 a 0,67. Tais estudos comprovam que o produto MOD13A3 pode ter superestimado alguns valores de NDVI dentro da série temporal analisada nesse estudo, devido a sua limitação quanto à resolução espacial (1 km). Todavia, pôde-se identificar também que essas áreas só terão a capacidade de regeneração ao longo do tempo se estiverem em uma faixa de valores inferiores ou iguais a 0,45, pois, acima desse valor, o NDVI apresentou uma redução espectral após a queimada (Figura 6A).

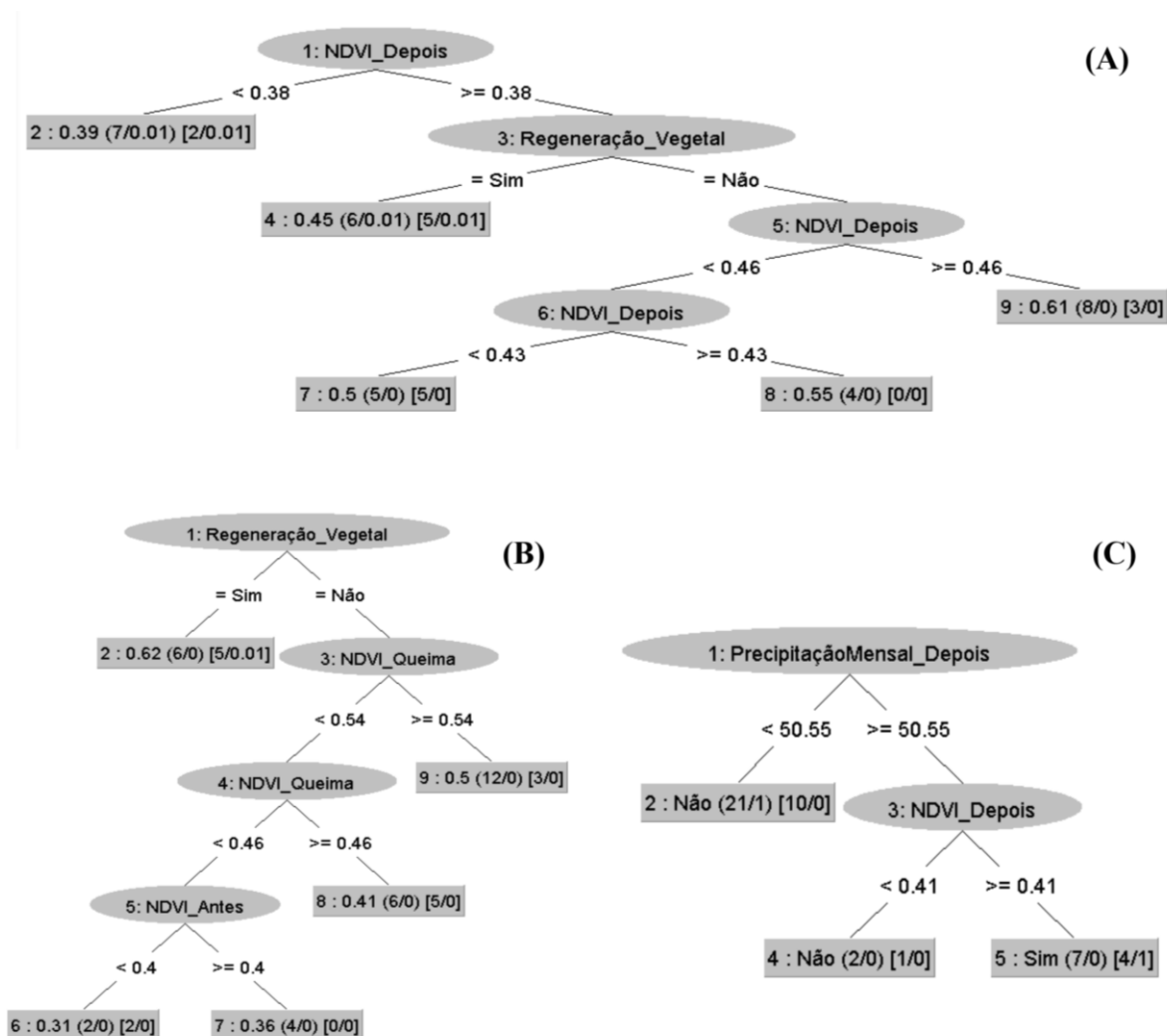


Figura 6. Árvores de decisão: Análises do NDVI mensal de queima, NDVI posterior à queima e do diagnóstico da regeneração vegetal (Figuras 6A, 6B e 6C, respectivamente).

A Figura 6B representa a árvore de decisão gerada a partir do NDVI posterior à queima, onde se encontrou uma correlação de 0,8614 com os dados de NDVI mensal de queima e o processo de regeneração natural da vegetação da região afetada pelo fogo, que, vincula inicialmente a recuperação vegetal a um NDVI posterior à queima crítico de 0,62.

Porém, quando se analisou diretamente o processo de recuperação e/ou regeneração natural da vegetação local após o evento de queimada (Figura 6C), foi expressa uma correlação superior com a precipitação pluviométrica após o evento de queimada ($R = 0,8797$), indicando que a regeneração dessas áreas somente ocorrerá se um valor mínimo de NDVI de 0,41 e a precipitação crítica de 50,55 mm forem alcançados no local.

A Figura 7 expressa a fase da validação desse mapeamento das áreas queimadas que se refere à comparação da localização espacial detectadas pelo algoritmo MODIS em relação às imagens de referência LANDSAT 8/OLI.

Através desses dados, é possível perceber que o produto MCD64A1 apresentou maior precisão espacial à medida que as áreas de queima aumentaram de dimensão territorial (RUIZ et al. 2014a; RAMO; CHUVIECO, 2017). Giglio et al. (2018) encontraram em seus estudos um coeficiente de acerto para este produto MODIS variante entre 0,554 e 0,777, quando analisaram pequenas áreas de queima em Mali com cenas de referência de imagens LANDSAT 8/OLI, e de 0,818, quando realizaram uma avaliação de precisão em escala regional em seus dados examinados.

Mapeamento espectral de cicatrizes de queimadas na caatinga através de dados orbitais modis e landsat

Notou-se ainda que os erros de georreferenciamento presentes na Figura 7 poderiam estar atrelados à baixa resolução geométrica do produto MCD64A1 (500m), pois, este fato também foi evidenciado por

Zhu et al. (2017) ao usufruírem do MCD64A1 (Coleção 5.1) em seus estudos, onde perceberam essa limitação na detecção de queimadas inferiores a 100 ha de extensão territorial.

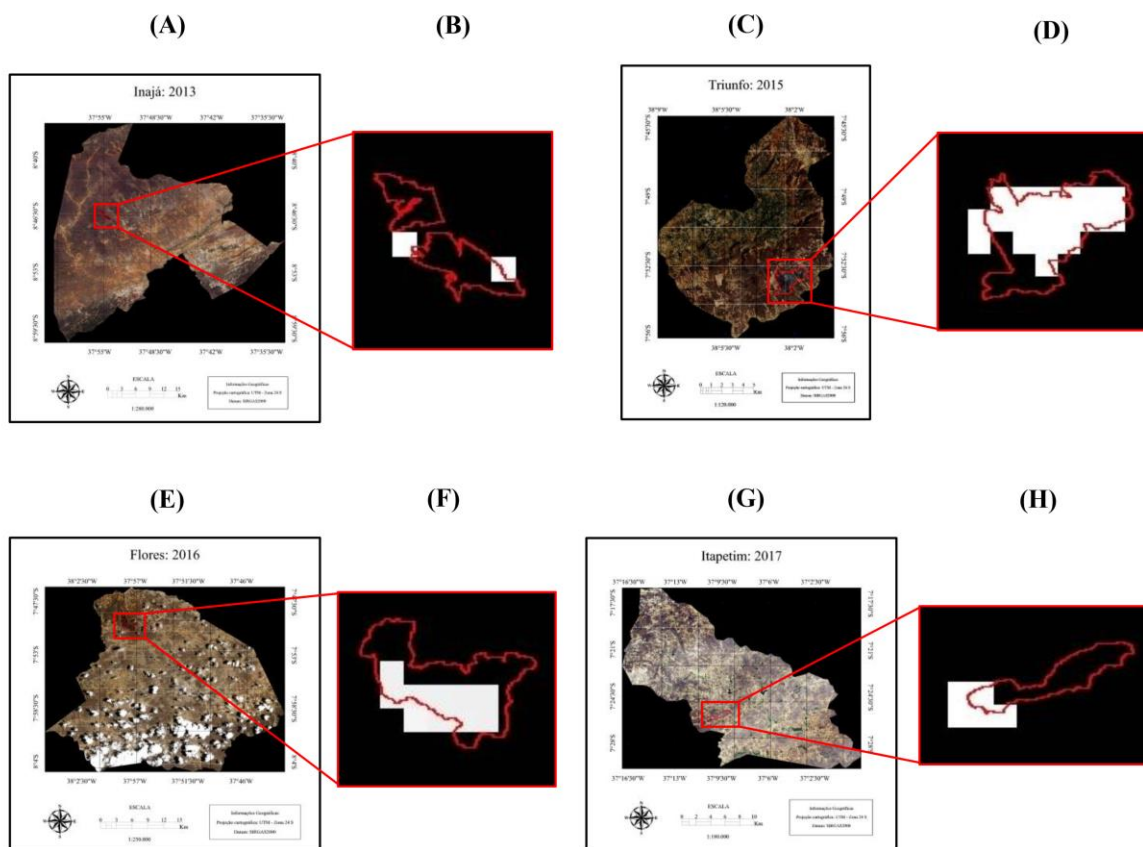


Figura 7. Representação espacial das áreas queimadas nos municípios de Inajá (2013), Triunfo (2015), Flores (2016), e Itapetim (2017) (itens A, C, E e G, respectivamente): áreas realmente queimadas – traçados na coloração vermelha e áreas detectadas pelo algoritmo MODIS – pixels na coloração branca (itens B, D, F e H).

A Tabela 4 analisa diretamente essa eficiência do produto MCD64A1 na detecção das áreas de queimadas demonstrada na Figura 7. Pôde-se perceber que esse

produto foi eficaz nesse mapeamento, porém, tendeu a perder esta característica quando o critério analisado foi a extensão espacial de queima.

Tabela 4. Eficácia de detecção de áreas queimadas pelo algoritmo gerado através das imagens MCD64A1 em comparação às imagens LANDSAT 8/OLI.

Município	Área Queimada (MODIS) (ha)	Área Queimada (LANDSAT) (ha)	Data de Ocorrência dos Focos de calor (INPE)	DFD (MODIS) (Dias)	Data de Obtenção (LANDSAT 8 /OLI)	ED (%)	EOL (%)
Inajá	21,5	107,3	19/11/2013	4	10/12/2013	20,00	80,00
Inajá	21,5	85,9	24/11/2013	2	10/12/2013	25,00	75,00
Triunfo	386,4	493,7	30/11/2015	-	07/12/2015	78,26	21,74
Flores	214,7	364,9	11/10/2016	1	22/10/2016	58,83	41,17
Itapetim	107,3	171,7	01/11/2017	-	19/11/2017	62,51	37,49

*Onde: ha – Hectares, DFD – Defasagem de dias, ED – Eficácia de Detecção, EOL – Erro de Omissão Local.

Fato este, que é justificado pelos altos erros de omissão local (80% e 75%) sucedidos no município de Inajá no ano de 2013, pois, pode-se perceber que este produto MODIS não é capaz de identificar com exatidão a progressão de queimadas que apresentem dimensão territorial inferior a sua resolução espacial: 21,5 ha (ZHU et al., 2017; GIGLIO et al., 2018).

Zhu et al. (2017) apontam ainda que isto se deve a fatores inerentes como o tipo de material inflamável, a duração temporal das queimadas a influência da velocidade do vento na propagação do fogo e o tipo de textura do solo.

CONCLUSÕES

O processo de mineração de dados gerado a partir do cruzamento das informações extraídas dos produtos orbitais (MCD64A1, MOD13A3 e LANDSAT 8/OLI) e do parâmetro precipitação permitiu o mapeamento e a caracterização do comportamento da vegetação em eventos de queimada para a área em estudo, com eficácia de detecção de 48,92% e erro de omissão local de 51,08% (ambos, valores médios).

Foi observado também que a influência da precipitação pluviométrica no processo de regeneração vegetal das áreas afetadas pelo fogo só ocorre com um intervalo superior a um ou dois meses, demonstrando que essa possibilidade está intimamente ligada ao seu grau de degradação ambiental, como foi comprovado pelos resultados encontrados pelo estudo, especificadamente, em relação ao percentual do NDVI que se tornou propenso a essa recuperação.

Em contrapartida, o produto MOD13A3 demonstrou uma pequena limitação operacional quanto à análise espectral das áreas de queima, provavelmente devido à sua baixa resolução espacial e ao fato de que cerca de 80% das áreas de queimadas detectadas terem sido de anos chuvosos, tornando a presença de nuvens mais evidente nesse tipo de imagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos incentivos que viabilizaram a execução dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. L. de; CARVALHO, T. R. A. de; ARAÚJO, J. C. de. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, n. 107705, 2019.
- DIDAN, K. MUNOZ, A. B. SOLANO, R. HUETE, A. **MODIS vegetation index user's guide (MOD13 Series)**. Versão 3. 2015. Disponível em: <https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2018.
- FERNANDES, A. C. G.; COUTINHO, M. A. N.; SANTOS, V. G.; NASCIMENTO, C. R. Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 30-40, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/2845>>.
- GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; HUMBER, M. L.; JUSTICE, C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72-85, 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**: Estimativas de população – 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/estimapop/tabelas>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

- LATORRE, M. L.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Integração de dados de sensoriamento remoto multi resoluções para a representação da cobertura da terra utilizando campos contínuos de vegetação e classificação por árvores de decisão. **Revista Brasileira de Geofísica, on-line**, v. 25, n. 1, p. 63-74, 2007.
- LIBONATI, R.; CAMARA, C. C. da; SETZER, A. W.; MORELLI, F.; MELCHIORI, A. E. An algorithm for burned area detection in the Brazilian Cerrado using 4 µm MODIS imagery. **Remote Sensing**, v. 7, p. 15782-15803, 2015.
- LOURENÇO, V. R.; RAMOS, N. N. L. A.; COSTA, C. A. G. Distribuição espaço-temporal do NDVI sob condições de caatinga preservada. **Revista Espaço Aberto**, v. 6, n. 2, p. 101-110, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto/article/view/3565/8627>>.
- MIRANDA, J. R.; SALES, G. B.; NASCIMENTO, C. R. Caracterização do perfil vegetativo propício à queima a partir de dados orbitais do sensor MODIS. **Caminhos de Geografia**, v. 16, n. 56, p. 73-83, 2015. Disponível em: <www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/28856>.
- MONTEIRO, J. B.; ROCHA, A. B.; ZANELLA, M. E. Técnica dos Quantis para caracterização de anos secos e chuvosos (1980-2009): Baixo curso do Apodi – Mossoró/RN. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 232-249, 2012.
- PINHEIRO, K.; ALVES, E.; MELO, J. G.; ALVES, E.; GALVÍNCIO, J. Avaliação da sazonalidade através do NDVI na Caatinga. In: NÓBREGA R. S. et al. (Org.). **Reflexões sobre o semiárido: Obra do encontro do pensamento geográfico** [livro eletrônico]. 1. ed. Ananindeua: Itacaiúnas, 2017. Cap. 18, p. 142-148. Disponível em: <<https://editoraitacaiunas.com.br/produto/reflexoes-sobre-o-semiarido-obra-do-encontro-do-pensamento-geografico/>>.
- PONZONI, F. J. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: Diagnosticando a mata atlântica. In: RUDORFF, B. F. T. et al. (Ed.). **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002. Cap. 8. 27p. (INPE-8984-PUD/62). Disponível em: <<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.11>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- RAMO, R.; CHUVIECO, E. Developing a Random Forest algorithm for MODIS global burned area classification. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1193-1220, 2017.
- RUIZ, J. A. M.; LÁZARO, J. R. G.; CANO, I. A.; LEAL, P. H. Burned area mapping in the North American Boreal Forest using Terra-MODIS LTDR (2001–2011): A comparison with the MCD45A1, MCD64A1 and BA GEOLAND-2 products. **Remote Sensing**, v. 6, p. 815-840, 2014.
- RUIZ, L. F. C.; CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D. Árvore de decisão e a densidade mínima de amostras no mapeamento da cobertura da terra. **Revista Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1001-1007, jun. 2014.
- SCHROEDER, W.; OLIVA, P.; GIGLIO, L.; QUAYLE, B.; LORENZ, E.; MORELLI, F. Active fire detection using Landsat-8/OLI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 210-220, 2016.
- SILVA, S. L.; BAPTISTA, G. M. M. Análise do grau de severidade de áreas queimadas na Estação Ecológica de Águas Emendadas por meio de dados do Landsat 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 2, p. 431-438, jul. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/articulo/view/233368>>.
- SILVA, B. K.; SILVA, J. F.; SILVA, R. K. A.; MESQUITA, A. N. S.; GOMES, V. P. O

Nordeste Brasileiro e a Caatinga: Diversidade e potencialidade. In: NÓBREGA R. S. et al. (Org.). **Reflexões sobre o semiárido**: obra do encontro do pensamento geográfico [livro eletrônico]. 1. ed. Ananindeua: Itacaiúnas, 2017. Cap. 38, p. 270-275. Disponível em: <<https://editoraitacaiunas.com.br/produto/reflexoes-sobre-o-semiarido-obra-do-encontro-do-pensamento-geografico/>>.

SOUSA, G. M.; FERNANDES, M. C.; COSTA, G. A. O. P. da. Classificação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios através de mineração de dados e GEOBIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n.3, p. 555-567, maio/jun. 2015. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44650>>.

SOUZA, G. M.; GURGEL, H. C.; CIAMP, P. M. Análise sazonal da vegetação do Cerrado

por meio de dados do sensor MODIS no Distrito Federal (BRASIL). **Boletim Goiano de Geografia (Online)**, v. 36, n. 3, p. 502-520, set./dez. 2016.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n. 2, p. 63-78, dez. 1999. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=491>.

ZHU, C.; KOBAYASHI, H.; KANAYA, Y.; SAITO, M. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. **Scientific Reports**, v. 7, p. 4181-4190, 2017.