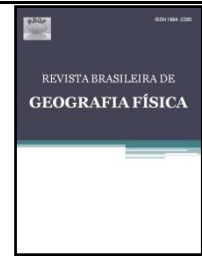




Revista Brasileira de Geografia Física

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



Determinação das Áreas Atingidas por Queimadas em Bacias Hidrográficas por meio do Índice De Queimada (NBR), Estudo de Caso da Bacia do Rio Piracicaba-MG

Fernanda Paula Bicalho Pio- Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira e-mail: fppbicalho@gmail.com (autor correspondente), Eliane Maria Vieira, e-mail: elianemv@yahoo.com.br

Artigo recebido em 09/10/2019 e aceito em 14/02/2020

RESUMO

O desenvolvimento da humanidade e consequente alteração no uso do solo vem tornando áreas cada vez mais susceptíveis à incêndios florestais, fato agravado pela prática de queimadas. Eventos de queima são considerados preocupantes devido a abrangência dos impactos que influenciam, inclusive nas mudanças climáticas. Assim, técnicas de sensoriamento remoto podem ser empregadas para identificação e espacialização de áreas queimadas. A gravidade dos impactos gerados torna visível a importância de estudos capazes de detectar cicatrizes de queimadas a fim contribuir com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento, conscientização, prevenção e recuperação de áreas afetadas. Assim, o presente estudo objetivou gerar o índice de queimada (NBR) bem como sua variação (Δ NBR) e o Índice Normalizado de Diferença de Água (NDWI) para distinção entre áreas queimadas e áreas úmidas para a região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, Minas Gerais, utilizando cenas Landsat 8 órbita/ponto 217/074 e 218/074 dos meses de agosto e setembro de 2016. A eficiência do método para detecção de áreas queimadas foi analisada a partir da comparação com polígonos de queimadas do banco de dados do INPE e pontos de ocorrência de incêndio fornecidos pelo 4º Pelotão de Bombeiros Militar de Itabira. Os resultados da Δ NBR foram classificados em níveis de severidade e mostraram-se eficientes para a detecção de áreas queimadas quando comparados com polígonos de registro de queimadas do INPE. Com o cálculo do índice para toda a bacia pôde-se perceber regiões com maior ocorrência das classes moderada e alta severidade nas porções noroeste e nordeste da bacia.

Palavras-chave: Queimadas, severidade do fogo, sensoriamento remoto, índice de queimada.

Determination of Areas Affected by Burns in Watersheds by the Queimada Index (Nbr), Case Study of the Piracicaba-MG River Basin

ABSTRACT

The development of mankind and consequent alteration in land use has made areas increasingly susceptible to forest fires, a fact aggravated by the practice of burning. Burning events are considered worrisome due to the extent of the impacts that influence, including climate change. Thus, remote sensing techniques can be used to identify and spatialize burned areas. The severity of the impacts generated makes visible the importance of studies capable of detecting burn scars in order to contribute to the development of monitoring techniques, awareness, prevention and recovery of affected areas. Thus, the present study aimed to generate the burn rate (NBR) as well as its variation (Δ NBR) and the Normalized Water Difference Index (NDWI) to distinguish between burned areas and wetlands for the Piracicaba river basin region, Minas Gerais, using Landsat 8 scenes orbit / point 217/074 and 218/074 from the months of August and September 2016. The efficiency of the method for the detection of burned areas was analyzed from the comparison with burned polygons of the INPE and fire occurrence points provided by the 4th Itabira Military Fire Squad. The results of Δ NBR were classified in severity levels and were efficient for the detection of burned areas when compared to INPE burn logs. With the calculation of the index for the whole basin it was possible to perceive regions with higher occurrence of the moderate and high severity classes in the northwest and northeast portions of the basin.

Keywords: burned, severity of fire, remote sensing, burn rate.

Introdução

Queimadas e incêndios florestais são eventos responsáveis por causar destruições e ameaças à biodiversidade (Lopes, 2018). A susceptibilidade à ocorrência de incêndios florestais tem aumentado com o decorrer dos anos e um dos fatores agravantes desse processo é a interação antrópica em ecossistemas naturais que gera alterações nas paisagens como introdução de espécies florestais uniformes, aumento de áreas degradadas e de pastagens e o êxodo rural (Ferreira et al., 2015; Van Marle et al., 2017; Hardtke et al., 2015), fatores que contribuem com a ocorrência de queimadas e incêndios florestais.

Os eventos de queimadas descontroladas, conhecidos como incêndios florestais, têm se tornado cada vez mais recorrentes e preocupantes, no ano de 2018, países como Portugal, Canadá e Estados Unidos se destacaram nas mídias perante às ocorrências de incêndios florestais. No Brasil, até o dia 11 de dezembro de 2018, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) havia registrado 128.727 focos de incêndio em território brasileiro desde o início do ano, destes, 51,9% haviam sido detectados na região amazônica (INPE, 2018).

A queima de biomassa é considerada uma fonte de emissão de aerossóis para a atmosfera e as partículas emitidas influenciam significativamente nas condições do clima e em fatores relacionados à saúde de populações expostas às altas concentrações, podendo atingir regional ou globalmente (Artaxo et al., 2006). As mudanças climáticas são intensificadas a partir da prática de queimadas e ocorrência de incêndios florestais que contribuem com o aquecimento global visto que durante a queima cerca de 90% da emissão é representada pelo conteúdo de CO₂ (dióxido de carbono), o principal gás do efeito estufa (Anderson et al., 2005). Além disso, seus efeitos perante às mudanças climáticas podem impactar na ecologia e economia em escala global (Cao et al., 2019).

Um comparativo realizado entre os meses de julho e setembro de 2018 revela a dependência das condições climáticas para ocorrência de fogo na vegetação do território brasileiro. Dados do INPE mostram que durante o mês de setembro houve um aumento de 90% de detecções de fogo na vegetação comparando com as ocorrências de julho, fato explicado pela redução de precipitação típica do período analisado (INPE, 2018). Essa relação direta da ocorrência de queimadas com as condições climáticas torna-se preocupante quando se observa as projeções futuras como os dados do

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que indicam por meio de modelos climáticos globais aumento da temperatura e mudanças no regime de precipitação para os cenários futuros (Nobre et al., 2007).

Dessa forma, requer-se melhores métodos de gerenciamento de fogo considerando o conhecimento da extensão de áreas queimadas, da gravidade da queimadura e dos processos de recuperação após o fogo (Rozario et al., 2018). Uma das formas de detectar e mapear áreas de vegetação queimadas consiste na utilização de técnicas de sensoriamento remoto que permitem extrair séries temporais e obter informações sobre as áreas afetadas (Pereira, 2016; Hislop et al., 2018), uma vez que a severidade de uma queimada influencia na composição das espécies após a queima (Schepers et al., 2014) e altera as assinaturas espectrais entre a vegetação saudável e a vegetação que foi danificada pelo fogo (Henry et al., 2019)

Atualmente, tem-se uma grande quantidade de dados de sensoriamento remoto disponíveis para diversos usos, incluindo a obtenção de séries temporais e a detecção e quantificação de mudanças na superfície terrestre (Doxani et al., 2018; White et al., 2014; Fornacca et al., 2018; Silveira et al., 2018; Pickell et al., 2015). Pode-se citar como exemplo os arquivos do satélite Landsat que disponibilizam diversos registros que contribuem com a realização de pesquisas relacionadas à mudanças da cobertura da terra e mudanças climáticas (Mishra et al., 2014).

Os dados de satélites permitem que áreas queimadas sejam detectadas a partir do seu comportamento espectral específico avaliando-se o valor da reflectância dos canais espectrais (Pereira, 2016). As superfícies queimadas são caracterizadas por apresentar baixos valores de reflectância na região do infravermelho próximo e altos valores na região do infravermelho médio, dessa forma, essas são as regiões do espectro mais indicadas para estudos de áreas queimadas, uma vez que no geral, é observado o oposto desse padrão em superfícies vegetadas (Pereira, 2016).

À vista disso, diversos índices espectrais foram desenvolvidos para trabalhar com a reflectância de bandas específicas do espectro eletromagnético com o objetivo de monitorar a cobertura vegetal e identificar os efeitos ocorridos após os eventos de queimadas (Resende et al., 2015). O trabalho com índices espectrais mostra-se eficiente para detecção de alterações na superfície, inclusive aquelas relacionadas à

ocorrência de queimadas. Os índices mais utilizados são o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NBR (Índice de Queima Normalizada) (Pereira, 2016; Santana et al., 2018), entretanto, para avaliação de áreas queimadas o NBR apresenta melhor desempenho quando comparado ao NDVI (Hislop et al., 2018) e outros índices (Mallinis et al., 2017).

Apesar da disponibilidade de dados de sensoriamento remoto e eficiência das técnicas de aplicação é recomendado o pré tratamento das cenas a serem utilizadas (Chen et al., 2005; Nia et al., 2015) por meio da realização de correção radiométrica para minimizar inconsistência radiométrica entre os alvos e divergências entre as características do sensor, condições atmosféricas e angulação solar e de visada (Chen et al., 2005; Laybros et al., 2019), visto que os efeitos atmosféricos modificam as medidas radiométricas do sensor (Bernardo et al., 2016; Keukelaere et al., 2018). Essa técnica consiste na conversão de número digital (ND) ou níveis de cinza de cada pixel em radiância espectral (Chen et al., 2005; Thompson et al., 2018), utiliza os coeficientes de redimensionamento radiométrico fornecidos no arquivo metadados disponibilizados simultaneamente à disponibilização das bandas (arquivo MTL.txt no caso das imagens LandSat 8) e permite minimizar os erros causados pela atmosfera, ângulo solar e geometria de visada (Chen et al., 2005).

É indicado também a realização da normalização radiométrica entre as imagens para minimizar efeitos da geometria de aquisição e variações não lineares relativas à calibração dos sensores (Chen, 2005; Volpi; Camps-Valls; Tuia, 2015). Esse processo fundamenta-se na realização de um ajuste entre a imagem de referência e a imagem a ser normalizada, dessa forma, as

propriedades radiométricas da imagem a ser normalizada corresponderá com as características da imagem de referência (Fernandes et al., 2017; Bai et al., 2018).

Diante da intensidade dos impactos gerados a partir das queimadas e incêndios florestais, torna-se visível a importância da realização de estudos capazes de identificar e quantificar áreas queimadas a fim contribuir com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento, conscientização, prevenção e recuperação de áreas afetadas.

Dessa forma, o presente estudo objetivou gerar o índice de queimada (NBR) bem como sua variação (Δ NBR) para detecção de áreas queimadas e o Índice Normalizado de diferença de Água (NDWI) para distinção entre áreas queimadas e áreas úmidas para a região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, Minas Gerais.

Material e métodos

Área de Estudo

O presente estudo compreende a região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, localizada no estado de Minas Gerais. Seu rio principal tem origem no município de Ouro Preto e deságua no rio Doce, na divisa das cidades de Ipatinga e Timóteo abrangendo aproximadamente 241 km de extensão, percorrendo 22 municípios: Alvinópolis, Antônio Dias, Barão de Cocais, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, Jaguarauçu, João Molevade, Mariana, Marliéria, Nova Era, Ouro Preto, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santana do Paraíso, São Domingos do Prata, São Gonçalo do Rio Abaixo e Timóteo (Queiroz et al., 2016).

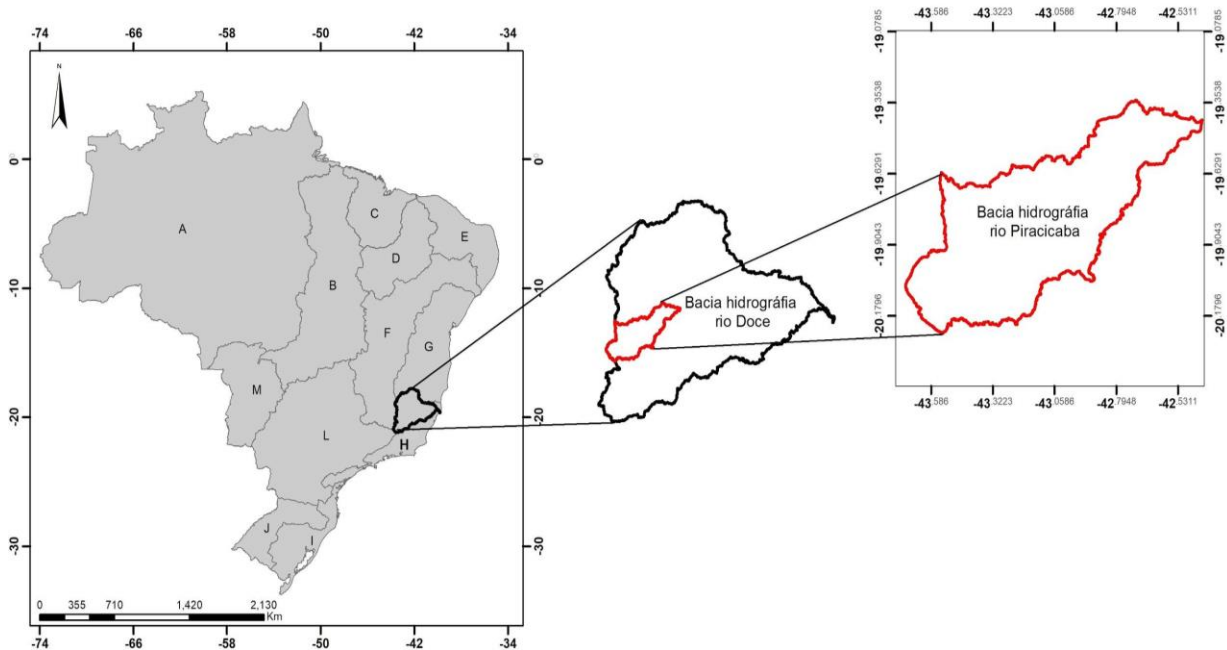


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Piracicaba. Fonte: Adaptado de ANA (2018).

Na Figura 1 é representada a divisão de bacias brasileiras, sendo a região hidrográfica Atlântico Sudeste indicada com a letra H e as demais regiões conforme segue: Amazônica (A), Tocantins (R), Paraguai (M), Atlântico Nordeste Ocidental (C), Atlântico Nordeste Oriental (E), Parnaíba (D), São Francisco (F), Atlântico Leste (G), Paraná (L), Uruguai (J) e Atlântico Sul (I).

Os principais afluentes do rio Piracicaba são o rio do Peixe e o rio Santa Bárbara, pela margem esquerda, e o rio da Prata, pela margem direita. Sua extensão é composta, em grande maioria, pelo bioma Mata Atlântica e partes de Cerrado (Queiroz et al., 2016).

Dados de entrada

Utilizou-se as cenas da órbita ponto 217/074 para os dias 10 de agosto e 11 de setembro de 2016 e 218/074 para os dias 17 de agosto e 18 de setembro de 2016, ambas do sensor OLI do satélite Landsat 8, disponibilizadas no catálogo de imagens do INPE. A escolha da data da imagem deu-se em função da área de abrangência da bacia, da qualidade das cenas com relação a presença de nuvens e da disponibilidade de registros de focos de queimadas para a região. Também foram empregados neste trabalho para a validação dos resultados, os polígonos representativos de áreas queimadas referentes a data das imagens obtidos em formato *shapefile* através do Programa Queimadas - Monitoramento por Satélites do INPE, pontos do banco de dados

de queimadas do INPE do dia 11 de setembro de 2016, pontos representativos de ocorrências de focos de incêndios disponibilizados pelo 4º Pelotão de Bombeiros Militar, 2ª Companhia BM - 6º BBM, localizado no município de Itabira, MG e o limite da bacia hidrográfica do rio Rio Piracicaba. Todos os dados foram trabalhados sob o sistema de coordenadas planas, *datum* WGS 84.

Correção radiométrica

Para cálculo do índice de queimada, realizou-se primeiramente a correção radiométrica das imagens no *software* ArcGIS© considerando a correção para ângulo solar conforme metodologia apresentada no site do USGS (Equações 1 e 2) onde a imagem foi convertida de número digital para reflectância no topo da atmosfera (TOA).

$$\rho\lambda' = M\rho Qcal + A\rho \quad (1)$$

Em que,

$\rho\lambda'$: reflectância planetária na parte superior da atmosfera sem correção para o ângulo solar.

$M\rho$: fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda).

$A\rho$: fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados

(REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda).

Qcal: valores de pixel do produto padrão (DN) quantificados e calibrados.

Com o valor da $\rho\lambda'$ calculou-se a reflectância na parte superior da atmosfera considerando a correção para o ângulo solar (Equação 2):

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\text{sen}(\theta_{se})} \quad (2)$$

Em que,

$\rho\lambda$: reflectância planetária na parte superior da atmosfera.

θ_{SE} = ângulo local de elevação do sol. O ângulo de elevação do sol do centro da cena em graus é fornecido nos metadados (SUN_ELEVATION).

Normalização radiométrica

Neste trabalho, utilizou-se o método do modelo de regressão para desenvolvimento da normalização radiométrica conforme apresentado pelos autores Fernandes et al. (2017), buscando maximizar o grau de ajuste entre as imagens em estudo.

Para tanto, realizou-se coleta manual de pontos representativos na imagem englobando locais que apresentavam alta reflectância como, solo exposto, vegetação rasteira, área urbana e locais com baixa reflectância como corpos hídricos e vegetação densa, para normalização das cenas do dia 10 de agosto com relação às cenas do dia 11 de setembro (cenas da órbita ponto 217/074) e das cenas do dia 18 de setembro com relação às cenas do dia 17 agosto (cenas da órbita ponto 218/074), buscando-se a equação matemática que melhor ajuste o modelo de regressão e por meio desta equação foi calculado os valores de ND das referidas bandas para as imagens a serem normalizadas empregando-se a ferramenta calculadora *Raster* do *ArcToolbox* (*ArcGIS* ©).

Após o processamento das imagens, foi gerado o Índice de Queima Normalizada (NBR), a variação de NBR (ΔNBR), o levantamento do nível de severidade e o Índice Normalizado de Diferença de Água (NDWI), como descrito a seguir.

Índice de Queima Normalizada

O cálculo do NBR foi realizado utilizando a ferramenta Calculadora *Raster* do *ArcToolbox* (*ArcGIS* ©) (Equação 3) e a variação de NBR foi obtida a partir da diferença entre o NBR do dia 10/08 e 11/09 de 2016 (Equação 4) e do NBR do dia 17 de agosto e 18 de setembro de 2016 (Equação 5).

$$NBR = \frac{IVP-IVM}{IVP+IVM} \quad (3)$$

Sendo;

IVP: banda do infravermelho próximo (B5 do sensor OLI satélite Lndsat 8), faixa espectral de 0.845 - 0.885 μm ; e

IVM: infravermelho médio (B6 do sensor OLI satélite Lndsat 8), faixa espectral de 1.560 - 1.660 μm .

$$\Delta NBR = NBR_{10/08} - NBR_{11/09} \quad (4)$$

$$\Delta NBR = NBR_{17/08} - NBR_{18/09} \quad (5)$$

Nível de severidade

A verificação da severidade do fogo foi realizada com base na metodologia apresentada pelos autores Rosan e Alcântara (2015) e classificada conforme valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de severidade e variações dos valores ΔNBR .

Nível de Severidade	ΔNBR
Alta regeneração	< -250,00
Baixa regeneração	-250 a -249
Não queimado	-250 a -100
Baixa severidade	-100 a 99
Baixa moderada severidade	99 a 269
Moderada severidade	269 a 659
Alta severidade	659 a 1.350
Anomalia	> 1.350

Fonte: Adaptado de Rosan e Alcântara (2015) em relação aos resultados encontrados.

Índice Normalizado de Diferença de Água (NDWI)

Para minimizar as confusões causadas entre áreas queimadas e áreas úmidas, emprega-se o cálculo do NDWI, índice proposto por Gao em 1996. Neste trabalho empregou-se este índice modificado, sendo assim denominado MNDWI (índice normalizado de diferença de água modificado). Para este índice utilizou-se as bandas verde (B3 0.525 - 0.600 μm, expresso na equação 6 por *Green*) e infravermelho médio (B7 2.100 - 2.300 μm, expresso na equação por *MIR*) conforme Equação 6.

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (6)$$

Assim, as regiões consideradas como contendo alta umidade (adotando-se a legenda de área úmida para tais áreas neste trabalho) são excluídas do resultado do ΔNBR.

Verificação da eficiência da metodologia empregada no cálculo da ΔNBR

Para verificar a eficiência da metodologia empregada na determinação da severidade do fogo, realizou-se a sobreposição de polígonos e pontos de queimadas registrados pelo INPE e pontos de ocorrência de queimadas detectados pelo corpo de bombeiros no município de Itabira, MG. Posteriormente, realizou-se a extração dos valores ΔNBR nesses locais comparando-os com os valores das classes de nível de severidade. Realizou-se a sobreposição do MNDWI ao ΔNBR para identificação das áreas úmidas que poderiam ser confundidas com áreas queimadas.

Resultados e discussão

A fim de se trabalhar com imagens com reflectâncias relacionadas às mesmas condições de aquisição em relação a uma imagem de referência, visto que o presente trabalho realiza a comparação entre os resultados obtidos por meio destas (Eckhardt *et al.*, 1990 apud Fernandes *et al.*, 2017), foi realizada a normalização radiométrica da cena do dia 10 de agosto em relação à cena do dia 11 de setembro e das cenas do dia 17 de setembro em relação às cenas do dia 17 de agosto.

A partir da extração dos valores de reflectância dos pontos selecionados foram testadas equações que melhor se ajustassem aos dados, sendo testados os tipos de equações

presentes no Excel®, software empregado para esta análise, quais sejam: exponenciais, lineares, logarítmicas, polinomiais, potenciais e média móvel.

Dentre estas a que apresentou melhor resultado foi a equação de potência no modelo de regressão em ambas as análises, sendo portanto, estas equações adotadas para ajuste entre as imagens a fim de se realizar a normalização radiométrica, para as bandas no IVP e para no IVM, respectivamente, conforme exemplificado nas Figuras 2 e 3.

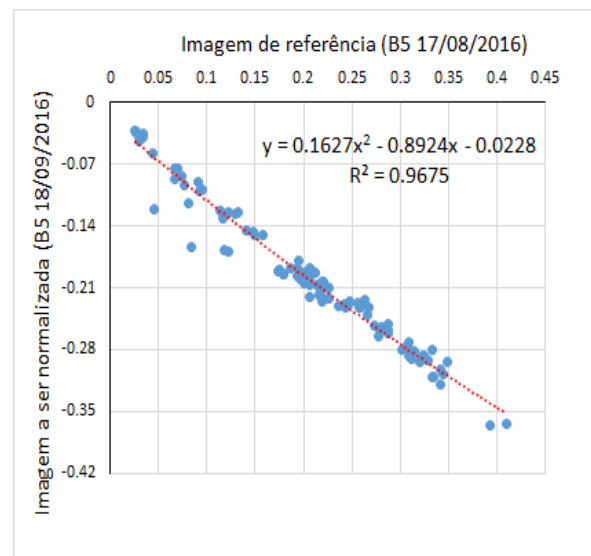


Figura 2. Ajuste da B5 do dia 18/09 com relação ao dia 17/08.

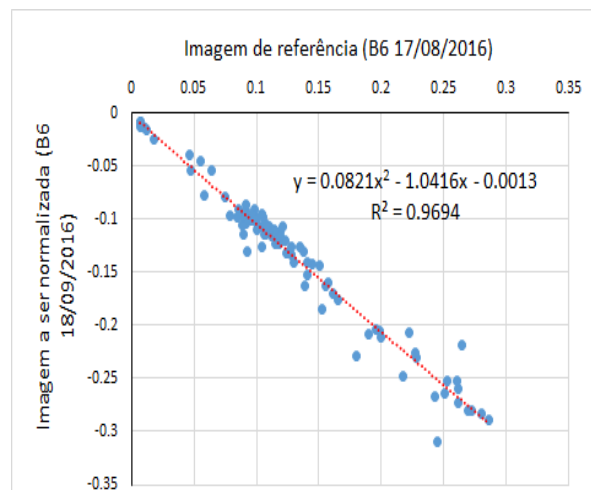


Figura 3. Ajuste da B6 do dia 19/09 com relação ao dia 17/08.

As equações empregadas apresentaram um bom ajuste como pode ser demonstrado nos exemplos acima onde obteve-se R² = 0,9675 para a B5 e R² = 0,9694 para a B6.

As equações foram empregadas na ferramenta Calculadora de *Raster* no ArcGIS® tendo como variáveis de entrada as imagens a serem normalizadas e empregando-se suas respectivas equações, chegando-se a valores de reflectâncias ajustados para as bandas utilizadas.

Para minimizar as confusões causadas entre áreas queimadas e áreas úmidas, empregou-se o cálculo do MNDWI. Para este índice utilizou-

se as bandas verde (B3) e infravermelho médio (B7) do mês de agosto de 2016. Na Figura 4 é apresentado o resultado do índice normalizado de diferença de água modificado (MNDWI), ou, índice de umidade.

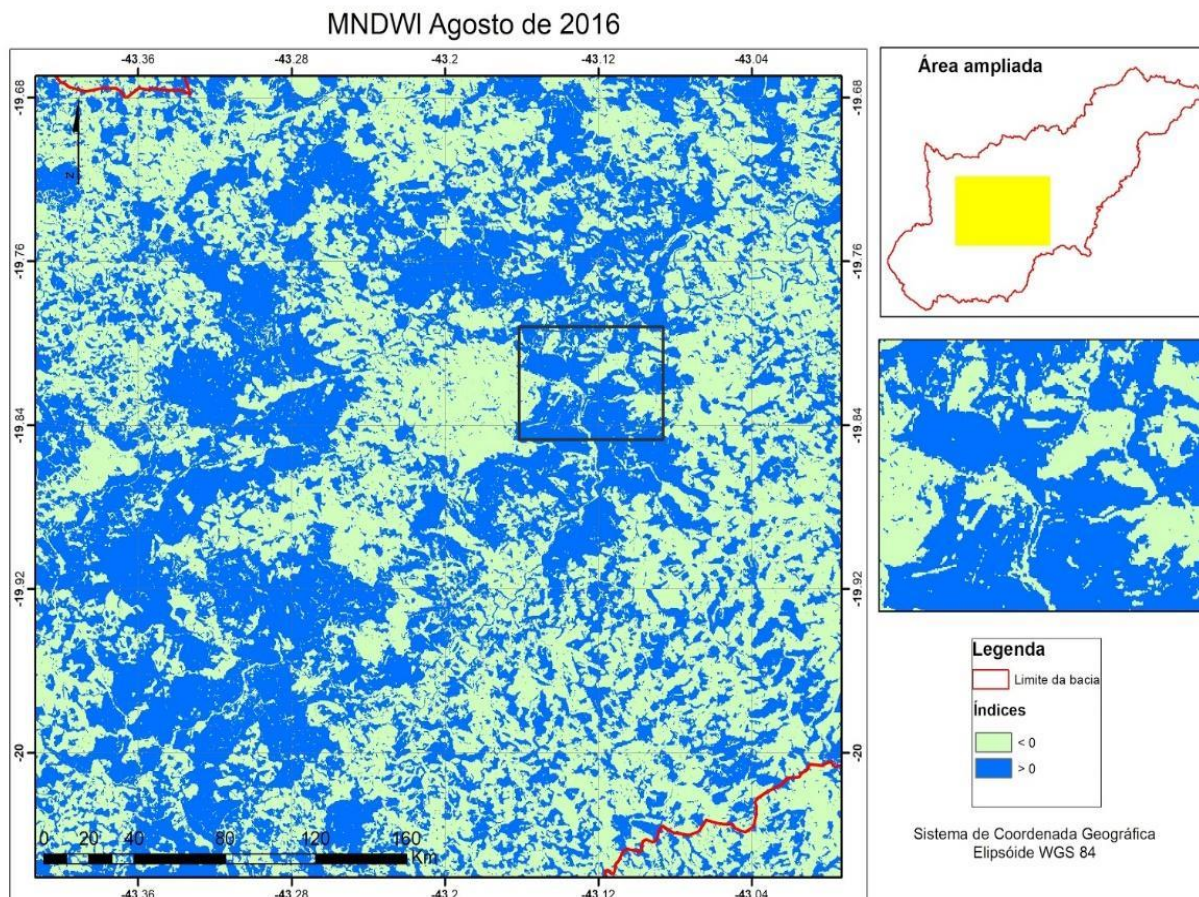


Figura 4. Resultado do índice normalizado de diferença de água modificado (MNDWI).

Os valores do índice de umidade variaram entre -1 e 1 , sendo que valores de $NDWI \geq 0$ indicam áreas com presença de água valores de $NDWI \leq 0$ incidam áreas sem a presença de água. Isso devido ao comportamento da assinatura espectral da água que fornece baixa reflectância nas bandas do visível e infravermelho (Yan et al., 2019).

O resultado da variação do índice de queimada (ΔNBR) é apresentado na Figura 5. O índice de queimada foi calculado com as imagens de 10 e 17 de agosto e 11 e 18 de setembro de 2016 para a região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, Minas Gerais. Na Figura 5, as diferentes colorações indicam os níveis de severidade, conforme explicado na legenda, e em vermelho são representadas as áreas úmidas obtidas a partir do cálculo do MNDWI.

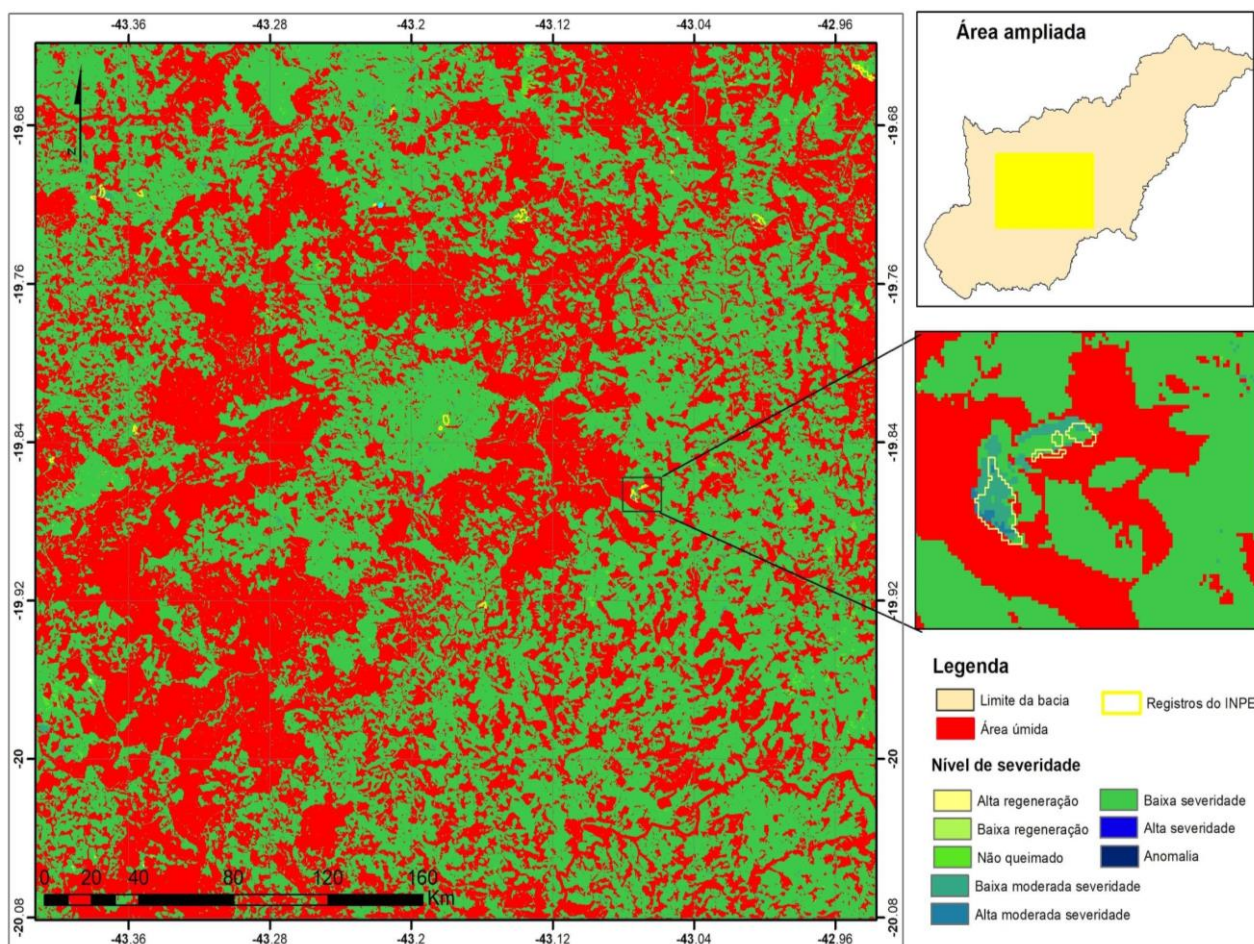


Figura 5. ΔNBR de agosto e setembro de 2016.

O Índice Normalizado de Diferença de Água Modificado (MNDWI) foi utilizado com o objetivo de diferenciar áreas úmidas que poderiam ser confundidas com áreas queimadas no cálculo do NBR devido a característica da reflectância.

Na Figura 5, as áreas em amarelo são as áreas de alta regeneração, os tons de verde correspondem às áreas não queimadas ou em baixa regeneração e os tons em azul, como representado na aproximação da imagem, indicam moderada severidade ou alta severidade. Valores de ΔNBR acima de 1.350 foram considerados como anomalias, recebendo a coloração preta.

O emprego do índice de queimadas pode acarretar em erros, visto que áreas úmidas podem ser classificadas como de baixa severidade, assim, com o emprego do índice de umidade pôde-se desconsiderar várias áreas classificadas como baixa severidade, proporcionando um resultado consistente.

Esta consistência foi verificada com a comparação do índice de queimada com os polígonos do INPE, que demonstrou a eficiência da metodologia visto que locais classificados como alta moderada severidade eram também destacados em polígonos do INPE como sendo áreas de queima conforme indicado na aproximação da imagem na Figura 5, onde o limite em amarelo representa os registros de queimadas do INPE, os quais coincidem com tais áreas na figura gerada com a ΔNBR . A vista disso, constatou-se a partir da extração dos valores que as áreas registradas pelo INPE apresentaram classificação variando de baixa, média a alta severidade.

Na Figura 6, é apresentada a variação de NBR na totalidade da região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba.

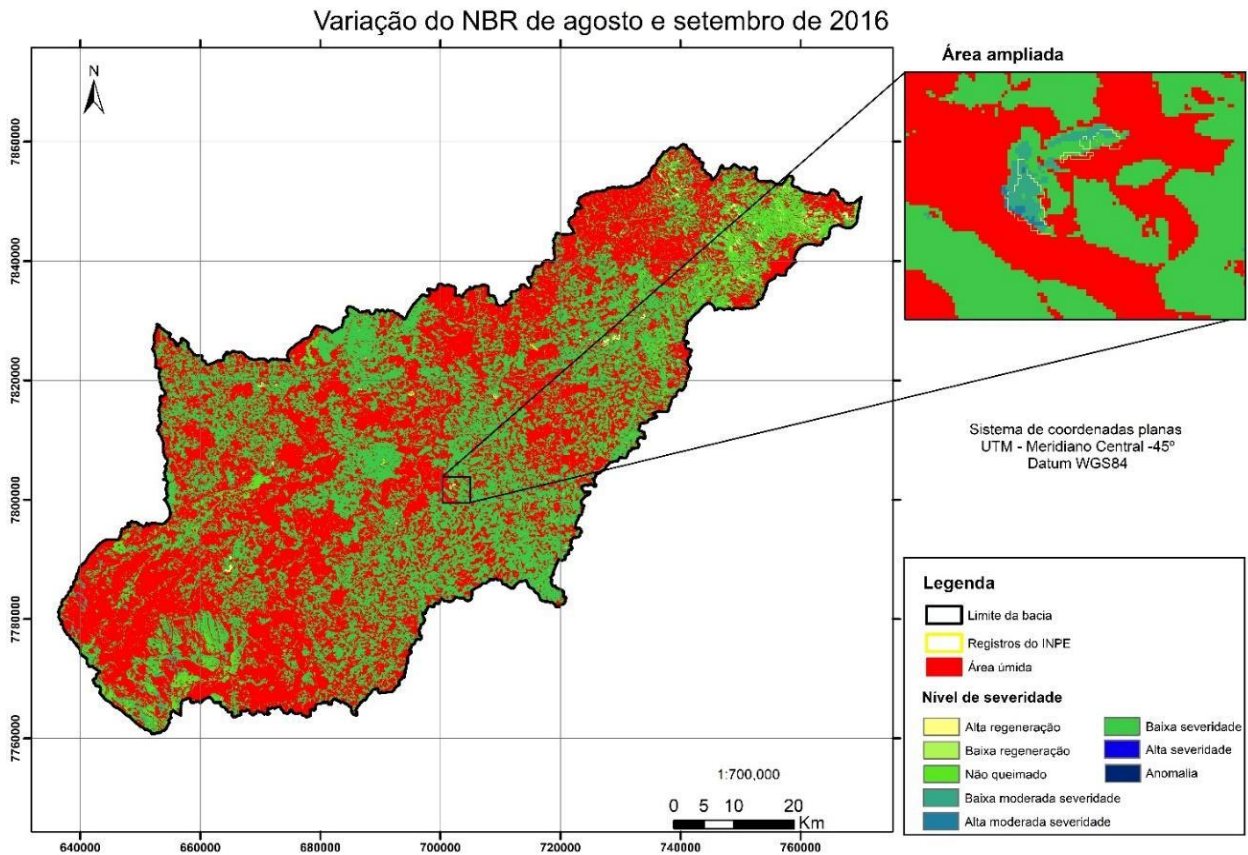


Figura 6: Área da bacia do rio Piracicaba com a ΔNBR de agosto e setembro de 2016.

Com o cálculo do índice para toda a bacia pode-se perceber regiões com maior ocorrência das classes moderada e alta severidade nas porções noroeste (na região dos municípios de Nova Era, João Monlevade, Itabira, Bela Vista de Minas, São Gonçalo do Rio Abaixo, Barão de Cocais e Bom Jesus do Amparo) e nordeste da bacia (nos municípios São Domingos do Prata, Marliéria, Jaguarçu e Antônio Dias).

Os resultados também permitem a avaliação local dos danos em relação à severidade, visto que apresenta os locais, para um mesmo

foco, mais intensamente atingidos (maiores severidades) e os locais mais brandos (menores severidades), permitindo uma análise mais ampla para a adoção de ações que possam minimizar os impactos causados.

Para realizar a comparação da ΔNBR com os registros de queimadas do banco de dados do corpo de bombeiros e dos pontos disponibilizados pelo INPE, realizou-se a sobreposição dessas informações ao resultado da ΔNBR conforme apresentado na Figura 7.

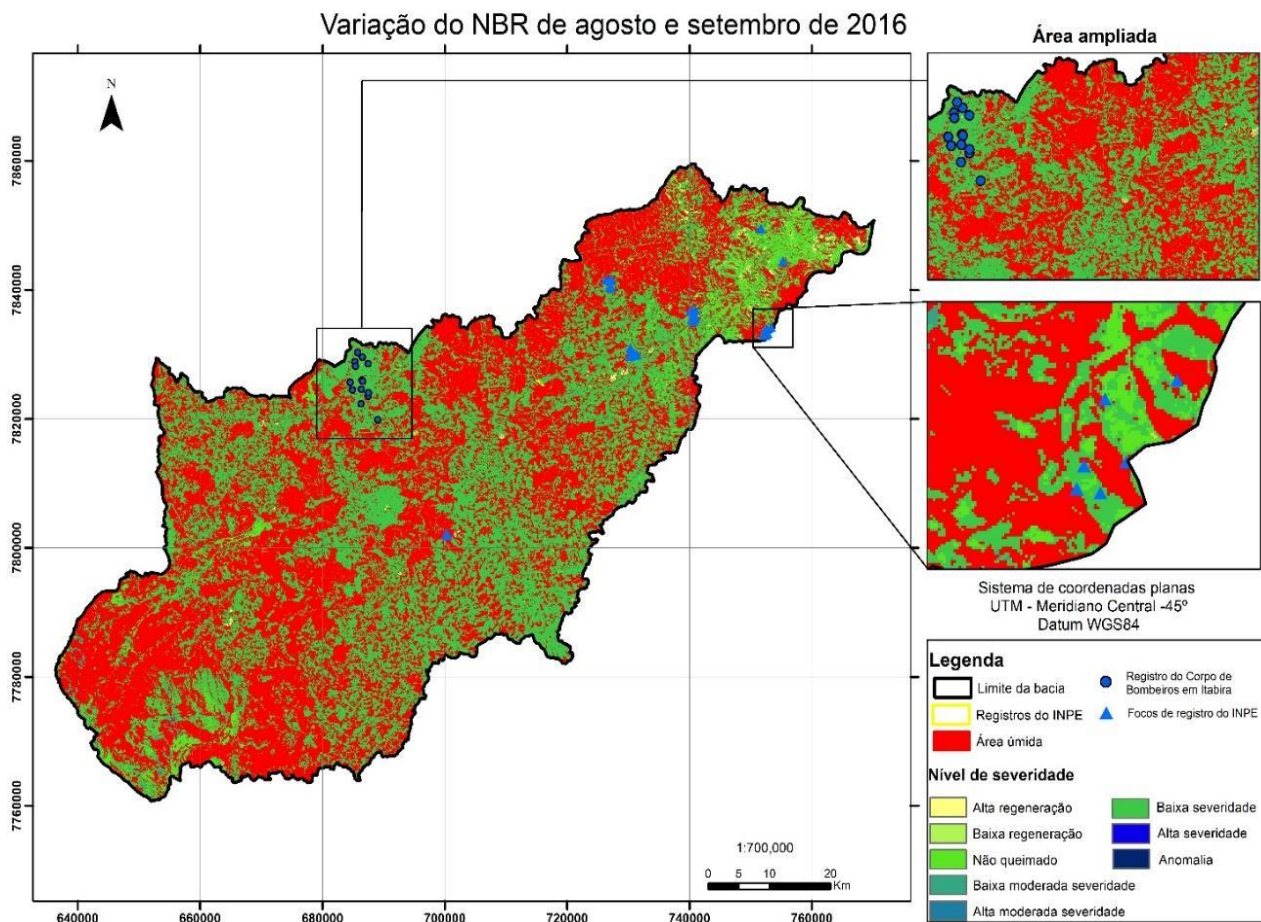


Figura 7: Análise dos registros do INPE e dos bombeiros sobrepostos ao resultado da ΔNBR .

Na Figura 7 é apresentada a sobreposição dos pontos de ocorrências registradas pelo corpo de bombeiros e dos pontos e polígonos do banco de dados do INPE à ΔNBR . Após a sobreposição dos locais de ocorrência de queimadas registradas na data das imagens pelo corpo de bombeiros do município de Itabira à ΔNBR , observou-se que esses pontos estavam em regiões de baixa severidade e não queimado. Da mesma forma, os pontos registrados pelo INPE também predominaram sobre essa mesma classificação. Dos 27 pontos do INPE enquadrados na região da bacia do rio Piracicaba, 6 foram identificados em locais classificados como não queimado e 19 em baixa severidade.

No caso dos registros do corpo de bombeiros, já se esperava um erro maior na sobreposição destes ao índice gerado, visto que os registros são referentes a incêndios em áreas urbana, com pequenas dimensões, que segundo conversa informal mais de 90% se referem a lotes vagos, e o índice foi calculado empregando uma imagem de média resolução espacial (30m), assim com uma resolução que não atenderia a um estudo local, justificando assim, os pontos em locais não queimados, ainda assim a grande maioria dos

pontos incidiram em locais com cicatrizes (aproximadamente 70% dos pontos), o que demonstra que as alterações espectrais são detectadas ainda que a área atingida pelo incêndio seja reduzida, quando comparada à resolução espectral adotada.

A queima provoca diversas mudanças na resposta espectral da superfície afetada, isso devido ao escurecimento da área pela combustão da vegetação ou, a geração de cicatriz na vegetação.

Pode-se citar de acordo com Loboda et al., (2007) a diminuição da clorofila da vegetação que resulta no aumento da reflectância no espectro visível e diminuição na região do infravermelho-próximo e, a diminuição da umidade do dossel da vegetação e do solo que faz com que aumente a reflectância na região do infravermelho-médio.

Segundo Pereira et al., (2016), a disponibilidade de informações confiáveis sobre as distribuições espacial e temporal de áreas queimadas é importante não só para uma melhor gestão dos recursos naturais, mas também para estudos relacionados à química da atmosfera e à mudanças climáticas.

Entretanto, as alterações espectrais causadas pela alteração da estrutura da vegetação pela queima são muito variável e dependem de alguns fatores, como a gravidade dos efeitos do fogo, tipo de vegetação e das propriedades do solo na área.

Ressalta-se que nem todas as áreas queimadas serão detectadas no espaço devido a fatores como baixa intensidade, data da queima, cobertura por dosséis de árvores ou estruturas físicas e queimadas pontuais como as identificadas no banco de dados do corpo de bombeiros de Itabira.

Da mesma maneira, queimadas em grandes áreas e em florestas podem gerar um sinal de fácil identificação pelos satélites devido área de abrangência, intensidade do sinal, resolução espacial dos satélites e mudanças de resposta espectral que a superfície sofre quando ocorre alteração da sua cobertura.

Conclusões

Entender a dimensão das áreas queimadas e a severidade do fogo torna-se importante para compreensão da extensão dos impactos ambientais advindos de queimadas e incêndios florestais. A obtenção dessas informações pode contribuir com o desenvolvimento de técnicas para prevenção e recuperação de áreas afetadas pelo fogo, minimizando os impactos futuros causados pela queima, tanto causas por ações antrópicas locais como aqueles relacionados às mudanças climáticas.

O fato destes índices serem obtidos empregando imagens, e, portanto, espacializados, permitem a quantificação da extensão territorial atingida pelos eventos e podem indicar regiões mais frágeis que deveriam ter um olhar mais atento em relação à medidas preventivas e gestão sustentável dos recursos existentes nas áreas, o que pode otimizar os recursos humanos e financeiros no processo de gestão do território.

Diante dos resultados apresentados conclui-se que o NBR e a Δ NBR mostraram-se eficientes para detecção de áreas queimadas, visto que os coincidem com os polígonos registrados pelo INPE. Entretanto, o índice não se mostrou adequado para comparação com os registros em formato de ponto como os locais de ocorrências registradas pelo corpo de bombeiros e os pontos disponibilizados pelo INPE, tal resultado se deve à baixa resolução espacial das imagens adotadas (30m) para uma análise local.

Ressalta-se ainda que o sensoriamento remoto é uma ferramenta útil para obtenção de

históricos de incêndios florestais e monitoramento dos eventos de incêndios atuais, dessa forma, o gerenciamento do fogo pode ser realizado obtendo-se informações específicas das áreas atingidas. Este monitoramento pode ser realizado com uma frequência relativamente curta, visto que as imagens empregadas apresentam uma frequência de obtenção de 16 dias, para imagens do Landsat8, quando não cobertas por nuvens. Outro ponto importante em relação à frequência de obtenção das imagens é a possibilidade de análise do tempo de permanência dos sinais das queimadas na região. Todos estes estudos se tornam ainda mais viável em função da disponibilidade das imagens de forma gratuita o que favorece o seu emprego na gestão do território, principalmente por agentes públicos.

Além da importância destes resultados para gestores, tal estudo ainda contribui para estudos de química da atmosfera e de mudanças climáticas, visto que uma das variáveis empregadas para quantificar as emissões associadas à queima de biomassa em escala global é o tamanho da área afetada pelo fogo.

Porém, abrangendo a ideia deste estudo para o território nacional, percebe-se a necessidade de disseminação das informações obtidas por meio do sensoriamento remoto em ações de prevenção que visem não só desenvolver as pesquisas científicas e tecnológicas da área, mas que busquem também promover a conscientização das populações em relação à gravidade de exercerem as práticas de queimadas e do risco que essas ações possuem de se tornarem incêndios difíceis de serem controlados, bem como dos danos ambientais e sociais advindos desses eventos.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá, campus de Itabira, pelo fornecimento de estrutura e equipamentos necessários ao desenvolvimento desse trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Referências

- ANA. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: relatório executivo. Brasília: ANA, 129 p., 2013.
- ANA. Divisão de Bacias. Brasília: ANA, 2018.
- Anderson, L. O., Aragao, L. E. O. C., Lima A., Shimabukuro, Y. E., 2005. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, [Online], 35. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672005000400009>. Acesso: 03 abr. 2019.
- Artaxo, P., Gatti, L. V., Leal, A. M. C., Longo, K. M., Freitas, S. R., Lara, L. L., Pauliquevis, T. M., Procópio, A. S., Rizzo, L. V. 2005. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica*, [Online] 35. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672005000200008>. Acesso: 27 mar. 2019.
- Bai, Y., Tang, P., Hu, C., 2018. KCCA Transformation-Based Radiometric Normalization of Multi-Temporal Satellite Images. *Remote Sensing* [Online]10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs10030432>. Acesso: 27 mar. 2019.
- Bernardo, N., Watanabe, F., Rodrigues, T., Alcântara, E., 2016. An investigation into the effectiveness of relative and absolute atmospheric correction for retrieval the TSM concentration in inland waters. *Modeling Earth Systems And Environment*. Springer Nature [Online] 2. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-016-0176-9>. Acesso: 20 abr. 2019.
- Cao, L. Chen, X., Zhang, C., Kurban, A., Qian, J., Pan, T., Yin, Z., Qin, X., Ochege, U., Philippe, M., 2019. The Global Spatiotemporal Distribution of the Mid-Tropospheric CO2 Concentration and Analysis of the Controlling Factors. *Remote Sensing* [Online] 11. Disponível em:
- <http://dx.doi.org/10.3390/rs11010094>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- Chen, X., Vierling, L., Deering, D. 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment* [Online] 98. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.021>. Acesso: 27 mar. 2019.
- Doxani, G., Vemrote, E., Roger, J. C., Gascon, F., Adriaesen, S., Frants, D., Hagolle, O., Hollsten, A., Kirches, G., Li, F., Louis, J., Mangin, A., Pahlevan, N., Pflug, B., Vanhellemont, Q., 2018. Atmospheric Correction Inter-Comparison Exercise. *Remote Sensing* [Online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs10020352>. Acesso: 22 abr. 2019.
- Fernandes, P. J. F., Vicens, R. S.; Furtado, L. F. A., 2017. Modelo automático de normalização radiométrica de série multitemporal Landsat-5 usando pontos pseudoinvariantes (PIF). *Revista Brasileira de Cartografia* [Online] 69. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/1479>. Acesso: 20 jul. 2018.
- Ferreira, A. J. D., Alegre, S. P., Coelho, C. O. A., Shakesby, R. A., Páscoa, F. M., Ferreira, C. S. S. Keiser, J. J., Ritsema, C., 2015. Strategies to prevent forest fires and techniques to reverse degradation processes in burned areas. *Catena* [Online] 128. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.002>. Acesso: 07 jul. 2018.
- Fornacca, D., Ren, G., Xiao, W., 2018. Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing* [Online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs10081196>. Acesso: 27 abr. 2019.
- Grégoire, J. M., Tansey, K., Silva, J. M. N. 2003. The GBA2000 initiative: Developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal Of Remote Sensing* [Online] 24. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/0143116021000044850>. Acesso: 20 jul. 2018.

- Hardtke, L. A., Blanco, P. D., del Valle, H. F., Metternicht, G. I., Sione, W. F., 2015. Automated mapping of burned areas in semi-arid ecosystems using modis time-series imagery. *Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences* [Online] 7/3. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-x1-7-w3-811-2015>. Acesso: 20 abr. 2019.
- Haywood, A., Stone, C., 2017. Estimating Large Area Forest Carbon Stocks—A Pragmatic Design Based Strategy. *Forests*, [Online] 8. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/f8040099>. Acesso: 19 abr. 2019.
- Henry, M., Maingi, J., Mccarty, J., 2019. Fire on the Water Towers: Mapping Burn Scars on Mount Kenya Using Satellite Data to Reconstruct Recent Fire History. *Remote Sensing* [Online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11020104>. Acesso: 20 abr. 2019.
- Hislop, S., Jones, S., Berelov, M. S., Skidmore, A., Haywood, A., Nguyen, T. H., 2018. Using Landsat Spectral Indices in Time-Series to Assess Wildfire Disturbance and Recovery. *Remote Sensing* [Online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs10030460>. Acesso: 19 abr. 2019.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. Boletim Mensal de Monitoramento. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios, vol. 3, n. 9. Setembro/2018. São José dos Campos.
- Keukelaere, L., Sterckx, S., Adriaensen, S., Knaeps, E., Reusen, I., Giardino, C., Bresciani, M., Hunter, P., Neil, C., Zande, der V., Vaiciute, D., 2018. Atmospheric correction of Landsat-8/OLI and Sentinel-2/MSI data using iCOR algorithm: validation for coastal and inland waters. *European Journal Of Remote Sensing* [Online] 51. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2018.1457937>. Acesso: 19 abr. 2019.
- Laybros, A., Schlöpfer, D., Féret, J. B., Descroix, L., Bedeau, C., Lefevre, M. J., Vicent, G., 2019. Across Date Species Detection Using Airborne Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing* [Online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070789>. Acesso: 27 abr. 2019.
- Loboda, T., O'Neal, K.J., Csiszar, I., 2007. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing Of Environment* [Online] 109. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.017>. Acesso: 20 jul. 2018.
- Lopes, E. R. do N., Silva, A. P. P., Peruchi, J. F., Lourenço, R. W., 2018. Zoneamento de Risco de Incêndio e Queimadas na Cidade de Sorocaba – São Paulo. *Geography Department University Of Sao Paulo* [Online] 36. Disponível: <http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v36i0.148048>. Acesso: 15 abr. 2019.
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., Chrysafi, I., 2017. Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *Giscience & Remote Sensing* [Online] 55. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>. Acesso: 26 abr. 2019.
- Mishra, N., Haque, M. O., Leigh, L., Aaron, D., Helder, D., Markham, B., 2014. Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). *Remote Sensing* [Online] 6, n. 12. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs61212619>. Acesso: 22 abr. 2019.
- Moraes, E. C., Franchito, S. H., BRAHMANANDA RAO, V., 2005. Evaluation of surface air temperature change due to the greenhouse gases increase with a statistical-dynamical model. *Journal of Geophysical Research* [Online] 110. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1029/2004jd005679>. Acesso: 22 jul. 2018.
- Nia, Mo. S., Wang, D. Z., Bohlman, S. A., Gader, P. D., Graves, S. J., Petrovic, M., 2015. Impact of atmospheric correction and image filtering on hyperspectral classification of tree species using support vector machine. *Journal Of Applied Remote Sensing* [Online] 9.

- Disponível:
<http://dx.doi.org/10.1117/1.jrs.9.095990>.
Acesso: 20 abr. 2019
- Nobre, C. A., Salazar, L. F., Oyama, M., Cardoso, M., Sampaio, G.; Lapola, D., 2007. Mudanças Climáticas e possíveis alterações nos Biomas da América do Sul. São Paulo: Ministério do Meio Ambiente; Secretaria de Biodiversidade e Florestas; Diretoria de Conservação da Biodiversidade, n. 6.
- Pereira, A. A.; Teixeira, F. R.; Libonati, R.; Melchiori, E. A.; Carvalho, L. M. T. 2016. Avaliação de Índices Espectrais para Identificação de Áreas Queimadas no Cerrado Utilizando dados LandSat TM. Revista Brasileira de Cartografia, nº 68/8, p. 1665-1680.
- Pickell, P., Hermosilla, T., Frazier, R. J., Coops, N. C., Wulder, M. A., 2015. Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests. International Journal Of Remote Sensing [Online] 37. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.1080/2150704x.2015.1126375>. Acesso: 22 abr. 2019.
- Queiroz, M. T. A., Lima, L. R. P., Sabará, M. G., Queiroz, C. A., Leão, M. M. D., Amorim, C. C. 2016. Avaliação do Estado Trófico do Rio Piracicaba e sua Relação com a UHE-Sá Carvalho, MG, Brasil. Revista de Ciências Ambientais – RCA, v.10, nº2, p. 21-43.
- Resende, F. C., Santos, P. R., Pereira, G. 2015. Análise de Índices Espectrais para Estimativa de Áreas de Regeneração Florestal no Parque Nacional Chapada Das Mesas. Revista Territorium Terram [Online] 3. Disponível:
http://www.seer.ufsj.edu.br/index.php/territorium_terram/article/view/1053. Acesso: 14 abr. 2019.
- Rosan, T. M., Alcântara, E. 2015. Detecção de áreas queimadas e severidade a partir do índice espectral Δ NBR. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 17. Anais. João Pessoa. Disponível:
<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0104.pdf>. Acesso: 17 jul. 2018.
- Rozario, P. F., Madurapperuma, B., Wang, Y., 2018. Remote Sensing Approach to Detect Burn Severity Risk Zones in Palo Verde National Park, Costa Rica. Remote Sensing [Online] 10. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.3390/rs10091427>. Acesso: 27 abr. 2019.
- Santana, N. C., Júnio, O. A. de C., Gomes, R. A. T., Guimarães, R. F., 2018. Burned-Area Detection in Amazonian Environments Using Standardized Time Series Per Pixel in MODIS Data. Remote Sensing [Online] 10. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.3390/rs10121904>. Acesso: 20 abr. 2019.
- Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Borre, J. V., Goossens, R., 2014. Burned Area Detection and Burn Severity Assessment of a Heathland Fire in Belgium Using Airborne Imaging Spectroscopy (APEX). Remote Sensing [Online] 6. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.3390/rs6031803>. Acesso: 14 abr. 2019.
- Silveira, E. M. de O., Mello, J. M., Júnior, F. W. A., Carvalho, M. T., 2018. Object-based land-cover change detection applied to Brazilian seasonal savannahs using geostatistical features. International Journal of Remote Sensing [Online] 39. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2018.1430397>. Acesso: 22 abr. 2019.
- Thompson, D. R., Guanter, L., Berk, A., Gao, B., Richter, R., Schläpfer, D., Thome, K. J., 2018. Retrieval of Atmospheric Parameters and Surface Reflectance from Visible and Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy Data. Surveys In Geophysics [Online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-018-9488-9>. Acesso: 23 abr. 2019.
- Van Marle, M. J. E., Field, R. D., Van der Werf, G. R. Wagt, I. A. E., Houghton, R. A., Rizzo, L. V., Artaxo, P., Tsigaridis, K., 2017. Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973-2014). Global Biogeochemical Cycles [Online] 31. Disponível:
<http://dx.doi.org/10.1002/2016gb005445>. Acesso: 23 abr. 2019.
- Volpi, M., Camps-Valls, G., Tuia, D., 2015. Spectral alignment of multi-temporal cross-sensor images with automated kernel canonical correlation analysis. Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing [Online] 107. Disponível:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.005>. Acesso: 26 abr. 2019.

White, J. C., Wulder, M. A., Hobart, G. W., Luther, J. E., Hermosilla, T., Griffiths, P., Coops, N. C., Hall, R. J., Hostert, P., Dyk, A., Guindon, L., 2014. Pixel-Based Image Compositing for Large-Area Dense Time Series Applications and Science. *Canadian Journal Of Remote Sensing [Online]* 40.

Disponível:

<http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2014.945827>. Acesso: 23 abr. 2019.

Yan, W., Shaker, A., Larocque, P., 2019. Scan Line Intensity-Elevation Ratio (SLIER): An Airborne LiDAR Ratio Index for Automatic Water Surface Mapping. *Remote Sensing [Online]* 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070814>. Acesso: 27 abr. 2019.