

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/8: 1665-1680
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS NO CERRADO UTILIZANDO DADOS LANDSAT TM

*Evaluation of Spectral Indices for Burned Area Identification in
Cerrado using Landsat TM Data*

**Allan Arantes Pereira¹, Fabrício Rodrigues Teixeira², Renata Libonati²,
Emilliano Arturo Melchiori³ & Luis Marcelo Tavares Carvalho⁴**

¹Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - IFSULDEMINAS
Campus Poços de Caldas
Av. Dirce Pereira Rosa, 300 - Jardim Esperança, 37713-100, Poços de Caldas, MG, Brasil
allan.pereira@ifsuldeminas.edu.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Instituto de Geociências/Departamento de Meteorologia / Laboratório de Aplicações de Satélites (LASA)
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN (Bloco G), Campus Ilha do Fundão - Cidade Universitária, 21949-900,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
fabricioteixeira@ufrj.br , renata.libonati@igeo.ufrj.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Programa Queimadas Monitoramento por Satélite
Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brasil
emelchiori@gmail.com

⁴Universidade Federal de Lavras - UFLA
Laboratório de Manejo Florestal/Departamento de Ciências Florestais
Av. Doutor Sylvio Menicucci, 1001 - Kennedy, 37200-000, Lavras, MG, Brasil
passarinho@dcf.ufla.br

Recebido em 16 de Outubro, 2015/ Aceito em 8 de Agosto, 2016
Received on October 16, 2015/ Accepted on August 8, 2016

RESUMO

A alteração no regime de fogo devido à ação humana é a principal ameaça à biodiversidade do Cerrado Brasileiro e tem levado a iniciativas de melhores políticas públicas ambientais. Neste contexto, a disponibilidade de informações confiáveis sobre as distribuições espacial e temporal de áreas queimadas afigura-se crucial, não só para uma melhor gestão dos recursos naturais, mas também para estudos da química da atmosfera e de mudanças climáticas. O sensoriamento remoto via satélites constitui, neste âmbito, uma ferramenta indispensável na medida em que permite um monitoramento especialmente útil em áreas extensas e/ou de difícil acesso afetadas pelo fogo. Neste contexto, este trabalho visa aprimorar o conhecimento científico sobre o fogo na vegetação do Cerrado, especificamente através da avaliação de qual índice espectral tem o melhor desempenho na discriminação de áreas queimadas em imagens Landsat TM. Foram avaliados dez índices espectrais: Burned Area Index (BAI), Char Soil Index (CSI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Burn Ratio (NBR), variation of Normalized Burn Ratio (NBR2), Normalized Difference Vegetation Index

(NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Mid-Infrared Burn index (MIRBI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) e W-burn-sensitive vegetation index (W). O índice M de separabilidade foi utilizado para avaliar a eficácia de cada um dos índices espectrais em discriminar pixels queimados e não queimados. Os resultados mostram que os índices que utilizam os canais infravermelho de ondas curtas (banda 5 e banda 7), possuem maior capacidade de separabilidade de áreas queimadas na região deste estudo.

Palavras chaves: Fogo na Vegetação, Cerrado, Sensoriamento Remoto, Landsat.

ABSTRACT

Alteration of fire regime due to human action is a major threat to the biodiversity of Brazilian Cerrado. Accordingly, a considerable number of environmental studies and Earth resources management activities require an accurate identification of burned areas. Due to the very broad spatial extent and the limited accessibility of areas affected by fire, instruments on-board satellites are currently the only available operational systems capable to collect cost-effective burned area information at adequate spatial and temporal resolutions. In such context, this work aims at improving the scientific knowledge regarding vegetation fires in Cerrado specifically, by assessing which spectral indices performs best in the discrimination of burned areas in the Landsat TM images. Ten spectral indices were evaluated: Burned Area Index (BAI), Char Soil Index (CSI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Burn Ratio (NBR), variation of Normalized Burn Ratio (NBR2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Mid-Infrared Burn index (MIRBI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and W-burn-sensitive vegetation index (W). The M separability index was used to assess the effectiveness of each spectral index to discriminate between burned and unburned pixels. We conclude that the indices using the bands of the shortwave infrared region showed the best results and are the most suitable for mapping fires in the region.

Keywords: Vegetation Fires, Cerrado, Remote Sensing, Landsat.

1. INTRODUÇÃO

A cobertura vegetal da superfície da Terra tem sofrido alterações significativas, não só devido a causas naturais, mas principalmente devido às atividades humanas. Mudanças na cobertura vegetal podem perturbar o clima através de alterações de propriedades físicas da superfície continental como albedo, emissividade e rugosidade aerodinâmica, modificando os balanços de energia e umidade através de variações na evaporação/transpiração, nos fluxos de calor latente e sensível e na transferência turbulenta de calor e umidade. Alterações nestes processos afetam diretamente a precipitação e a circulação atmosférica, assim como a temperatura do ar próxima à superfície (SELLERS *et al.*, 1995). Com efeito, as queimadas constituem uma das mais importantes fontes de alteração da cobertura vegetal, resultando na destruição de florestas e de recursos naturais e alterando as interações biosfera-atmosfera (LEVINE *et al.*, 1995; SCHOLLES, 1995) através de mudanças na rugosidade do solo, na área foliar e em diferentes parâmetros biofísicos associados à cobertura vegetal.

Adicionalmente, a queima de biomassa possui um papel importante no ciclo do carbono

e na produção de gases traço e emissões de aerossóis. O dióxido de carbono (CO₂) compõe aproximadamente 90% das emissões de gases liberados durante as queimadas (LEVINE *et al.*, 1995), porém outras espécies químicas, como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos são também produzidas (ANDREAE, 1991). Além do CO₂, as emissões de CH₄ e NO_x, também contribuem diretamente para o aumento do efeito estufa, assim como a formação fotoquímica do ozônio (O₃) resultante da oxidação de CO e hidrocarbonetos na presença de NO_x. As partículas de aerossol emitidas pelas queimadas têm também efeito no balanço radiativo da atmosfera através do espalhamento e absorção de radiação de onda curta e longa, e por meio de alterações na microfísica e na dinâmica de formação de nuvens, podendo afetar o ciclo hidrológico em escala regional e global (RAMASWAMY *et al.*, 2001; LOHMANN & FEICHTER, 2005).

A queima de combustíveis fósseis e a conversão de áreas florestais para agricultura e pastagem, especialmente aquelas localizadas em zonas tropicais, são apontadas como os maiores responsáveis pelo rápido aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (VITOUSEK

et al., 1997), bem como tendo efeitos na diversidade biológica e na degradação do solo (FEARNSIDE, 1993; GUILD *et al.*, 1998; GEDNEY & VALDES, 2000). De acordo com ANDREAE (1991), a maior parte das queimadas ocorre nos países em desenvolvimento nos trópicos, sendo estes responsáveis por 87% das emissões globais produzidas por queimadas, estimadas em 3940 Tg[C]/ano. De fato, a transição recentemente em curso de economia de subsistência para industrial caracteriza-se pela conversão de florestas em áreas agrícolas e pastagens através do uso do fogo (MOUILLOT & FIELD, 2005). Durante a estação seca nas regiões Amazônica e Brasil Central, compreendida entre os meses de julho a outubro, ocorrem em grande quantidade queimadas antropogênicas em áreas de Cerrado e de Floresta Tropical (COUTINHO *et al.* 2002). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de cem a trezentos mil focos de queimadas são observados anualmente no Brasil somente com o sensor National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR). Considerando todos os satélites disponíveis na Base de Dados de Queimadas do INPE, este número ultrapassa um milhão de ocorrências.

Nesta conformidade, as queimadas assumem um papel de extrema importância na medida em que podem estar associadas às mudanças climáticas de ordem regional e global (NOBRE *et al.*, 1991; O'BRIEN, 1996). Uma das principais formas de estudar e avaliar as mudanças climáticas induzidas por emissões de queimadas e outras intervenções antropogênicas é através de projeções futuras do estado atmosférico incluindo estas perturbações. Estas projeções são obtidas com modelos matemáticos resolvidos numericamente em supercomputadores. Assim, para obter resultados que sejam fisicamente consistentes, os modelos atmosféricos devem corretamente incorporar as emissões de queimadas, através de estimativas espaciais e temporais da quantidade de biomassa consumida pela combustão (SCHOLES *et al.*, 1995), e incluir o transporte e a interação destas emissões com o ambiente (FREITAS *et al.*, 2005). A quantidade emitida de um dado composto pela queima pode ser estimada a partir do conhecimento: 1) da quantidade

de biomassa acima do solo, 2) do fator de combustão, 3) do fator de emissão e 4) da área queimada em um dado ecossistema. Portanto, uma das variáveis cruciais para quantificar as emissões associadas à queima de biomassa em escala global, é o tamanho da área afetada pelo fogo. Com efeito, atualmente a obtenção de um melhor desempenho dos modelos de emissão de poluentes tem sido um dos objetivos principais da comunidade científica. Neste sentido, a estimativa total de área queimada constitui um desafio especial à medida que a sua qualidade determina amplamente a qualidade do cálculo de emissões provenientes de queimadas.

Além das questões de mudança climática e de química da atmosfera, há uma busca de modelos alternativos para que o desenvolvimento socioeconômico seja sustentável devido à ameaça de escassez de recursos naturais. Como o impacto do setor industrial na deterioração ambiental é significativo no Brasil, torna-se fundamental levar em conta os efeitos negativos provocados pelo processo produtivo no meio ambiente. Um melhor conhecimento da extensão de áreas queimadas auxiliará na valoração econômica desses efeitos, permitindo a adoção de políticas públicas para uma melhor gestão dos recursos naturais.

O sensoriamento remoto constitui, neste âmbito, uma ferramenta indispensável na medida em que permite observar todo o globo com uniformidade (o mesmo sensor é utilizado em lugares diferentes) e continuidade (um único sensor fornece longas séries temporais de dados), uma capacidade não alcançada por nenhum outro meio convencional de medição. Acresce que os satélites são fontes indispensáveis de informação em áreas extensas e/ou de difícil acesso afetadas pelo fogo (PEREIRA *et al.*, 1997). Atualmente, o sensoriamento remoto por satélite possui capacidade única de extrair informação sobre áreas afetadas pelo fogo de forma repetitiva nas escalas regional e global, possibilitando a extração de séries temporais.

Apesar de vários trabalhos encontrados na literatura, ainda existem várias limitações a serem resolvidas no que diz respeito ao mapeamento de áreas queimadas por satélites (STROPPIANA *et al.*, 2012). A diversidade das tipologias florestais é um deles, uma vez que as fitofisionomias presentes na área possuem peculiaridades

estruturais que interferem diretamente nas suas características espectrais e conseqüentemente nos algoritmos de mapeamento de área queimada.

Com o intuito de minimizar esse problema, a maioria dos trabalhos que tem por finalidade mapear as queimadas, por meio de sensoriamento remoto, utilizam índices espectrais para melhor caracterizar e então discriminar as queimadas de outros alvos (CHUVIECO *et al.*, 2012; LIBONATI *et al.*, 2012; MALLINIS *et al.*, 2012; MATTAR *et al.*, 2012; STROPPIANA *et al.*, 2012).

Esses índices espectrais têm o intuito de discriminar a informação de interesse com outros alvos de semelhança espectral, além de normalizar ou minimizar os efeitos ligados a coleta de dados espaciais (LIU, 2007, JENSEN, 2009, PONZONI *et al.*, 2012). Apesar disso, por serem provenientes de expressões matemáticas envolvendo valores de reflectância, esses índices são sensíveis às mudanças das características espectrais nas diferentes fitofisionomias.

Dessa forma, esse trabalho é norteado pelas seguintes questões: (1) Quais índices espectrais possuem maior capacidade em diferenciar queimadas de outros alvos, nas imagens em áreas de Cerrado? (2) Existem diferenças no desempenho destes índices de acordo com o local de estudo no mesmo Bioma? Assim, o objetivo desse trabalho é investigar os índices espectrais quanto à capacidade de diferenciar as queimadas dos demais alvos em duas cenas Landsat TM em regiões de Cerrado, a fim de verificar qual o índice mais indicado no mapeamento de áreas queimadas para essas cenas, e se existe diferença no desempenho dos índices nas duas regiões.

2. MÉTODOS E DADOS

Nesta seção apresentam-se a área de estudo, a descrição do conjunto de imagens utilizadas e a metodologia aplicada.

2.1 Áreas de estudo

O Cerrado é uma das áreas consideradas prioritárias para a conservação da biodiversidade mundial, conhecidas como “hotspots” (MYERS *et al.*, 2000). Neste domínio, a mais extensa formação de savana, está localizada na América do Sul, sendo que no Brasil é considerado o segundo maior bioma (KLINK *et al.*, 2005).

O Bioma Cerrado apresenta diferentes

formações florestais (florestas, matas de galeria, savanas e campos) que são classificadas de acordo com a densidade de fitomassa, condicionada pelos processos de formação dos solos da região (EITEN, 1977). Dentre as fitofisionomias de Cerrado estão o campo limpo, o campo sujo, campo cerrado, cerrado *stricto sensu*, cerradão e as veredas (COUTINHO, 1990).

O clima da região do Cerrado é muito variado, porém, no geral, é classificado como Aw de Köppen (tropical chuvoso). A precipitação média na região do Cerrado é de aproximadamente 1500 mm, porém, apresenta variações de 700-2000 mm, sendo duas épocas climáticas definidas: a) a estação chuvosa (outubro a março, com 90% da precipitação); e b) a estação seca (abril a setembro), com baixa precipitação, menor incidência de nuvens e baixa umidade relativa (WALTER, 2006).

Dois regiões distintas do Cerrado são analisadas neste trabalho (Figura 1). A primeira área (cena 221/67) recobre a região do Jalapão a Leste do estado de Tocantins – TO, fazendo limites com os estados da Bahia, Piauí e Maranhão. Nesta cena, encontra-se o complexo de áreas protegidas do Jalapão, que constitui o maior mosaico de Unidades de Conservação do bioma Cerrado, e apresenta locais preservados, com grupos fitofisionômicos distintos e alta diversidade de espécies, sendo que muitas delas encontram-se ameaçadas de extinção. Dentre as unidades de conservação de proteção integral, o Jalapão possui o maior conjunto do Cerrado (5): Estação Ecológica (ESEC) Serra Geral do Tocantins, a Estação Ecológica do Rio Preto, o Monumento Natural (MN) *Canyons* e Corredeiras do Rio Sono, o Parque Estadual (PE) do Jalapão e o Parque Nacional (PN) das nascentes do Rio Parnaíba. A região do Jalapão também abriga seis unidades de conservação de uso sustentável: as Áreas de Proteção Ambiental (APA) Serra da Tabatinga, APA do Jalapão e APA do Rio Preto, As Reserva Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) Catedral do Jalapão, Fazenda Calixto e Mina d'Água. No total são protegidos por unidades de conservação 3.280.045 ha (SANTOS *et al.*, 2011).

A outra área (cena 219/70) está localizada na Bacia do Rio São Francisco, região norte do estado de Minas Gerais, em área de transição entre os biomas Cerrado e Caatinga, com predomínio

do Cerrado, composto pelas fitofisionomias de Cerrado *stricto sensu*, Campo Cerrado, Campo, Vereda, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual (CARVALHO *et al.*, 2008). A região possui um clima do tipo semiárido (CARVALHO *et al.*, 2008) com uma temperatura média de 23°C e uma precipitação anual média de 1.000 mm/ano, sendo as chuvas concentradas nos meses de novembro a janeiro (NUNES *et al.*, 2006). Nesta área, estão unidades de conservação estaduais do complexo Jaíba, sendo as Unidades de Proteção Integral a Reservas Biológica Estadual do Jaíba, o Parque Estadual Mata Seca, o Parque Estadual Lagoa do Cajueiro, e as Unidades de Conservação de Uso Sustentável a Área de Proteção Ambiental (APA) Estadual Rio Cochá e Gibão, e APA Estadual Serra do Sabonetal, além do Parque Estadual Veredas do Peruaçu e a Reserva Indígena Xacriabá.

De acordo com o Mapa do uso e cobertura do solo do Brasil desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/>,

a predominância do uso do solo na Região da Bacia do Rio São Francisco (cena 219/70) é pastagem natural, pastagem plantada, mosaico de vegetação silvestre com áreas agrícolas, vegetação campestre, áreas agrícolas e áreas descobertas (solo exposto). Na região do Jalapão (cena 221/67), além da pastagem natural, pastagem plantada, vegetação campestre e áreas agrícolas, a área possui mosaico de vegetação florestal com áreas agrícolas e mosaico de agropecuária com remanescentes.

Embora ambas as regiões sejam constituídas por espécies típicas do Cerrado, adaptadas ao regime de queimada natural, a biodiversidade dos seus ecossistemas é diretamente afetada quando a queimada é induzida de forma intencional e indiscriminada (PIVELLO, 2011). Com as práticas antrópicas, impulsionadas pelo manejo intensivo do solo nas atividades agrícolas, em ambiente de vegetação savana com uma estação seca bem definida, estão sendo registrados aumentos significativos nos eventos de fogo para a região do Cerrado, segundo dados levantados pelo INPE.

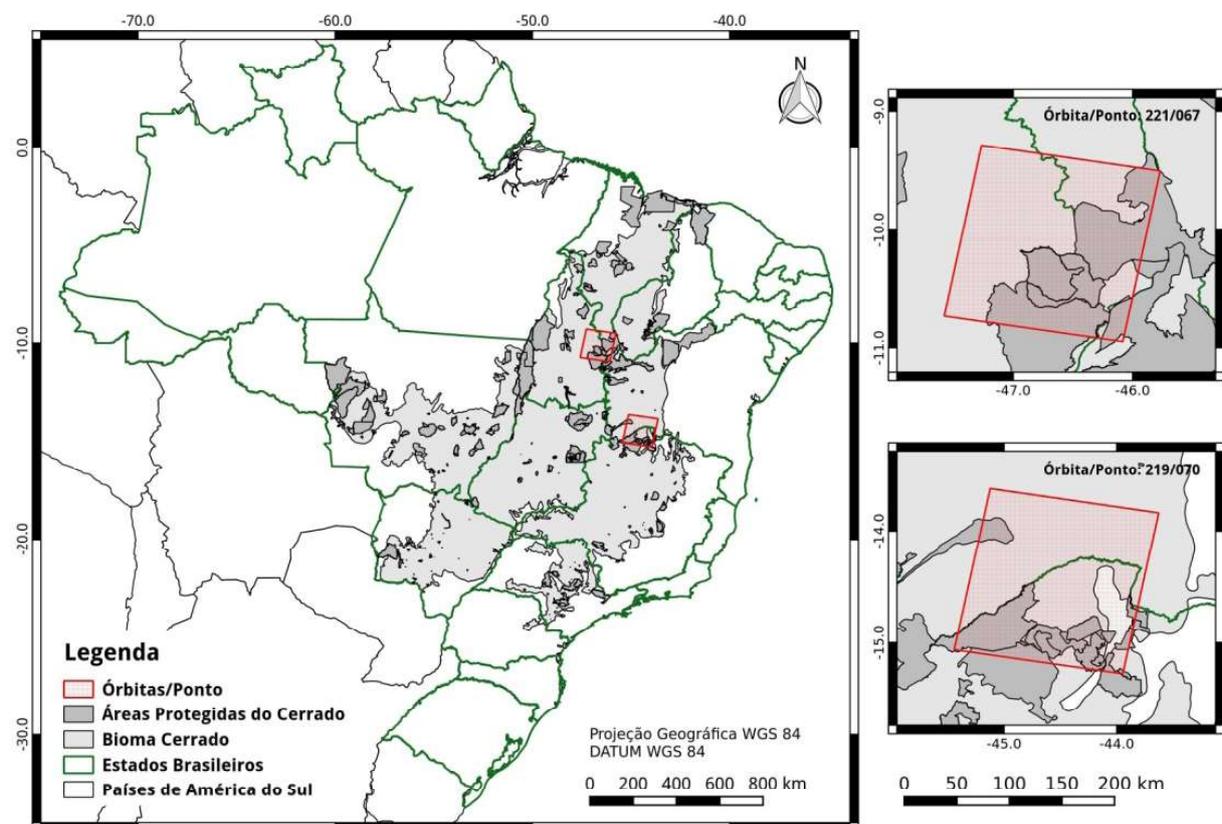


Fig. 1 – Mapa da área de estudo, apresentando as duas cenas Landsat (221/67 e 219/70), localizadas no Cerrado (cinza claro) e a delimitação das Unidades de Conservação (cinza escuro) localizadas no bioma.

2.2 Dados

Para o cálculo dos índices espectrais utilizou-se imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 5, adquiridas na base de dados da série histórica *LandSat Surface Reflectance Climate Data Record (United State Geological Survey – USGS)*. Os dados referem-se ao produto *Landsat Surface Reflectance High Level Data*, que fornece dados de reflectância à superfície (CLAVERIE *et al.*, 2015). Além da correção atmosférica, o referido produto fornece ainda dados com correção geométrica.

Foram utilizadas as cenas da órbita-ponto 219/70 nas datas de 24/08/2010 (pré-fogo) e 25/09/2010 (pós-fogo); e a cena órbita-ponto 221/67 de 22/08/2010 (pré-fogo) e 23/09/2010 (pós-fogo). As cenas pré-fogo (pós-fogo) foram definidas como T1(T2). Portanto, o período de análise corresponde a 32 dias. A escolha das datas, levou em consideração o período crítico dos incêndios florestais sendo setembro o mês de maior ocorrência de queimadas (ARAÚJO *et al.*, 2012; LIBONATI *et al.*, 2015) e também a ausência de nuvens nas imagens.

O sensor TM, a bordo do satélite Landsat 5, faz o recobrimento da superfície terrestre com visada no terreno de 185 km de largura, resolução espacial de 30 m e resolução temporal de 16 dias. O sensor possui capacidade de coleta de informação em sete regiões espectrais, sendo os canais 1 (0,45 - 0,52 μm), 2 (0,52 - 0,60 μm) e 3 (0,63 - 0,69 μm), referentes às faixas do azul, verde e vermelho, respectivamente. Os canais 4, 5, 6 e 7 operam na faixa do infravermelho, sendo o canal 4 (0,76 - 0,90 μm) correspondente à faixa do infravermelho próximo (NIR), o canal 5 (1,55 - 1,75 μm) e 7 (2,08 - 2,35 μm) à faixa do infravermelho de onda curta (SWIR). O canal 6 (10,40 - 12,50 μm) corresponde à faixa do infravermelho termal (TIR) com uma resolução espacial de 120 m. A resolução radiométrica deste sensor é de 8 bits. Este sensor é amplamente utilizado em estudos de áreas queimadas (LIU *et al.*, 2007).

2.3 Métodos

A seguir são descritos os métodos de coleta de amostras, além dos índices de vegetação e de separabilidade aplicados.

2.3.1 Coleta de dados

Para a coleta das amostras foram utilizados mapas de áreas queimadas de referência, produzidos pelo Grupo de Monitoramento de Queimadas do INPE (cena 221/67) e pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) (cena 219/70). Estes mapas foram obtidos através de uma classificação prévia e posterior edição minuciosa, corrigindo os possíveis erros, e são utilizadas na validação da cartografia automática de áreas queimadas. A escolha das duas cenas levou em consideração o conhecimento prévio das áreas de estudo pela equipe envolvida neste trabalho.

Foram coletadas 10000 amostras, dentro das cicatrizes das queimadas (mapa de referência) para cada cena. Essas amostras foram escolhidas aleatoriamente, dentro de todas as cicatrizes de queimadas mapeadas.

De acordo com o mapa de uso do solo do IBGE, a maioria das amostras está em áreas de pastagem natural, sendo 88,4% na Bacia do Rio São Francisco e 93% no Jalapão. Apesar de algumas diferenças no uso do solo, em ambas as áreas, as pastagens naturais são a classe mais propícia à ocorrência do fogo. Isso devido à atividade de pecuária, onde o fogo é utilizado para o manejo dessas áreas. Além disso, as condições de inflamabilidade das pastagens naturais favorecem a proliferação do fogo.

Os pontos de amostras foram utilizados para extrair os valores de reflectância nas imagens pré-fogo (T1) e pós-fogo (T2), para o cálculo dos índices espectrais.

2.3.2 Índices espectrais

Índices espectrais, calculados a partir de imagens de satélites, constituem um método simples e dinâmico no mapeamento de áreas de vegetação afetadas pelo fogo. Tais índices têm sido amplamente utilizados para detecção e mapeamento de áreas queimadas (CHUVIECO *et al.*, 2012; LIBONATI *et al.*, 2012; MALLINIS *et al.*, 2012; MATTAR *et al.*, 2012; STROPPIANA *et al.*, 2012). A Tabela 1 resume os índices utilizados neste trabalho, onde B se refere à banda 1 do Landsat 5 TM (azul, 0,45 - 0,52 μm), R se refere a banda 3 (vermelho, 0,60 - 0,69), NIR a banda 4 (infravermelho próximo, 0,76 - 0,90 μm), SWIR1 a banda 5 (infravermelho de

onda curta, 1,55 – 1,75 μm) e SWIR2 a banda 7 (infravermelho de onda curta, 2,08 - 2,35 μm).

2.3.3 Índice de separabilidade

A análise visual de imagens contendo áreas queimadas e não queimadas, não é um método adequado para avaliar a capacidade de discriminação de um índice espectral. É necessário quantificar esta capacidade de discriminação, levando em consideração tanto a magnitude das diferenças dentro de cada classe (queimada e não queimada) quanto a magnitude da variação intraclasse. Neste contexto, os índices de separabilidade têm grande potencial no sensoriamento remoto, sendo útil na análise da discriminação de classes de interesse (SWAIN *et al.*, 1973; KAUFMAN & REMER, 1994; BASTARRIKA *et al.*, 2011). Para avaliar a capacidade de cada índice espectral em discriminar entre superfícies queimadas e superfícies não queimadas, foi utilizado o índice de separabilidade M (KAUFMAN & REMER, 1994):

$$M = |\mu_{nq} - \mu_q| / (\sigma_{nq} + \sigma_q) \quad (1)$$

onde μ_{nq} (σ_{nq}) e μ_q (σ_q) são respectivamente a média (desvio padrão) dos valores do conjunto de pixels não queimados (T1) e queimados (T2). O índice de separabilidade M pode ser interpretado como um estimador da razão sinal-ruído, onde o sinal é representado pela diferença absoluta entre as médias das classes (associado à variação intraclasse) e o ruído é representado pela soma dos desvios-padrões (associado à variação interclasse) Portanto este teste representa a sobreposição dos histogramas de frequência das classes analisadas. Valores de M maiores que um indica alta separabilidade entre as classes, enquanto valores de M menores que um, indicam baixa separabilidade (PEREIRA, 1999; LIBONATI *et al.*, 2010; VERAVERBEKE *et al.*, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão são analisados e discutidos os comportamentos dos índices e canais espectrais para classes queimadas e não queimadas e seus respectivos padrões de separabilidade.

3.1 Índices espectrais

Conforme mencionado, os índices espectrais são calculados com base nos valores de reflectância dos canais espectrais dos sensores orbitais. Dessa forma, as características espectrais dos objetos de interesse, vão interferir diretamente nos valores de reflectância e nas variações temporais destes valores, seja devido a mudanças do uso da terra ou devido às características caducifólias da vegetação, diminuindo a refletividade.

Assim, torna-se importante observar os valores de reflectância dos canais espectrais antes (pré-fogo) e depois das queimadas (pós-fogo) para identificar quais canais apresentam maior sensibilidade na resposta espectral de superfícies queimadas. A Tabela 2 apresenta os valores de média, mediana, variância, desvio padrão, e o coeficiente de variação (CV), das reflectâncias nos canais espectrais TM, antes e depois das queimadas, para as duas cenas analisadas neste estudo, utilizando para cada cena, as 10000 amostras coletadas aleatoriamente, conforme descrito no item 2.3.1.

O comportamento espectral de superfícies queimadas é caracterizado por baixos valores de reflectância na região do NIR e altos valores de na região do SWIR2. Este padrão espectral é o oposto ao observado para áreas de superfícies vegetadas em ambas as faixas espectrais. Desta forma, considerando o intervalo entre visível e infravermelho de onda curta, as regiões do NIR e SWIR2 são as mais recomendadas para o mapeamento de áreas queimadas (PEREIRA, 1999; LIBONATI *et al.*, 2010). De fato, a Tabela 2 mostra uma maior variação nos valores de reflectância pré e pós-fogo nos canais NIR e SWIR2. Entretanto, observa-se que o canal NIR possui baixa variação no Jalapão quando comparada com a Bacia do Rio São Francisco. Observa-se pelos resultados da Tabela 2 que as características espectrais da vegetação pré-fogo são semelhantes nas duas regiões, pois o tipo de vegetação/uso do solo é semelhante. No entanto, as características espectrais pós-fogo diferem principalmente no canal NIR, conforme apresentado na Figura 2, onde a Figura 2a (2b) representa um recorte da região do Jalapão (cena 221/67) na composição RGB 453 antes do fogo (depois do fogo).

Tabela 1: Índices espectrais utilizados

Índices Espectrais	Acrônimo	Equação	Referência
Burned Area Index	BAI	$1/[(0,1-R)^2 + (0,06-NIR)^2]$	CHUVIECO <i>et al.</i> , 2002
Normalized Burn Ratio	NBR	$(NIR-SWIR2) / (NIR+SWIR2)$	KEY & BENSON, 1999
Mid-Infrared Burn Index	MIRBI	$(10*SWIR2) - (9,8*SWIR1) + 2$	TRIGG <i>et al.</i> , 2001
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(NIR-R) / (NIR+R)$	ROUSE <i>et al.</i> , 1973
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$(1+L)*[(NIR-R)/(NIR+R+L)]$ onde L=1	HUETE, 1988
Char Soil Index	CSI	$NIR/SWIR2$	SMITH <i>et al.</i> , 2007
Variation of Normalized Burn Ratio	NBR2	$(SWIR1-SWIR2) / (SWIR1+SWIR2)$	KEY & BENSON, 1999
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$	GAO, 1996
Enhanced Vegetation Index	EVI	$(NIR-R)/[NIR+(6*R)-(7,5*B)+1]$	HUETE <i>et al.</i> , 1994
Burn-sensitive vegetation index	W	1,1*	LIBONATI <i>et al.</i> , 2011

Tabela 2: Valores de reflectância para os canais do sensor TM

Canais Espectrais	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão		Período	Cena TM
BLUE	0,05	0,04	0,00	0,04	78,27	Pré Fogo	219/70
GREEN	0,07	0,07	0,00	0,02	29,91		
RED	0,09	0,08	0,00	0,03	30,65		
NIR	0,21	0,21	0,00	0,03	13,94		
SWIR1	0,25	0,25	0,00	0,05	19,13		
SWIR2	0,16	0,16	0,00	0,04	24,19		
BLUE	0,06	0,06	0,00	0,01	16,37	Pós Fogo	
GREEN	0,09	0,09	0,00	0,02	18,92		
RED	0,10	0,10	0,00	0,02	22,17		
NIR	0,16	0,16	0,00	0,04	23,29		
SWIR1	0,24	0,24	0,00	0,05	21,40		
SWIR2	0,22	0,22	0,00	0,05	21,52		
BLUE	0,05	0,05	0,00	0,01	26,01	Pré Fogo	221/67
GREEN	0,08	0,07	0,00	0,02	22,27		
RED	0,10	0,09	0,00	0,03	26,38		
NIR	0,22	0,22	0,00	0,03	12,69		
SWIR1	0,27	0,27	0,00	0,05	17,77		
SWIR2	0,18	0,17	0,00	0,05	27,45		
BLUE	0,07	0,06	0,00	0,03	38,99	Pós Fogo	
GREEN	0,10	0,09	0,00	0,04	40,12		
RED	0,13	0,11	0,00	0,05	42,14		
NIR	0,20	0,19	0,00	0,06	32,15		
SWIR1	0,25	0,28	0,01	0,09	37,16		
SWIR2	0,27	0,26	0,01	0,10	37,57		

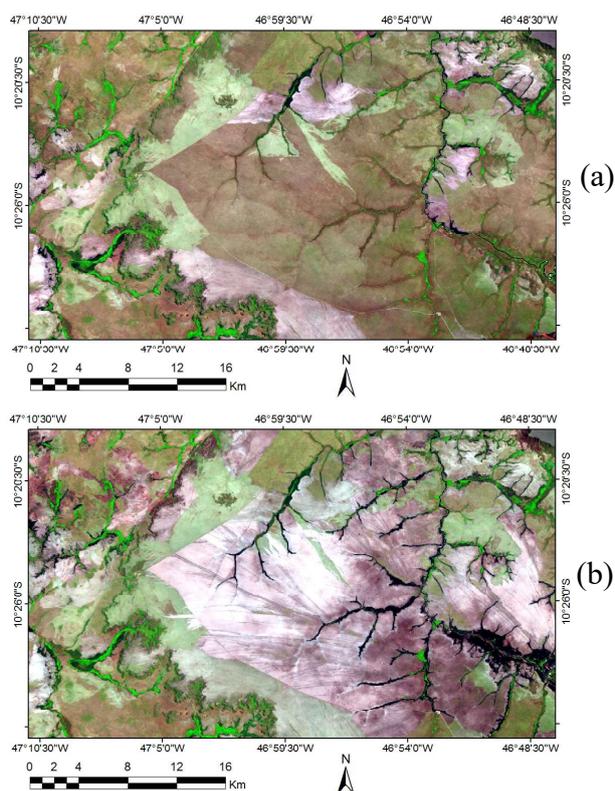


Fig. 2 - Recorte da cena 221/67, na região do Jalapão, na composição Landsat RGB 453 antes do fogo (a) e após o fogo (b).

O comportamento espectral esperado para superfícies queimadas é uma diminuição dos valores de reflectância na região do NIR (PEREIRA, 1999; LIBONATI *et al.*, 2010). Porém em condições de vento e chuva, combinado com baixa densidade de biomassa queimada e solos arenosos, as cinzas desaparecem rapidamente, deixando o solo exposto com altos valores de reflectância no canal NIR (conforme Figura 2b). Segundo a classificação de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, a predominância dos solos nas duas áreas de estudo são os Neossolos (SANTOS *et al.*, 2011). Este tipo de solos é considerado jovem, possuindo cor esbranquiçada, e textura arenosa. Tais tipos de solo apresentam altos valores de reflectância devido à presença de areia e quartzo em sua composição (WHITE *et al.*, 1997).

A combinação de baixa biomassa, proveniente das pastagens naturais, e a textura dos solos presentes nestas regiões, podem contribuir para o desaparecimento das cinzas, e consequentemente, refletir o solo exposto. Outros fatores, além da dissipação pelas condições meteorológicas, podem influenciar a permanência do sinal espectral das queimadas, como recorrência, frequência e severidade do fogo. Para explicar o aumento da reflectância de uma superfície

queimada na região espectral do NIR, recomenda-se em estudos futuros, investigar como é a interação entre a radiação eletromagnética, com as características de superfície da região estudada (Figura 2b) e a relação desta interação na variação do comportamento espectral de uma queimada clássica, na região do NIR.

A Tabela 3 corresponde aos valores de média, mediana, variância, desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) calculados a partir dos índices espectrais, antes e depois das queimadas, para as duas cenas analisadas neste estudo, utilizando para cada cena, as 10000 amostras coletadas aleatoriamente, conforme descrito no item 2.3.1. A Figura 3 mostra a assinatura espectral antes e depois do fogo, para as duas áreas analisadas. A curva pós-fogo, apresenta diminuição da reflectância na região do NIR (B4) e um aumento da reflectância na região do SWIR2 (B7) após a queimada. Observa-se pela Figura 3b que há uma menor variação nos valores de reflectância no NIR (B4) na região do Jalapão quando comparado com a região da Bacia do Rio São Francisco. Este comportamento no Jalapão é justificado pelo aumento da reflectância do NIR como discutido anteriormente e mostrado na Figura 2b.

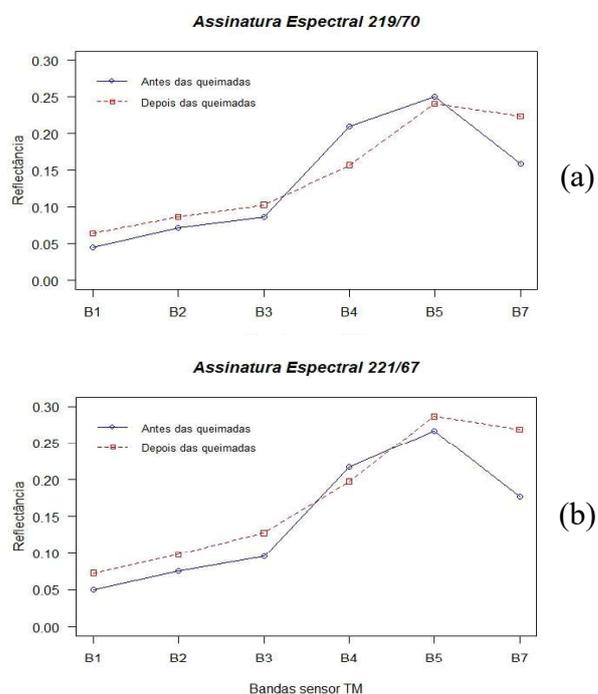


Fig. 3- Assinatura espectral na região da Bacia do Rio São Francisco (a) e Jalapão (b), em cada uma das bandas do sensor TM. As linhas em azul representam os dados de reflectância antes das queimadas e as linhas vermelhas, os valores de reflectância depois das queimadas.

Tabela 3: Métricas estatísticas dos índices espectrais

ÍNDICES	Média	Mediana	Variância	Desvio Padrão	CV%	Período	Cena TM
MIRBI	1,14	1,14	0,04	0,21	18,19	Pré Fogo	219/70
NDVI	0,42	0,42	0,01	0,08	18,71		
NBR	0,15	0,14	0,01	0,10	65,94		
BAI	3,32	3,32	0,17	0,41	12,24		
CSI	1,38	1,33	0,10	0,31	22,51		
SAVI	0,19	0,19	0,00	0,03	16,85		
NBR2	0,23	0,23	0,00	0,04	17,85		
NDMI	-0,08	-0,09	0,01	0,07	-81,63		
EVI	0,09	0,09	0,00	0,02	18,40		
W	0,25	0,25	0,01	0,00	10,43		
MIRBI	1,88	1,92	0,06	0,24	12,65	Pós Fogo	
NDVI	0,21	0,20	0,00	0,05	24,51		
NBR	-0,18	-0,19	0,01	0,10	-54,66		
BAI	3,98	3,90	0,49	0,70	17,63		
CSI	0,72	0,68	0,03	0,16	22,87		
SAVI	0,09	0,08	0,00	0,03	33,20		
NBR2	0,04	0,03	0,00	0,05	145,85		
NDMI	-0,21	-0,22	0,00	0,05	-25,44		
EVI	0,04	0,04	0,00	0,01	31,74		
W	0,17	0,16	0,00	0,00	18,19		
MIRBI	1,16	1,16	0,03	0,18	15,37	Pré Fogo	221/67
NDVI	0,40	0,39	0,01	0,09	21,81		
NBR	0,12	0,09	0,02	0,12	105,91		
BAI	3,20	3,20	0,12	0,35	10,99		
CSI	1,31	1,20	0,28	0,53	40,31		
SAVI	0,19	0,18	0,00	0,04	18,85		
NBR2	0,21	0,21	0,00	0,05	25,69		
NDMI	-0,10	-0,11	0,01	0,08	-86,86		
EVI	0,09	0,08	0,00	0,02	20,88		
W	0,26	0,25	0,00	0,00	12,79		
MIRBI	1,88	1,92	0,12	0,34	18,12	Pós Fogo	
NDVI	0,23	0,21	0,01	0,08	35,96		
NBR	-0,14	-0,17	0,02	0,13	-89,13		
BAI	3,45	3,41	0,86	0,93	26,81		
CSI	0,78	0,71	0,14	0,37	47,17		
SAVI	0,11	0,10	0,00	0,04	34,06		
NBR2	0,04	0,03	0,00	0,06	151,01		
NDMI	-0,18	-0,19	0,01	0,08	-42,29		
EVI	0,05	0,05	0,00	0,02	35,82		
W	0,17	0,18	0,00	0,05	27,41		

3.2 Separabilidade

Um índice espectral que apresenta boa separabilidade é aquele em que os valores entre as queimadas e os diferentes alvos sejam distintos. Valores iguais podem confundir classificadores automáticos, provocando erros no mapeamento. A Figura 4 apresenta o *boxplot* dos valores pré e pós-fogo dos índices espectrais analisados nas duas regiões de estudo. Os *boxplots* em vermelho, representam dos valores dos índices antes da ocorrência do fogo e os *boxplots* em verde representam os valores dos índices pós fogo. A linha central representa as medianas, enquanto que a caixa do *boxplot* representa os valores no primeiro e o terceiro quartil, e as linhas os valores máximos não discrepantes. Os pontos são valores discrepantes. Através da Figura 4 observa-se uma maior sobreposição dos dados da cena do Jalapão (4b), em relação à cena da Bacia do Rio São Francisco (4a).

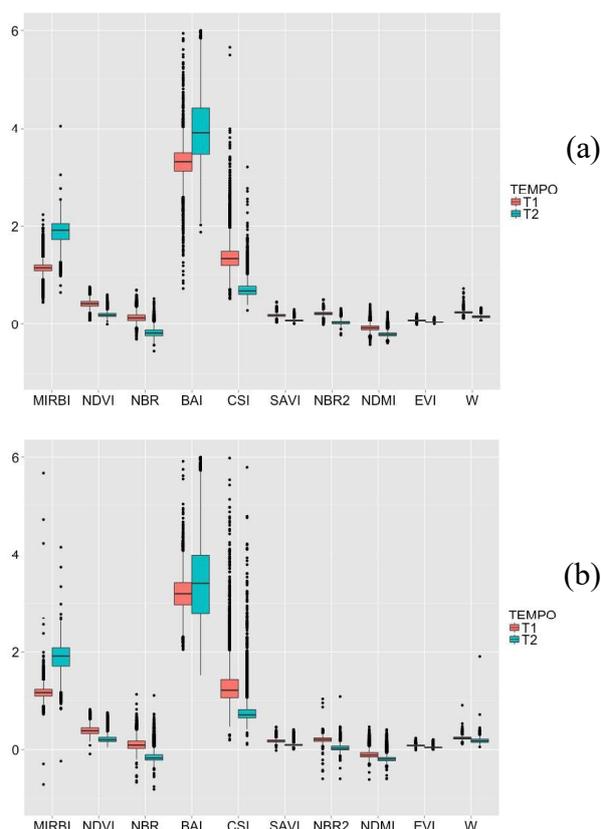


Fig. 4 - *Boxplot* dos valores pré (vermelho) e pós-fogo (verde) dos índices espectrais: (a) Bacia do Rio São Francisco (cena 291/70) e (b) Jalapão (cena 221/67). O eixo y representa os valores dos índices espectrais definidos no eixo x.

As sobreposições dos *boxplot* apresentados na Figura 4 podem ser quantificadas pelo índice M, uma vez que este índice mede a sobreposição dos valores de um histograma de frequência do objeto de interesse, com diferentes alvos. A Tabela 4 mostra os valores do índice M para cada índice espectral nas cenas da Bacia do Rio São Francisco (219/70) e Jalapão (221/67). Verifica-se que, para cada índice, quanto maior a sobreposição dos *boxplots*, menor o valor do índice de separabilidade M.

A cena da Bacia do Rio São Francisco (219/70) apresentou maiores valores do índice M, quando comparado com o Jalapão (221/67), apesar da vegetação e o uso do solo serem semelhantes nas duas cenas. Neste caso, a análise de 32 dias mostra-se menos eficiente na separabilidade dos dados, sendo ideal um intervalo menor para evitar a dispersão do sinal espectral da queimada. Porém esta escolha é diretamente dependente da cobertura de nuvens nas imagens.

Tabela 4: Índice M de separabilidade calculado para cada índice espectral

CENA TM	219/70	221/67
ÍNDICES ESPECTRAIS	ÍNDICE M	
MIRBI	1,67	1,39
NDVI	1,67	1,02
NBR	1,67	1,03
NBR2	2,03	1,43
BAI	0,60	0,20
CSI	1,40	0,59
SAVI	1,74	1,15
NDMI	1,04	0,53
EVI	1,60	1,05
W	1,50	0,61

De acordo com a Tabela 4:

- Os índices espectrais na região da Bacia do Rio São Francisco tiveram melhor separabilidade que os índices espectrais na região do Jalapão.
- Os índices espectrais que utilizam as bandas do infravermelho de ondas curtas (NBR2, MIRBI,) apresentam melhor separabilidade para as duas cenas.
- Os índices NBR, NDVI, SAVI e EVI

apresentam valores intermediários para as duas cenas, quando comparado aos outros índices.

- Os índices CSI, NDMI e W, apresentaram uma separabilidade alta para a região da Bacia do Rio São Francisco, porém, baixa separabilidade para a região do Jalapão..
- O índice espectral BAI apresentou separabilidade fraca para ambas as cenas, não permitindo a separação de pixels queimados e não queimados.

MELCHIORI *et al.* (2015), realizaram um estudo comparativo dos índices espectrais na cena 221/67, e os índices NBR2, NDVI e W apresentaram melhores resultados quando comparado aos outros índices. O MIRBI, apesar de resultados satisfatórios, teve valores abaixo de índices como o NDVI e o W. A análise realizada no referido estudo, corresponde ao mesmo período deste trabalho, porém, avalia os índices em um intervalo de 16 dias.

PEREIRA *et al.* (2015), avaliaram índices espectrais para a cena 219/71, localizada ao Sul da cena 219/70, para o ano de 2007 e um intervalo de 32 dias. Os índices espectrais com maior separabilidade foram aqueles calculados com os canais espectrais do infravermelho de ondas curtas, semelhante aos resultados encontrados neste estudo, o que sugere que são os índices mais indicados para esta região, considerando um intervalo de 32 dias.

O BAI apresentou o pior resultado para as duas cenas analisadas. Assim como esse estudo, SMITH *et al.* (2007) não encontram bons resultados utilizando o índice BAI na discriminação de queimadas em Savanas africanas. O baixo desempenho do índice BAI pode ser explicado pelas diferenças características entre a vegetação do Cerrado, e das Savanas africanas, e a vegetação dos países situados na região mediterrânea da Europa, onde o estudo de CHUVIECO *et al.* (2002) foi desenvolvido.

O índice MIRBI foi desenvolvido por TRIGG *et al.* (2001) que avaliaram o espaço espectral das queimadas e a separabilidade de não queimadas em uma região da Savanas africana. Nesse mesmo trabalho, os autores apresentaram melhores resultados da discriminação de queimadas no espaço bi espectral na faixa do infravermelho de ondas curtas (bandas 5 e 7)

assim como os resultados obtidos.

PEREIRA *et al.* (1999) apontaram que existem divergências na literatura sobre as propriedades espectrais de áreas queimadas. Segundo os autores, a maioria dos trabalhos indica que o período de tempo entre a ocorrência de incêndios e aquisição das imagens pode interferir nas propriedades espectrais. Os autores consideram ainda que as diferenças específicas dos biomas também interferem na relação da dinâmica espectral pós-incêndio.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise sobre o potencial de diferentes índices espectrais na discriminação entre áreas queimadas e não queimadas em duas regiões do Cerrado brasileiro utilizando dados do sensor TM-Landsat. Apesar das diferenças dos valores do índice M nas áreas deste estudo, verificou-se que em ambas as áreas, os índices espectrais que obtiveram maior capacidade de diferenciar queimadas de outros alvos são aqueles que utilizam as bandas do infravermelho de onda curta (banda 5 e banda 7). Dentre estes, os índices MIRBI e NBR2 apresentaram melhor capacidade de diferenciar queimadas de diferentes alvos.

A região da Bacia do Rio São Francisco apresentou alta separabilidade na maioria dos índices espectrais analisados. Isto sugere que o intervalo de 32 dias não altera o sinal espectral das queimadas nesta área, ao contrário da região do Jalapão, onde parece haver uma atenuação acentuada do sinal espectral das queimadas no intervalo de tempo analisado.

Os índices CSI, NDMI e W, apesar de apresentarem boa separabilidade para a Bacia do Rio São Francisco, não obtiveram bons resultados na região do Jalapão. A perda do sinal espectral das queimadas e conseqüentemente a exposição dos solos no Jalapão, interferiu diretamente nestes resultados.

O índice espectral BAI apresentou separabilidade fraca para ambas as cenas, não permitindo a separação de pixels queimados e não queimados, sendo o menos indicado para mapeamento de áreas queimadas nessas áreas.

Sugerem-se trabalhos futuros que abordem essa metodologia, porém, em diferentes intervalos de tempo entre a aquisição das imagens, e em diferentes áreas do Cerrado, para comparação

com os resultados desse trabalho. As análises em diferentes intervalos de tempo permitem verificar por quanto tempo o sinal espectral das queimadas fica evidenciado. A análise para outras áreas permitirá examinar de maneira ampla a influência da cobertura vegetal na variabilidade das características espectrais das áreas queimadas.

A disponibilidade de informações detalhadas e atualizadas sobre as distribuições espaciais (localização e extensão) e temporais das áreas queimadas no Brasil é atualmente crucial, não só para a melhor gestão dos recursos naturais, mas também para estudos de química da atmosfera e de mudanças climáticas. O aprofundamento das investigações científicas em estudos sobre a quantificação das áreas queimadas a partir de informações de satélites, bem como a melhor precisão destas estimativas, como proposto no presente trabalho permitirá não só melhorar as incertezas no cálculo de emissão e dispersão de poluentes gerados pela queima da vegetação mais também contribuir para uma melhor avaliação dos impactos da emissão de queimadas nos cenários futuros das alterações climáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPQ pela bolsa de doutorado sanduíche do primeiro autor, processo número 215158/2014-8, à CAPES pela bolsa de doutorado do primeiro autor (Programa de Formação Doutoral Docente do IFSULDEMINAS) e pela bolsa de mestrado do segundo autor (Programa Pós Graduação em Meteorologia/UFRJ). Este trabalho foi financiado pelo Projeto 'BRazilian Fire-Land-Atmosphere System' (BrFLAS), com recursos FAPESP-FCT (referência 2015/01389-4) e pelo projeto 'Desenvolvimento de mapas de áreas queimadas no Brasil utilizando dados diários do sensor PROBA-V', no âmbito do Programa Ciência sem Fronteiras CNPQ (referência 407459/2013-8).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M. Biomass Burning in the Tropics: Impact on Environmental Quality and Global Climate. **Resources, Environment, and Population: Present Knowledge, Future Options**, 268-291, 1991.

ARAÚJO, F. M.; FERREIRA L.G.; ARANTES A.E. Distribution Patterns of Burned Areas in the Brazilian Biomes: An Analysis Based on Satellite Data for the 2002–2010 Period. **Remote Sensing**, v. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

BASTARRIKA, A.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, P. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1003-1012, 2011.

CARVALHO, L. G.; de OLIVEIRA, M. S.; ALVES, M. C.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; NETO, P. C.; DANTAS, A. A. A. Clima. In: Scolforo, J. R. S.; Carvalho, L. M. T.; Oliveira, A. D. **Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais**. Componente Geofísico e Biótico. Lavras-MG: Editora UFLA, 2008. cap. 4, p. 89-101.

CARVALHO, L.M.T.; SCOLFORO, J.R.S. **Inventário Florestal de Minas Gerais: Monitoramento da flora nativa 2005 – 2007**. Lavras-MG: Editora UFLA, 2008. 357 p.

CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P.; PALACIOS, A. Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 23, p 5103–5110, 2002.

CHUVIECO, E; SANDOW, C; GUENTHER, K. P; GONZÁLEZ-ALONSO, F; PEREIRA, J.M; PÉREZ, O; BRADLEY A.V; SCHULTZ, M; MOUILLOT F; CIAIS, P. GLOBAL BURNED AREA MAPPING FROM EUROPEAN SATELLITES: THE ESA FIRE_CCI PROJECT. In: **XXII ISPRS Congress, 2012, Australia. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012**. Articles, Volume XXXIX-B8, p. 13-16. Disponível em <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIXB8/13/2012/isprsarchives-XXXIX-B8-13-2012.pdf>>. Acesso em 21 set. 2015.

CLAVERIE M.; VERMOTE E.F.; FRANCH B.; MASEK J.G. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. **Remote Sensing of Environment**, v.

30; n.169, p 390-403, 2015.

COUTINHO, L.M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: J.G. GOLDAMMER. **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges**. Berlin, Springer-Verlag. Cap. 6, p.82-103, 1990.

COUTINHO, L.M.; MIRANDA, H.S.; MORAIS, H.C. O Bioma do Cerrado e o fogo I. Caracterização. **Série Ciência Ambiental**, v.20, 1-48, 2002.

EITEN, G. Delimitação do conceito de Cerrado. **Arquivos do Jardim Botânico**, Rio de Janeiro. v 21, p. 125-134, 1977.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: the effect of population and land tenure. **Ambio-Journal of Human Environment Research and Management**, v. 22, n. 8, p. 537-545, 1993.

FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; DIAS, M.A.S.; DIAS, P.L.S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G.A.; RECUERO, F.S. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, v.5(1-2), p.135-167, 2005.

GAO, B.C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, v. 58(3), 257-266, 1996.

GEDNEY, N.; VALDES, P.J. The effect of Amazonian deforestation on the northern hemisphere circulation and climate. **Geophysical Research Letters**, v. 27(19), 3053-3056, 2000.

GUILD, L.S.; KAUFFMAN, J.B.; ELLINGSON, L. J.; CUMMINGS, D.L.; CASTRO, E. A.; BABBITT, R.E.; WARD, D.E. Dynamics associated with total aboveground biomass, C, nutrient pools, and biomass burning of primary forest and pasture in Rondonia, Brazil during SCAR-B. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.103(D24), 32091-32100, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual Técnico de Uso da Terra. Rio de Janeiro, 2013.

JENSEN, J.R.; EPIPHANIO, J.C. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos:

Parêntese, Editora; 2009. 604 p.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p 295-309, 1988.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49(3), 224-234, 1994.

KAUFMAN, Y.J.; REMER, L. Remote sensing of vegetation in the mid-IR: The 3.75 μm channels. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. v 32, p. 672-683, 1994.

KEY, C.H.; BENSON, N.C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. **U.S. Department of the Interior, Northern Rocky Mountain Science Centre**, 1999.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. A conservação do Cerrado. **Megadiversidade**, vol. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

LEVINE, J.S.; COFER, W.R.; CAHOON, D. R.; JR.; WINSTEAD, E.L. Biomass burning: a driver for global change. **Environmental Science and Technology**, v. 29, 120-125, 1995.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.C.; PEREIRA, J.M.C.; PERES, L.F. Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.831 - 843, 2010.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.C.; PEREIRA, J.M.C.; PERES, L.F. On a new coordinate system for improved discrimination of vegetation and burned areas using MIR/NIR information. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1464-1477, 2011.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.C.; PEREIRA, J.M.C.; PERES, L.F. Retrieving Middle-Infrared Reflectance Using Physical and Empirical Approaches: Implications for Burned Area Monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 1, p. 281-294, 2012.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.C.; SETZER, A.W.; MORELLI, F.; MELCHIORI, A.E. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μm MODIS Imagery.

- Remote Sensing**, v. 7, p.15782-15803, 2015.
- LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2007. 908 p.
- LOHMANN, U.; FEICHTER, J. Global indirect aerosol effects: a review. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.5(3), 715-737, 2005.
- MALLINIS, G.; KOUTSIAS, N. Comparing ten classification methods for burned mapping in a Mediterranean environment using Landsat TM satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 14, p. 4408-4433, 2012.
- MARTÍN, M.P.; GÓMEZ, I.; CHUVIECO, E. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. In J. Riva, F. Pérez-Cabello, & E. Chuvieco (Eds.), **Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment** p. 193–198. Paris: Universidad de Zaragoza, GOF-C-GOLD, EARSeL. 2005.
- MATTAR C; SANTAMARIA-ARTIGAS A; DURÁN-ALARCÓN, C. Estimation del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. **Revista de Teledetección**, v. 38, n. 1, p. 36-50, 2012.
- MELCHIORI, A. E.; CÂNDIDO, P. A.; LIBONATI, R.; MORELLI, F.; SETZER, A.; JESUS, S. C.; FONSECA, L. M. G.; KORTING, T. S. Spectral indices and multi-temporal change image detection algorithms for burned area extraction in the Brazilian Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 643-650.
- MOUILLOT, F.; FIELD, C. B. Fire history and the global carbon budget: a 1 × 1 fire history reconstruction for the 20th century. **Global Change Biology**, v.11(3), 398-420, 2005.
- MYERS, N.; MITTERMEYER, R.; MITTERMEYER, C. G.; FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4(10), 957, 1991.
- NUNES, Y. R. F.; FAGUNDES, M. Fenologia e germinação de sementes de dez espécies arbóreas da Reserva da Copasa. **Relatório Técnico Final**. Juramento, Minas Gerais. Universidade Estadual de Montes Claros, 2006. 110 p.
- O'BRIEN, K. L. Tropical deforestation and climate change. **Progress in Physical Geography**, v. 20(3), 311 -332, 1996.
- PEREIRA, A.A.; DE CARVALHO, L.M.T.; LIBONATI, R.; JÚNIOR, F.W.A.; MORELLI, F. Avaliação de nove índices espectrais quanto a separabilidade entre queimadas e diferentes alvos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais... São José dos Campos: INPE, 2015**. p. 3105-3012.
- PEREIRA, J.M.C.; CHUVIECO, E.; BEAUNDOIN, A.; DESBOIS, N. Remote sensing of burned areas: a review. In: CHUVIECO, E.; Ed. A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires. Alcalá de Henares, 127-183pp., 1997.
- PEREIRA, J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n. 1. p. 217–226. 1999.
- PIVELLO, V. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. **Fire Ecology**, v.7, 24–39, 2011.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y E; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2012. 160 p.
- RAMASWAMY, V.; BOUCHER, O.; HAIGH, J.; HAUGLUSTAINE, D.; HAYWOOD, J.; MYHRE, G.; NAKAJIMA, T.; SHI, G.Y.; SOLOMON, S.: Radiative Forcing of Climate Change, in: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Editado por: J. T. HOUGHTON, Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL, e C.A. JOHNSON, pp. 349–416, **Cambridge Univ. Press**, New York, 2001.

- ROUSE, J.W; HAAS, R.H; SCHELL, J.A; DEERING, D.W. **Third ERTS Symposium, 1973**. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA, v. I, p. 309-317.
- SANTOS, R.P.; CREMA, A.; SZMUCHROWSKI, M.A.; ASANO, K.; KAWAGUCHI, M. Atlas do corredor ecológico da região do Jalapão. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**, 2011, 54 p.
- SCHOLES, R.J. Greenhouse gas emissions from vegetation fires in Southern Africa. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.38, 169-179, 1995.
- SELLERS, P.J.; HALL, F.G.; MARGOLLS, H.; KELLY, B.; BALDOCCHI, D.; DEN HARTOG, J.; CIHLAR, J.; RYAN, M.; GOODISON, B.; CRILL, P.; RANSON, J.; LETTERNMAIER, D.; WICKLAND, D.E. The Boreal Ecosystem – Atmosphere Study (BOREAS): an overview and early results from 1994 field year. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.76, 1549-1577, 1995.
- SMITH, A.M.S.; DRAKE, N.A.; WOOSTER, M.J.; HUDAK, A.T.; HOLDEN, Z.A.; GIBBONS, C.J. Production of Landsat ETM+ Reference Imagery of Burned Areas within Southern African Savannahs: Comparison of Methods and Application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12. p. 2753-2775. 2007.
- STROPPIANA, D; BORDOGNA; G; CARRARA, P; BOSCHETTI, M; BOSCHETTI, L; BRIVIO; P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. **ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**; v. 69. n. 1. p. 88–102, 2012.
- SWAIN, P. H.; KING, R. C. Two effective feature selection criteria for multispectral remote sensing. West Lafayette, Laboratory for Applications of **Remote Sensing, Purdue Univ., 1973**. (LARS information note 042673).
- TRIGG, S.; FLASSE, S. An Evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. **International Journal of Remote Sensing**. v. 22, n. 13, p. 3161–3168. 2001.
- VERAVERBEKE, S.; HARRIS, S.; HOOK, S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10. p. 2702–2709, 2011.
- VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277(5325), 494-499, 1997.
- WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado: síntese terminológica e relações florísticas, 2006. 389f. **Tese** (Doutorado em Ecologia) Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- WHITE, K.; WALDEN, J.; DRAKE, N.; ECKARDT, F.E; SETTLE, J. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, 30-39, 1997.