

**MERLY ROCIO VÁSQUEZ HERNÁNDEZ**

**RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO DESIDRATADA E VALORES DE NBR  
(NORMALIZED BURN RATIO) OBTIDOS VIA DADOS MSI/SENTINEL - 2 EM  
REGIÕES TROPICAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: José Marinaldo Gleriani

Coorientador: Helio García Leite

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V335r  
2021

Vásquez Hernández, Merly Rocio, 1989-  
Resposta espectral da vegetação desidratada e valores de NBR (Normalized Burn Ratio) obtidos via dados MSI Sentinel – 2 em regiões tropicais / Merly Rocio Vásquez Hernández. – Viçosa, MG, 2021.  
50 f.: il. (algumas color.); 29 cm.

Orientador: José Marinaldo Gleriani.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 43–50.

1. Queimada. 2. Vegetação - Desidratação. 3. Imagens multiespectrais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.94322

**MERLY ROCIO VÁSQUEZ HERNÁNDEZ**

**RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO DESIDRATADA E VALORES DE NBR  
(NORMALIZED BURN RATIO) OBTIDOS VIA DADOS MSI/SENTINEL - 2 EM  
REGIÕES TROPICAIS**

Dissertation submitted to the Forest Science  
Graduate Program of the Universidade Federal de  
Viçosa in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of *Magister Scientiae*.

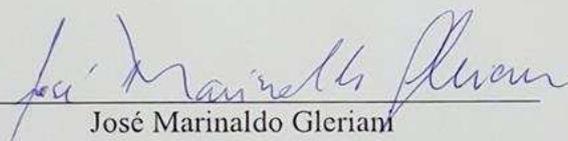
APROVADA: 24 de março de 2021

Asentimento:



---

Merly Rocio Vásquez Hernández  
Autora



---

José Marinaldo Gleriani  
Orientador

*A Deus, todo-poderoso, pela vida.  
Minha mãe, Melva Hernández, e pai, Andres Vásquez  
Minha irmã, Clarivel Vásquez.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida.

Aos meus pais Melva Hernández Sánchez e Andrés Vásquez Julca pelo amor, incentivo e apoio.

A minha irmã Clarivel Vásquez Hernández pela sua companhia e ajuda nos momentos difíceis.

Ao orientador professor José Marinaldo Gleriane pela amizade e ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao coorientador Helio García Leite pelo acompanhamento nesta pesquisa.

A Universidade Federal de Vicososa e ao Departamento de Engenharia Florestal pelos excelentes professores e pessoal técnico e administrativo.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG me concedeu a bolsa de estudos e foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Ao programa de pós-graduação em Ciências Florestais pela acolhida no programa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

HERNÁNDEZ, Merly Rocio Vásquez, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Resposta espectral da vegetação desidratada e valores de NBR (Normalized Burn Ratio) obtidos via dados MSI Sentinel – 2 em regiões tropicais.** Orientador: José Marinaldo Gleriani. Coorientador: Helio García Leite.

Com mais de 200 mil focos de incêndios detectados no ano de 2020, a ocorrência/uso do fogo voltou a ocupar destaque na mídia e preocupações pelo consequente impacto na flora e fauna e a emissão de gases estufa. O índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) está sendo usado atualmente para destacar as áreas queimadas. Nesse contexto o objetivo deste trabalho foi analisar através dos dados do MSI/Sentinel-2 a resposta espectral de alvos vegetados susceptíveis ao fogo e valores de NBR para regiões tropicais. Foram selecionadas cinco regiões em todo território nacional as quais contemplam - cana de açúcar, cerrado, campo cerrado/rupestre, floresta Amazônica e pastagens naturais/cultivadas foram escolhidas; com o uso de imagens do sensor MSI/Sentinel2, analisou-se a resposta da vegetação descritas em 12 canais pré e pós-fogo comparando-se a resposta vegetação pré-fogo com a resposta espectral da vegetação verde local a qual não queimou. O ângulo entre os vetores espectrais “verdes” e “secos” foram gerados assim como analisou-se a dinâmica do NBR e a sua variação dNBR (pré e pós-fogo) a qual, está correlacionado com a severidade de queima. Constatou-se que a resposta da vegetação combustível pré-queima é bem diferente da vegetação verde, com exceção da floresta Amazônica, onde o fogo é colocado em áreas com material seco e remanescente verde, além disso, observou-se uma forte redução da variação do NBR após a queima, mostrando homogeneidade espectral gerada pelo material carbonizado pós queima, com exceção das queima na floresta Amazônica. Conclui-se que as curvas espectrais dos alvos vegetados pré-ocorrência do fogo, diferem muito da vegetação verde; na floresta Amazônica foram encontrados pixels “verdes”, porém, provavelmente pixels mistos com material seco (combustível) junto a material verde remanescente, além que a vegetação passível de ignição é a vegetação desidratada, e que a variação do NBR ( $\Delta$ NBR), a qual expressaria a severidade de queima, também apresentou resultados muito aquém da escala da severidade de Key e Benson (2006) e analisando os valores, esses estariam classificados em grande parte, como “não queimada”.

**Palavras chave:** MSI/Sentinel. Severidade de queimada. Vegetação desidratada.

## ABSTRACT

HERNÁNDEZ, Merly Rocio Vásquez, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2021. **Spectral Response of Dehydrated Vegetation and NBR Values(Normalized Burn Ratio) from MSI/Sentinel – 2 Data in Tropical Regions.** Adviser: José Marinaldo Gleriani. Co-adviser: Helio García Leite.

With more than 200,000 outbreaks of fire detected in 2020, the occurrence/use of fire was once again highlighted in the media and concerns about the consequent impact on flora and fauna and the emission of greenhouse gases. The NBR (Normalized Burn Ratio) index is currently being used to highlight burnt areas. In this context, the objective of this work was to analyze through the MSI/Sentinel-2 data the spectral response of fire-susceptible vegetated targets and NBR values for tropical regions. Five regions were selected throughout the national territory which include - sugar cane, cerrado, cerrado/rupestrian field, Amazon forest and natural/cultivated pastures were chosen; using images from the MSI/Sentinel2 sensor, the response of vegetation described in 12 channels before and after fire was analyzed, comparing the response of pre-fire vegetation with the spectral response of local green vegetation which did not burn. The angle between the "green" and "dry" spectral vectors were generated as well as the dynamics of the NBR and its dNBR variation (pre and post-fire) which is correlated with the burning severity. It was found that the response of pre-burn combustible vegetation is very different from green vegetation, with the exception of the Amazon forest, where fire is set in areas with dry material and green remnant. of the NBR after burning, showing spectral homogeneity generated by the carbonized material after burning, with the exception of burning in the Amazon forest. It is concluded that the spectral curves of the pre-fire occurrence vegetated targets differ greatly from the green vegetation; in the Amazon forest “green” pixels were found, however, probably pixels mixed with dry material (fuel) together with remaining green material, in addition to the ignitable vegetation being dehydrated vegetation, and that The variation of NBR ( $\Delta$ NBR), which would express the burning severity, also presented results well below the severity scale of Key and Benson (2006) and analyzing the values, these would be classified in large part as “unburned”.

**Keywords:** MSI/Sentinel. Fire severity. Dehydrated vegetation.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Modelos conceituais de severidade de queima e da dinâmica de recuperação ao longo do tempo. A severidade de curto prazo dos componentes da comunidade está expressa em cinza. A severidade de longo prazo reflete as consequências que prevalecem no futuro. .... 17
- Figura 2. Refletância espectral da vegetação saudável e da vegetação carbonizada e a dinâmica de valores esperados nas regiões do NIR e SWIR..... 20
- Figura 3. Resposta espectral em cinco diferentes graus de desidratação descritos pelo RWC (relative water content) e as posições das bandas 5 e 7 do sensor OLI/Landsat8..... 22
- Figura 4. A. Resposta espectral média de vegetação queimada, vegetação e solo exposto obtidas com dados TM e ASTER. B. frequência relativa dos valores assumidos por pixels vegetados, semi (queimados) e queimados para as bandas TM4, TM5 e TM7..... 23
- Figura 5. Refletância aparente média para dez coberturas em todo território português 23
- Figura 6. Território Nacional e localização das áreas de estudo com pequenos recortes, em composições 8R4G3B do sensor MSI/Sentinel2. 1. Bom Jesus de Goiás (GO); 2. Brasília (DF); 3. Guapé (MG); 4. Colniza (MT); 5. São Joao del-Rei (MG). .... 26
- Figura 7. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a vegetação (cana de açúcar) pré-fogo, pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município de Bom Jesus de Goiás (GO). 32
- Figura 8. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a vegetação (cerrado) pré-fogo, pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no Distrito Federal ..... 33
- Figura 9. Imagem MSI/Sentinel-2 na composição RGB-11/8/2 de 10 setembro de 2019. 34
- Figura 10. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a Campo Cerrado, campo rupestre pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, nos municípios de Guapé e Delfinópolis (MG). .... 35
- Figura 11. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a Floresta Amazônica pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município Colniza (MT)..... 36

Figura 12. Imagens de Colniza (MT) na composição R8G11B2, pré e pós-queima ilustrando a vegetação remanescente (setas amarelas), as quais alteram a resposta espectral pré-queima.	37
Figura 13. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a pastages naturais e plantadas pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município São João del-Rei (MG).	38
Figura 14. Ângulos espectrais entre a vegetação pré queima e a vegetação fotossinteticamente ativa, mostrando a maior similaridade entre as repostas para a localidade de Colniza (Floresta Amazonica); Bom Jesus de Goiás (BJG) cana de açúcar; Brasília (Cerrado), Guapé.....	39
Figura 15. Valores de NBR para as datas pré-queima, pós-queima e variação pré-pós para as cinco localidades analisadas .....	40
Figura 16. Variação - NBR – para as cinco localidades estudadas e enquadramento segundo a escala de severidade de Key e Benson (2006).....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação de diferentes índices de severidade baseado no $\Delta\text{NBR}(*1000)$ .....	19
Tabela 2. Resoluções Espaciais e Espectrais dos sensores MSI 2A e 2B.....	24
Tabela 3. Localidades e datas das cenas MSI Sentinel e datas dos principais eventos de queimadas .....	28

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	13
1.2. HIPÓTESE.....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Sensoriamento Remoto .....	14
2.2. Índices de vegetação .....	14
2.3. NBR – Normalized burn ratio.....	16
2.4. Refletância espectral da vegetação desidratada .....	21
2.5. Reflectância da vegetação carbonizada .....	22
2.6. Sensor MSI – SENTINEL 2.....	24
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1. Área de estudo .....	26
3.2. Metodologia.....	27
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
4.1. Variações do NBR (índice de severidade) .....	39
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No ano de 2020 foram detectados mais de 200 mil incêndios em território brasileiro (INPE, 2021). Os incêndios ocorrem em todos os biomas brasileiros, porém no bioma Amazônia é mais preocupante porque está associada a perda de floresta primária (Barlow et al., 2019); aproximadamente 50% dos incêndios detectados na bacia amazônica são em desmatamento recente ou em áreas com exploração de floresta primária (INPE, 2021); outra preocupação é que a exploração madeireira e os incêndios florestais são distúrbios antropogênicos que têm mais impacto na biodiversidade do que analisar a perda de cobertura florestal (Barlow et al., 2016).

O satélite de sensoriamento remoto oferece uma oportunidade para monitorar incêndios ativos (GIGLIO et al., 2003; SCHROEDER et al., 2014) e quantificar as cicatrizes de queimaduras (CHOMPUCHAN e LIN, 2017; HUANG et al., 2016; SMITH et al., 2007), e nesta última aplicação - o NBR (Normalized Burn Index) é usado para destacar as áreas queimadas (GARCÍA e CASELLES, 1991; KEY e BENSON, 2006) (Equação 1):

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}} \quad (1)$$

Este índice é calculado com duas bandas espectrais (Near Infrared) NIR e (Short Infrared-2) SWIR2 que estão presentes em muitos sensores orbitais como MODIS / Terra e Aqua (LOBODA et al., 2011; ROY et al., 2006), TM / Landsat-5 (VERBYLA et al., 2008), ETM+ / Landsat-7 (VAN WAGTENDONK et al., 2004; COCKE et al., 2005) e MSI / Sentinel (AMOS et al., 2018; DRUSCH et al., 2012; Huang et al., 2016).

A explicação para usar essas bandas é porque o comportamento oposto da vegetação não queimada / queimada na região NIR / SWIR2 e pode está descrito em CANSLER e MCKENZIE (2012); KEY e BENSON, 2006; VAN WAGTENDONK et al., 2004). A banda NIR responde positivamente ao LAI (Índice de Área da Folha) verde e SWIR2 responde positivamente à vegetação queimada e seca, no entanto a banda NIR responde negativamente às áreas queimadas e SWIR2 responde negativamente à vegetação fotossinteticamente e solos úmidos. Então, nas áreas verdes (NIR > SWIR2) e NBR apresentam valores positivos e nas

áreas queimadas ( $NIR < SWIR2$ ) e NBR resulta em valores NBR negativos (CANSLER e MCKENZIE, 2012; VAN WAGTENDONK et al., 2004).

A variação de NBR antes e depois do incêndio descrita na equação 2 é relatada como gravidade de queima (EPTING ET al., 2005; KEY e BENSON, 2006), mas não é a preposição original (HUANG et al., 2016) da NBR.

$$\Delta NBR = NBR_{PREFire} - NBR_{POSPFire} \quad (2)$$

A generalização de NBR (e  $\Delta NBR$ ) para todos os tipos de ambiente é discutida na literatura. Epting et al. (2005) relata NBR de baixo desempenho em áreas não florestais e resultados semelhantes podem ser encontrados em Veraverbeke et al. (2011), De Santis e Chuvieco (2009) em ambientes de baixa cobertura. Esses ambientes de baixa cobertura ou não florestais podem ser resumidos em um ambiente com resposta espectral diferente de florestas verdes densas com resina inflamável ou árvores esparsas e presença de fundo de pastagem seca no EIFOV do sensor. Em seguida, a dinâmica  $NIR_{green} \rightarrow NIR_{burned}$  e  $SWIR2_{green} \rightarrow SWIR2_{burned}$  em ambiente não florestal até agora da dinâmica da resposta espectral verde para vegetação queimada, como mostra Dindaroglu et al. (2021).

No Brasil, o número médio de incêndios entre 1998 até 2020, mostra que em cinco meses na estação seca (julho a novembro) concentra 85% da ocorrência de incêndios (INPE, 2021), indicando que a ocorrência de incêndios está ligada à desidratação da vegetação e não inflamável resina apresenta muitas espécies em florestas de coníferas.

A desidratação modifica a resposta espectral das folhas verdes de  $SWIR \rightarrow Visible$  (SEELIG et al., 2008). As folhas têm duas bandas de absorção fraca em 970 e 1200nm e três bandas de absorção forte em 1450, 1940 e 2500nm (KINIPLING, 1970; SEELIG et al., 2008). Com o processo de perda de água as bandas fortes desaparecem, após as múltiplas refrações e reflexos causados pela variação do índice de refração ( $n_{air}/n_{water}$ ) (GAUSMAN, 1974) no interior da célula das folhas cessa, ao final ocorre a perda de clorofila com interrupção da fotossíntese. e absorção de luz visível.

Então a resposta espectral da vegetação seca (propensa ao fogo) é tão diferente para a vegetação verde, particularmente na região NIR, NIRgreen é quase o dobro da resposta NIRdry Clark (1999), e com aumento do LAI (Índice de Área da Folha) a resposta e a região NIR a vegetação desidratada é insignificante em comparação com o aumento do NIR com o aumento do IAF verde (GAUSMAN et al., 1976).

Analisando a estação de ocorrência do fogo, a resposta espectral da vegetação desidratada e os fundamentos da escolha das bandas NIR e SWIR2, o objetivo deste trabalho é (i) usar dados MSI / Sentinel para descrever a resposta espectral de cinco diferentes ambientes propensos ao fogo: pastagens (natural e cultivada), cana-de-açúcar, savana, rupestre e floresta tropical, (ii) usando mapeador de ângulo espectral analisando a similaridade da resposta espectral propensa ao fogo e vegetação verde e (iii) análise da resposta espectral da vegetação carbonizada e os valores de NBR e classificação da gravidade da queimada.

## **1.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar através dos dados do MSI/Sentinel-2 a resposta espectral de alvos vegetados susceptíveis ao fogo é valores de NBR para regiões tropicais

### **1.1.1. Objetivos específicos**

Analisar através dos dados do MSI/Sentinel-2, a resposta espectral de vários alvos vegetados terrestres – cerrado, floresta amazônica, pastagens, campos naturais, campos rupestres e canaviais, pré e pós-fogo.

Observar os valores o  $\Delta$ NBR e compará-los com os valores descritos por Key e Benson (2006).

## **1.2. HIPÓTESE**

Uma vez que a combustão ocorre com a vegetação desidratada a generalização do NBR para detecção de queimadas ou quantificar a severidade não é recomendada.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Sensoriamento Remoto**

O sensoriamento remoto é a arte e a ciência de estudar a matéria sem ter contato físico com a mesma, baseando-se somente na interação da radiação eletromagnética (RME) com a matéria, além, pode ser definido, de uma maneira ampla, como sendo a forma de obter informações de um objeto ou alvo, sem que haja contato físico com o mesmo. As informações são obtidas utilizando-se radiação eletromagnética gerada por fontes naturais como o Sol e a Terra, ou por fontes artificiais como, por exemplo, o Radar. Hoje inúmeras instituições do país utilizam-se desta tecnologia para obter informações de carácter geológico, geomorfológico, geográfico, pedológico, hidrológico, agrícola, de qualidade ambiental. O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. A energia eletromagnética utilizada na obtenção dos dados por sensoriamento remoto é também denominada de radiação eletromagnética (LILLESAND et al., 2015; ROSA, 2009; MORAES, 2002).

### **2.2. Índices de vegetação**

Índices espectrais de vegetação (IVs), ou índices de vegetação têm sido largamente utilizados para monitorar a cobertura vegetal da Terra em escala global ou local (MIURA et al., 2001). Tais índices são combinações de dados espectrais de duas ou mais bandas, selecionadas com o objetivo de sintetizar e melhorar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos da vegetação (MOREIRA, 2000). Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e combinada em vários índices de vegetação (PONZONI, 2001).

Os índices de vegetação são modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e relacionam a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (BARBOSA, 2006).

Os índices de vegetação são operações algébricas que utilizam na maioria de vezes a banda vermelha (R) e a banda infravermelho próximo (NIR).

Rosa (2009) afirma que os índices de vegetação utilizam as faixas do vermelho e do infravermelho próximo por conterem mais de 90 % da variação da resposta espectral da vegetação e, portanto, tais índices realçam o seu comportamento espectral, correlacionando-os com os parâmetros biofísicos da mesma.

Antes do lançamento do Landsat-1, Jordan (1969) visando estimativas precisas do IAF (Índice de Área Foliar), propuseram o índice Razão Simples (RS) o qual é descrito pela Equação 3:

$$RS = \frac{NIR}{R} \quad (3)$$

em que: NIR é a refletância na região do Infravermelho próximo e R, a refletância na região do vermelho.

O próximo índice proposto foi o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1973), operacional, de uso comum e mais sensível a pequenos incrementos da vegetação (Jackson e Huete, 1991) (Equação 5). Apesar das limitações ao sombreamento e interferência do solo, é um índice de fácil e possível cômputo (bandas na região do vermelho e IVP) e de fácil interpretação, a expressão matemática do NDVI se amostra na equação 4.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (4)$$

Embora existam outros índices como o *Greenness*, o qual é derivado da segunda componente da transformação *Tasseled Cap* (Kauth e Thomas, 1976) sendo uma ponderação positiva e negativa de vários canais, a maioria dos índices são formulados na operação razão. Para Huete *et al.* (1999) grande parte das variações (interferências -  $\alpha$ ) não atribuídas ao alvo, como sombreamentos/topografia, geometria de aquisição, atmosfera, refletância do solo são bastante reduzidas com a operação de razão, ou seja, para um índice de vegetação (IV) hipotético, descrito pela razão do canal A pelo canal B (Equação 5). Se as interferências ( $\alpha$ ) alterassem ambos os canais, na mesma magnitude, elas seriam anuladas; o que, na prática, não ocorre.

$$IV = \frac{A.\alpha}{B.\alpha} \quad (5)$$

### 2.3. NBR – Normalized burn ratio

Seguindo a tendência de índices composto pela diferença normalizada entre duas bandas, García e Caselles (1991) trabalhando com dados TM/Landsat propuseram a Equação 6 para destaque das áreas queimadas:

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (6)$$

O sensor TM tem dois canais na região do SWIR (5 e 7), García e Caselles (1991) utilizaram e recomendam, por melhor desempenho, os dados da banda 7 (2,08-2,35  $\mu\text{m}$ ). A operação proposta por Garcia e Caselles (Equação 6) não ganha denominação, a denominação Normalized Burn Ratio a qual só foi feita por Key e Benson (1999).

Huang et al., (2016) descrevem que o índice foi inicialmente desenvolvido apenas para mapeamento de áreas queimadas (GARCÍA e CASELLES, 1991; FORNACCA et al., 2018; PENHA et al., 2020), no entanto, tem sido muito utilizado para quantificar a severidade de queima (CANSLER e Mckenzie, 2012; CHOMPUCHAN e LIN, 2017; KEY e BENSON, 2006; ROY et al., 2006).

Key e Benson (2006) do USDA Forest Service, descrevem o porquê da escolha das bandas na equação NBR. O canal do NIR (Infravermelho próximo) responde positivamente a área foliar verde e produtividade, já o canal SWIR (Infravermelho de onda curta), responde positivamente a superfícies secas e não vegetadas e negativamente (radiação absorvida) em superfícies vegetadas e solos úmidos. Como no numerador existe a diferença NIR-SWIR, áreas com vegetação fotossinteticamente ativa tendem a produzir índices positivos (NIR>SWIR); valores próximos de zero em áreas com vegetação seca, afloramento rochoso e alguns tipos de solo bem secos. Valores negativos (NIR<SWIR) estão associados à presença de cinza e materiais carbonizados (CANSLER e MCKENZIE, 2012; VAN WAGTENDONK et al., 2004).

Relatos desfavoráveis ao uso do NBR podem encontrados em Roy et al. (2006) os quais trabalharam com dados MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) com 500 m de resolução espacial, obtidos na savana Australiana, savana Africana, Floresta Boreal Russa e Florestas da América do Sul. No entanto, Veraverbeke et al. (2011) monitorando os incêndios na Grécia, analisaram o NDVI, o NBR e o NDMI (Normalized Difference Moisture Index), o qual é similar ao NBR, com a alteração da banda TM7 pela banda TM5 (1,55 a

1,75 $\mu$ m). Para os autores os índices NBR e NDMI são mais bem correlacionados com a severidade de queima por terem bandas relacionadas a informação de umidade (SWIR). Comparações do NBR e NDVI também podem ser analisadas em Hudak et al. (2007), com conclusões positivas para o uso do NBR. Epting et al. (2005) analisaram a correlação de 12 índices de vegetação e o NBR com a severidade de queima, no Alasca, sendo a severidade da queima, coletada em campo, expressa pelo CBI (Composite Burn Index). O NBR teve o melhor desempenho para a área florestal e desempenho ruim em áreas cobertas com árvores esparsas, gramíneas e arbustos.

A severidade da queima (Burn Severity) é descrita segundo Key e Benson (2006), como o “impacto socioeconômico associado, com o fogo, que pode ser mensurado diretamente em termos dos custos da supressão, custo da reabilitação, de perdas patrimoniais e vidas humanas”; para a atual discussão, fica restrito ao grau de dano ambiental causado pelo fogo, ou seja, mudanças físicas e químicas no solo, conversão da vegetação em carbônico orgânico trazendo transformações composicionais e estruturais no microclima e espécies, fazendo a comunidade se reestabelecer do “zero” (Figura 1).

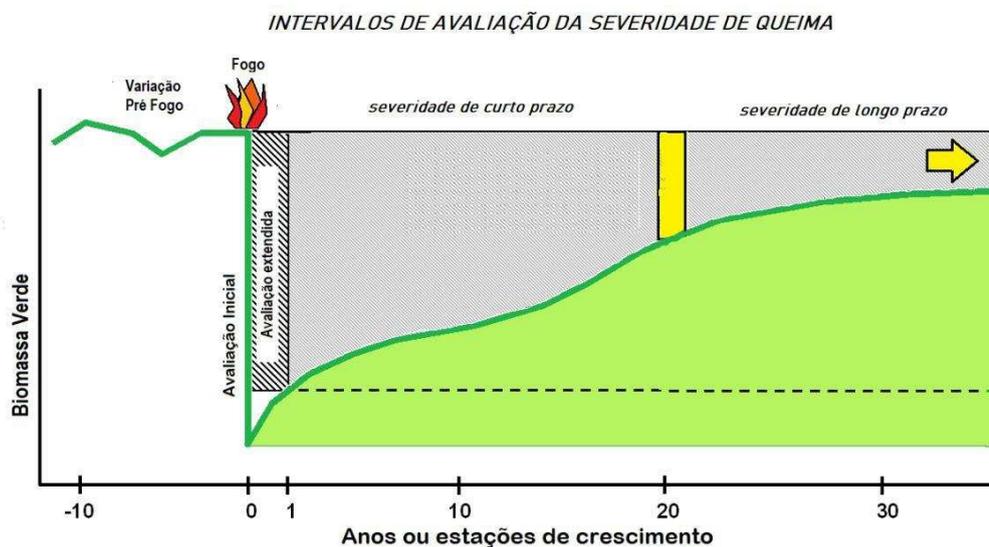


Figura 1. Modelos conceituais de severidade de queima e da dinâmica de recuperação ao longo do tempo. A severidade de curto prazo dos componentes da comunidade está expressa em cinza. A severidade de longo prazo reflete as consequências que prevalecem no futuro.

A medição da severidade, em trabalho de campo, é descrita pelo CBI (“Composite Burn Index”), que trata da coleta amostral (guiada por um protocolo) da análise visual sobre o

efeito do fogo em cinco estratos florestais (solo/ervas/arbustos/árvores médias/árvores grandes), cada estrato incorpora quatro ou cinco variáveis que são ranqueadas de zero a três. Modelos do protocolo CBI podem ser encontrados em Key e Benson (2006) e Miller e Thode (2007).

A severidade não é descrita pelo NBR de uma única data, e sim pela diferença dos valores do índice em datas pré e pós-fogo conforme a Equação 7 (KEY e BENSON, 2006):

$$\Delta NBR = NBR_{PRE-FOGO} - NBR_{POS-FOGO} \quad (7)$$

Key e Benson (2006) estabeleceram fatiamentos de valores de  $\Delta NBR$  os quais podem ser descritos como: “sem queima” (-0,100 a +0,09); “queima de baixa severidade” (+0,1 a +0,269); “queima de Moderada-baixa severidade” (+0,270 a +0,439); “queima de moderada-alta severidade” (+0,440 a +0,659), “queima de alta severidade” (+0,66 a +1,30). Epting et al. (2005) verificaram valores de 680 ( $\Delta NBR * 1000$ ) para áreas de áreas de alta severidade checadas em campo via protocolo CBI, o mesmo limiar de  $\Delta NBR$  foi encontrado por Verbyla et al. (2008). Apesar da escala descrita acima, percebe-se em publicações de Key e Benson (2006), Cansler e Mckenzie (2012), Veraverbeke et al. (2011), (HALL et al., 2008), preocupação em informar para o leitor, a severidade com fotos coloridas em campo, o que resultou em trabalhos ricamente ilustrados. A correlação CBI vs NBR dependem das datas de aquisição pré/pós fogo, das condições ambientais locais, características da vegetação. Mudanças na resposta espectral pós-fogo, podem alterar e dificultar a avaliação das áreas queimadas (CHU e GUO, 2013). Roy et al. (2006) e Smith et al. (2010) afirmam que distanciamento temporal dos dados orbitais pré e pós-ocorrência do fogo atrapalham inferir o quanto do atraso da regeneração de um determinado local se deve exclusivamente a ação do fogo ou alguma condição meteorológica extrema, como uma seca. Huang et al. (2016) afirmam ainda que a eventual exposição do solo torna a inferência sobre severidade uma incógnita. Outros autores publicaram diferentes valores de severidade baseados no  $\Delta NBR$  (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação de diferentes índices de severidade baseado no  $\Delta\text{NBR}(*1000)$ 

<b>Severidade de queima</b>	<b>Cocke et al. 2005</b>	<b>Epiting et al. 2005</b>	<b>Hall et al. 2008</b>
Sem queima	<50	<89	<40
Baixa severidade	51-240	51-240	41-283
Severidade moderada	241-570	241-570	284-513
Alta severidade	>571	>571	>514

Cansler e McKenzie (2012) analisaram a robustez do uso da generalização espacial do  $\Delta\text{NBR}$  para outros biomas. Analisando o  $\Delta\text{NBR}$  e o  $R\Delta\text{NBR}$  (“Relative Difference Normalized Burn Ratio”) os autores encontraram melhores correlações do CBI com o  $R\Delta\text{NBR}$ . O  $R\Delta\text{NBR}$  foi proposto por Miller e Thode (2007) e é descrito pela Equação 8:

$$R\Delta\text{NBR} = \frac{NBR_{PRE-FOGO} - NBR_{POS-FOGO}}{\sqrt{\frac{|NBR_{PRE-FOGO}|}{1000}}} \quad (8)$$

De acordo com Mille e Thode (2007) a relativização do  $\Delta\text{NBR}$  para a condição inicial de fitomassa do dossel que foi queimado, evitaria interpretações e inferências errôneas do  $\Delta\text{NBR}$ , permitindo comparações em outros tempos e locais e, um índice relativo, promoveria maior exatidão de classificação para paisagens heterogêneas do que um simples índice absoluto. Por exemplo, Loboda et al. (2011) encontraram um limiar de 300 para a área florestal e valores entre 75-100 para cobertas por gramíneas e arbustos (Sagebrush steppe). Para um mesmo bioma, com a florestal da Sibéria, por exemplo, dependendo da densidade de árvores, o limiar de  $\Delta\text{NBR}$  para mapear a vegetação queimada foi de 300 ( $\Delta\text{NBR} \times 1000$ ) para locais com cobertura florestal maior que 10% e de 200 para locais com cobertura florestal menor que 10%.

Apesar do  $R\Delta\text{NBR}$  melhor descrever a severidade de queima, vale aqui destacar os valores de  $\Delta\text{NBR}$  para os diferentes tipos de vegetação. Epiting et al. (2005) concluíram que a relação  $\text{NBR}$  com a severidade, descrita pelo CBI, só foi positiva para as áreas florestais e teve um baixo desempenho para áreas com vegetação esparsa e rasteira. Hudak et al. (2007) ao analisarem a severidade da queima de áreas florestais no estado de Montana e no Alasca e áreas arbustivas (Chaparral) na Flórida. Apesar da baixa correção (coeficiente de Pearson) para todas

as localidades, as piores relações foram observadas para o Chaparral (vegetação arbustiva) presente no estado da Florida. Roy et al. (2006) analisaram os valores de  $\Delta NBR$  com dados MODIS de 500m e encontraram valores médios de 0,21 para a floresta Boreal Russa e 0,081 para a América do Sul. Os valores baixos encontrados provavelmente se devem à resolução espacial e à presença de pixels mistos, mas outro fator deve ser analisado: valores baixos encontrados para a América do Sul seguem a tendência dos valores derivados dos sensores TM/ETM+ para o chaparral e áreas não florestais descritas em Epting et al. (2005). A fundamentação lógica, pela escolha de bandas no computo do NBR se enquadra para as florestas temperadas, apesar do uso índice em regiões tropicais (ALVES et al., 2018; SILVA e BAPTITA, 2015).

A Figura 2, disponível no site do USFS (United States Forest Service), ilustra a fundamentação teórica descrita por Key e Benson (2006) e Cansler e McKenzie, (2012) na qual tecidos vegetais verdes refletem muito na região do NIR em oposição às áreas queimadas, o inverso ocorre na região do SWIR. Para as florestas boreais isso é verdadeiro pois existindo clima seco e condições meteorológicas favoráveis a árvore, mesmo “verde”, é passível de ignição. Nas áreas tropicais, o fogo ocorre em pastagens, campos, cerrado e em áreas desmatadas, durante o período seco e, as curvas espectrais desses alvos estariam bem distintas da curva de vegetação saudável exibida abaixo, e o NBR não exibiria a dinâmica NIR e SWIR pré/pos-fogo (Figura 2).

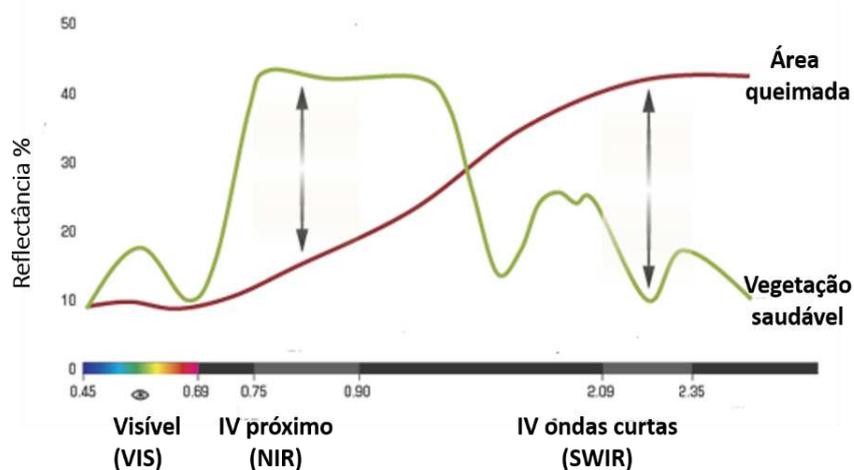


Figura 2. Refletância espectral da vegetação saudável e da vegetação carbonizada e a dinâmica de valores esperados nas regiões do NIR e SWIR.

Fonte: adaptada de United States Forest Service.

Ao contrário do descrito acima, Huang et al. (2016) descrevem que, predominantemente, o impacto da queimada é reduzir a reflectância na região do NIR e SWIR.

#### **2.4. Refletância espectral da vegetação desidratada**

Poucos trabalhos exibem a refletância espectral da vegetação seca. Um dos trabalhos pioneiros foi de Gausman et al. (1976) comparando a refletância infinita  $R_{\infty}$  de dosséis de milho, com folhas verdes e secas na faixa de 0,5 a 2,5 $\mu$ m; os autores observaram refletância próxima de 30% para a região do NIR e 50% para a região do SWIR para folhas de milho secas. A refletância espectral da folha vegetal possui várias bandas de absorção cujo responsável é o conteúdo de água: duas bandas fracas em 970 e 1200nm e bandas fortes de absorção em 1450, 1940, e 2500nm (KNIPLING, 1970). Com o avanço da desidratação, mudanças na curva espectral são observadas da região do SWIR para o VIS (visível). No SWIR as fortes bandas de absorção ficam descaracterizadas e desaparecem (KNIPLING, 1970; SEELIG et al., 2008), depois, na região do NIR, existe uma queda da refletância (SEELIG et al., 2008), uma vez que as refrações e reflexões múltiplas da REM (Radiação Eletromagnética), causadas pela variação do índice de refração –  $n$  - (células hidratadas/espacos intercelulares -  $n_{ar}/n_{H_2O}$ ) (GAUSMAN, 1974) tendem a cessar e, por último, existe a perda de pigmentos e descoloração com consequente elevação da refletância na faixa do VIS.

Seelig et al. (2008) analisaram a refletância espectral de *Spathiphyllum lynnise* com cinco diferentes conteúdos de água ilustrados na Figura 3. Nos retângulos, em preto, a posição da banda 5 (850-880nm) e da banda 7 (2110-2290nm) do sensor OLI/Landsat-8 foram sobrepostas para melhor entendimento. Observa-se para a folha desidratada diminuição da refletância no NIR e aumento da refletância do SWIR, ou seja, valores opostos a vegetação verde e, portanto, indesejados para um bom desempenho do  $\Delta$ NBR. Apesar de também ocorrerem em épocas secas, os incêndios consomem árvores verdes (pinus) que contém resina inflamável; a vegetação herbácea, arbustiva e o chaparral acima descritos, provavelmente não exibem curva espectral pré-fogo próxima ao da Figura 3, daí o baixo desempenho do  $\Delta$ NBR.

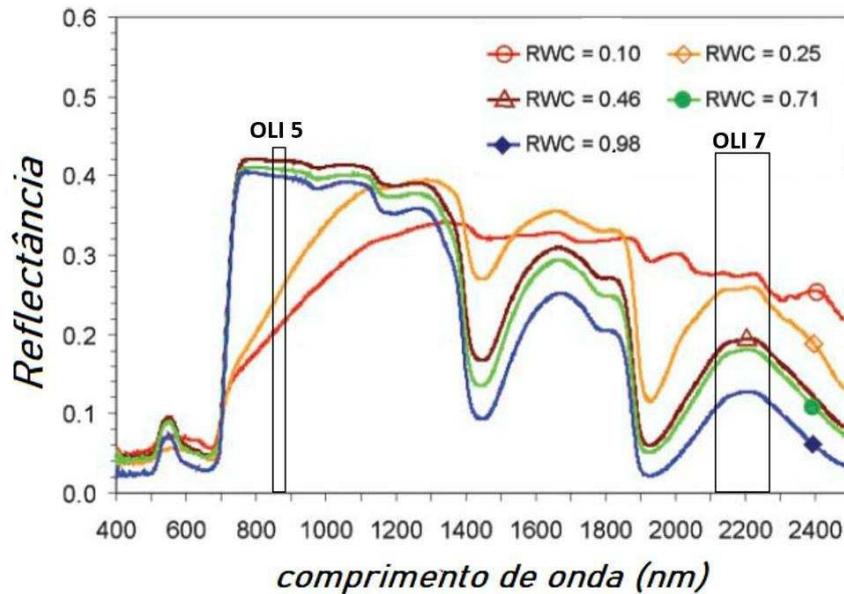


Figura 3. Resposta espectral em cinco diferentes graus de desidratação descritos pelo RWC (relative water content) e as posições das bandas 5 e 7 do sensor OLI/Landsat8.

Fonte: adaptada de United States Forest Service.

## 2.5. Reflectância da vegetação carbonizada.

Outro ponto que pode ser questionado com relação à Figura 2 é se a reflectância da vegetação carbonizada chega a valores próximos a 40% na região do SWIR conforme ilustrado. Pleniou e Koutsias (2013) afirmam que áreas completamente queimadas exibem baixa variância na região do NIR e alta variância na região do SWIR. Trabalhando com dados TM/landsat-5 e ASTER/Terra, os autores exibem as curvas médias de áreas queimadas, vegetação e solo exposto; e em nenhuma delas o valor de refletância de superfície. Para o SWIR para áreas queimadas ultrapassa 20% (Figura 4A). Os histogramas com frequência relativa (Figura 4B) ilustram bem a distribuição para vegetação não queimada, queimada (45-55%) e totalmente queimada para as bandas TM4(NIR), TM5(SWIR1) e TM7(SWIR2). A avaliação da porcentagem do pixel (TM) que foi queimada foi feita com dados Ikonos, de melhor resolução espacial.

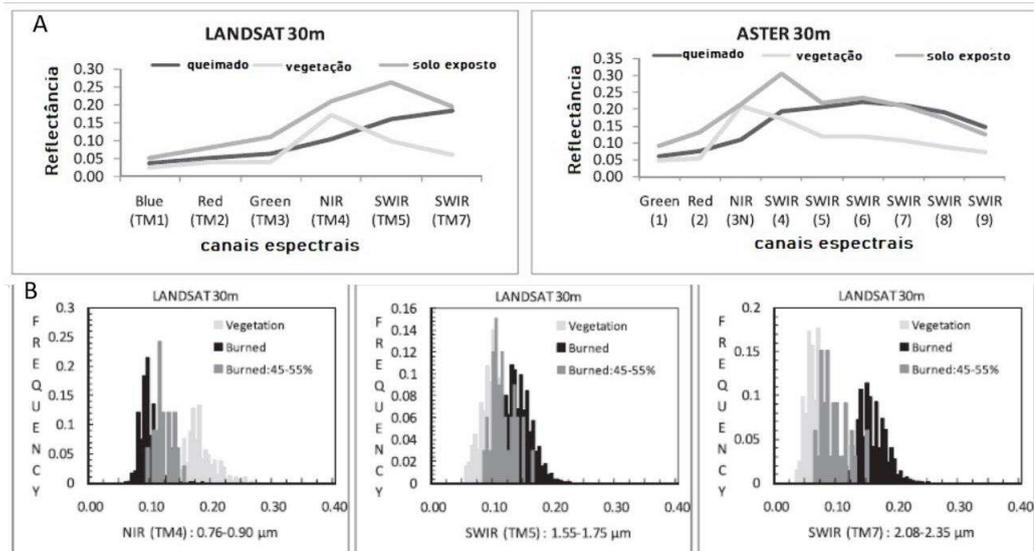


Figura 4. A. Resposta espectral média de vegetação queimada, vegetação e solo exposto obtidas com dados TM e ASTER. B. frequência relativa dos valores assumidos por pixels vegetados, semi (queimados) e queimados para as bandas TM4, TM5 e TM7.

Fonte: Pleniou e Koutsias (2013).

Em outro estudo, Pereira et al. (1999), fazem uma revisão da dinâmica dos valores (refletância e DN) para vários tipos de vegetação queimadas, no espectro óptico, relatando queda de valores na região do NIR e incremento na região do SWIR. Por fim, os autores exibem um gráfico de refletância média para vários tipos de cobertura coletado em 20 cenas TM/Landsat-5 em Portugal. Após a queima e a desidratação existe uma elevação da refletância aparente nos valores nas bandas TM5 e TM7, porém, com valores inferiores a 0,2 (Figura 5).

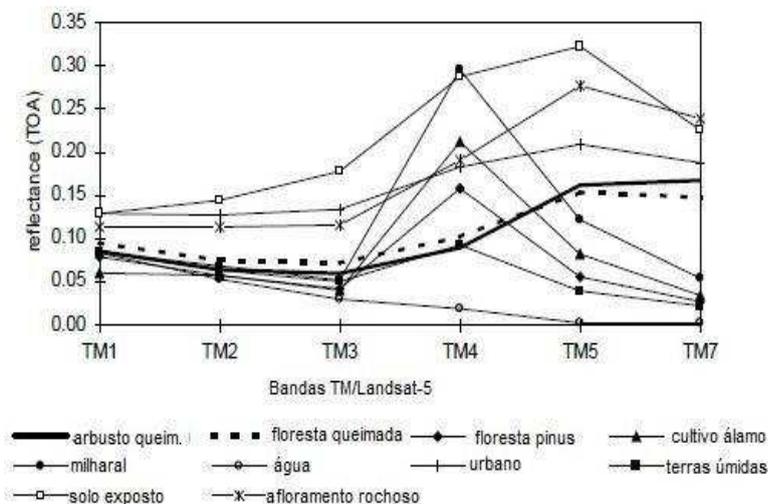


Figura 5. Refletância aparente média para dez coberturas em todo território português.

Fonte: Adaptada de Pereira et al. (1999).

## 2.6. Sensor MSI – SENTINEL 2

Lançados no dia 23 de junho de 2015 e 07 de março de 2017 os satélites Sentinel 2A e 2B carregam a bordo o sensor MSI (Multi Spectral Instrument) o qual com um ângulo de abertura 20,6° a uma altitude de 786km varrem uma faixa de 290km sobre a superfície terrestre (DRUSCH et al., 2012; HUANG et al., 2016). Opostos 180° na órbita polar, os dois sensores garantem um resolução temporal de 5 dias no equador (DRUSCH et al., 2012) com resoluções espaciais de 10, 20 e 60m e 13 bandas espectrais descritos na Tabela 2. Os sensores coletam dados em 12 bits.

Tabela 2. Resoluções Espaciais e Espectrais dos sensores MSI 2A e 2B

Bandas do sensor MSI	Resolução espacial (m)	MSI-2A		MSI-2B	
		Comprimento de onda central (nm)	Largura de Banda (nm)	Comprimento de onda central (nm)	Largura de Banda (nm)
1 (Aerosol)	60	442,7	21	442,2	21
2 (Azul)	10	492,4	66	492,1	66
3 (Verde)	10	559,8	36	559,0	36
4 (Vermelho)	10	664,6	31	664,9	31
5 (RedEdge)	20	704,1	15	703,8	16
6 (RedEdge)	20	740,5	15	739,1	15
7 (RedEdge)	20	782,8	20	779,7	20
8 (NIR)	10	832,8	106	832,9	106
8A (NIR)	20	864,7	21	864,0	22
9 (Vapor d'água)	60	945,1	20	943,2	20
10 (SWIR /Cirrus)	60	1373,5	31	1376,9	31
11 (SWIR)	20	1613,7	91	1610,4	91
12 (SWIR)	20	2202,4	105	2185,7	105

Fonte: Agência Espacial Europeia

Com três canais da faixa dos SWIR e resolução temporal de 5 dias, os dados dos sensores têm sido atrativos para monitoramento de queimadas muitas vezes em completo com dados OLI/Landsat-8 (AMOS et al., 2018; Huang et al., 2016; MALLINIS et al., 2018).

Verstraete et al. (1996) discutem a impossibilidade da generalização espacial e temporal de uma relação de um parâmetro biofísico ou bioquímico (pb) do dossel vegetal com um dado espectral “X” ( $[pb]=f(x)$ ), uma vez que a relação traz interferências intrínsecas (atmosfera, topografia, etc.) do momento da aquisição. No presente trabalho, não se trata de fatores interferentes a aquisição, mas a generalização do NBR para todo tipo de vegetação, pode

não ser viável: as bandas podem não ser as mais adequadas para a detecção de queimada e, a dinâmica de curvas espectrais (verde→carbonizado) do portal do USFS não ocorrer e a severidade apresentar valores não usuais comparados a tabela de Key e Benson (2006).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram escolhidas cinco áreas que representam diferentes tipos de vegetação (Figura 6), essas áreas são as seguintes: Bom Jesús de Goiás (GO) (área de cultura de cana de açúcar), Brasília (DF) (Cerrado); Guapé (MG) (campo cerrado e vegetação rupestre); Colniza (MT) (área de derrubada de floresta Amazônica) e São Joao del-Rei (MG) (área com pastagens naturais e cultivadas).

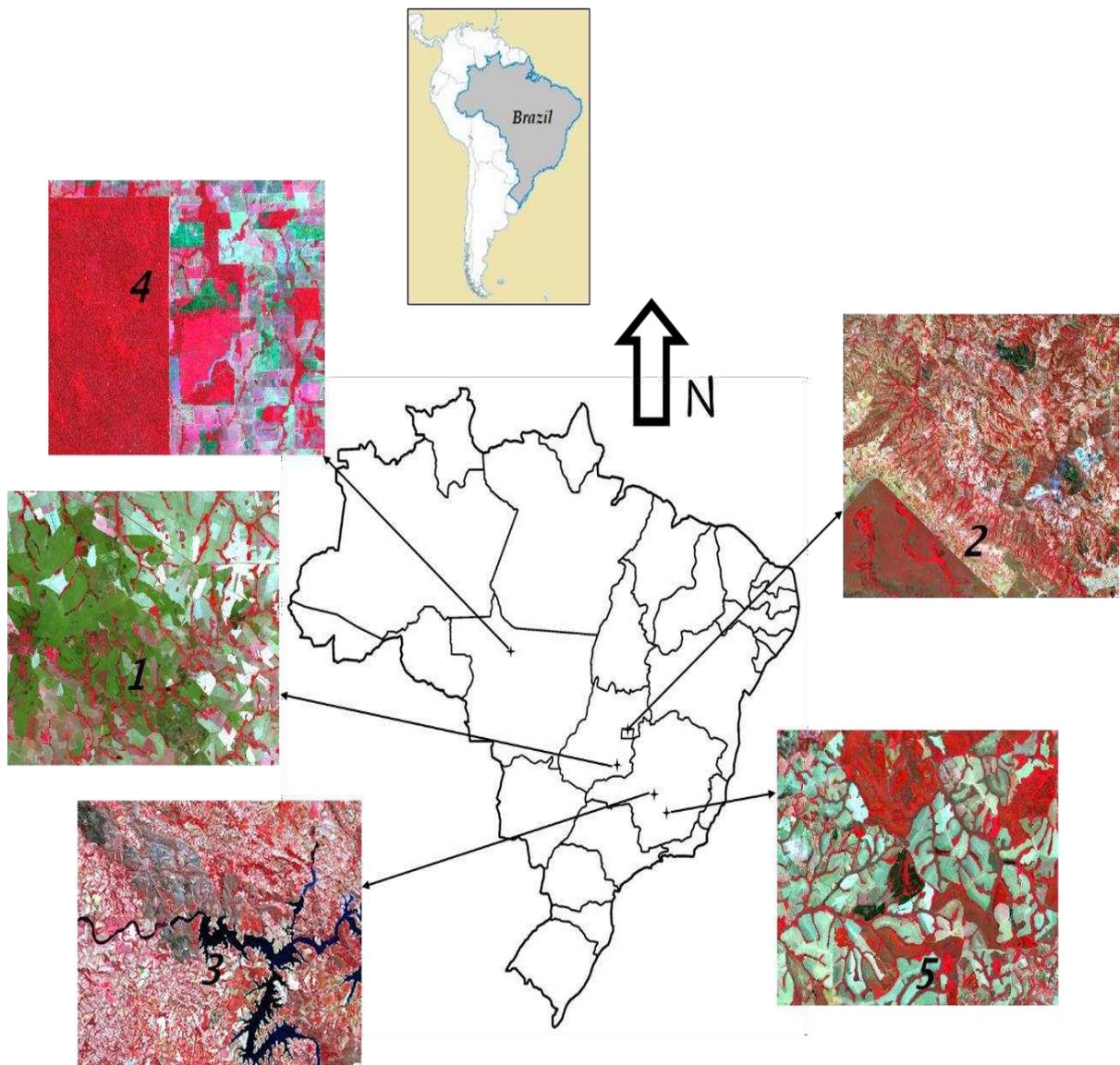


Figura 6. Território Nacional e localização das áreas de estudo com pequenos recortes, em composições 8R4G3B do sensor MSI/Sentinel2. 1. Bom Jesus de Goiás (GO); 2. Brasília (DF); 3. Guapé (MG); 4. Colniza (MT); 5. São Joao del-Rei (MG).

## 3.2. Metodología

### a. Consulta ao portal Queimadas do INPE

Fez-se várias consultas ao portal de queimadas do INPE (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>), o qual utiliza dados dos sensores AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) do NOAA-18, NOAA-19 e NOAA-20; dados do europeu MetOp-B (Meteorological Operational Satellite Programme), dados do sensor MODIS das plataformas Terra e Aqua e dados do sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) do Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP), os quais são de órbita polar. O portal também utiliza dados dos satélites geoestacionários, GOES-16 e MSG-3. Com variadas resoluções espaciais todos possuem um canal entre 3,7 e 4,1 $\mu\text{m}$  o que, pela lei de Wien, detectaria queimadas com pico de emissão entre 700 ~ 800k.

A banda não precisa ter exatamente em um intervalo cujo centro esteja no pico de emissão da queimada, Lillesand et al. (2015) mostram que mesmo um sensor fotográfico com filme infravermelho permite uma melhor detecção de lava vulcânica a 1100°C do que um filme colorido normal pelo aumento da exitância radiante ( $\text{W.m}^{-2}$ ) descrita na equação de Stefan-Boltzmann.

### b. Consulta de queimadas para os municípios

Após visita ao portal de queimadas do INPE (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>) fez a consulta para os municípios e para as datas as quais serão exibidas posteriormente. Optou-se, além de observar as coordenadas das queimadas, também procurar as que aparecem no link <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/links-adicionais/exemplos-e-validacoes>. O qual possui centenas de validações de queimadas por todo território nacional com fotos de campo, reportagens da grande mídia e imagens de altíssima resolução (Tabela 2).

De posse das datas e localização das queimadas fez a busca de imagens do sensor MSI Sensinel-2 no portal *EarthExplorer* baixando-se as cenas (UTM/WGS-84) pré e pós queimada, mais próximas dos eventos e livres de nuvens. Na Tabela 3 estão contidos a localidade, o período analisado e os principais eventos de queimadas.

Tabela 3. Localidades e datas das cenas MSI Sentinel e datas dos principais eventos de queimadas.

<b>Localidade</b>	<b>Imagem MSI/Sentinel2 pré-fogo</b>	<b>Eventos de queimadas*</b>	<b>Imagem MSI/Sentinel2 pós-fogo</b>
Bom Jesus de Goiás	15/09/2019	17/09/2019	15/10/2019
		19/09/2019	
		20/09/2019	
Brasília	26/08/2018	27/08/2018	10/09/2018
		02/09/2018	
		10/09/2018	
Guapé	21/07/2017	27/07/2017	30/08/2018
		30/08/2017	
		07/08/2019	
Colniza	27/07/2019	08/08/2019	21/08/2019
		21/08/2019	
		28/08/2019	
São Joao del-Rei	30/08/2017	11/09/2019	09/10/2017
		20/09/2017	
		06/10/2017	

Para o período analisado, em São Joao del-Rei município com 1464 km<sup>2</sup>, existem 241 registros e, há muitos outros *registros* para as outras localidades citadas. Apenas os eventos expressivos estão listados.

### c. Processamento de imagens

Después de descargar las imágenes, se realizó la corrección atmosférica con la rutina *sen2cor*. El parámetro de *entrada* - concentración de aerosol - expresado en kilómetros se obtuvo mediante la ecuación 9, propuesta por Retalis et al. (2010).

$$Visibility[km] = \frac{3.9449}{AOT_{550} - 0.08498} \quad (9)$$

Onde AOT é Aerosol Optical Thickness in 550nm.

Para obter o AOT550 na localização desejada foi utilizada a página NEO (Nasa Earth Observations) ([https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2\\_M\\_AER\\_O](https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_O)) com consulta de OAT550 composição de oito dias com temática visualização (0,1 grau) no Google Earth e associação de tonalidade de cor com escala numérica. Após a correção atmosférica, todas as bandas foram redimensionadas e reamostradas para 10m.

Em seguida, importou-se os pontos de queimadas na imagem pós ocorrência do fogo. Alguns pontos foram ajustados para o limite da área queimada identificados na composição R11G8B2, pois segundo o portal de queimadas, devido à resolução de alguns sensores, alguns pontos podem estar 400m distantes da posição verdadeira. Dos pontos iniciais do portal de queimadas, amostrou-se 300 pontos (“pinus”) aleatórios, os quais salvos e, posteriormente importados para a mesma localização geográfica na cena pré-queima. Obtendo-se, dessa maneira, a refletância de superfície em 12 canais, pré e pós-queima, para o mesmo pixel.

#### **d. Gráficos e análise estatística**

Gerou-se o gráfico de refletância espectral com as 12 bandas<sup>1</sup>, pré e pós-fogo para as localidades mencionadas. Os gráficos de refletância obtida em alvos de vegetação verde vigorosa (fragmentos florestais e matas ciliares), como um comparativo ao espectro da vegetação sob estresse hídrico.

Os gráficos de NBR pré e pós queima e o  $\Delta$ NBR também foram gerados para cada localidade, ilustrando a amplitude e a dinâmica do índice nas duas situações (pré e pós-queima), assim como, analisou-se em qual classe de severidade (Key e Benson, 2006) o  $\Delta$ NBR se enquadraria para cada localidade.

Quanto à similaridade/diferença dos espectros pré-queima e vegetação vigorosa, optou-se pelos ângulos espectrais. O ângulo espectral entre dois vetores também utilizado no algoritmo de classificação – SAM - (*Spectral Angle Mapper*) é bem conhecido na literatura (Kruse et al., 1993). Dos 300 vetores poderiam ser gerados a combinação de 90 mil ângulos espectrais (300 – vetores “verdes” e 300 vetores “secos”). Fez a opção por 10 mil ângulos aleatórios para cada cobertura, os quais foram plotados em gráficos *box plot*. A opção do ângulo espectral para analisar a similaridade foi feita uma vez que procurou-se analisar a diferença/similaridade do estresse hídrico das coberturas, independente do IAF (índice de Área Foliar) de folhas secas uma vez que incrementos deles acarretam pequenos incrementos de refletância (VIS ao IVM) , embora não uniforme em todo espectro óptico (Gausman, 1974). O ângulo ( $\Theta$ ) entre dois vetores espectrais é dado por:

---

<sup>1</sup> Das 13 bandas do sensor, a banda 10 (cirrus) não é corrigida e não contém informação de superfície (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>).

$$\vec{u} * \vec{v} = u_1 * v_1 + u_2 * v_2 + u_3 * v_3 + \dots + u_{12} * v_{12} \quad (10)$$

Os módulos de  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  dados por:

$$\|\vec{u}\| = (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_{12}^2)^{1/2} \quad (11)$$

$$\|\vec{v}\| = (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_{12}^2)^{1/2} \quad (12)$$

E o ângulo (rad) entre os dois vetores é dado por:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{u} * \vec{v}}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|}\right) \quad (13)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os Índices de vegetação, de áreas construídas, de corpos d'água e de queimadas, são operações algébricas com bandas espectrais que realçam as feições de interesse em relação a uma cobertura circundante. Embora todos os tipos de índices descritos possam ser aplicados em todo globo Terrestre, analisando o gráfico da refletância espectral da vegetação verde e do solo carbonizado, o qual é fundamento da proposição da diferença normalizada NIR e SWIR.

A primeira análise (Figura 7), seguindo a sequência da Tabela 1, é para o município de Bom Jesus de Goiás (GO), com a queima de culturas agrícolas (cana-de-açúcar). Observa-se que os 12 canais permitem uma boa descrição espectral dos alvos queimados (vegetação seca), bem distinta da vegetação verde sadia a qual não queimou. Observa-se também, que após a queima, existe uma forte redução da variabilidade (min-max) da resposta espectral e a queda da resposta espectral em todos os canais.

Muitos autores como (HUANG et al., 2016) descrevem que após a queima a refletância na região do NIR e SWIR tende a diminuir, mas um comportamento que não pode ser generalizado. A exposição de um solo altamente refletivo no pós-queima pode trazer comportamentos atípicos (SMITH et al., 2005). Pereira et al. (2016), com dados *Surface Reflectance* derivados do TM/Landsat5, reportam após a queima, queda na região do NIR e aumento do SWIR2.

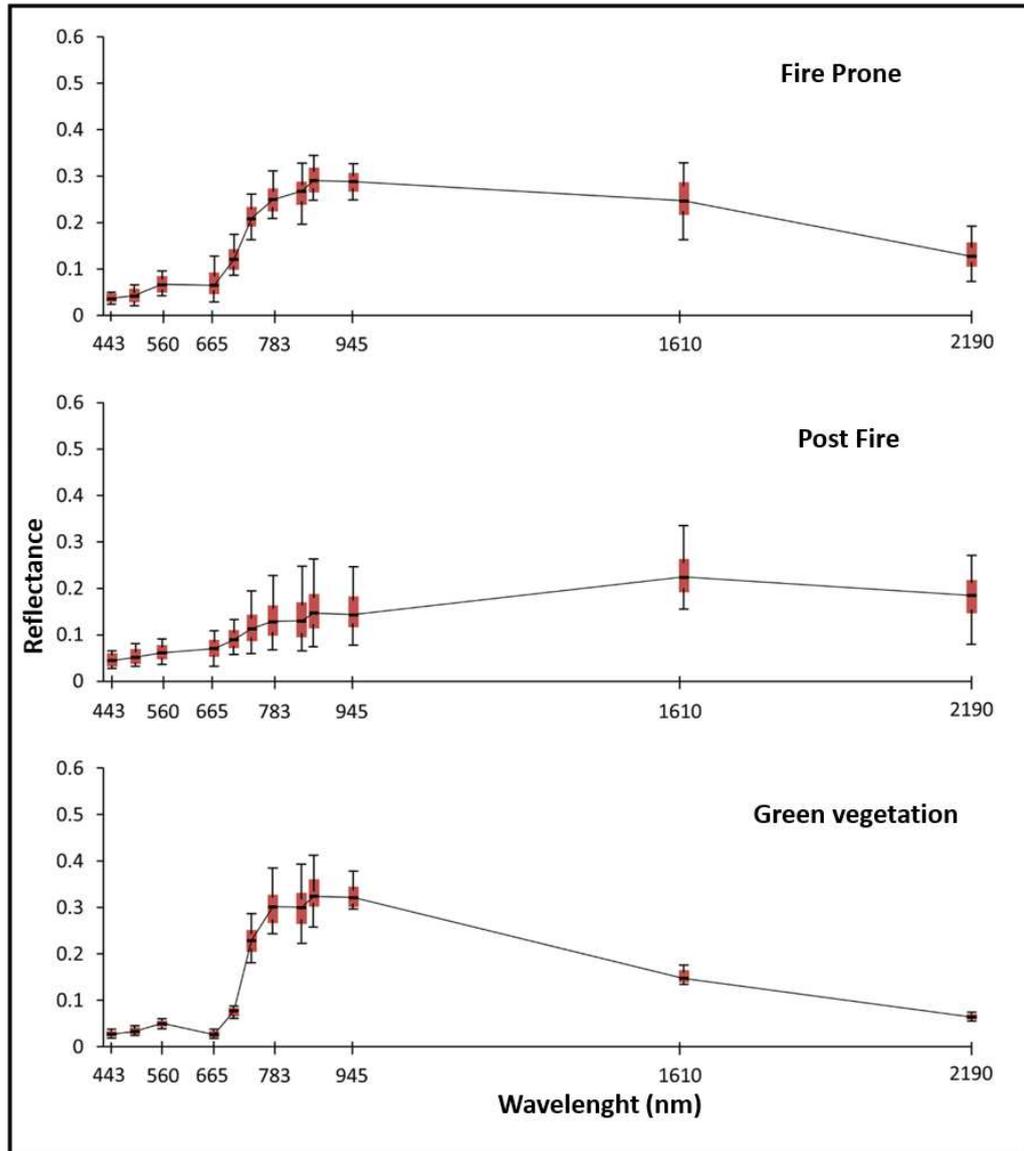


Figura 7. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a vegetação (cana de açúcar) pré-fogo, pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município de Bom Jesus de Goiás (GO).

Na sequência da análise são apresentados os mesmos três gráficos para o Distrito Federal (Brasília) (Figura 8), onde a vegetação que foi queimada é o cerrado. Novamente observa-se a redução da resposta em todo espectro, com a redução da variância principalmente no canal (SWIR1 1610nm). Uma análise comparativa pode ser analisada em Pereira et al. (2016) o qual utilizou dados TM/Landsat-5 (Surface Reflectance) para localidade de cerrado (Jalapão e a bacia do São Francisco) com ligeira redução da resposta no NIR e aumento na localidade no SWIR2 entre o pré e o pós-fogo.

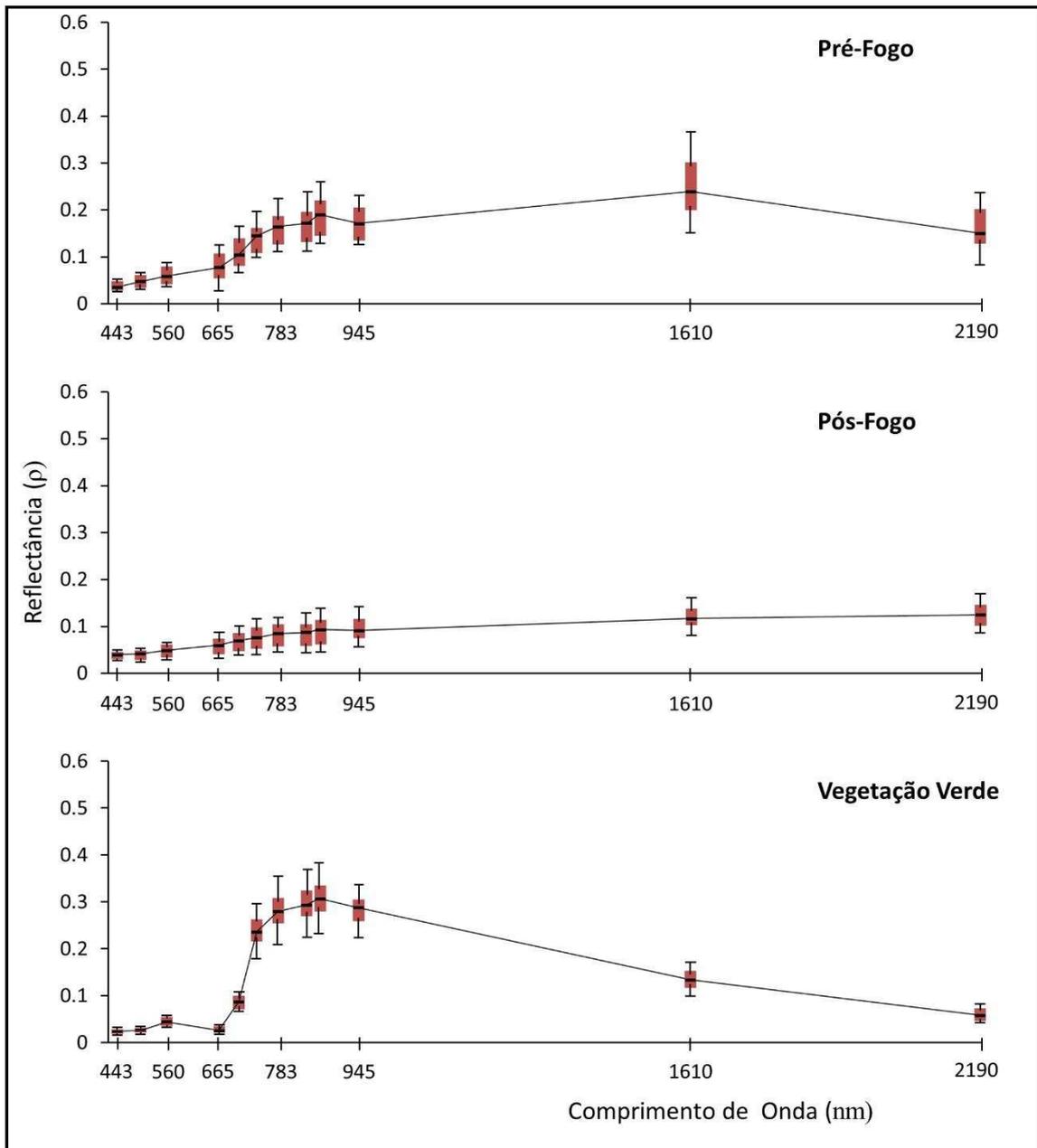


Figura 8. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a vegetação (cerrado) pré-fogo, pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no Distrito Federal.

A análise das queimadas no DF, na data de 19 de setembro de 2019, permitiu visualizar (Figura 9) uma queimada ativa e a vegetação ciliar a qual também foi utilizada como amostra para o gráfico de refletância espectral verde, funcionando como barreira de propagação ao fogo. Na Figura 9 é possível visualizar a frente de fogo ativo (vermelho), a área queimada (preto) e a mata de galeria (verde) a qual não sofreu processo de queima.



Figura 9. Imagem MSI/Sentinel-2 na composição RGB-11/8/2 de 10 setembro de 2019.

Poucos trabalhos na literatura nacional utilizaram o NBR em regiões de cerrado. O trabalho de Pereira *et al.* (2016) no qual utilizou dados TM/Landsat-5 (Surface Reflectance) para regiões de cerrado (Jalapão TO e bacia do S Francisco) descreve ligeira redução da resposta no NIR e aumento na região no SWIR2 entre o pré e o pós-fogo.

Dando sequência à análise, apresentam-se os gráficos para a localidade de Guapé (Figura 10) na qual predominam a vegetação da localidade de Guapé (MG). Observa-se que existe a redução da refletância nos pós queima, porém, não com uma redução tão acentuada da variância em 1610 e 2190 nm. De todos os tipos de vegetação analisada nesse trabalho- campo cerrado e campo rupestre apresentam a menor fitomassa por área. Além disso na área, existem Neossolos Litólicos e Cambissolos Ápicos muito rasos e com muito afloramento rochoso. Não existindo grande cobertura de material carbonizado após a queima.

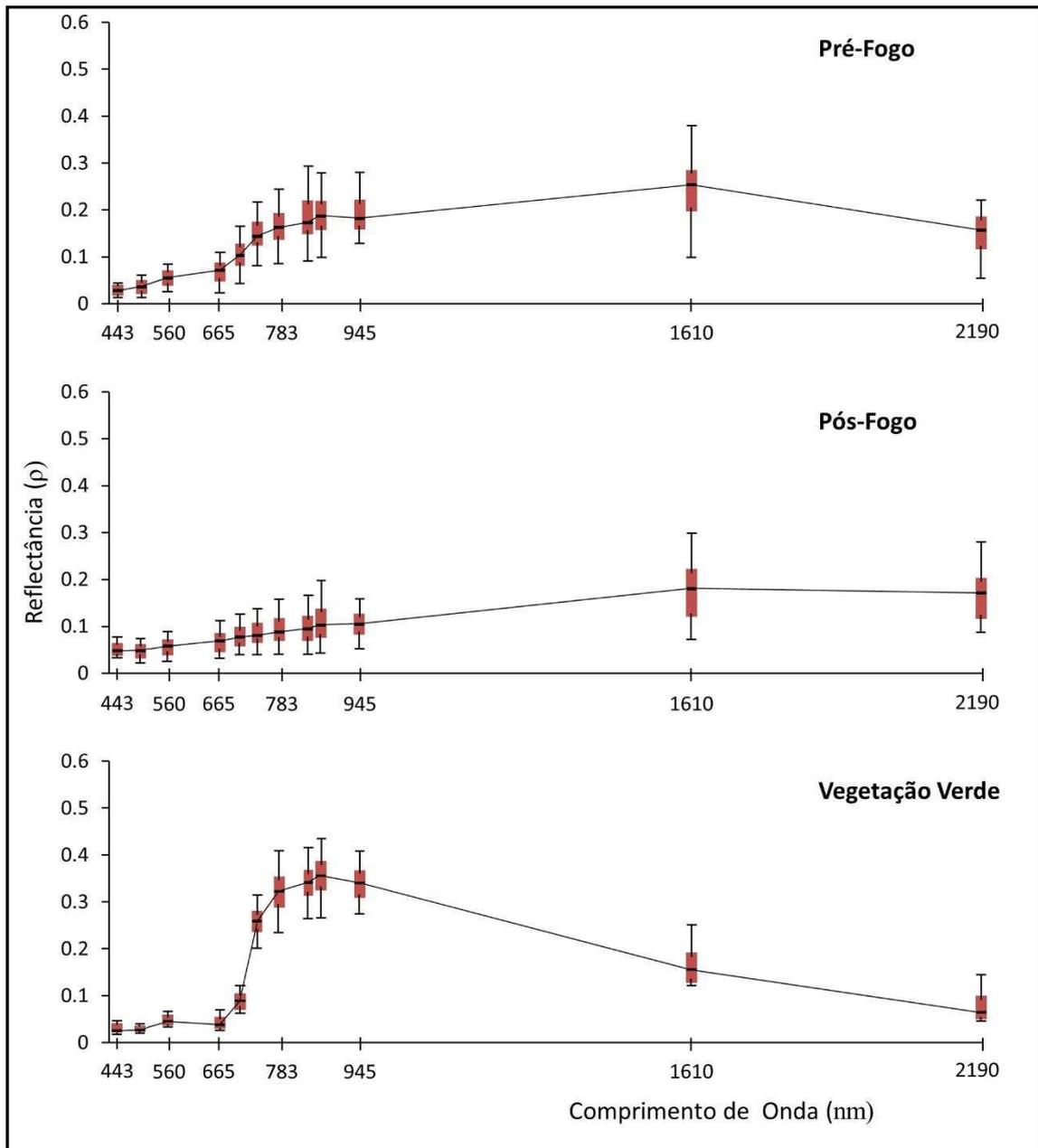


Figura 10. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a Campo Cerrado, campo rupestre pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, nos municípios de Guapé e Delfinópolis (MG).

Para a localidade de Colniza (MT) aonde a vegetação queimada é a floresta Amazônica (Figura 11), observa-se um comportamento diferente da vegetação pré-queima. São pixels mistos que expressam um remanescente de vegetação verde. Existe semelhança entre 443 a 945nm com perda de umidade entre 1610 a 2190nm expresso nos gráficos pré-fogo e vegetação verde. A visualização pode ser vista na composição RGB 8/11/2 (Figura 12) onde é possível perceber a presença de vegetação fotossinteticamente ativa na área que sofre queima.

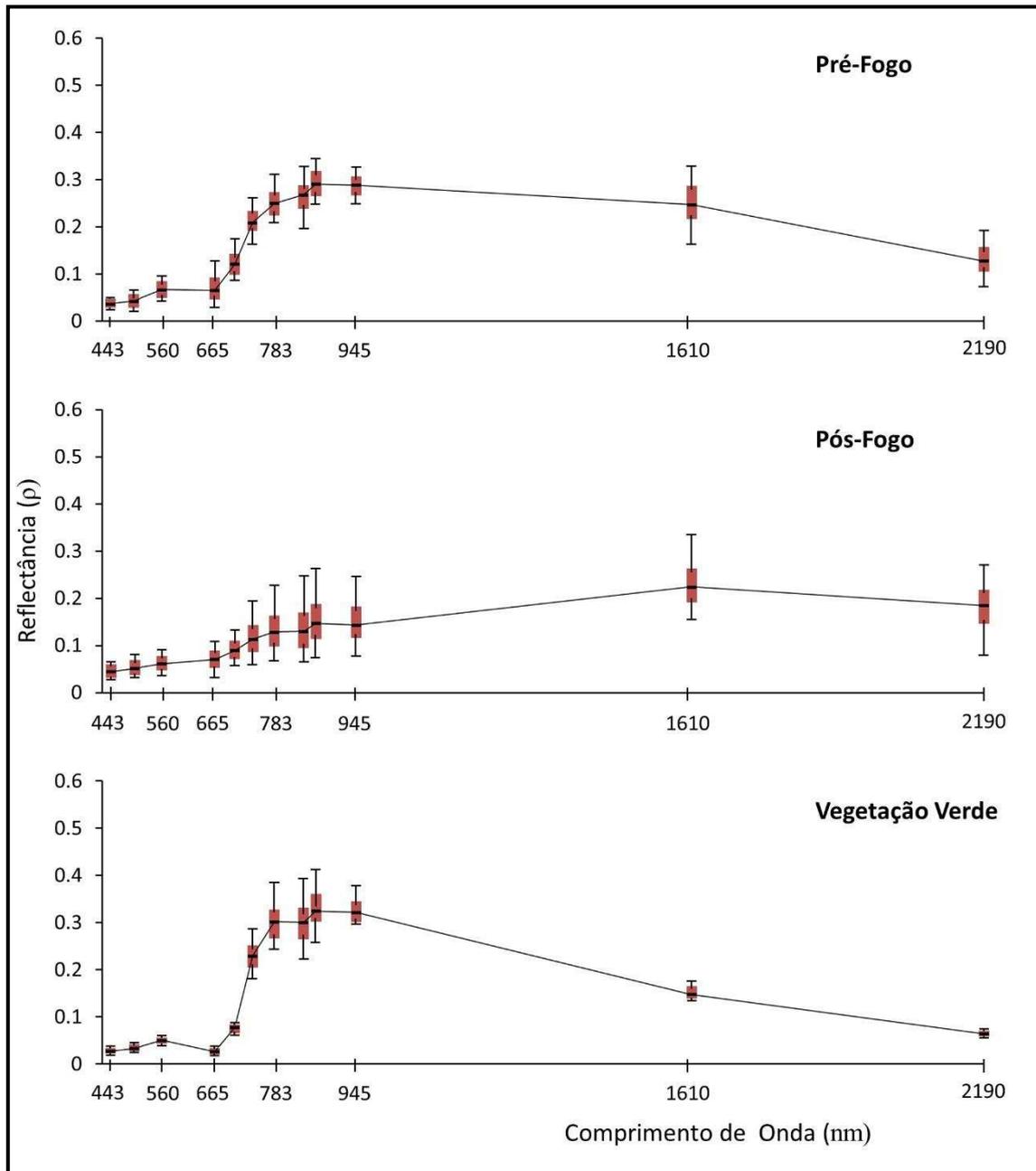


Figura 11. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a Floresta Amazônica pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município Colniza (MT).

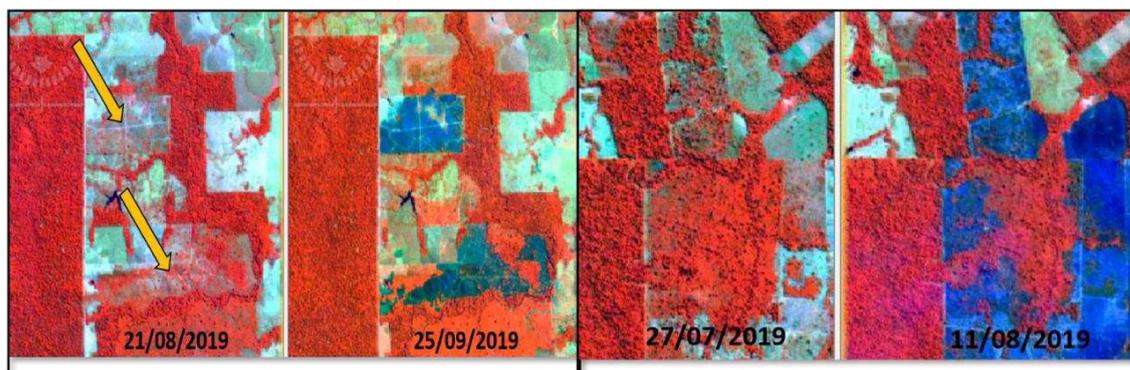


Figura 12. Imagens de Colniza (MT) na composição R8G11B2, pré e pós-queima ilustrando a vegetação remanescente (setas amarelas), as quais alteram a resposta espectral pré-queima.

Por último analisa-se o município de São Joao del-Rei (Campo das Vertentes, MG) cujos alvos são pastagens cultivadas e naturais (Figura 13) e cuja queima levou a redução da refletância espectral e os alvos verde continuam apresentando a resposta típica destoante da vegetação sob estresse hídrico.

A verificação da similaridade dos alvos pré-queima em relação à vegetação verde vigorosa no ângulo entre os respectivos vetores espectrais. Esse valor é utilizado no algoritmo descrito como SAM (*Spectral Angle Mapper*) implementado em muitos *softwares*. Como descrito, das 300 amostras de vegetação seca e 300 amostras de vegetação verde permitiriam gerar 90 mil ângulos espectrais (300 x 300). Como já mencionado foram gerados 10mil ângulos aleatórios para verificar qual cobertura tem resposta espectral mais próxima da vegetação vigorosa.

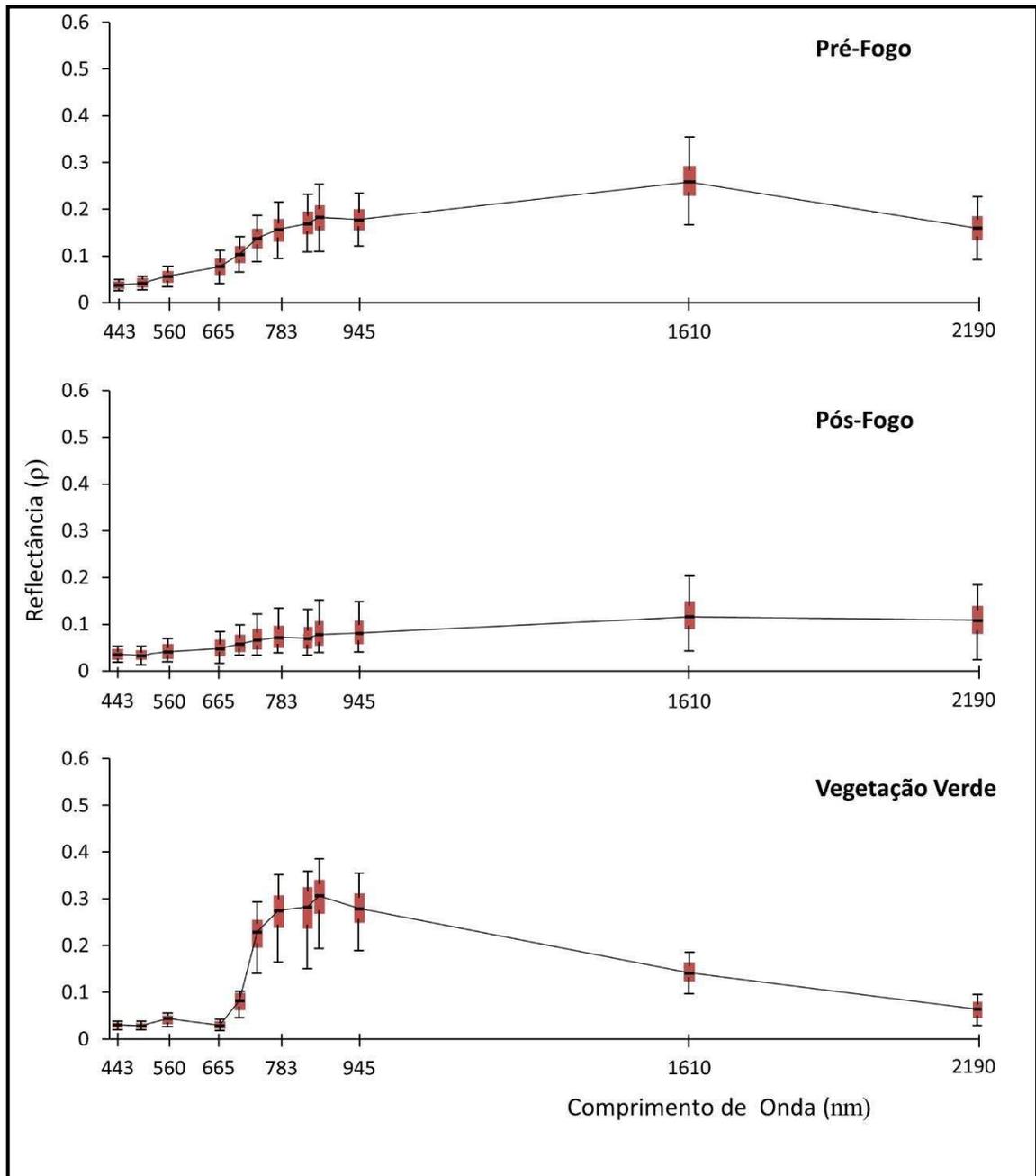


Figura 13. Reflectância espectral em 12 canais do sensor MSI para a pastagens naturais e plantadas pré e pós-fogo e vegetação verde vigorosa, no município São João del-Rei (MG).

A Figura 14 ilustra os *box plots* cujos ângulos (rad) entre os vetores espectrais obtidos na vegetação pré-queima é confrontada com a vegetação verde local. Observa-se que as pastagens naturais e plantadas nos campos das vertentes (São Joao del-Rei) são as mais destoantes e como observado nas Figura 11, a vegetação pré-queima de Colniza composta por vegetação verde e desmatada é a resposta mais próxima a resposta da vegetação verde local.

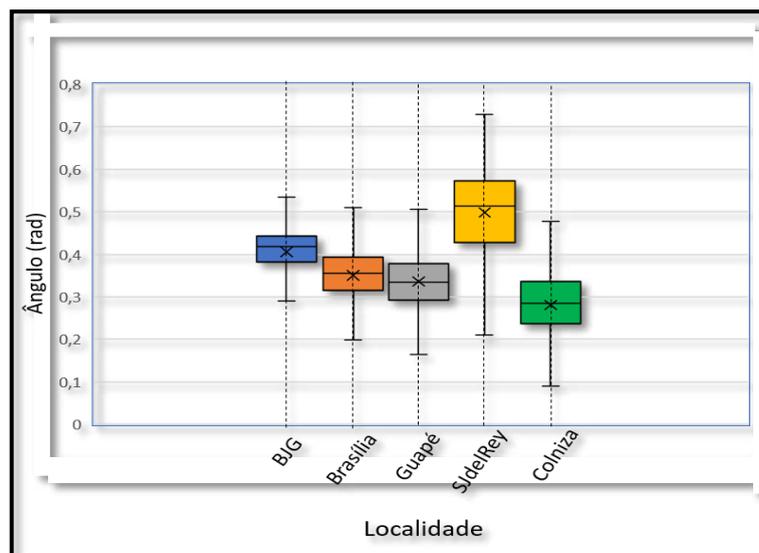


Figura 14. Ângulos espectrais entre a vegetação pré queima e a vegetação fotossinteticamente ativa, mostrando a maior similaridade entre as repostas para a localidade de Colniza (Floresta Amazonica); Bom Jesus de Goiás (BJG) cana de açúcar; Brasília (Cerrado), Guapé.

De acordo com Nepstad et al. (1999) existem três tipos de ocorrência de fogo na Amazônia: I) Associado ao desmatamento, os quais são queimadas intencionais para limpeza da floresta derrubada; II) incêndios rasteiros, associados a queimadas que fogem do controle e invadem florestas primárias ou florestas já exploradas para extração de madeira e III) incêndios e queimadas em áreas de pastagens, agricultura e capoeiras. Ainda, segundo os autores, dos três tipos, o primeiro é o mais nocivo ambientalmente pela abrupta substituição do ecossistema florestal por outro ecossistema antropogênico. Os autores Kirchoff e Escada (1998) lembram ainda que extremos eventos climáticos, como o fenômeno do Nino de 1998 secou as florestas de Roraima e 3,3 M ha dos quais 1M ha de floresta primária estacional foram queimados. A quebra de paradigma de que a floresta “sempre verde, úmida e fria” em relação aos outros tipos de cobertura não pudesse pegar fogo tem sido colocada em dúvida (Silva e Brown, 2016). No entanto, no atual trabalho, nos anos analisados, não havia áreas de floresta sob seca extrema para que perfis espectrais pudessem ser analisados.

#### 4.1. Variações do NBR (índice de severidade)

Huang *et al.* (2016) descrevem que o índice NBR foi inicialmente desenvolvido apenas para mapeamento de áreas queimadas (GARCÍA e CASELLES, 1991; FORNACCA et al., 2018; PENHA et al., 2020), no entanto, tem sido muito utilizado para quantificar a severidade

de queima (CANSLER e MCKENZIE, 2012; CHOMPUCHAN e LIN, 2017; KEY e BENSON, 2006; ROY et al., 2006) através variação dos valores pré e pós-fogo. A severidade, descrita pela diferença do NBR em datas pré e pós-ocorrência do fogo foi gerada para todas as localidades (tipos) de vegetação.

Na Figura 15, se apresentam gráficos boxplot onde observa-se grande redução da variância pós-fogo, ilustrando a homogeneidade da resposta espectral das áreas queimadas. A maior variância para os valores de NBR para o pós-queima observou-se em área de floresta Amazônica, provavelmente causada pela heterogeneidade de cobertura observada na resposta pré-queima e que nem toda vegetação presente na área, era passível de queima ou queima completa.

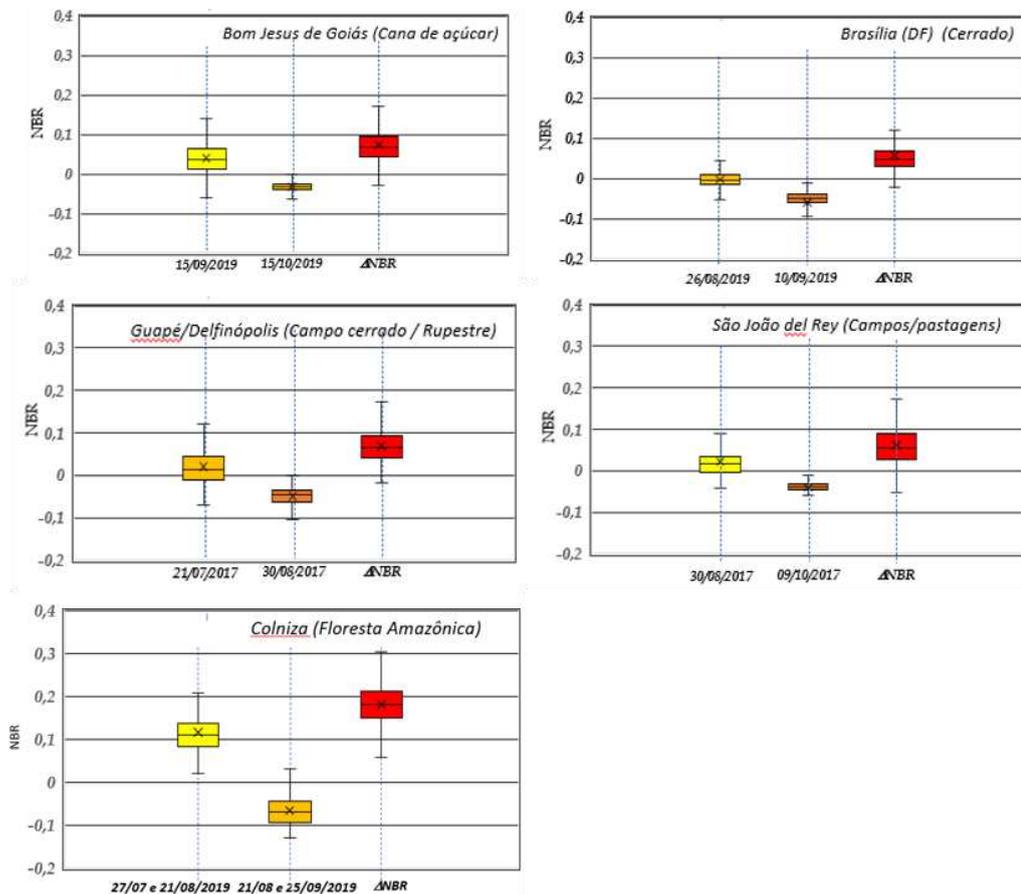


Figura 15. Valores de NBR para as datas pré-queima, pós-queima e variação pré-pós para as cinco localidades analisadas.

Os valores máximos de  $\Delta NBR$  foram observados para Colniza (Floresta Amazônica) nos pós-queima, mas ainda distante dos valores reportados para floresta de coníferas,

comportamento semelhante com os resultados obtidos neste estudo pode ser observado em Pereira et al. (2016).

Uma análise comparativa a tabela de severidade proposta por Key e Benson (2006) pode ser verificada na Figura 16, onde todos os valores de  $\Delta\text{NBR}$  são ilustrados ao fundo da escala de severidade.

Deve-se que destacar onde a comparação dos intervalos de severidade seria mais pertinente é com relação aos ecossistemas florestais, no caso Floresta Amazônica. No entanto, o cenário temporal descrito na Figura 1, exemplificado no artigo de Soverel *et al.* (2010) focando a preocupação com os Parques Canadenses, não se aplica. O que existe é uma derrubada da floresta e a posterior utilização do fogo para limpeza e a substituição de um ecossistema florestal por outro antropizado como pastagem ou agricultura. Na Figura 16 observa-se, com exceção aos dados de Colniza (MT), os valores de  $\Delta\text{NBR}$  estão classificados como “Sem queimada” e apenas os valores de  $\Delta\text{NBR}$  de Colniza, estão classificados como baixa severidade. O NBR teve melhor desempenho para a área florestal e desempenho ruim nas áreas cobertas com árvores, gramíneas e arbustos, alertas para o desempenho não satisfatório do NBR também pode ser encontrado em Huang et al. (2016) ou, corrigindo a conclusão de Epting *et al.*, (2005) quem diz que o índice NBR pode não ser apropriado para estimar a severidade das queimadas em áreas não florestadas, além da afirmação de Epting et al. (2005) com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se determinar que o índice NBR também não é apropriado às florestas tropicais

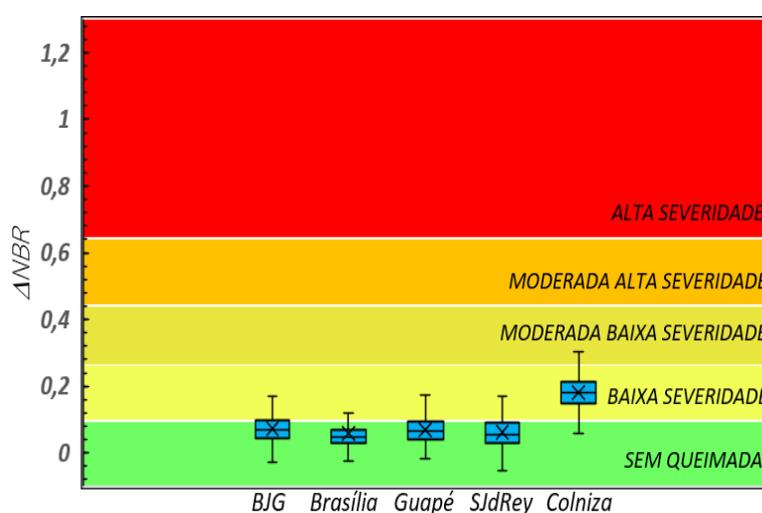


Figura 16. Variação - NBR – para as cinco localidades estudadas e enquadramento segundo a escala de severidade de Key e Benson (2006).

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho discutiu a aplicabilidade de índice NBR em contexto diferenciado ao proposto pelo Serviço Florestal Americano. Constatou-se que as curvas espectrais dos alvos vegetados pré-ocorrência do fogo, diferem muito da vegetação verde; na floresta Amazônica foram encontrados pixels “verdes”, porém, provavelmente pixels mistos com material seco (combustível) junto a material verde remanescente.

Das áreas avaliadas com o  $\Delta$ NBR solo a área de Colniza é classificada como “Baixa severidade” e as outras quatro áreas avaliadas foram classificadas como “Sem queimada”, com o que é possível concluir que o índice NBR não é apropriado às florestas tropicais.

A maior variância do índice NBR para o pós-queima é observada na área de floresta Amazônica, provavelmente causada pela heterogeneidade de cobertura observada na resposta pré-queima e que nem toda vegetação presente na área, era passível de queima ou queima completa

A variação do NBR ( $\Delta$ NBR), a qual expressaria a severidade de queima, também apresentou resultados muito aquém da escala da severidade de Key e Benson (2006) e analisando os valores, esses estariam classificados em grande parte, como “não queimada”.

A vegetação passível de ignição é a vegetação desidratada.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B.; PÉREZ-CABELLO, F.; CAMBRAIA, B. C.; BONADEU, F.; DA SILVEIRA, A. L. P. Análise multitemporal de áreas afetadas pelo fogo no enclave de cerrado do parque nacional dos campos amazônicos utilizando sensoriamento remoto e trabalho de campo. **Geografia Ensino e Pesquisa**, 18. 2018. <https://doi.org/10.5902/2236499433584>.
- ALVES, I. R.; DO AMARAL, C. H.; GLERIANI, J. M.; CABRAL, I. F. Q. Spatial dynamics of semideciduous seasonal forests: Case study in the turvo sujo river basin in Southeastern Brazil, between the years of 2003 and 2016. **Revista Arvore**, 42(5). 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000500007>.
- AMOS, C.; PETROPOULOS, G. P.; FERENTINOS, K. P. Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning e severity detection e severity detection. **International Journal of Remote Sensing**, 40(03), 1–26. 2018 <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1519284>.
- BARBOSA, K. M. N. Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 131 p., 2006.
- CANSLER, C. A.; MCKENZIE, D. How robust are burn severity indices when applied in a new region? Evaluation of alternate field-based and remote-sensing methods. **Remote Sensing**, 4(2), 456–483. 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4020456>.
- CHOMPUCHAN, C.; LIN, C. Y. Assessment of forest recovery at Wu-Ling fire scars in Taiwan using multi-temporal Landsat imagery. **Ecological Indicators**, 79(April), 196–206. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.038>.
- CHU, T.; GUO, X. Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in boreal forest regions: A review. **Remote Sensing**, 6(1), 470–520. 2013. <https://doi.org/10.3390/rs6010470>.
- DRUSCH, M.; BELLO, U.; DEL CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.,

- SPOTO, F. S. Y., O.; MARCHESE, F.; E BARGELLINI, P. **Remote Sensing of Environment Sentinel-2 : ESA ' s Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services.** *120*, 25–36. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- EPTING, J.; VERBYLA, D.; SORBEL, B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. **Remote Sensing of Environment**, *96*(3–4), 328–339. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>.
- FORNACCA, D.; REN, G.; XIAO, W. 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**, *10*(8). 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10081196>.
- GARCÍA, M. J. L.; CASELLES, V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. **Geocarto International**, *6*(1), 31–37. 1991. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>.
- GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, *40*(2), 183–191. 1994.
- GAUSMAN, H. W.; RODRIGUES, R. R.; E RICHARDSON, A. J. Infinite Reflectance of Dead Compared with Live Vegetation 1. **Agronomy journal**, *68*(2), 295-296. 1976
- HALL, R. J.; FREEBURN, J. T.; DE GROOT, W. J.; PRITCHARD, J. M.; LYNHAM, T. J.; LANDRY, R. Remote sensing of burn severity: Experience from western Canada boreal fires. **International Journal of Wildland Fire**, *17*(4), 476–489. 2008. <https://doi.org/10.1071/WF08013>.
- HUANG, H.; ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; ZHANG, H. K.; YAN, L.; KUMAR, S. S.; GOMEZ-DANS, J. E LI, J. Separability Analysis of Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument ( MSI ) Data for Burned Area Discrimination. **Remote Sensing**, *8*(10), 1–18. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8100873>.
- HUDAK, A. T.; MORGAN, P.; BOBBITT, M. J.; SMITH, A. M. S.; LEWIS, S. A.; LENTILE, L. B.; ROBICHAUD, P. R.; CLARK, J. T.; E MCKINLEY, R. A. The relationship of

multispectral satellite imagery to immediate fire effects. **Fire Ecology**, 3(1), 579–612. 2007.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, A. Modis Vegetation Index Algorithm Theoretical Basis. In **Environmental Sciences** (Issue MODIS VEGETATION INDEX (MOD 13) Algorithm theoretical basis document Version 3). 1999.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. 1991. **Preventive Veterinary Medicine**, 11(3–4), 185–200. 1991.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, 50, 663–666. 1969.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. Tasselled Cap - a Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops As Seen By Landsat. **Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data**, 41–51. 1976.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. Measuring and remote sensing of burn severity. In L. F. Neuenschwander, K. C. Ryan, e G. E. Goldenberg (Eds.), *Proceedings of the Joint Fire Science Conference* (p. 284). University of Idaho and the International Sssociation of Wildland Fire. 1999.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR, 164 RMRS-GTR*. 2006.

KIRCHOFF, V. W. J. H.; ESCADA, P. A. S. O Megaincendio do seculo-1998. Sao Jose dos Campos: Transtec. 1998.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote sensing of environment**, 1(3), 155-159.1970.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System ( SIPS ) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. 163(January

1992), 145–163. 1993.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; E CHIPMAN, J. W. Remote sensing and image interpretation (John Wiley e Sons (ed.); 7th ed.). 2015.

LOBODA, T. V.; HOY, E. E.; GIGLIO, L.; KASISCHKE, E. S. Mapping burned area in Alaska using MODIS data: A data limitations-driven modification to the regional burned area algorithm. **International Journal of Wildland Fire**, 20(4), 487–496. 2011. <https://doi.org/10.1071/WF10017>

MALLINIS, G.; MITSOPOULOS, I.; E CHRYSAFI, I. 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 e Remote Sensing**, 55(1), 1–18. 2018. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17(7), 1425–1432. 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B.N. **An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction**. Remote Sensing of Environment, n.78, p. 284-298, 2001.

MORAES, E. C. **CAPÍTULO 1 Fundamentos de sensoriamento remoto**. 2002.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 179p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

MYNENI, R. B.; MAGGION, S.; IAQUINTA, J.; PRIVETTE, J. L.; GOBRON, N.; PINTY, B.; KIMES, D. S.; VERSTRAETE, M. M.; WILLIAMS, D. L. Optical remote sensing of vegetation: Modeling, caveats, and algorithms. **Remote Sensing of Environment**, 51(1), 169–188. 1995. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00073-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00073-V)

- NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. A. Floresta em Chamas: origens, impactos e prevenção do fogo na Amazonia. 1999.
- PENHA, T. V.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; SILVA JÚNIOR, C. H. L.; PLETSCH, M. A. J. S.; ANDERSON, L. O.; E MORELLI, F. Burned Area Detection in the Brazilian Amazon using Spectral Indices and GEOBIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, 72(2), 253–269. 2020. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n2-48726>.
- PEREIRA, A. A.; TEIXEIRA, F. R.; LIBONATI, R.; MELCHIORI, E. A.; MARCELO, L., E CARVALHO, T. Áreas queimadas no cerrado utilizando Evaluation of Spectral Indices for Burned Area Identification in Cerrado using Landsat TM Data Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - IFSULDEMINAS Universidade Federal do Rio de Janeiro -. **Revista Brasileira de Cartografia**, 68(8), 1665–1680. 2016.
- PEREIRA, J. M. C.; SÁ, A. C. L.; SOUZA, A. M. O.; SILVA, J. M. N.; SANTOS, T. N.; E CARREIRAS, J. M. B. Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. In E. Chuvieco (Ed.), **Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin** (pp. 123–138). 1999.
- PLENIYOU, M.; KOUTSIAS, N. *ISPRS* Sensitivity of spectral reflectance values to different burn and vegetation ratios : A multi-scale approach applied in a fire affected area. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 79, 199–210. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.016>
- PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação. In. Sensoriamento Remoto – Reflectância dos alvos naturais.** Editora UnB, Embrapa, Brasília (DF), p. 157-199, 2001.
- RETALIS, A.; HADJIMITSIS, D. G.; MICHAELIDES, S.; TYMVIOS, F.; CHRYSOULAKIS, N.; E CLAYTON, C. R. I. Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus. *May 2002*, 421–428. 2010.
- ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto.** 7 ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. 260 p.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation

systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium - NASA SP-351*, 309–317. 1973.

ROY, D.P.; BOSCHETTI, L.; TRIGG, S. N. Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 3(1), 112–116. 2006. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858485>

SEELIG, H. D.; HOEHN, A.; STODIECK, L. S.; KLAUS, D. M.; ADAMS III, W. W.; EMERY, W. J. International Journal of Remote The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible , near - , and short - wave - infrared. **International Journal of Remote Sensing**, 29(13), 3701–3713. 2008. <https://doi.org/10.1080/01431160701772500>

SERVICE, F.; MOUNTAIN, R.; E LUTES, D. C. Fire Effects Monitoring and Inventory System Technical. Program, June 2014. 2006. [https://doi.org/28/11/2745 \[pii\]r10.1523/JNEUROSCI.4286-07.2008](https://doi.org/28/11/2745[pil]r10.1523/JNEUROSCI.4286-07.2008)

SILVA, S.; BROWN, F. OS INCÊNDIOS FLORESTAIS RECENTES E A MUDANÇA DE PARADIGMA. 2016. <https://ambienteacreato.blogspot.com/2016/11/os-incendios-florestais-recentes-e.html>

SILVA, S. L.; BAPTITA, G. M. M. Revista Brasileira de Geografia Física. *Revista Brasileira de Geograifa Fisica*, 08(02), 431–438. 2015.

SMITH, A.M.S.; EITEL, J. U. H.; E HUDAK, A. T. Spectral analysis of charcoal on soils: implications for wildland fire severity mapping methods. **International Journal of Wildland Fire**, 19, 976–983. 2010.

SMITH, A. M.S.; WOOSTER, M. J.; DRAKE, N. A.; DIPOTSO, F. M.; FALKOWSKI, M. J.; HUDAK, A. T. (2005). Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African Savannahs. **Remote Sensing of Environment**, 97(1), 92–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.014>

SOVEREL, N. O.; PERRAKIS, D. D. B.; E COOPS, N. C. Remote Sensing of Environment

- Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. **Remote Sensing of Environment**, 114(9), 1896–1909. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.013>
- VAN WAGTENDONK, J. W.; ROOT, R. R.; KEY, C. H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 397–408. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.015>
- VERAVERBEKE, S.; LHERMITTE, S.; VERSTRAETEN, W. W.; E GOOSSENS, R. Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a mediterranean environment with landsat thematic mapper. **International Journal of Remote Sensing**, 32(12), 3521–3537. 2011. <https://doi.org/10.1080/01431161003752430>
- VERBYLA, D. L.; KASISCHKE, E. S.; HOY, E. E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM / ETM + data Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM / ETM + data. **International Journal Of Wildland Fire**, 17, 527–534. 2008. <https://doi.org/10.1071/WF08038>
- VERSTRAETE, M.M.; PINTY, B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, 34(5), 1254–1265. 1996.
- VERSTRAETE, M. M.; PINTY, B.; MYNENI, R. B. Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, 58(2), 201–214. 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00069-7)
- XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 29(14), 4269–4276. 2008. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 27(14), 3025–3033. 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.

ZHA, Y., GAO, J., E NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 24(3), 583–594. 2003. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>