

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/7: 1397-1409
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

IDENTIFICAÇÃO DE DESMATAMENTOS NO CERRADO UTILIZANDO TÉCNICAS DE DIFERENÇA DE IMAGENS E ÍNDICE DE QUEIMADA POR DIFERENÇA NORMALIZADA

*Identifying Deforestation in the Brazilian Cerrado Using the Image Difference
Technique and Normalized Burn Ratio*

Andreza Gondin Barroso¹, Edson Eyji Sano^{1,2} & Daniel Moraes de Freitas³

¹Universidade de Brasília - UnB

Instituto de Geociências – IG/ Instituto Central de Ciências - ICC
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte - 70910-000 - Brasília-DF, Brasil
andrezabcerrado@gmail.com, edson.sano@gmail.com

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Embrapa Cerrados
BR-020 km 18, CEP: 73301-970, Planaltina-DF, Brasil
edson.sano@embrapa.br

³Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA

Centro de Sensoriamento Remoto – CSR
SCEN Av. L4 Norte Ed. Sede do IBAMA, Bloco F CEP: 70818-900, Brasília-DF, Brasil
daniel.freitas@ibama.gov.br

*Recebido em 13 de Fevereiro, 2017/ Aceito em 24 de Agosto, 2017
Received on February 13, 2017/ Accepted on August 24, 2017*

RESUMO

No Brasil, sistemas de alerta de desmatamentos por corte raso foram desenvolvidos apenas para a Amazônia, embora, ‘nos últimos anos, o bioma Cerrado tem-se destacado por suas altas taxas de ocupação humana, principalmente para produção de grãos e carne bovina. Em comparação com a Amazônia, o Cerrado apresenta dificuldades adicionais devido à presença de três formações vegetacionais (campestre, savânica e florestal) e à influência da distinta sazonalidade climática. O objetivo desse estudo é analisar o potencial das técnicas de diferença de imagens e do índice de queimada por diferença normalizada (NBR) em cenas do satélite Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) para produzir indicadores de desmatamentos no bioma Cerrado. A área de estudo selecionada foi a região oeste da Bahia, uma das fronteiras agrícolas mais importantes do país. Foram selecionadas duas cenas (órbita = 220; ponto = 68) de 26 de agosto de 2014 e de 29 de agosto de 2015. Foi utilizado o algoritmo diferença de imagens (image difference) disponível no programa Erdas Imagine 2014. Essa técnica foi complementada com o NBR para discriminar áreas desmatadas de áreas queimadas. A técnica de diferença de imagens utilizando a banda 7 do Landsat-8 e um limiar de 5% permitiu a identificação de 286 polígonos na área de estudo, correspondendo a áreas desmatadas ou a áreas queimadas. O NBR permitiu eliminar 108 desses polígonos, classificados como queimada após a inspeção visual de composições coloridas RGB/564. A análise de acurácia com base em imagens do Sentinel-2A indicou erros de omissão e comissão inferiores a 5%. O método de diferença de imagens seguida da técnica de NBR possui alto potencial para identificar, de forma rápida, eficiente e operacional, indicadores de desmatamentos no bioma Cerrado para subsidiar campanhas de combate a desmatamentos ilegais no Cerrado.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Monitoramento Ambiental, Limiar de Detecção, Oeste da Bahia, NBR.

ABSTRACT

In Brazil, clear-cut deforestation detection systems were developed only for the Amazon, although, in recent years, the Cerrado biome has been highlighted for its high rates of human occupation, mainly for grain and beef production. Compared with the Amazon, the Cerrado presents additional difficulties due to the presence of three types of vegetation formations (grasslands, shrublands and forestlands) and also because of the marked influence of the climatic seasonality. The objective of this study is to analyze the potential of the image difference and normalized burn ratio (NBR) techniques applied to the Landsat-8 satellite images to produce indicatives of deforestation in the Cerrado biome. The study area was the western region of Bahia, one of the most important agricultural frontiers of the country. Two Landsat-8 scenes (path = 220; row = 68) from August 26, 2014 and from August 29, 2015 were selected. The image difference algorithm available in the Erdas Imagine 2014 software package was used. This technique was complemented with the NBR to discriminate between deforested areas and burned areas. The image difference technique based on band 7 of Landsat-8 and a threshold of 5% identified 286 polygons in the study area, corresponding to either deforested or burned area. The NBR allowed the exclusion of 108 polygons classified as burned areas, according to the visual inspection of RGB/564 color composites. Accuracy analysis based on Sentinel-2A images indicated omission and commission errors below 5%. Results of this research indicated that the image difference and the NBR procedures has high potential to identify, quickly, efficiently and in an operating mode, indicatives of deforestation in the Cerrado biome to subsidize field campaigns to combat illegal deforestations.

Keywords: Remote Sensing, Environmental Monitoring, Change Detection Threshold, Western Bahia, NBR.

1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado ocupa uma área de 2.036.448 km², o que representa 24% do território nacional, e abrange totalmente o Distrito Federal e parcialmente 11 estados: Goiás (97%), Tocantins (91%), Piauí (37%), Maranhão (64%), Mato Grosso do Sul (61%), Minas Gerais (57%), Mato Grosso (40%), São Paulo (33%), Bahia (27%), Paraná (2%) e Rondônia (0,2%) (IBGE, 2004). Por se estender desde os estados de São Paulo e Paraná até o litoral maranhense, o Cerrado possui uma variação de aproximadamente 22,4 graus de latitude e 1.800 metros de altitude (SANO *et al.*, 2008). O Cerrado apresenta forte sazonalidade climática, com duas estações bem definidas, uma seca, de maio a setembro e outra chuvosa, de outubro a abril (OLIVEIRA-FILHO & RATTER, 2002). A vegetação do bioma Cerrado é tipicamente composta por um mosaico de formações florestais, savânicas e campestres (RIBEIRO & WALTER, 2008).

Nos últimos 35 anos, o Cerrado tem sofrido impactos humanos significativos, sendo que mais da metade da sua cobertura vegetal original foi transformada em pastagens, culturas agrícolas e outros tipos de usos (KLINK & MACHADO, 2005). Os avanços tecnológicos da produção agropecuária, junto com o clima, topografia e solos favoráveis, fizeram do Cerrado uma região com grande potencial de

expansão agrícola (AGROSATÉLITE, 2015). Grandes plantios de monoculturas como soja, milho, feijão, algodão, café e cana-de-açúcar predominam em regiões como Luís Eduardo Magalhães na Bahia, Jataí e Rio Verde em Goiás e Lucas do Rio Verde e Sorriso no Mato Grosso (SANO *et al.*, 2008). A extensa produção de grãos e pastagens cultivadas representa grandes desafios para a sustentabilidade ambiental, em função da mecanização exigida e uso intensivo de agrotóxicos (SILVA *et al.*, 2006).

Apesar da forte ameaça de desmatamento, existem poucas tentativas de monitoramento da degradação do Cerrado, o que torna necessário o desenvolvimento de um sistema de monitoramento sistemático e operacional para o bioma, possibilitando subsidiar as atividades de fiscalização de desmatamentos ilegais no campo (SILVA *et al.*, 2010; BAYMA & SANO, 2015). A ausência de um sistema de monitoramento do Cerrado é justificada por uma série de fatores tais como a grande extensão do bioma, acentuada sazonalidade climática, existência de diferentes fitofisionomias, bem como o elevado índice de cobertura de nuvens na estação chuvosa (SANO *et al.*, 2010).

Outro obstáculo para o desenvolvimento de um monitoramento sistemático para o Cerrado é a carência de mapas periódicos de uso e cobertura de terras que permitam descrever com exatidão a realidade do bioma,

junto com técnicas para detecção de mudanças na paisagem, permitindo a contabilização das áreas naturais que foram alteradas ao longo do tempo (FERREIRA *et al.*, 2009). Dentro desse contexto e visando promover subsídios para o monitoramento sistemático e periódico do bioma, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) coordenou um projeto de mapeamento de uso e cobertura de terras intitulado TerraClass Cerrado (MMA, 2015). Nesse projeto, foi disponibilizado o mapeamento do uso da terra e da cobertura vegetal do bioma por meio de imagens Landsat-8 OLI do ano de 2013. A expectativa é a de que esse mapeamento sirva de base para outros projetos sistemáticos de monitoramento do desmatamento do Cerrado.

Na Amazônia, o monitoramento do desmatamento é realizado através dos sistemas de detecção de desmatamentos denominados Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER) (SHIMABUKURO *et al.*, 2006) e Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) (CÂMARA *et al.*, 2006), desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As estimativas da taxa de desmatamento da Amazônia Legal por corte raso geradas pelo PRODES baseiam-se no mapeamento anual de um grande conjunto de imagens do satélite Landsat ou similares, processadas pela técnica de modelo linear de mistura espectral e, em seguida, interpretadas visualmente para extração de polígonos de desmatamento por corte raso.

A transferência de metodologia do PRODES para o Cerrado apresenta duas grandes limitações: sazonalidade climática acentuada do Cerrado, que dificulta a interpretação de imagens obtidas em épocas diferentes do ano e a existência de três formações vegetacionais. O PRODES foi desenvolvido para coberturas florestais, possuindo limitações para formações savânicas e principalmente formações campestres (BAYMA & SANO, 2015). Portanto, novas técnicas de processamento digital de imagens e novas opções de sensores imageadores precisam ser testadas para desenvolver um sistema operacional de monitoramento de desmatamento no Cerrado.

Dentro desse contexto, o objetivo desse estudo é analisar o potencial das técnicas de

diferença de imagens e de índice de queimada por diferença normalizada (NBR – normalized burn ratio) aplicadas nas cenas do satélite Landsat-8 para produzir indicativos de desmatamentos no bioma Cerrado. A finalidade básica desse estudo consiste em subsidiar atividades de fiscalização de desmatamentos ilegais no campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo foi baseado na análise de duas cenas do satélite Landsat-8 da época seca do oeste da Bahia, espaçadas em um intervalo de tempo de aproximadamente um ano. Ambas as cenas foram obtidas da página eletrônica do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), já convertidas para reflectância de superfície. Para estimar a acurácia dos resultados obtidos com as imagens do Landsat-8, foram selecionadas nove cenas do satélite Sentinel-2A. Detalhes sobre o processamento e análise dessas imagens, bem como a descrição das características da área de estudo são apresentados a seguir.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo situa-se no oeste da Bahia, mais especificamente, na área de aproximadamente 185 quilômetros por 185 quilômetros, coberta pela cena do satélite Landsat-8 com órbita = 220 e ponto = 68 (Figura 1).

O oeste da Bahia corresponde a uma área representativa da ocupação agrícola do bioma Cerrado, cujo marco para a expansão agrícola começou no início da década de 1980 (BRANNSTROM *et al.*, 2008; MENKE *et al.*, 2009; SANO & PINHATI, 2009). Um dos principais fatores para a supressão da vegetação nativa nessa região é o seu relevo plano (chapadões) e precipitação suficiente para o desenvolvimento de agricultura de sequeiro, a despeito dos solos pobres em nutrientes e predominantemente ácidos. O processo de ocupação agrícola nessa área foi acelerado no final da década de 1990 e início do século XXI.

No período entre 2008 e 2009, de acordo com o relatório publicado pelo MMA (2011), dentre os cinco municípios que mais desmataram o Cerrado, quatro deles localizavam-se no oeste da Bahia: Formosa do Rio Preto, Jaborandi, Correntina e São Desidério. De acordo com a Portaria publicada no Diário Oficial da União de 22 de março de 2012, esses municípios,

mais os de Barreiras, Cocos, Luís Eduardo Magalhães e Riachão das Neves, tornaram-se alvos de medidas e ações prioritárias de monitoramento e controle do desmatamento

ilegal, ordenamento territorial e incentivo às atividades econômicas ambientalmente sustentáveis, além de manutenção de áreas nativas e recuperação de áreas degradadas.

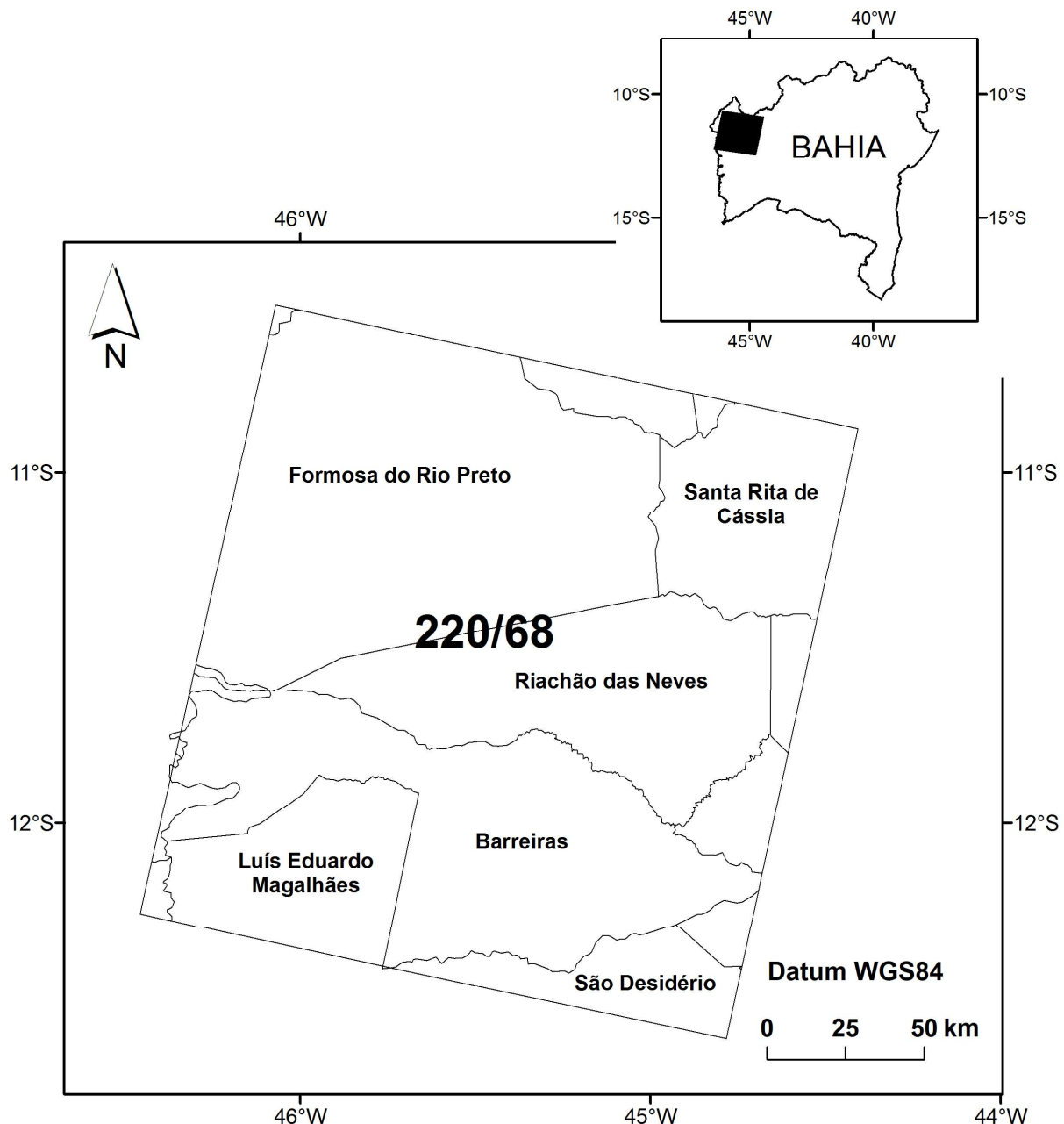


Fig. 1 – Localização da área de estudo no oeste da Bahia e que corresponde à região coberta pela cena do Landsat-8 definida pela órbita 220 e ponto 68 no sistema de referência mundial da série Landsat.

2.2 Materiais

Foram selecionadas duas cenas do satélite Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) de 25 de agosto de 2014 e 29 de agosto de 2015 (órbita = 220; ponto = 68). Esse satélite opera com uma resolução espacial de 30 metros (bandas 1 a 7 e 9), 15 metros (banda 8, modo pancromático) ou 100 metros (bandas termais

10 e 11) e periodicidade de 16 dias (ROY *et al.*, 2014). As cenas ortoretificadas e convertidas em reflectância de superfície (Landsat-8 surface reflectance) das bandas 2 a 7 (Tabela 1) foram obtidas da página eletrônica Earth Explorer do USGS, em sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum WGS84 e fuso UTM = 23.

Tabela 1: Bandas espectrais do satélite Landsat-8 OLI

Banda Espectral	Faixa Espectral	Comprimento de Onda (μm)
B1	Aerosol costal	0,43 – 0,45
B2	Azul	0,45 – 0,51
B3	Verde	0,53 – 0,59
B4	Vermelho	0,64 – 0,67
B5	Infravermelho próximo	0,85 – 0,88
B6	Infravermelho médio	1,57 – 1,65
B7	Infravermelho médio	2,11 – 2,29
B8	Pancromático	0,50 – 0,68
B9	Cirrus	1,36 – 1,38
B10	Infravermelho termal	10,60 – 11,19
B11	Infravermelho termal	11,50 – 12,51

Foram selecionadas ainda nove cenas do satélite Sentinel-2A de 2016 necessárias para cobrir a área de estudo considerada. Essas imagens foram mosaicadas e utilizadas para a etapa de análise da acurácia. O satélite óptico e multiespectral Sentinel-2A foi lançado em 23 de junho de 2015 e opera com uma constelação de dois satélites, 13 bandas nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, periodicidade de cinco dias para visada a nadir e resolução espacial de 10, 20 e 60 metros, dependendo da banda nas faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo e médio (DRUSCH *et al.*, 2012). As datas das imagens corresponderam a 20 de fevereiro e 19 de julho de 2016.

Com relação a dados vetoriais, foi utilizado o mapa de uso e cobertura de terras do Cerrado que foi produzido pelo projeto TerraClass Cerrado (MMA, 2015). Nesse projeto, cenas do satélite Landsat-8 de 2013 foram processadas pela técnica de segmentação de imagens por

crescimento de regiões, com área mínima de mapeamento de 6,25 hectares. Em seguida, os segmentos foram exportados para formato shapefile e interpretados visualmente, tendo, como base, a seguinte legenda: cobertura vegetal natural (formações florestais, formações não-florestais e áreas naturais não vegetadas); cobertura vegetal antrópica (culturas agrícolas, pastagens cultivadas, reflorestamento, áreas urbanas, áreas de mineração, solo exposto e mosaico de ocupações); e não-observado (nuvens; sombras de nuvens e queimada).

2.3 Abordagem Metodológica

Os valores de reflectância de superfície do Landsat-8 das bandas 2 a 7, disponibilizados originalmente na escala de 0 a 10.000, foram divididos por um fator de multiplicação igual a 0,0001 por meio da função *band math*, disponível no programa ENVI 5.0, para que os valores de reflectância fossem re-escalados para o intervalo de 0 a 1. Esses dados de reflectância são gerados a partir do Landsat Surface Reflectance Code (LaSRC) que utiliza a banda de aerossol costeira para realizar testes de inversão de aerossóis, os dados de atmosfera do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e um modelo de transferência radiativa específico, além de um algoritmo de correção do ângulo solar.

As cenas foram normalizadas radiometricamente por meio das extensões *iMAD* (Iteratively Reweighted Multivariate Alteration Detection) e *radcal*, escritas na linguagem IDL (NIELSEN, 2007; CANTY & NIELSEN, 2008), dentro do ambiente de trabalho do programa ENVI 5.0. As duas cenas foram recortadas nas bordas para que as áreas úteis fossem coincidentes.

Em seguida, foram identificadas 12 áreas (regiões de interesse – ROIs) de vegetação natural na imagem de 2014 e que apareceram desmatadas na imagem de 2015, nos municípios de Barreiras, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães e Riachão das Neves. Essas regiões foram selecionadas por meio de análise visual de composições coloridas RGB/564. Médias aritméticas simples de valores de reflectância nas duas cenas foram comparadas banda a banda para a definição dos parâmetros de entrada do algoritmo diferença de imagens.

Foi utilizada a técnica de diferença de imagens (image difference) disponível no programa Erdas Imagine 2014. Trata-se de uma técnica simples na sua formulação matemática e que já vem sendo utilizada desde 1989 (e.g., SINGH, 1989). Ela envolve a subtração de duas imagens obtidas em datas diferentes, resultando em valores positivos e negativos quando há mudanças na paisagem ou valores nulos quando não há mudanças. Nesse algoritmo, o usuário precisa selecionar a banda que vai ser utilizada, além do limiar de mudança. Segundo Jensen (2005), a definição desse limiar é a etapa mais crítica desse procedimento e precisa ser bastante criteriosa.

Nesse estudo, a escolha da banda foi baseada na diferença entre valores médios de reflectância na cena de 2015 e correspondentes valores médios de reflectância na cena de 2014, nos 12 ROIs anteriormente selecionados. Aqui, a premissa foi a de que quanto maior a diferença, maior a capacidade de discriminar áreas de desmatamento. Na Figura 2 são mostradas as principais etapas metodológicas desse estudo.

Para a definição do limiar, foram testadas quatro porcentagens: 3, 5, 7 e 10%. Um limiar de 3% significa que pixels com valores de reflectância na imagem mais recente que forem superiores ou inferiores em 97% dos correspondentes valores na imagem mais antiga serão classificados como mudança detectada (Figura 3). Pixels com valores de reflectância menores na cena mais recente correspondem, por exemplo, a presença de nuvens na cena mais antiga. Pixels com valores de reflectância maiores na cena mais recente correspondem, por exemplo, a desmatamentos. Nesse estudo, foi considerada apenas a situação em que houve aumento nos valores de reflectância para as bandas 2 a 7 na cena mais recente (cena de 2015). O resultado da classificação pelo algoritmo de diferença de imagem foi exportado para o formato shapefile. Em seguida, polígonos com áreas inferiores a 6 hectares foram eliminados das análises subsequentes, pois seis hectares, mais precisamente, 6,25 hectares, é a área mínima de mapeamento que vem sendo utilizada no projeto TerraClass.

Para a execução da técnica de diferença

de imagens, foi considerada uma máscara com áreas antropizadas anteriores a 2014 na área de estudo. Essa máscara foi baseada no mapa de uso e cobertura de terras do Cerrado (TerraClass Cerrado) de 2013 (MMA, 2015), recortada para a área de estudo. Áreas de uso da terra que surgiram no intervalo de 2013-2014 na região de estudo foram extraídas visualmente (escala de visualização na tela de 1:75.000; composição colorida utilizada = RGB/564) por meio da função de digitalização de polígonos, disponível no programa ArcGIS 10.1. Essas áreas foram acrescentadas na máscara de uso de terras do TerraClass Cerrado.

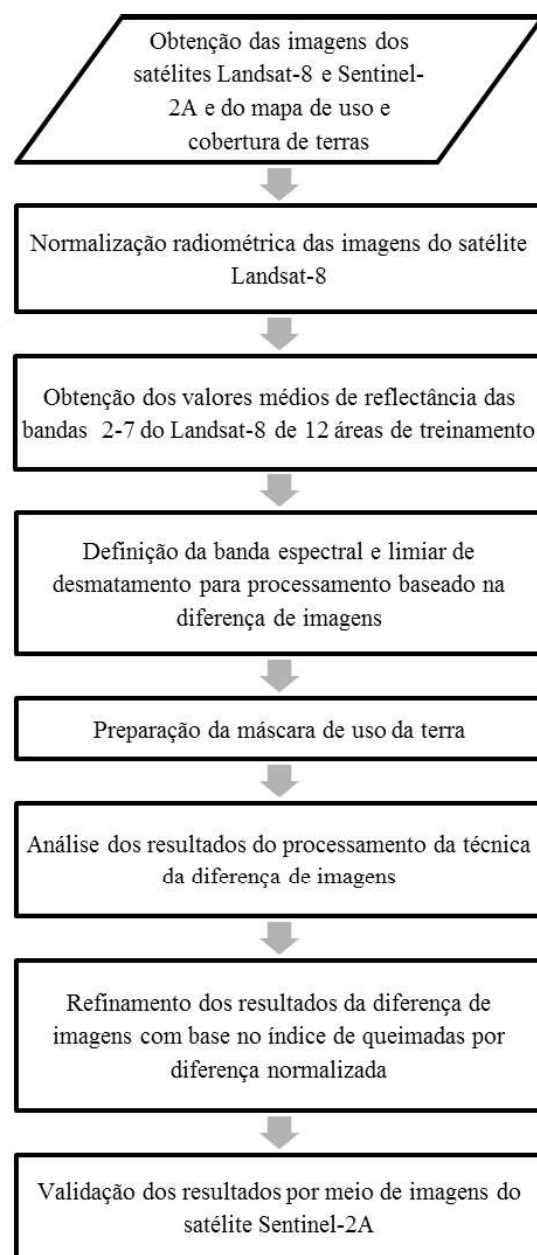


Fig. 2 – Fluxograma das principais etapas de trabalho.

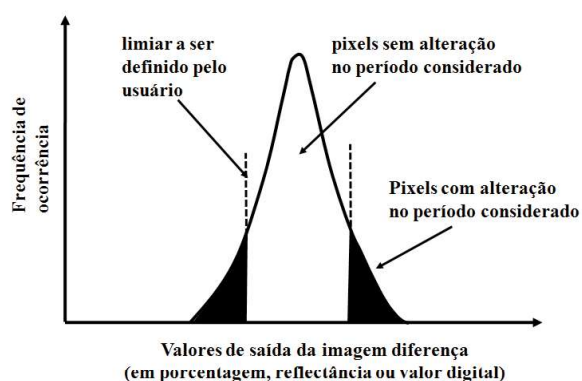


Fig. 3 – Ilustração sobre detecção de mudanças baseado na definição de um limiar. Fonte: adaptado de Jensen (2005).

Valores médios de reflectância para as bandas 2 a 7 do Landsat-8 de cada polígono resultante da diferença de imagem foram obtidos por meio do uso da função ROI Tools, disponível no software ENVI 5.0 e salvos na tabela de atributos do shapefile. Nessa tabela, foram calculados ainda os valores de índice de queimada por diferença normalizada (NBR) (KEY & BENSON, 2006) (Eq. 1):

$$NBR = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVM}} \quad (1)$$

onde ρ_{IVP} corresponde à reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo e ρ_{IVM} à reflectância na faixa espectral do infravermelho médio. Nesse trabalho, foram consideradas as bandas 5 e 7 do Landsat-8 para o cálculo do NBR. O NBR realça áreas de queimadas, as quais, juntamente com áreas desmatadas, são as duas classes espectrais mais representativas da área de estudo e que teoricamente poderiam ser incluídas nos resultados da diferença de imagens.

Para verificação dos erros de comissão (áreas classificadas como desmatamento e que, na realidade, correspondem à outra classe, por exemplo, queimada), todos os polígonos identificados foram inspecionados visualmente, sobrepondo-os na composição colorida RGB das bandas 8, 4 e 2 do mosaico de imagens do Sentinel-2A. Para verificação de erros de omissão, foram sorteados 600 pontos distribuídos aleatoriamente na área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As bandas 2, 4 e 7, com 118,3%, 138,1% e 121,5%, respectivamente (Tabela 2), foram as que apresentaram as porcentagens mais altas de variação nos valores de reflectância. Optou-se por utilizar a banda 7 para executar a detecção de mudanças, pois, dentre essas três bandas, foi a que apresentou, em valores absolutos, a diferença mais alta.

Tabela 2: Valores médios de reflectância e diferenças absoluta e relativa (em porcentagem) nas bandas 2 a 7 do satélite Landsat-8 OLI sobre 12 regiões de interesse localizadas nos municípios baianos de Barreiras, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães e Riachão das Neves e identificadas visualmente como desmatamento nas composições coloridas RGB/564 do Landsat-8

Banda	Reflectância 2014	Reflectância 2015	Diferença (2015 – 2014)	Diferença (%)
2	0,0309	0,0656	0,0347	118,3
3	0,0567	0,1095	0,0528	96,7
4	0,0685	0,1564	0,0879	138,1
5	0,2282	0,2507	0,0225	10,0
6	0,2274	0,3573	0,1299	59,1
7	0,1304	0,2796	0,1492	121,5

A banda 7 do satélite Landsat-8 corresponde ao infravermelho médio do espectro eletromagnético e sua assinatura espectral de pixels com vegetação é determinada pela quantidade de água no solo e nas plantas. A reflectância nessa faixa espectral aumenta para

os solos secos à medida que a concentração de água diminui, uma vez que a água absorve a radiação (FRANÇA & FERREIRA, 2005). Assim, nos casos em que o solo está exposto, como quando ocorre a remoção da vegetação, a assinatura espectral nesta faixa é aumentada.

Entre os diferentes valores de limiar testados, foi definido o limiar de 5%, que identificou com maior precisão os alvos de desmatamentos, reduzindo a confusão com outros alvos, como queimada.

A título de ilustração, são mostrados exemplos de detecções de desmatamento obtidas nesse estudo, por meio de composições coloridas RGB/564 (Figura 4). Nessa composição, o Cerrado natural aparece com um padrão vermelho-escuro (Figura 4a) e a correspondente área desmatada, com padrão verde-azulado

(Figura 4b). A tonalidade vermelho-escuro indica que provavelmente se trata de uma formação savânica (Cerrado típico, de acordo com o sistema de classificação proposto por RIBEIRO & WALTER, 2008). A figura mostra ainda um Cerrado natural (Figura 4c, provavelmente um Cerrado ralo ou Campo sujo por causa do seu padrão mais esverdeado) e a correspondente área queimada, com padrão cinza-escuro (Figura 4d). Queimada foi praticamente o único alvo que se confundiu com desmatamento, conforme detalhado mais adiante.

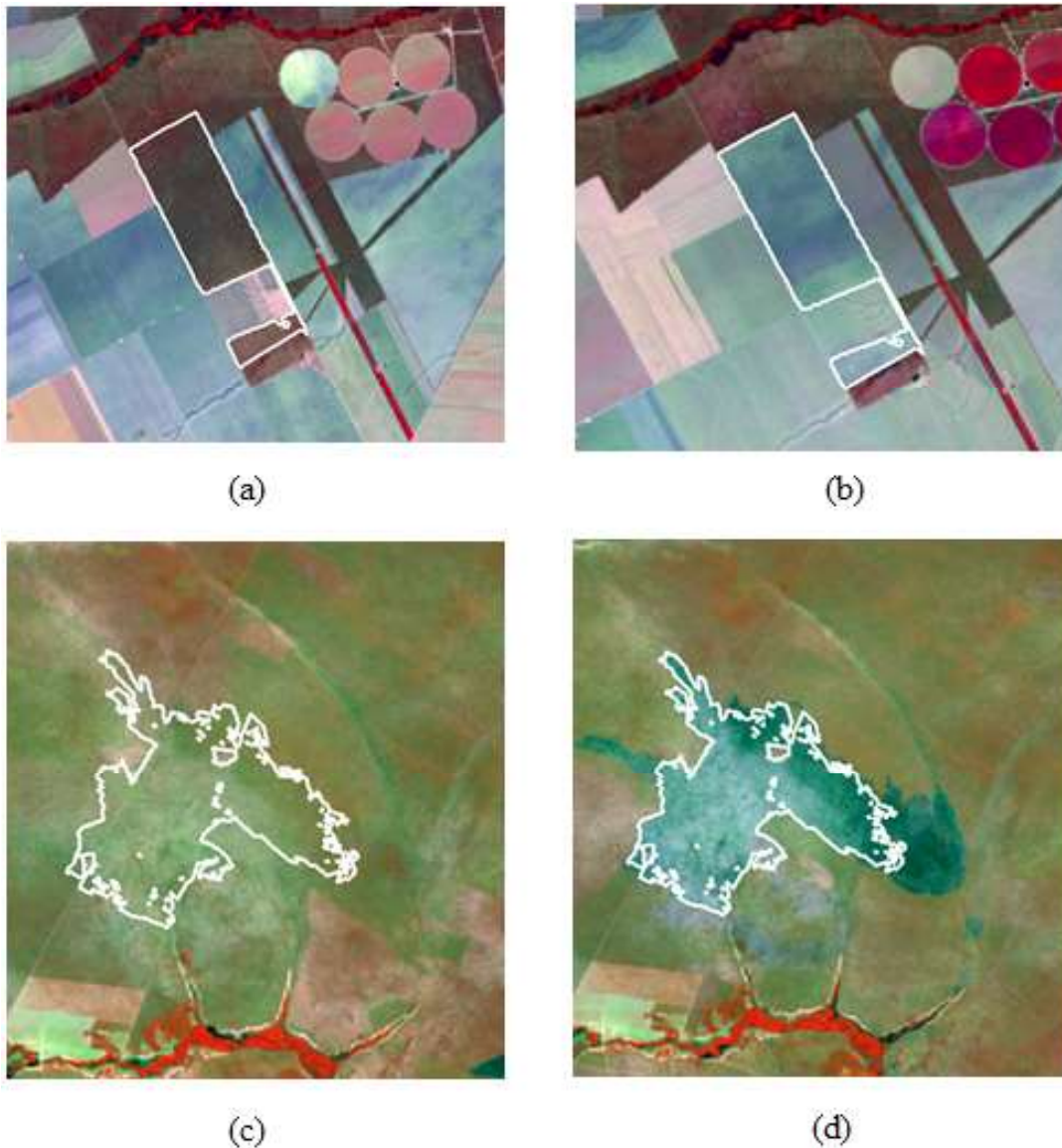


Fig. 4 – Exemplos de composições coloridas RGB/564 mostrando áreas de Cerrado natural em 26 de agosto de 2014 na divisa entre os municípios de Formosa do Rio Preto e Riachão das Neves/Bahia (a) e que aparece desmatada em 29 de agosto de 2015 (b). A figura mostra ainda uma composição colorida com Cerrado natural em 26 de agosto de 2014 no município de Formosa do Rio Preto/Bahia (c) e que aparece queimada em 29 de agosto de 2015 (d). A escala de visualização na tela de computador foi de 1:75.000. A delimitação em cor branca indica os limites dos polígonos detectados pela função de diferença de imagens, disponível no programa Erdas Imagine 2014.

Foram identificados 286 polígonos de alteração pela técnica de diferença de imagens com limiar de 5% na banda 7 do Landsat-8 (Figura 5). Esses polígonos estiveram localizados principalmente nos municípios de Barreiras, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães,

Riachão das Neves, Santa Rita de Cássia e São Desidério. Inspeção visual de composições coloridas RGB/564 mostraram que 178 polígonos corresponderam a áreas de desmatamento por corte raso, enquanto outros 108 polígonos corresponderam a áreas de queimadas.

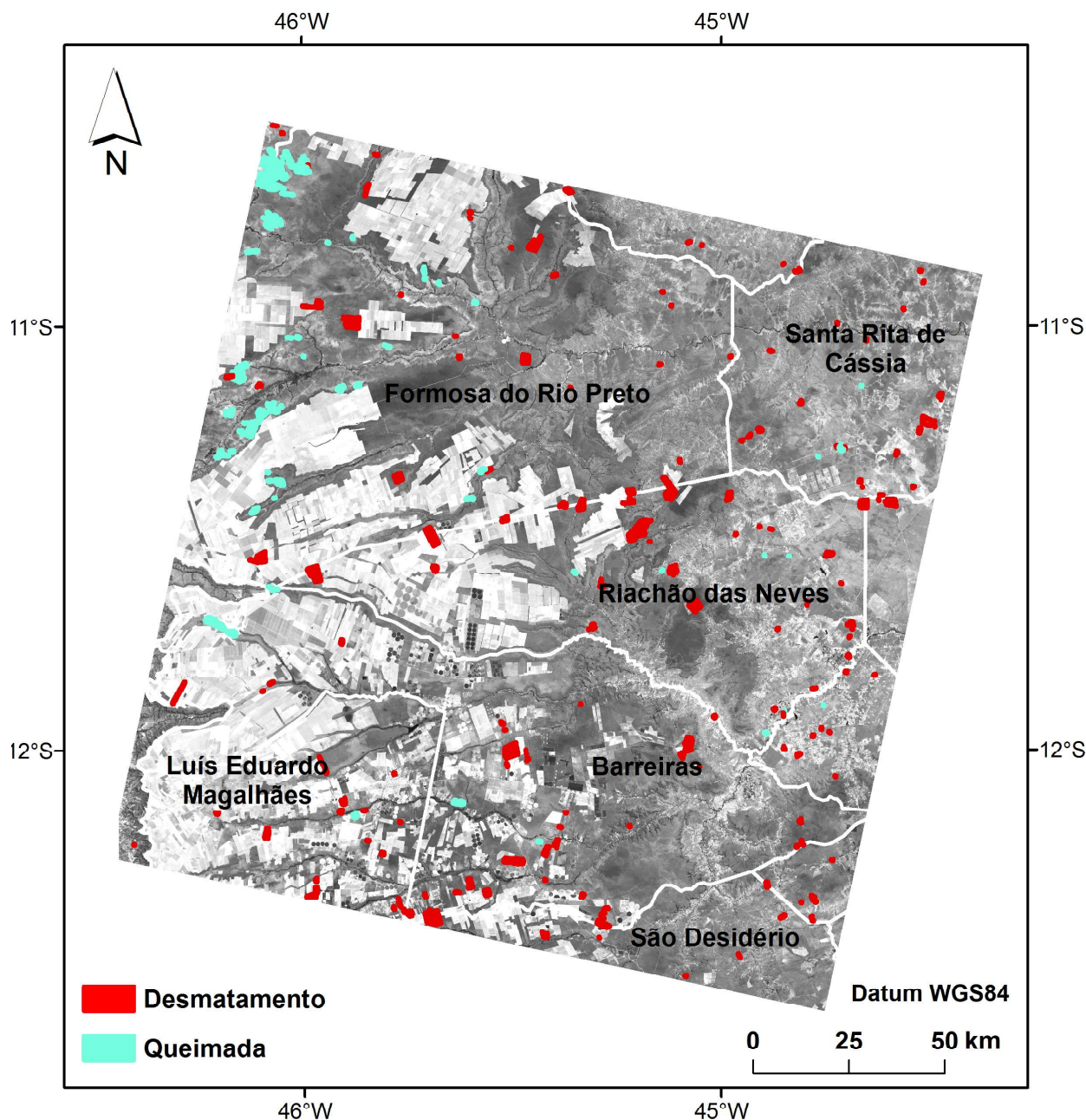


Fig. 5 – Conjunto de 286 polígonos identificados na área de estudo pela técnica de diferença de imagens com limiar de 5% de diferença na banda 7 das cenas do Landsat-8 obtidas em 26 de agosto de 2014 e 29 de agosto de 2015. Imagem de fundo corresponde à banda 7 do Landsat-8 de 29 de agosto de 2015.

A maioria da literatura especializada afirma que cicatrizes de queimada tendem a reduzir os valores de reflectância na faixa óptica do espectro eletromagnético (ANDERSON

et al., 2005; FRANÇA & FERREIRA, 2005) por causa do acúmulo de cinzas e carvões na superfície do solo. De fato, este fenômeno pode ser comprovado na Figura 6, em que há

uma redução nos valores de reflectância para polígonos de queimada, em comparação com os do desmatamento.

No entanto, há uma faixa de sobreposição entre as duas classes em todas as bandas, dificultando a discriminação desses dois alvos. Essa sobreposição é pequena na banda 5, mas bastante acentuada na banda 7. Tal fato ocorre por causa da elevada porcentagem de solo exposto que é deixada em áreas de Cerrado natural que sofrem queimadas, podendo ser confundidas com áreas desmatadas, dependendo do intervalo de tempo entre queimada e passagem do satélite. Segundo Pessoa *et al.* (2015), a rápida remoção de cinzas oriundas de queima completa ou incompleta da biomassa e o acelerado processo de rebrota da vegetação fazem com os indícios de queimada sejam rapidamente atenuados. Quando a queimada é intencional, isto é, quando faz parte do processo de desmatamento e preparo do solo para plantio de grãos, essa confusão é ainda maior, porque geralmente os galhos e troncos são enfileirados aproximadamente a cada 15-20 metros antes de serem queimados.

A técnica de NBR utilizada nesse estudo conseguiu eliminar essa sobreposição. Os valores máximos (média + desvio-padrão) e mínimos (média – desvio-padrão) de NBR para áreas desmatadas variaram entre 0,060 a -0,111, respectivamente e, para áreas queimadas, variaram de -0,116 a -0,255, respectivamente. Portanto, por meio do uso do limiar NBR = -0,115, conseguiu-se discriminar os alvos correspondentes aos desmatamentos dos alvos correspondentes às queimadas.

A área total e a área média dos polígonos detectados e considerados como desmatamento foram de 15.035 hectares e 84 hectares, respectivamente, sendo que o maior deles apresentou área de 1.082 hectares (Figura 7). A classe de desmatamento < 100 hectares, com 145 ocorrências, foi a mais expressiva no período de agosto/2014 a agosto/2015, vindo a seguir, a classe com desmatamentos entre 100 a 200 hectares (13 ocorrências). Os 10 polígonos de maiores áreas corresponderam a 46% dessa área total desmatada, sendo, a princípio, os mais prioritários para fins de fiscalização no campo.

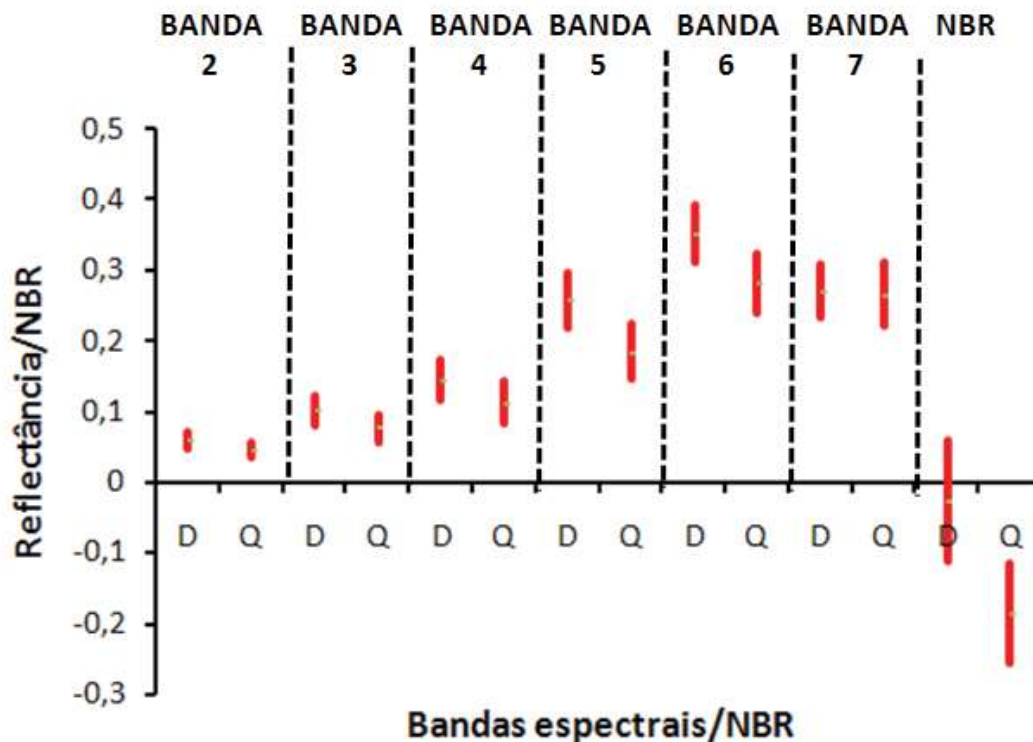


Fig. 6 – Valores mínimo e máximo de reflectância para as bandas 2 a 7 do Landsat-8 (imagem de 29 de agosto de 2015) e para o índice de queimadas por diferença normalizada (NBR), discriminados em classes de desmatamento (D) e queimadas (Q). Valor mínimo = média – desvio-padrão; valor máximo = média + desvio-padrão.

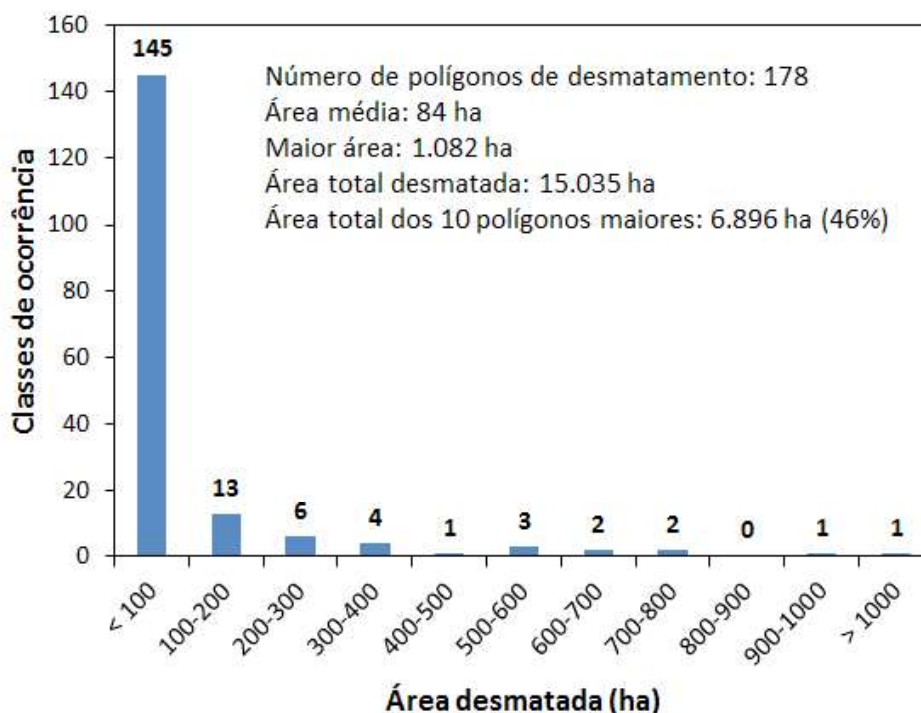


Fig. 7 – Frequência de ocorrência de classes de desmatamento em termos de área (em hectares), encontrados na área de estudo no período de agosto/2014 a agosto/2015.

A exatidão global da classificação digital, expressa pela razão entre os pontos corretamente classificados e o total de pontos de referência, foi de 98,7%, encontrando-se dentro do patamar estabelecido como aceitável por Jensen (2005) de 85%. O valor do índice Kappa obtido foi de 96,9%, conforme esperado, menor do que a exatidão global, pois o índice Kappa considera todas as células da matriz de erros, porém, classificado como “concordância quase perfeita” segundo os critérios de Landis e Koch (1977).

Dos 178 polígonos classificados como desmatamento, apenas sete foram identificados como cicatrizes deixadas pelo fogo pela análise das imagens do Sentinel-2A, indicando erro de comissão de 4%. Dos 600 pontos sorteados, apenas seis foram identificados como áreas desmatadas e não foram detectados pelo método da diferença de imagens, indicando erro de omissão de 1%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desse estudo mostraram que a aplicação da técnica de diferença de imagens envolvendo a banda 7 do Landsat-8 e seguida da técnica de NBR consegue discriminar áreas de desmatamento na região do Cerrado com erro de omissão e comissão inferiores a 5%.

O procedimento proposto nesse estudo possui grande potencial para se tornar um sistema operacional e robusto de alerta de desmatamentos no bioma Cerrado para fins de fiscalização de desmatamentos ilegais.

Sugere-se que o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas seja reduzido para 16 dias, isto é, duas passagens consecutivas do satélite Landsat, para identificação de desmatamentos recentes usando a metodologia proposta por esse estudo. Além disso, testes adicionais em outras áreas do Cerrado precisam ser conduzidos. Conforme ressaltado por Bayma e Sano (2015), o Cerrado é bastante heterogêneo não somente em termos de fitofisionomia e fisiografia, mas também na dinâmica de ocupação humana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROSATÉLITE. **Análise geoespacial da dinâmica das culturas anuais no bioma Cerrado: 2000 a 2014**. Florianópolis: Agrosatélite, 2015, 27 p.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais

- do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.
- BAYMA, A. P.; SANO, E. E. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma Cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, p. 797-813, 2015.
- BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986–2002: comparative analysis and implications for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, n. 4, p. 579-595, 2008.
- CÂMARA, G.; VALERIANO, D. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006, 24 p. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/metodologia.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2016.
- CANTY, M. J.; NIELSEN, A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1025-1036, 2008.
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; BARGELLINI, P. *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25-36, 2012.
- FRANÇA, D. A.; FERREIRA, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 3017-3023, 2005.
- FERREIRA, L. G.; FERREIRA, M. E.; FERNANDES, G.; NEMAYER, M.; FERREIRA, N. C. Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de Cerrado: uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 2, p. 117-127, 2009.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5.000.000**. 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: 28 nov. 2016.
- JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 3ª ed., 2005, 526 p.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape assessment (LA). In: LUTES, D. C.; KEANE, R. E.; CARATI, J. F.; KEY, C. H.; BENSON, N. C.; GANGI, L. J. (Eds.). **FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System**. Fort Collins: USDA Forest Service, Technical Report RMRS-GTR-164-CD. p. LA-1-55, 2006.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, p. 707-713, 2005.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.
- MENKE, A. B.; CARVALHO Jr., O. A.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luís Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 3, p. 315-326, 2009.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Monitoramento do bioma Cerrado: 2008-2009**. Brasília: MMA, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/arquivos/relatoriofinal_cerrado_2008_2009_72.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2017.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento de uso e cobertura da terra do Cerrado. Projeto TerraClass Cerrado 2013**. Brasília: MMA, 2015. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/ Metodologia_TCCerrado_2013.pdf. Acesso em: 28 nov. 2016.
- NIELSEN, A. A. The regularized iteratively reweighted MAD method for change detection in multi- and hyperspectral data. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 16, n. 2, p. 463-468, 2007.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In: OLIVEIRA, P. S.;

- MARQUIS, T. J. (Eds.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna.** New York: Columbia University Press, p. 91-120, 2002.
- PESSOA, O. A. A.; BAPTISTA, G. M. M.; ALMEIDA, T.; MENESES, P. R. Monitoramento da reflectância espectral após extinção do fogo e uma proposta para a detecção de áreas queimadas em vegetação campestre do Cerrado. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 67, n. 6, p. 1131-1143, 2015.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, p. 151-199, 2008.
- ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. *et al.* Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154-172, 2014.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.
- SANO, E. E.; PINHATI, F. S. C. Espaço rural do oeste baiano: identificação de áreas agrícolas sob sistema de plantio direto por meio de dados obtidos por câmera digital e satélite CBERS-2 CCD. **Geografia**, v. 34, n. 1, p. 117-129, 2009.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 113-124, 2010.
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ANDERSON, L. O.; VALERIANO, D. M.; ARAI, E.; FREITAS, R. M. Near real time detection of deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS imagery. **Revista Ambi-Água**, v. 1, p. 37-47, 2006.
- SILVA, J. F.; FARIÑAS, M. R.; FELFILI, J. M.; KLINK, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 536-548, 2006.
- SILVA, G. B. S.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SANO, E. E. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 186-194, 2010.
- SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.