

Uso de técnicas de sensoriamento remoto utilizando imagens Modis (MCD45A1) para identificação e avaliação de áreas queimadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG, Brasil

The use of remote sensing techniques by Modis (MCD45A1) images using to identify and evaluate burned areas in the metropolitan region of Belo Horizonte – MG, Brazil

Luiza Cintra Fernandes^a

Marcelo Antonio Nero^b

Plínio Temba^c

Marcos Antônio Timbó Elmiro^d

^aMestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil
End. Eletrônico: luizacintraf@gmail.com

^bDoutor em Engenharia de Transportes, professor no Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil
End. Eletrônico: marcelo.nero@gmail.com

^cDoutor em Engenharia Civil, professor no Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil
End. Eletrônico: temba.mobile@gmail.com

^dDoutor em Computação Aplicada, professor no Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil
End. Eletrônico: timboelmiro@gmail.com

doi:10.18472/SustDeb.v11n2.2020.28145

Received: 07/11/2019

Accepted: 16/06/2020

ARTICLE- DOSSIER

RESUMO

Estudos sobre a ocorrência de queimadas são muito importantes, visto que eles corroboram medidas de controle, prevenção e monitoramento destas. Incêndios florestais causam vários impactos, entre eles perda da biodiversidade e prejuízo à saúde humana, sendo um problema tanto na esfera ambiental quanto social e política. Uma forma de monitoramento desses incêndios é a utilização de técnicas de sensoriamento remoto. Assim, a proposta do presente trabalho foi a utilização de imagens Modis (MCD45A1) para identificação e avaliação de áreas queimadas na região metropolitana de Belo Horizonte, entre os anos de 2012 e 2016, validando-o com dados do sensor Landsat-8/OLI. Com o emprego dos dados Landsat, é possível delimitar com melhor precisão a dimensão da área queimada,

mas exigindo-se conhecimento técnico operacional e corpo técnico especializado para tanto. Já o produto decorrente do Modis, é mais acessível e de fácil utilização, sendo de aplicação direta, pois já informa os focos de incêndio. Observou-se grande ocorrência de queimadas na região de estudo, principalmente na primavera e no inverno. Os resultados encontrados aqui poderão ser utilizados em estudos futuros para diminuir a incidência de queimadas na região e assim preservar a biodiversidade de biomas importantes nela presente.

Palavras-chave: Incêndios Florestais. Landsat/OLI. Modis MCD45A1. Preservação Ambiental.

ABSTRACT

The study of fire burned areas is very important, since they corroborate with control measures, prevention and monitoring of fires. Forest fires causes numerous impacts, among them, there is biodiversity lost and human health prejudice. So, it is a problem of environmental sphere as well as a social and political sphere. A way of monitoring this is using remote sensing techniques. So the propose of the present article is to use the Modis product (MCD45A1) to identify and evaluated the burned areas in metropolitan region of Belo Horizonte, among the years of 2012 to 2016, which is validated with Landsat-8/OLI sensor data. With the use of Landsat data it is possible to define the size of the burned area with greater precision, but requiring technical operational knowledge and specialized technical staff for both, on the other side, Modis is easier to operate, and have direct application and higher availability. It was observed that the study area has high burned area occurrences, mainly in spring and winter. The results found here could be used for future studies to decrease the forest fires incidence in the region and thus preserve the biodiversity of important biomes present in it.

Keywords: Forest fires. Landsat. Modis MCD45A1. Environmental Preservation.

1 INTRODUÇÃO

As ocorrências de queimadas na vegetação representam sérias preocupações relacionadas ao meio ambiente, pois devastam grandes proporções de florestas, campos e regiões agrícolas, causando alterações no meio ambiente. Guimarães et al. (2014) verificaram como principais impactos dos incêndios: aquecimento do solo, erosão, redução de nutrientes do solo, redução do teor de matéria orgânica, acidez do solo, alteração do microclima local, redução da qualidade da água, mortalidade de animais, enfraquecimento da madeira, limpeza do sub-bosque, impactos às culturas agrícolas, interferência na sucessão vegetal, redução da atividade de microrganismos e renovação da pastagem, transtornos à população do entorno, impactos paisagísticos e destruição de áreas de recreação.

Ichoku e Kaufman (2005) afirmam que as queimadas causam impactos no albedo, modificações do balanço radiativo da atmosfera, alterações nos ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, além da liberação de gases de efeito estufa na atmosfera. Além disso, as ocorrências de queimadas estão amplamente associadas ao clima, às condições da vegetação e principalmente às atividades humanas (SANTOS; SOARES; BATISTA, 2006). Vale destacar também a abordagem do assunto em Lima e Nasuti (2017), Silva e Carneiro (2014), entre outros.

Quando um ambiente natural é destruído, se este não foi propriamente estudado, muitas espécies de plantas e animais são perdidas, o que é uma grande perda para a ciência e para a humanidade. Por isso, a importância da proteção e defesa da biodiversidade. Um exemplo a ser citado como perda de biodiversidade é o Cerrado brasileiro, onde aproximadamente 40% a 50% do solo foi transformado em agricultura nos últimos 50 anos. Esse bioma representa 23% da cobertura do Brasil e é um dos mais importantes *hotspots* de conservação da biodiversidade. Outro bioma muito afetado é a Mata Atlântica, a qual compreende 7% de matas remanescentes do original (GIUSTINA; SILVA; MARTINS, 2018).

O processo de queimadas no Brasil é crescente e se intensifica principalmente nos períodos mais secos do ano, podendo ser divididos entre focos naturais e antrópicos. O assunto é também tratado com

detalhe em Lima e Nasuti (2017) e Silva e Carneiro (2014). Quanto aos processos antrópicos, esses são geralmente ligados à limpeza de áreas para expansão agrícola e pecuária, além de ser uma forma de manejo em algumas culturas, como a cana-de-açúcar (FERNANDES et al., 2016).

Entre os grupos de causas de incêndios classificados pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, sigla do inglês Food and Agriculture Organization), a maioria envolve fatores antrópicos, tais como: incêndios propositais, por motivos como retaliação, vingança, disputa pela posse de terras, urbanização e incapacidade mental, entre outros; queima para limpeza, para fins agrícolas; fumantes, devido à negligência de jogar pontas de cigarro ou fósforo acesos; operações florestais e recreação (JUVANHOL, 2014). Vale destacar que é possível desenvolver sistemas automatizados de monitoramento e prevenção de desastres, tal como é aplicado na área de deslizamento, por exemplo, como citado por Saito, Lima e Dias (2019). No entanto, vale ressaltar, também, pesquisas voltadas para a área de prevenção de incêndios, apresentadas em Fernandes (2019), Fernandes et al. (2018a, 2018b, 2019), Oliveira (2013), Oliveira e Nero (2012, 2013), Oliveira et al. (2017), Prudente (2010), Ribeiro (2009), Ribeiro et al. (2008) e Zhang et al. (2011).

Além dos impactos de perda de biodiversidade, as queimadas representam grande risco à saúde humana, pois emitem material particulado fino que prejudica o sistema respiratório. Essas partículas se depositam nos brônquios terminais e nos alvéolos, agravando problemas respiratórios. Assim, municípios situados nas imediações das áreas de queimadas têm problemas crescentes com saúde pública. Dessa maneira, estima-se que nos próximos 20 anos a poluição do ar será responsável por 156 mil mortes, 4 milhões de casos de asma e 300 mil atendimentos médicos em crianças (CASTRO et al., 2016).

Considerando-se tudo o que já foi exposto aqui, pode-se afirmar que a problemática das queimadas envolve tanto questões sociais e de saúde pública quanto questões ambientais, relacionadas às perdas de biodiversidade. Portanto, na tomada de medidas de prevenção e controle desse fenômeno, é necessário primeiro o estudo e entendimento deste. Dessa maneira, o conhecimento do local onde mais ocorrem as queimadas, frequência de acontecimentos, épocas do ano, entre outros, são de vital importância.

A partir desses dados, torna-se possível identificar as causas e estudar as melhores formas de controle e prevenção de incêndios. Assim, é importante dispor de uma forma rápida e eficiente de detecção de incêndios florestais para melhorar o controle das queimadas, monitorar as áreas afetadas, obter reduções dos custos nas operações de combate, permitir atenuação dos danos e estimar os impactos causados na região. As formas de detecção podem ser realizadas de diferentes maneiras, tais como por meio de: postos de vigilância, torres de observação, patrulhamento aéreo e monitoramento por imagens de satélite (BATISTA, 2013).

Técnicas de sensoriamento remoto se tornam uma boa solução quando o objetivo é mapear incêndios em áreas de acesso dificultado, como, por exemplo, unidades de conservação e áreas rurais, já que não existem monitoramentos nessas áreas e o registro é feito apenas por meio de denúncias.

O sensoriamento remoto consiste em obter informações de um objeto ou alvo, sem que haja contato físico com ele, sendo as informações obtidas utilizando-se radiação eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos (ROSA, 2011). Além disso, o sensoriamento remoto permite a identificação de classes temáticas na superfície terrestre, assim como a área de ocorrência, explorando as classes de uso do solo. Adicionalmente, devido a seu domínio temporal, identifica também alterações em objetos da superfície, muito importante principalmente para o planejamento e ambiente.

Com a integração de suas características espectrais e espaciais, é possível extrair informações em relação ao produto de uma única data ou de poucas datas. Como exemplo, tem-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (do inglês Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), onde, mediante a utilização da reflectância nas faixas do vermelho e infravermelho próximo, são fornecidas informações da quantidade da biomassa verde fotossinteticamente ativa da vegetação (PEREIRA FILHO, 2014). Assim,

técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para conhecimento de ocorrências de queimadas, bem como a quantificação da área e da biomassa afetadas pelo fogo (FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Em termos da temática de meio ambiente vale destacar diversos trabalhos que aplicam sensoriamento remoto, tais como: 1) o realizado por Barbalho et al. (2019) com o emprego de imagens Rapideye em conjunto com técnicas de geoprocessamento; 2) o emprego do ArcGIS (programa de processamento na área de Sistemas de Informação Geográfica, SIG) com a utilização de imagens Google Earth; 3) pesquisa com a aplicação de SIG e análise temporal de estudos de devastação ambiental, relatada em Guistina et al. (2018).

Para a detecção de queimadas por meio do sensoriamento remoto, são envolvidas três fontes de radiação: a emissão da queimada em si, como substâncias da combustão, a emissão e reflexão da área em que ocorre a queimada, e a reflexão de outras fontes, como solo exposto. A utilização de mudanças na superfície entre vegetação e solo exposto é uma das formas mais utilizadas para detecção de áreas queimadas, como exemplo tem-se o uso de imagens de satélites dos sistemas Landsat e Spot, que possuem grande potencial para tal fim, devido a sua fina resolução espacial em relação a outros sensores (FRANÇA; FERREIRA, 2005). Outra forma de detecção é a utilizada por Resende et al. (2017) o bioma Cerrado se tornou um dos ambientes mais favoráveis para a expansão da fronteira agrícola. Uma das consequências consiste no desmatamento e no aumento do número de queimadas, ocasionando a degradação e supressão de extensas áreas de ecossistemas naturais do bioma. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal analisar a distribuição espacial das áreas queimadas na porção nordeste do bioma Cerrado. Desta forma, foi realizado o mapeamento das áreas queimadas em imagens do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, que utilizaram o Modelo Linear de Mistura Espectral – MLNE (SMITH; SHIMABUKURO, 1991) a partir de imagens do sensor Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para identificar a área queimada na porção nordeste do Cerrado nos anos de 2012 a 2015.

Outro estudo relacionado é o de Fornazari (2015) em que este utilizou-se de imagens do sensor Landsat 5 TM para mapear as cicatrizes de queimada no Parque Nacional da Serra do Cipó (MG). Em seu estudo foi concluído que o método demonstrou limitações diante da análise da permanência das cicatrizes associadas às variáveis “tamanho” e “precipitação”. A presença de nuvens promoveu o obscurecimento de diversas cenas adquiridas pelo sensor Landsat 5 TM devido à sua baixa resolução temporal, de modo que possíveis cicatrizes presentes na região não tenham sido mapeadas. Apesar da dificuldade do método, notou-se que há um aumento considerável de incidência de fogo na região, nos meses de junho, setembro e outubro.

Rodrigues (2014) utilizou uma estimativa automática da área queimada na Região Serrana do Rio de Janeiro em outubro de 2014, por meio de informações do sensor OLI a bordo do satélite Landsat-8. Devido à baixa frequência temporal das imagens Landsat-8 (16 dias) e à frequente presença de alta nebulosidade na região, somente foi possível mapear as áreas queimadas após dois meses do evento. Os resultados quantitativos indicam um total de aproximadamente 4000 ha de área queimada na Unidade de Conservação. Nota-se a importância de utilizar produtos com maior frequência temporal, já que nesse estudo foi possível detectar o fenômeno apenas dois meses após o ocorrido, podendo ter perda de informações.

O sensor Modis, a bordo das plataformas orbitais Terra e Aqua, é configurado para fornecer dados da dinâmica da biosfera terrestre, permitindo a geração de imagens com resolução espacial entre 250 e 1000 metros, além de apresentar frequência de revisita entre 1 e 2 dias no Equador (PIROMAL et al., 2008). O MCD45A1 é um produto obtido a partir de imagens de ambos os sensores Modis com frequência mensal e resolução espacial de 500 m, contendo queimadas identificadas por *pixel* e que apresenta informações de qualidade dos dados.

O algoritmo utilizado na geração desse produto se baseia nas mudanças de depósito de carvão e cinzas, remoção e alteração da estrutura da vegetação. Assim, detecta-se a data da queimada localizando-se

a ocorrência de mudanças rápidas nos dados da série temporal de reflectância da superfície diária, sendo realizada uma comparação entre os dados de reflectância dos dias anteriores, resultando em uma medida estatística para determinar se a diferença entre a reflectância prevista e observada é uma mudança significativa (ROY *et al.*, 2005).

A série de satélites Landsat, que apresenta resolução espacial entre 15 m e 30 m (dependendo da banda espectral), tem se consolidado como uma das principais ferramentas para análise e avaliação de impactos ambientais, uso e cobertura do solo, estimativa de parâmetros biofísicos, georreferenciamento e planejamento agrícola e ambiental (ALVES *et al.*, 2017).

Exemplos de trabalhos recentes estão em Andrade e Lourenço (2016), Bittencourt e Guasselli (2017) que são periodicamente inundadas por reflexo lateral de rios e de lagos, pela precipitação direta ou por água subterrânea. Para compreender a dinâmica desses ambientes – em especial o banhado da Reserva Biológica de São Donato - RS, a partir de processamento de imagens Landsat 5 e Landsat 8, foi utilizado o índice NDPI (Normalized Difference Pond Index ou Índice de Diferença Normalizada de Corpos de água, Paula *et al.* (2016), Prado *et al.* (2016) e Sotille *et al.* (2016). Por ter se destacado em suas aplicações, dados dos satélites Landsat são muito utilizados na validação de metodologias para detecção de queimadas, podendo citar os autores que aplicaram essa validação, como Jesus *et al.* (2011), Matos e Leal (2014), Piromal *et al.* (2008) e Tomzhinski *et al.* (2011). Araújo e Ferreira Júnior (2011) fizeram a validação do produto MCD45A1 com dados do Landsat 5, na região do Cerrado, sendo que 100% dos polígonos encontrados pelo Modis foram rotulados positivamente como queimadas, devido à boa precisão do algoritmo.

Já Cardozo *et al.* (2012) fizeram a mesma validação para uma região da Floresta Amazônica e obtiveram mais de 90% de omissão de áreas queimadas. As vantagens em se utilizar os dados Landsat estão relacionadas com sua melhor resolução espacial entre os dados de satélite que tem acesso gratuito.

Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a ocorrência de queimadas na região metropolitana de Belo Horizonte, nas épocas de seca, entre os anos de 2012 e 2016. Para tanto, foram utilizados os dados do produto MCD45A1 do sensor Modis. Além disso, foi realizada a comparação dos resultados obtidos em relação à área queimada estimada com os mesmos dados gerados a partir de imagens orbitais do sensor Landsat-8/OLI.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação da ocorrência de queimadas consistiu em duas etapas principais. A primeira tratou da aquisição dos dados do produto MCD45A1 para os anos de 2012 a 2016, tratamento dos dados e a estimativa da extensão de área queimada. A segunda etapa foi a comparação dos resultados do MCD45A1 com imagens do sistema Landsat/OLI 8, já que este apresenta melhor resolução espacial e melhor resposta espectral para a ocorrência de incêndios e é amplamente utilizado em estudos para esse fim. A comparação foi feita apenas nos períodos de maior ocorrência de queimadas no presente estudo.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) está inserida no estado de Minas Gerais e seus acessos principais são pelas rodovias BR-040, BR-381 (Rodovia Fernão Dias), BR-356 e BR-262, como mostrado na Figura 1. A região é composta por 34 municípios, com uma extensão territorial de 9.460 km², sendo a 3ª maior Região Metropolitana do Brasil e a 7ª maior Região Metropolitana da América Latina. Possui uma população de aproximadamente 5 milhões de habitantes e um PIB de 56,8 milhões, correspondente a 40% do PIB estadual (AGÊNCIA RMBH, 2016). A região abrange três bacias hidrográficas: Bacia do Rio das Velhas, Bacia do Rio Paraopeba e Bacia do Rio Pará, todas sub-bacias do Rio São Francisco (AGÊNCIA RMBH, 2016).

A RMBH está presente entre dois biomas: Mata Atlântica e o Cerrado. O primeiro se caracteriza pela predominância de fisionomias florestais ombrófilas e estacionais (semidecíduais e decíduais), enquanto que o Cerrado é caracterizado pela predominância de fisionomias savânicas (OLIVEIRA FILHO, 2006), além de florestais e campestres. A Mata Atlântica representa a segunda maior floresta pluvial tropical do continente americano, sendo um dos 25 *hotspots* mundiais de biodiversidade. Embora tenha sido em grande parte destruída, ela ainda abriga mais de 8.000 espécies endêmicas de plantas vasculares, anfíbios, répteis, aves e mamíferos (MYERS et al., 2000). O Cerrado é uma das principais formações de savana nos trópicos, sendo o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando 22% do território brasileiro, sendo o bioma que mais concentra a produção agropecuária do País (MARQUES et al., 2017).

A classificação climática da região abrange quatro zonas climáticas definidas por Nimer (1979). As zonas de maior expressão são: Tropical Brasil Central mesotérmico brando semiúmido e Tropical Brasil Central subquente semiúmido. O clima Tropical Brasil Central semiúmido se destaca por um regime anual de chuvas caracterizado por uma acentuada concentração de chuvas de instabilidades tropicais no verão, enquanto o inverno é fortemente marcado pela seca (entre 4 a 5 meses).

A baixa umidade faz com que a região esteja propícia a incêndios florestais. Segundo dados fornecidos pela Feam (2017), em unidades de conservação estaduais houve a queima de mais de 2.783 ha entre 2012 e 2016.

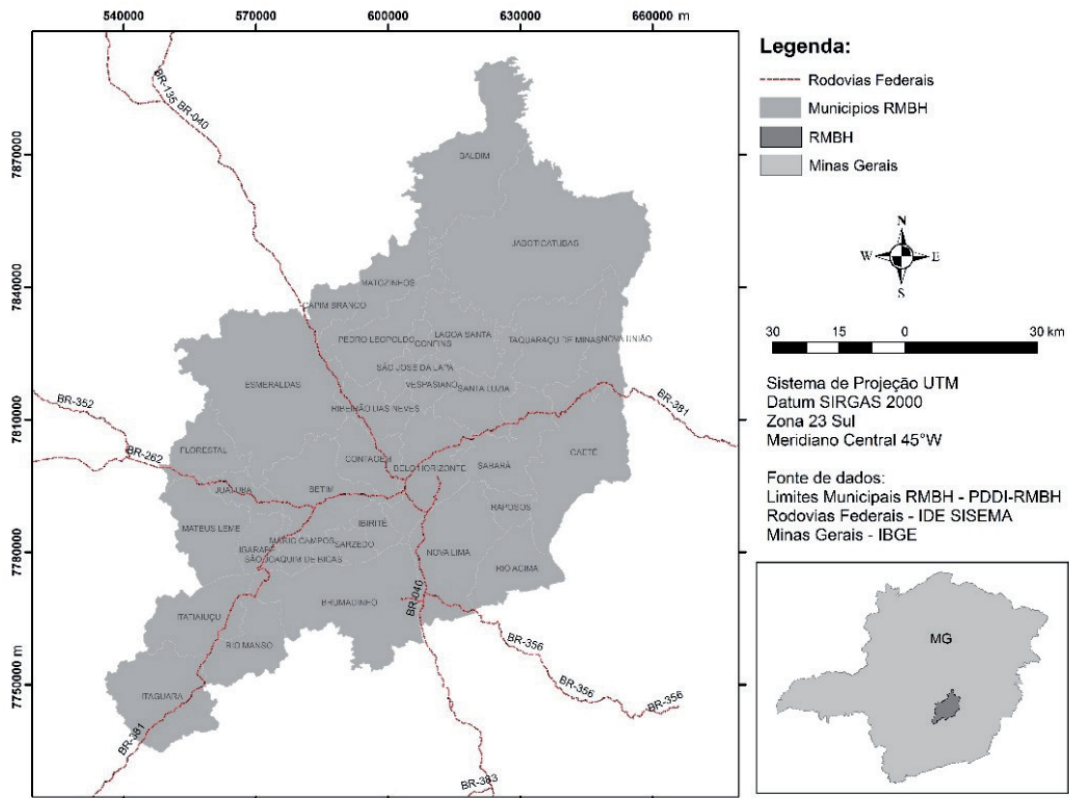


Figura 1 | Localização da área de estudo.

Fonte: Elaboração própria, baseada em bases PDDI (2014), ESRI (2015), IBGE (2017)

2.2 AVALIAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS PELO SENSOR MODIS

A aquisição do produto MCD45A1 foi feita em Nasa (2017), a partir do site <https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>, onde foram adquiridas as imagens em formato *geotiff*. Nessa aquisição de imagens, foram considerados os limites geográficos da RMBH que estão inseridos nos tiles *H13V11*, *H13V10*, *H14V11* e recorte da área de interesse. As imagens obtidas consideraram a situação nos meses de janeiro a dezembro, dos anos de 2012 a 2016, totalizando 60 imagens.

O produto MCD45A1 fornece oito subprodutos, sendo que na presente análise foram utilizados apenas dois, o subproduto *ba_qa* (índice de confiabilidade e do *pixel* rotulado como queimada) e o subproduto *burndate* (índice que indica se a área está queimada). Para a obtenção dos *pixels* com alto índice de confiabilidade, foi realizado o cruzamento das duas bandas. O valor dos *pixels* do subproduto *ba_qa* varia de 0 a 5, sendo que foram selecionados apenas *pixels* com valor 1, que representam a mais alta confiabilidade. Os valores dos *pixels* do subproduto *burndate* representam o dia de ocorrência da queimada, no formato do calendário Juliano, o que possibilitou o conhecimento exato dos dias nos quais ocorreram mais queimadas.

A área queimada para cada ano foi calculada levando em consideração a resolução espacial do produto, que é de 500 m. Todos os dados foram tratados usando procedimentos desenvolvidos no *Interactive Data Language* (IDL), um ambiente computacional interativo de programação integrado ao *software* Envi (versão 5.2), uma plataforma voltada para tratamento de dados de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens.

2.3 AVALIAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS COM DADOS LANDSAT

Foram adquiridas imagens Landsat-8/OLI, no site do *Earth Explorer* (USGS, 2017), por meio do link <https://earthexplorer.usgs.gov>, referentes à órbita/ponto 218/74 que recobre parte da região do estudo. As imagens foram escolhidas considerando a menor cobertura de nuvens possível. Assim, foram adquiridas 4 imagens (setembro e novembro de 2014, agosto e setembro de 2016). Como não foi possível encontrar imagens com ausência total de nuvens, foram utilizados recortes que obedeciam a essa condição, além de dados com a qualidade do Landsat-8/OLI para verificar a presença de áreas queimadas.

Os valores digitais brutos das imagens foram convertidos em reflectância aparente para correção das imagens, por meio do método de correção radiométrica de imagens Landsat/OLI 8, disponibilizado pelo USGS (*United States Geological Survey* – Levantamento Geológico dos Estados Unidos da América), que é baseado nas relações propostas por Markham e Barker (1987).

Para reconhecimento das cicatrizes de queimado, são calculadas as imagens NDVI cujo cálculo (Equação 1) é feito mediante uma operação entre as bandas do infravermelho próximo (IR) e a do vermelho (R), partindo do princípio que quanto maior a quantidade de vegetação, maior a reflexão no infravermelho e menor no vermelho, aumentando o valor da razão e realçando a vegetação (MELO, SALES; OLIVEIRA, 2011).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

A partir de imagens NDVI, do período anterior à queimada (T1) e do período posterior (T2), são calculadas as diferenças dessas imagens (T1-T2) para ajudar na verificação das cicatrizes de queimada.

3. RESULTADOS

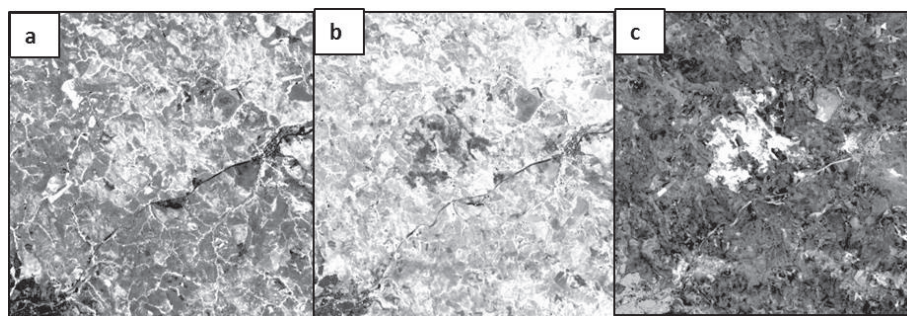


Figura 2 | Recorte NDVI T1 (agosto de 2014) (a), Recorte NDVI T2 (setembro de 2014) (b) e Recorte imagem diferença (T1-T2) (c)

Fonte: Elaboração própria, baseada em imagens Landsat/OLI 8

Conforme apresentado na Figura 2, a imagem diferença permite identificar os *pixels* onde não se registrou diferença com valores próximos de 0, locais com remoção de vegetação, valores próximos de 1 e de crescimento de vegetação, valores próximos de -1 (CARVALHO; SCOLFARO, 2008), sendo possível identificar e demarcar as cicatrizes de queimada por meio de regiões de interesse (ROI). Com uso da ferramenta ROI (*Region of Interest*), disponível no *software* Envi, é selecionada uma quantidade de *pixels* representativos (*pixel* semente), a partir de métodos de crescimento de regiões baseados na similaridade dos *pixels* semente com seus vizinhos, faz-se o delineamento da região de forma eficiente, produzindo um contorno otimizado e preciso da cicatriz.

Foram comparadas as quantidades de *pixels* de áreas queimadas pelo Landsat/OLI 8 e pelo Modis, e se as áreas eram correspondentes. Foi possível notar que todos os polígonos de queimadas encontrados com base nos dados do sensor Modis também foram identificados nas imagens Landsat/OLI 8, um exemplo é apresentado na Figura 3. Apesar disso, quando foi verificada a correspondência de *pixels*, observou-se que os dados Modis conseguiram verificar 72% dos *pixels* de incêndio em 2014 e 60% dos *pixels* para 2016.

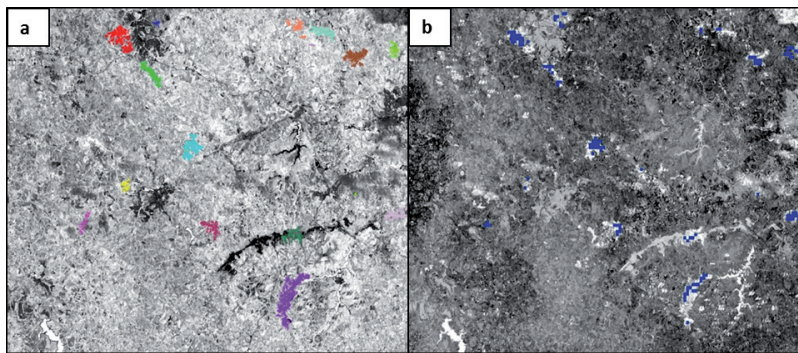


Figura 3 | Comparação de polígonos de queimadas encontrados pelas imagens Landsat/OLI 8 (cores apenas para diferenciar cada cicatriz de queimada) (a) e pelo sensor Modis (b)

Fonte: Elaboração própria, baseada em imagens Landsat/OLI 8

3.1 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS

Com os dados de áreas queimadas obtidos pelo produto MCD45A1, foram feitas algumas análises. Portanto, foi possível notar que as estações do ano em que ocorrem mais queimadas são o inverno e a primavera, sendo que no outono registraram-se poucos pontos de queimadas, e no verão não foi encontrado nenhum (Figura 4).

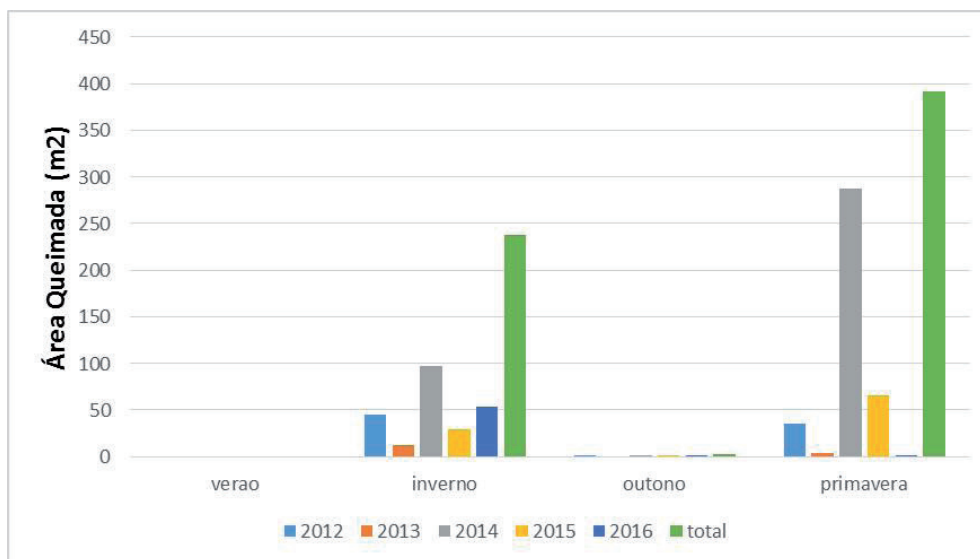


Figura 4 | Área queimada por estações do ano

Fonte: Elaboração própria.

Comparando o total anual (Figura 5), nota-se que o ano de 2014 ganhou destaque como o de maior incidência de queimadas, com 350 km² de área atingida, seguido de 2015, com 81 km² de área atingida.

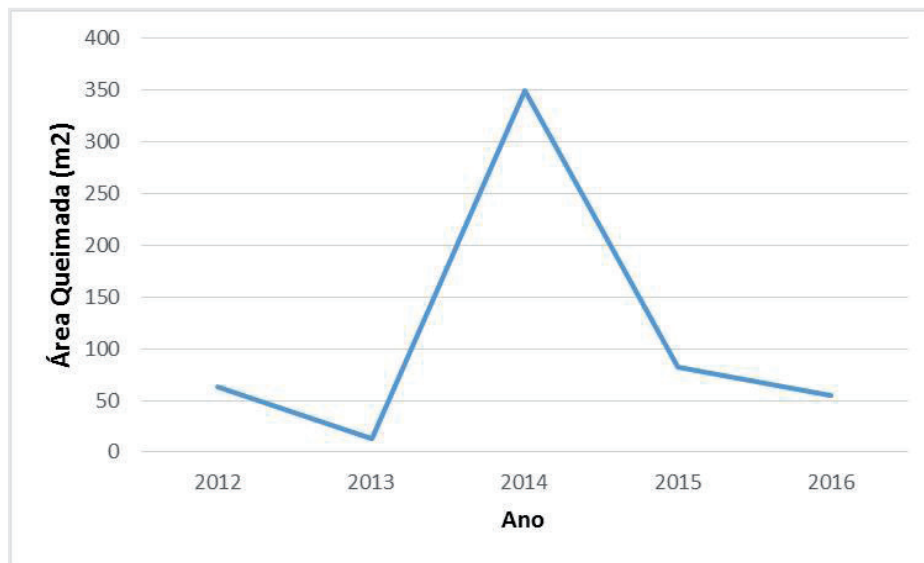


Figura 5 | Área queimada por ano
Fonte: Elaboração própria

Entre os meses (Figura 6), os que têm uma maior concentração de queimadas são agosto, setembro e outubro. Deve-se destacar, ainda, que o mês de outubro apresentou valor expressivo devido ao ano de 2014, quando se registraram as ocorrências em quantidade considerável de queimadas e atingindo uma área de aproximadamente 183 km², sendo o mês, de todos os anos estudados, o que apresentou o maior valor de área queimada.

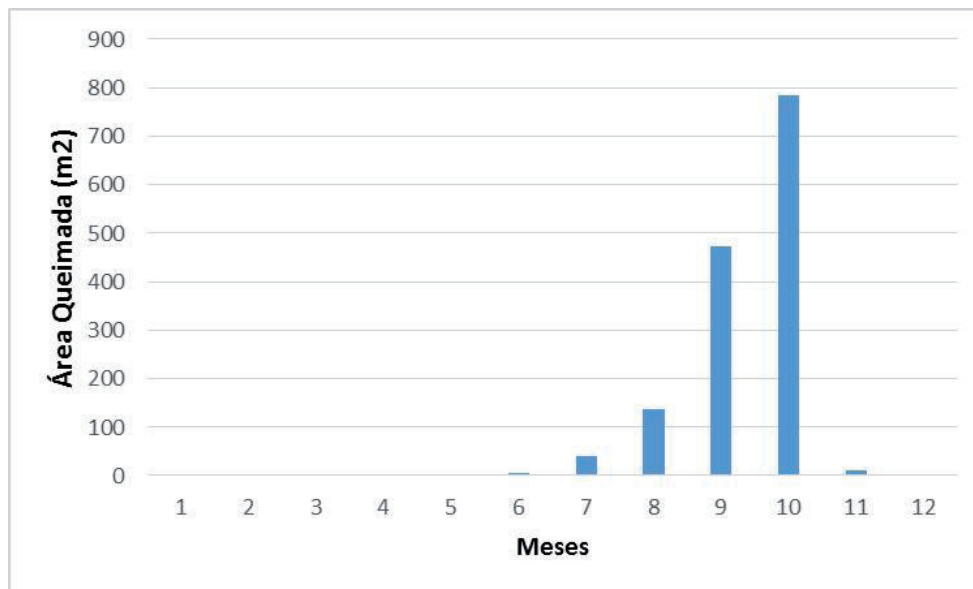


Figura 6 | Área queimada por meses
Fonte: Elaboração própria

A partir dos dados do mapeamento do uso e cobertura do solo disponibilizados pelo MapBiomas (2017), foi possível fazer uma análise dos tipos de cobertura mais afetados pelo fogo. Os dados foram cruzados com os dados de áreas queimadas do Modis (Figura 7), sendo verificado que as áreas mais afetadas, para os anos de estudo, foram: 33% de queimadas em áreas de Formação Florestal, 26% em áreas de pastagem e 12% em áreas de mosaico de agricultura e pastagem.

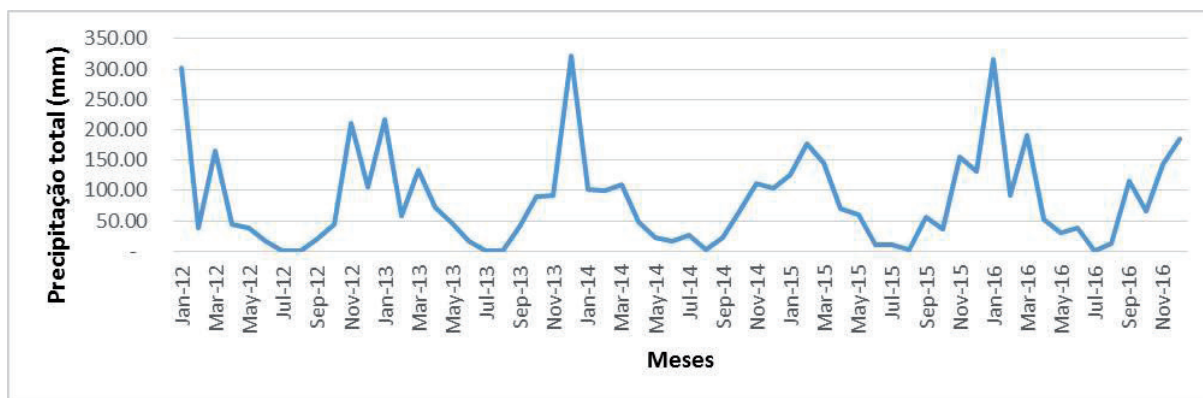


Figura 7 | Tipos de cobertura do solo onde foram identificados pixels de queimadas durante os anos de estudo

Fonte: Elaboração própria

4 DISCUSSÕES

Na Figura 8, é possível compreender melhor os resultados, já que é apresentada a variação da precipitação total durante os anos estudados. É possível perceber a relação entre a precipitação e as áreas queimadas. No ano de 2014 é identificada uma grande baixa da precipitação, já que a maior parte dos meses apresentou uma precipitação total menor que 50 mm. Já o ano de 2015 foi o segundo ano com maior índice de queimadas, o que pode ainda ser devido à baixa precipitação que o estado estava sofrendo. Em 2016 a quantidade de área queimada diminuiu e isso coincidiu com o aumento da precipitação no ano.

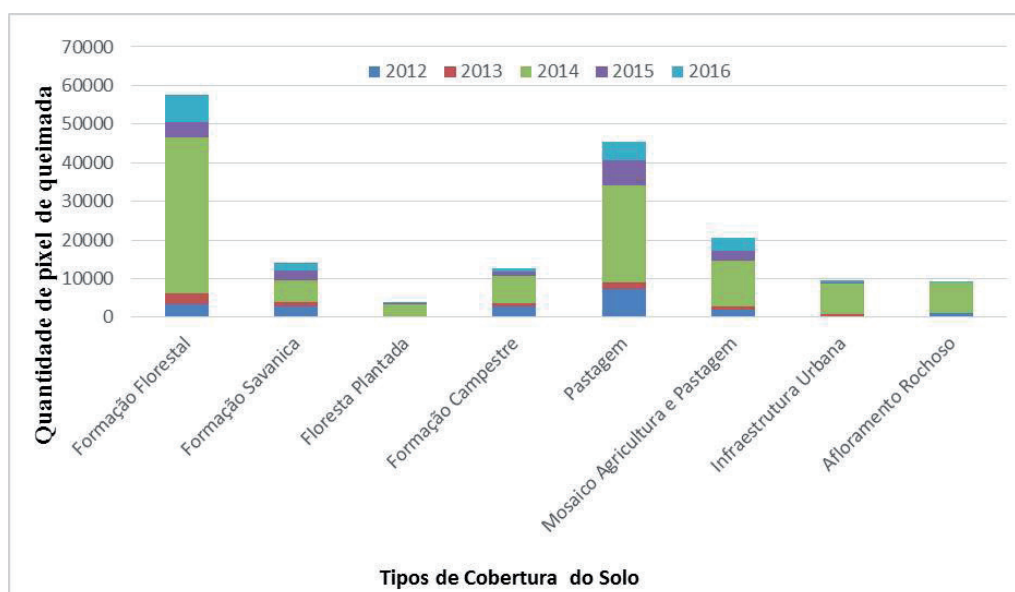


Figura 8 | Precipitação acumulada na RMBH.

Fonte: Elaboração própria, baseada em dados da ANA (2018).

É possível observar a coerência dos dados na Figura 4, já que as estações em que ocorrem menores valores de precipitação são durante o inverno e a primavera, que são também as estações com maior índice de queimadas. Nota-se que na primavera registrou-se a maior ocorrência. Esse fato pode ser explicado devido à combinação de baixa precipitação aliada às temperaturas mais altas.

No estudo de Fornazari (2015) citado acima, também é verificado um aumento considerável de incidência de fogo na região, nos meses de junho, setembro e outubro, o que vai ao encontro do observado neste estudo, lembrando que parte da Serra do Cipó está inserida na RMBH.

Quanto às áreas mais afetadas por incêndios, estão as áreas florestais, que em sua maioria compreendem áreas de Mata Atlântica, mostrando a importância em verificar a ocorrência de incêndios na região. Isso porque é uma região muito rica em biodiversidade, que acaba se perdendo com a ocorrência dos incêndios florestais.

Outras áreas muito afetadas são as utilizadas para agricultura e pastagem. Isso pode estar relacionado com as queimas para limpeza de áreas, o que pode também estar associado à¹ ocorrência de incêndios em outras regiões.

Já que o fogo precisa de uma ignição para iniciar e muitas vezes está associado a causas humanas, o fato de ter maior quantidade de incidência em épocas mais secas não significa que o clima seja o único “culpado”. O que ocorre é que, com a diminuição de precipitação e a consequente queda na umidade do ar, há uma queda na umidade do material combustível (madeira), o que o torna mais propenso à ignição. Além disso, há queda na umidade do solo, que fica mais propenso a propagar o fogo, queimando áreas maiores, que são mais fáceis de serem identificadas pelos satélites, ressaltando, assim, a importância de maior fiscalização nessas regiões, principalmente em épocas de menor precipitação.

Quanto à forma de detecção de queimadas por satélite, foi constatado que utilizar os dados do sensor Modis em vez de dados do Landsat/OLI 8 para detecção dos locais com área queimada não afeta o resultado, pois os polígonos se sobrepueram.

Já a utilização de imagens Landsat, devido à sua melhor resolução espacial, consegue identificar melhor a dimensão e delimitação das áreas queimadas. Cabe destacar, entretanto, que foram utilizados somente os *pixels* de maior confiabilidade do sensor Modis (valor 1 do índice *ba_qa*). Caso fossem utilizados outros arranjos, considerando índices de menor confiabilidade, seria possível atingir uma melhor correspondência das áreas.

A manipulação dos dados Landsat/OLI 8 exige mais tempo e processamento, além de depender do usuário para a identificação das áreas, como apresentado na “figura 2c”, e da seleção do *pixel* semente para crescimento da área, enquanto os dados do sensor Modis estão praticamente prontos para uso direto.

Outra vantagem do sensor Modis em relação ao Landsat/OLI 8 é a resolução temporal deste, sendo que o primeiro tem resolução de 1 e 2 dias, enquanto o segundo apresenta uma frequência de 16 dias e ainda tem o agravante de ter muitas imagens com presença de nuvens, o que dificulta a detecção, como ocorre em Rodrigues (2014).

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A disponibilidade de informações detalhadas e atualizadas sobre as distribuições espaciais (localização e extensão) e temporais das áreas queimadas é atualmente crucial, não só para a melhor gestão dos recursos naturais, mas também para estudos de química da atmosfera e de mudanças climáticas.

A grande ocorrência de queimadas associadas tanto a fatores meteorológicos quanto antrópicos é uma preocupação crescente, já que causa impactos na sociedade e no meio ambiente. Portanto, é muito importante que se desenvolvam trabalhos de pesquisa e estudos científicos que cooperem com o monitoramento dos focos e os riscos de incêndio. Observou-se que a maior quantidade de queimadas ocorreu principalmente nos meses de setembro e outubro, quando foram encontradas maiores quantidades de áreas queimadas. Nessa época do ano, a umidade do ar torna-se baixa e a temperatura fica mais elevada, o que diminui a umidade no material combustível e no solo, facilitando a propagação de incêndios. Notou-se que as queimadas estão muito ligadas à ocorrência de precipitação, sendo que nas épocas de menor ocorrência desta foram encontradas as maiores quantidades de áreas queimadas.

Técnicas de sensoriamento remoto são importantes no processo de detecção de queimadas, já que se faz possível o monitoramento de forma remota, tendo muitos dados de qualidade disponíveis. A opção de se utilizar dados do sistema Landsat ou dados do sensor Modis para estudos de queimadas depende do objetivo da aplicação. Com uso do primeiro sensor, consegue-se delimitar com melhor precisão a dimensão da área queimada, mas a utilização desse método exige mais trabalhos de processamento, além de referenciais externos, já que depende de transformações radiométricas, cálculos de índices de vegetação e interpretação visual de dados das imagens. Além disso, existe a dificuldade de encontrar imagens com ausência de nuvens, dependendo da época de interesse. Por outro lado, o produto decorrente do Modis não delimita com a mesma exatidão o contorno da área queimada, porém identifica bem os lugares onde os focos ocorreram, sendo de aplicação direta, de alta disponibilidade e de fácil utilização. Esse fato favorece amplamente uma gestão pública, que muitas vezes pode não dispor de corpo técnico tão capacitado, seja por ausência de recursos ou por desconhecimentos dos próprios gestores.

Portanto, o produto MCD45A do sensor Modis é um recurso prontamente disponível, que agrega rapidez e simplicidade aos estudos de queimadas, particularmente na verificação de áreas com maior risco e no seu monitoramento regular, apresentando vantagens adicionais sobre outros métodos existentes. Entretanto, ressalta-se que o presente estudo não esgota o assunto que é, de fato, muito amplo e merece mais aprofundamento.

Outra possibilidade é a utilização do Raio de Calor Normalizado (do inglês *Normalized Burn Ratio* – NBR) em vez do NDVI em outros estudos. Sugere-se, em outros trabalhos, dividir o estudo em dois períodos do ano, a saber: precoce (de 16 de outubro a 15 de agosto) e tardio (de 16 de agosto a 15 de outubro). Deve-se ressaltar que esses períodos utilizados são os adotados pelos órgãos gestores na tomada de decisão com respeito ao manejo de ocorrências de incêndios aplicadas às áreas protegidas. Novas possibilidades também incluiriam a realização de outras análises, de modo a prevenir e combater os incêndios na área de estudo, tais como: extensão máxima e média dos incêndios (área atingida) a cada ano; frequência de incêndios (número de vezes que cada *pixel* queimou no período de análise), buscando-se identificar as áreas críticas e de maior risco para as áreas protegidas correlacionando ao tipo de solo, por exemplo; diferenças de ocorrências de incêndio dentro e fora das áreas de proteção; e identificação das áreas protegidas mais vulneráveis aos incêndios (quantificados pela frequência dos incêndios e de maior extensão).

Além disso, é importante validar com dados de campo para verificar se os *pixels* realmente correspondem a áreas de incêndio. A disponibilidade de dados de incêndio é uma dificuldade, estes foram solicitados ao Corpo de Bombeiros e não puderam ser disponibilizados por questões de segurança. Foi feita uma tentativa de pedido desses dados ao órgão responsável pelas florestas em Minas Gerais, o Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF), e este também não possuía esse tipo de dados observados e computados. Assim, é importante verificar maneiras de monitoramento e registro desses incêndios para melhorar cada vez mais as técnicas de detecção destes.

Os resultados obtidos neste trabalho podem contribuir efetivamente para a prevenção de impactos socioambientais na região de estudo e servir de modelo para a aplicação em outras regiões metropolitanas visando à sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em: 1 jun. 2018.

AGÊNCIA RMBH. **RMBH e Colar Metropolitano**, 2016. Disponível em: <<http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/rmbh-e-colar-metropolitano/>>. Acesso em: 20 out. 2016.

ALVES, L. E. R. et al. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na Bacia do Rio Pajeú. **Geography Department University of São Paulo**, v. 33, p. 117, 2017.

ANDRADE, F. M.; LOURENÇO, R. W. Uso do Solo e Cobertura Vegetal na Bacia Hidrográfica do Rio Una – Ibiúna/SP. **Geography Department University of São Paulo**, v. 32, n. 0, p. 48, 2016.

BARBALHO, M. G. DA S. et al. Permanent preservation, coverage area and use of the land in the hydrographic basin of the Almas River, microregion de Ceres, Goiás, Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 10, n. 3, p. 147-178. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v10n3.2019.24751>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

BATISTA, A. C. Detecção de Incêndios Florestais por Satélites. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

BITTENCOURT, D. Z.; GUASSELLI, L. A. Dinâmica de Inundação do Banhado a partir do índice NDPI, Reserva Biológica de São Donato – RS. **Geography Department University of São Paulo**, v. 33, p. 85, 2017.

CASTRO, F. R. DE et al. Impactos das Queimadas sobre a Saúde da População Humana na Amazônia Maranhense. **Revista de Pesquisa em Saúde**, v. 7, n. 3, p. 141–146, 2016.

FERNANDES, A. C. G. et al. 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.

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019, 146p.

FERNANDES, L. C. et al. **Fire Risk Modeling Using Artificial Neural Networks**. EngOpt 2018. Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization. Springer International Publishing, 2019, p. 938-948.

FERNANDES, L. C. et al. Modelagem de Risco de Incêndios Florestais: uma visão geral. **Sodebrás**, v. 13, p. 79-84, 2018a.

FERNANDES, L. C. et al. **Modelagem de risco de incêndio utilizando Redes Neurais Artificiais**. In: XXVI JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES DE LA AUGM, 2018b, Mendoza-Argentina. XXVI JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES DE LA AUGM. Mendoza-Argentina: AUGM, 2018.

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

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Dados conseguidos junto ao órgão responsável, 2017.

GIUSTINA, C. C. DELLA; SILVA, S. D. E.; MARTINS, E. D. S. Geographic reconstruction of a Central-West Brazilian landscape devastated during the first half of the 20th century: Mato Grosso de Goiás. **Sustentabilidade em Debate**, v. 9, n. 3, p. 44–63, 2018.

GUIMARÃES, P. P. et al. Análise dos impactos ambientais de um incêndio florestal. **Agrarian Academy**, v. 1, n. 1, p. 38, 2014.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from Modis fire radiative energy measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 11, p. 2636–2649, nov. 2005.

JESUS, S. C.; SETZER, A. W.; MORELLI, F. Validação de focos de queimadas no Cerrado em imagens TM/Landsat-5. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. **Anais...** Curitiba, PR: Inpe, 2011

JUVANHOL, R. S. **Modelagem da vulnerabilidade à ocorrência e propagação de incêndios florestais**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

LIMA, V. DA S., NASUTI, S. Universo Quebradeiras. **Sustentabilidade em Debate**, v. 8, n. 2, p. 147-169. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n2.2017.26924>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias – Coleção [3] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. In: **International Journal of Remote Sensing**. [s.l.: s.n.]. v. 8, p. 517–523.

MARQUES, C. B. et al. **Análise de correspondência entre mapas de vegetação florestal do bioma Cerrado.** XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. **Anais...** 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3PSM4HJ>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

MATOS, N. M. DE; LEAL, F. A. Mapeamento temporal e validação de áreas queimadas por meio do produto Modis MCD45A1 para o bioma Pantanal. 5o SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. **Anais...** Campo Grande – MS, 2014.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. DE. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, n. 23, p. 520–533, 2011.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853, 2000.

NASA. **Dados Modis.** Disponível em: <<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** Rio de Janeiro, 1979.

OLIVEIRA, A. L. S. **Modelagem espacial de predição de riscos de incêndios com lógica fuzzy, comparação e validação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013, 161p.

OLIVEIRA, A. L. S. et al. Comparação e validação da modelagem espacial de riscos de incêndios considerando diferentes métodos de predição. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, p. 556-577, 2017.

OLIVEIRA, A. L. S.; NERO, M. A. Application of Fuzzy Logic in Prediction of Fire in João Pessoa City – Brazil. **Communications in Computer and Information Science (Print)**, v. 399, p. 323-334, 2013.

_____. Mapa de análise de risco de incêndios florestais: estudo de caso no município de João Pessoa – Paraíba, Brasil. In: 9º SINAGEO – SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2012, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** Rio de Janeiro – RJ, 2012.

OLIVEIRA FILHO, A. T. DE. Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. DE (Ed.). **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais.** 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. p. 21–35.

PAULA, M. R. DE; BENEDETTI, A. C. P.; PEREIRA FILHO, W. Influência do Uso e Cobertura da Terra aliada à Precipitação Pluviométrica na Qualidade da Água da Bacia Hidrográfica do Rio Ingaí – RS/Brasil. **Geography Department University of São Paulo**, v. 32, p. 143, 2016.

PEREIRA FILHO, W. Cartografia e sensoriamento remoto na avaliação de dados com abordagem espaço e tempo. **Geography Department University of São Paulo**, v. Especial C, n. spe, p. 426, 2014.

PINTO FILHO, J. L. DE O.; PETTA, R. A.; SOUZA, R. F. Caracterização Socioeconômica e Ambiental da População do Campo Petrolífero Canto do Amaro, RN, Brasil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 7, n. 2, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v7n2.2016.17489>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

PIROMAL, R. A. S. et al. Utilização de dados Modis para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 1, p. 77–84, 2008.

RESENDE, F. C.; CARDOZO, F. D. S.; PEREIRA, G. Análise Ambiental da Ocorrência das Queimadas na Porção Nordeste do Cerrado. **Geography Department University of São Paulo**, v. 34, p. 31, 2017.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81–90, 2011.

ROY, D. P. et al. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using Modis time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 2, p. 137–162, 2005.

SANTOS, J. F.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 93–100, 2006.

SILVA, D. L.; CARNEIRO, M. H. DA S. Biodiversidade, conservação e sustentabilidade no livro didático de Biologia no Brasil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 5, n. 1, p. 98-116. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v5n1.2014.9914>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

SIMIONI, J. P. D. et al. Caracterização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, RS. **Geography Department University of São Paulo**, v. 28, n. 0, p. 112, 2015.

SOTILLE, M. E.; BREMER, U. F.; SIMÕES, J. C. Avanço e retração de área glacial no extremo norte da Península Trinity, Antártica, entre 1988 e 2015. **Geography Department University of São Paulo**, v. 31, p. 72, 2016.

TOMZHINSKI, G. W.; COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. DO C. Avaliação da detecção de focos de calor por Sensoriamento Remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 201–211, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Dados Landsat-8**, 2017. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 1 jun. 2017.