



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License. Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702015000400797&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 22 mar. 2018.

REFERÊNCIA

BAYMA, Adriana Panhol; SANO, Edson Eyji. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma Cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 797-813, out./dez. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702015000400797&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 22 mar. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400047>.

SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI E EVI) DO SENSOR MODIS PARA DETECÇÃO DE DESMATAMENTOS NO BIOMA CERRADO

Time series of vegetation indices (NDVI and EVI) from MODIS for detecting deforestation in the Cerrado biome

Adriana Panhol Bayma ¹

Edson Eyji Sano²

¹ Universidade de Brasília – UnB/IG Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70919-970 Brasília/DF E-mail: panhol@gmail.com

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Cerrados BR-020 km 18 CEP: 73301-970 Planaltina/DF E-mail: edson.sano@embrapa.br

Resumo:

O Cerrado é um bioma caracterizado por uma ampla variedade de formações vegetacionais, pela forte sazonalidade climática e pela acentuada pressão antrópica. Este estudo analisou o uso de séries temporais (2000-2013) do MODIS EVI e MODIS NDVI para detectar desmatamentos no Cerrado. As áreas de estudo corresponderam aos municípios de Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA, Mateiros/TO e São Miguel do Araguaia/GO. As séries temporais foram suavizadas pelo filtro logística dupla, disponível no programa TIMESAT. Foi utilizada a estatística de Kruskal-Wallis para definir se as assinaturas temporais representativas das formações florestais de Jataí e São Miguel do Araguaia e das formações savânicas dos quatro municípios eram estatisticamente iguais. Em seguida, foram definidos os limiares de desmatamento para cada formação vegetal (valores de EVI e NDVI abaixo dos quais são considerados desmatamentos). Resultados indicaram que não é possível definir um limiar único de desmatamento para cada formação vegetal, porém, é possível detectar desmatamentos em formações florestais e savânicas. O desempenho do NDVI foi superior ao EVI no sentido de que a redução nos valores de NDVI durante o evento de desmatamento é mais acentuada do que nos valores de EVI.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Assinaturas Temporais; Savana Tropical; Imagens de Satélite.

Abstract:

The Cerrado is a biome characterized by a wide variety of vegetation formations, strong seasonality and high anthropogenic pressure. This study analyzed the use of time series (2000-2013) of MODIS EVI and MODIS NDVI to detect deforestation in the Cerrado. The study areas corresponded to the municipalities of Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA, Mateiros/TO and São Miguel do Araguaia/GO. The time series were smoothed by the double logistic filter, available in the TIMESAT program. Kruskal-Wallis statistics was used to determine whether the representative temporal signatures of forestlands from Jataí and São Miguel do Araguaia and shrublands from all municipalities were statistically equal. Then the deforestation thresholds were identified for each vegetation formation (EVI and NDVI values below of which are considered deforestation). Results indicated that it is not possible to define a single threshold for each type of vegetation, however, it is possible to detect deforestation in forestlands and shrublands. The performance of NDVI was higher than that from EVI since the decrease in the NDVI values during the events of deforestation was higher.

Keywords: Remote Sensing; Temporal Signatures; Tropical Savanna; Satellite Images.

1. Introdução

O bioma Cerrado ocupa uma área de 203,6 milhões de hectares (IBGE, 2004), na porção central do País, compreendendo um mosaico de formações campestres, arbustivas e arbóreas e com flora e fauna bem adaptadas à acentuada sazonalidade climática - seis meses de estação seca e seis meses de estação chuvosa (Eiten, 1993). Essa ampla variedade de fatores bióticos, além de outros abióticos como solo, relevo e topografia, conferem ao bioma elevada biodiversidade, sendo reconhecido como a savana mais rica do mundo (Klink e Machado, 2005). Apesar de sua importância ambiental, o Cerrado é o bioma brasileiro que mais sofreu alterações com a ocupação humana nas últimas três décadas, devido principalmente à crescente pressão para a abertura de novas áreas para a produção de carne, grãos e etanol para exportação, o que coloca em risco a sobrevivência de muitas espécies e a integridade de seus *habitat* (Dias, 1994; Machado *et al.*, 2004).

Dados derivados de imagens do satélite Landsat de 2009-2010 mostraram que aproximadamente 49% da cobertura vegetal original do Cerrado já foram suprimidas (IBAMA, 2010). Apesar da forte ameaça de desmatamento e de iniciativas de monitoramento anual do desmatamento no Cerrado por parte do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), não existe ainda, para o Cerrado, um sistema operacional de monitoramento do desmatamento em tempo quase real que permita subsidiar as atividades de fiscalização no campo de desmatamentos ilegais (Ferreira *et al.*, 2007).

Devido a características como alta periodicidade na aquisição de imagens e possibilidade de imageamento de grandes áreas, as imagens de satélite permitem monitorar alterações na vegetação de forma contínua no tempo e no espaço. Nesse sentido, a utilização de dados de sensoriamento remoto é marcadamente útil no monitoramento em larga escala das alterações que têm ocorrido nos diversos ecossistemas que compõem o Cerrado. Muitas iniciativas de mapeamento da cobertura vegetal do Cerrado têm sido realizadas por instituições governamentais federais e estaduais, por institutos de pesquisa e por organizações não-

governamentais e em diferentes escalas (Mantovani e Pereira 1998; Eva *et al.*, 2004; Machado *et al.*, 2004; Kronka *et al.*, 2005; Scolforo e Carvalho, 2006; Ferreira *et al.*, 2007; Sano *et al.*, 2008, 2010), a maior parte delas com a utilização de dados provenientes de sensores remotos orbitais. No entanto, essas iniciativas, que em sua maioria estão baseadas em análises de imagens de satélite de uma única data, não permitem uma análise mais apurada da dinâmica das mudanças ocorridas na cobertura e no uso da terra.

Nessa perspectiva, o uso de séries temporais do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) pode ser considerado de grande valia para a detecção rápida de desmatamentos recentes no Cerrado, em razão de suas características de resolução espacial (250 metros) e temporal (1-2 dias) e faixa relativamente larga de imageamento (2.330 km) (Justice *et al.*, 2002). Ademais, os produtos do sensor MODIS, especialmente aqueles cujos potenciais de utilização são voltados a estudos relativos a ecossistemas terrestres, são extremamente úteis, pois têm propiciado a análise das transformações e perturbações ocorridas na cobertura vegetal ao longo de mais de 10 anos (Verbesselt *et al.*, 2012). Nesse aspecto, o desenvolvimento de índices de vegetação, elaborados com o propósito de explorar as propriedades espectrais da vegetação, possibilitou a inferência de parâmetros biofísicos referentes à vegetação de extensas áreas da superfície da Terra, bem como de suas respostas frente à ação de fenômenos geofísicos e à influência antrópica (Ginciene e Bitencourt, 2011).

Desta forma, para estudos em escala regional - especialmente os realizados por meio de composições multitemporais -, é possível realizar as análises das mudanças no uso e cobertura da terra por meio de índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ou índice de vegetação realçado (EVI) do sensor MODIS, os quais são capazes de evidenciar variações sazonais, interanuais e de longo termo de parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação (Huete *et al.*, 2002; Correia *et al.*, 2006). As séries temporais do NDVI e EVI poderão evidenciar se as mudanças ocorridas são devidas à sazonalidade climática ocasionada pela alteração no regime de chuvas ou se ocorrem por mudanças no uso da terra (p. ex. desmatamentos) ou, ainda, se são causadas por queimadas. Para tanto, torna-se importante avaliar a capacidade de as séries temporais de NDVI e EVI propiciarem informação suficiente para possibilitar a diferenciação na mudança de comportamento espectral da vegetação, de modo a predizer se houve ou não desmatamento ou alteração nas classes de vegetação nativa e de uso da terra. Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é avaliar o uso de séries temporais MODIS NDVI e EVI para detectar desmatamentos no bioma Cerrado.

2. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento desse estudo, foram selecionadas quatro áreas-teste, correspondentes aos municípios de Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA (LEM), Mateiros/TO e São Miguel do Araguaia/GO (SMA) (Figura 1). Os municípios foram selecionados por se constituírem em regiões do Cerrado representativas em termos de produção de grãos e energia (etanol) com elevada produtividade e tecnologia, de manutenção de extensas áreas de remanescentes de cobertura vegetal do Cerrado, de fronteira agrícola e de pecuária extensiva, respectivamente.

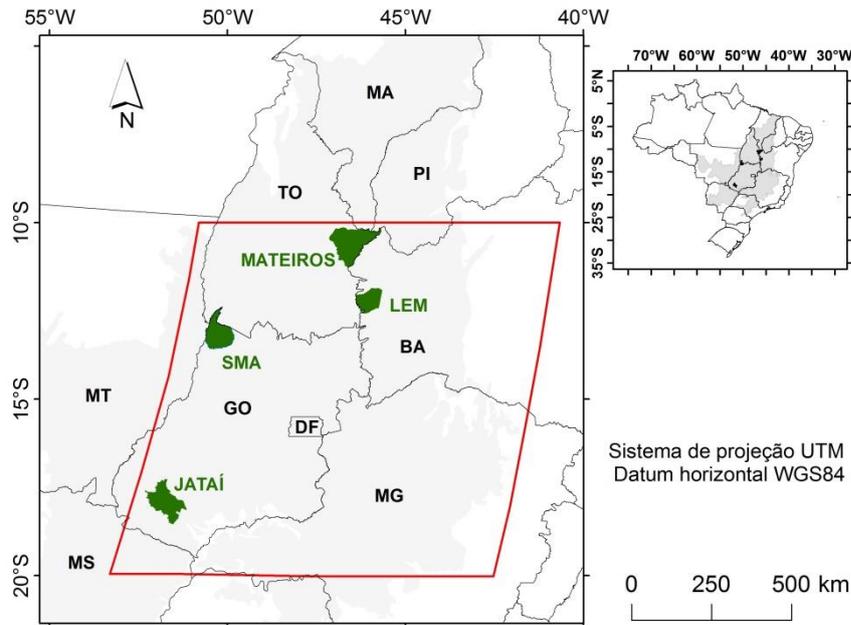


Figura 1: Mapa de localização das áreas de estudo no bioma Cerrado (municípios de Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA (LEM), Mateiros/TO e São Miguel do Araguaia/GO) (SMA) e localização do *tile* h13v10 (cena do MODIS que engloba os quatro municípios).

O material básico desse estudo foram as séries temporais do produto MOD13Q1, coleção 5 (versão 4), *tile* h13v10 do período compreendido entre fevereiro de 2000 a dezembro de 2013 (total de 319 séries temporais). Essas séries são disponibilizadas com resolução espacial de 250 metros e periodicidade de 16 dias (Huete *et al.*, 2002). Nesse estudo, foram considerados os dois índices de vegetação disponibilizados no referido produto, o NDVI e o EVI, disponibilizados a cada 16 dias e com resolução espacial de 250 m (Huete *et al.*, 2002). O NDVI é calculado a partir da razão normalizada entre as bandas do infravermelho próximo e a banda do vermelho, variando entre -1 e 1. Sua fórmula é apresentada a seguir (Equação 1):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

onde: ρ_{NIR} e ρ_{RED} são os fatores de refletância bidirecional de superfície para as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), respectivamente.

Huete *et al.* (1997) desenvolveram o EVI, um índice que minimiza os efeitos de solos e da atmosfera e que é mais sensível às variações na estrutura do dossel (Gao *et al.*, 2000). Seu cálculo é dado por (Equação 2):

$$EVI = 2,5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6 * \rho_{RED} - 7,5 * \rho_{BLUE} + 1} \quad (2)$$

A partir desses dois índices de vegetação, foram elaborados dois cubos temporais, um para cada índice de vegetação. Nesse cubo, as imagens são ordenadas em três dimensões, de modo que os eixos X e Y representam as coordenadas geográficas e o eixo Z, os valores do espectro temporal dos índices de vegetação (Carvalho Júnior *et al.*, 2009).

Entre outubro de 2013 e março de 2014, foram realizadas quatro campanhas de campo para a caracterização dos tipos de cobertura vegetal natural e antrópica representativos de cada

município. Foram visitados 126 pontos nos quatro municípios: 32 em Jataí e SMA; e 31 em LEM e Mateiros. Desse total de pontos, 12 corresponderam à formação florestal; 41 à formação savânica; 13 à formação campestre; 34 às culturas agrícolas; e 26 às pastagens cultivadas. Os seguintes registros foram obtidos em cada ponto: coordenadas geográficas com GPS de navegação; fotografias digitais panorâmicas; e identificação da classe de cobertura vegetal predominante.

A partir dos dados de campo, foram extraídas assinaturas temporais representativas das formações florestais, savânicas e campestres. Para assegurar que a extração dessas assinaturas seria realizada com base em pixels puros do MODIS, isto é, com nível mínimo de mistura espectral, as coordenadas geográficas de campo foram sobrepostas nas imagens ortorretificadas do Landsat-8 e também em uma grade de células de 250 metros x 250 metros, coincidente com os pixels do MODIS. O *software* utilizado foi o ArcGIS 10.1. Procurou-se selecionar ao menos quatro pixels para cada ponto amostral, os quais foram convertidos para um único valor por meio de média aritmética simples. Entretanto, em alguns casos, em função do tamanho da área visitada em campo, somente foi possível a seleção de um pixel puro. A extração de séries temporais de NDVI e EVI dos pixels selecionados foi feita por meio do *software* ENVI 4.8. As séries temporais de EVI e de NDVI de cada um dos 66 pontos de campo correspondentes às três formações vegetais naturais do Cerrado foram então convertidas em séries representativas por formação e por município. Assim, foram obtidas séries temporais de formação florestal de Jataí e SMA, formação savânica de todos os quatro municípios e formação campestre de Mateiros.

Essas séries temporais, por apresentarem ruídos causados, por exemplo, pela presença de nuvens durante a passagem do satélite, foram suavizadas pelo filtro denominado logística dupla, disponível no programa TIMESAT (Jönsson e Eklundh, 2002, 2004). Esse *software*, de domínio público, disponibiliza três métodos de suavização: logística dupla, Savitzky-Golay e gaussiano assimétrico. Testes intensivos realizados por Borges *et al.* (2014) indicaram melhor desempenho da logística dupla para dados do MODIS EVI do Cerrado, mais especificamente, do oeste da Bahia. A logística dupla corresponde a uma função harmônica e polinomial. Sua formulação matemática é dada pela Equação 3, onde o parâmetro x_1 determina a posição do ponto de inflexão esquerdo, enquanto x_2 determina a taxa de variação. O parâmetro x_3 determina a posição do ponto de inflexão do lado direito, enquanto x_4 fornece a taxa de variação nesse ponto. De acordo com Jönsson e Eklundh (2004), esse filtro garante uma forma suave às séries temporais.

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \quad (3)$$

O programa TIMESAT oferece a possibilidade de filtragem de dados de séries temporais a partir de imagens ou de arquivos em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Esse padrão permite que códigos de textos sejam reconhecidos por programas de computadores. Assim, os valores médios representativos foram salvos em arquivos TXT, os quais, por sua vez, foram lidos pelo programa. O resultado foi a suavização dos valores médios originais de EVI e de NDVI para cada formação por município pelo filtro de logística dupla. Em função de uma necessidade operacional do programa TIMESAT, utilizado para suavização das séries temporais, três grânulos tiveram que ser replicados para perfazerem 23 cenas no ano de 2000, tendo em vista que as séries temporais do Terra/MODIS só passaram a ser disponibilizadas em 18 de fevereiro de 2000.

Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, disponível no pacote estatístico de domínio público denominado Action® 2.7, foi conduzido para verificar se as séries temporais de uma mesma formação vegetacional, porém, de municípios diferentes, eram estatisticamente iguais ou diferentes. O intuito do teste de Kruskal-Wallis era definir se haveria uma única assinatura

temporal por formação vegetal ou se haveria assinaturas temporais distintas para cada município. Pelo fato de a formação campestre ter sido amostrada somente em Mateiros-TO, não foi testada a igualdade das séries temporais para essa formação. Assim, foi estabelecida hipótese nula (H_0) de igualdade entre as séries temporais de EVI e de NDVI de cada formação entre os municípios estudados, a um nível de significância de 5%.

De posse das séries temporais representativas, passou-se à definição de limiares de desmatamento para cada formação vegetacional considerada. Por limiar de desmatamento, entendem-se como sendo aqueles valores de NDVI e EVI abaixo dos quais podem ser considerados como desmatamento. Por causa da elevada sazonalidade climática do Cerrado, as séries temporais do NDVI e EVI de áreas naturais possuem padrão tipicamente senoidal; os seus valores mais baixos coincidem aproximadamente com o pico da estação seca, enquanto os seus valores mais altos coincidem aproximadamente com o pico da estação chuvosa. Quando uma área natural é desmatada, os índices de vegetação das passagens subsequentes do sensor MODIS tendem a apresentar valores menores do que os limiares de desmatamento.

O desempenho dos limiares foi verificado a partir do arquivo em formato *shapefile* contendo polígonos de desmatamento do bioma Cerrado do ano de 2011, identificados pelo Centro de Sensoriamento Remoto do IBAMA por meio de análise de imagens do satélite Landsat TM (dados não publicados). Foi selecionado um polígono de desmatamento por formação vegetacional e por município (total de sete pontos). Assinaturas temporais desses polígonos de desmatamento foram então comparadas com as assinaturas temporais das formações vegetacionais naturais por meio de diagramas de dispersão XY, onde X = data; e Y = índice de vegetação.

Em seguida, foram identificadas visualmente, nos diagramas de dispersão, datas prováveis de desmatamento, as quais foram inferidas a partir de quedas acentuadas e continuadas nos valores de índices de vegetação, abaixo do limiar pré-definido. A presença ou não dessas áreas desmatadas foram confirmadas por meio de análise de duas cenas do satélite Landsat ou ResourceSat, anterior e posterior à data provável de desmatamento. Convém ressaltar que, para que a metodologia proposta nesse estudo seja implementada de forma operacional, é recomendável que haja um mapeamento prévio de cobertura vegetal natural e antrópica da área de estudo. Nesse caso, as áreas de cobertura antrópica devem entrar como máscara para evitar que assinaturas temporais de pixels antropizados sejam geradas sem necessidade.

3. Resultados e discussão

A título de ilustração, na Figura 2 são mostradas as séries temporais de EVI das formações florestais, savânicas e campestres de SMA, LEM e Mateiros, respectivamente. As três assinaturas espectrais mostram nítida interferência da sazonalidade climática. Regra geral, valores mais altos de EVI representam pico da estação chuvosa (meados de fevereiro) e valores mais baixos próximos aos picos da estação seca (meados de setembro), indicando uma relação direta do padrão sazonal da precipitação com a sazonalidade da vegetação (Becerra *et al.*, 2009). Outro aspecto relevante mostrado nessa figura é a presença de ruídos nos valores originais de EVI, indicando a necessidade de suavizar as séries temporais. A figura ilustra ainda os resultados da suavização pelo método da logística dupla. Pode-se observar que, de uma maneira geral, o filtro conseguiu reduzir com sucesso, os valores anômalos excessivamente altos e baixos das séries temporais. As séries suavizadas são bastante similares aos perfis apresentados em estudos

anteriores (e.g., Chen *et al.*, 2004; Ma e Veroustraete, 2006; Julien e Sobrino, 2010; Atkinson *et al.*, 2012). Resultados similares ao EVI foram obtidos na suavização dos dados do NDVI e também para outras formações vegetacionais de outros municípios.

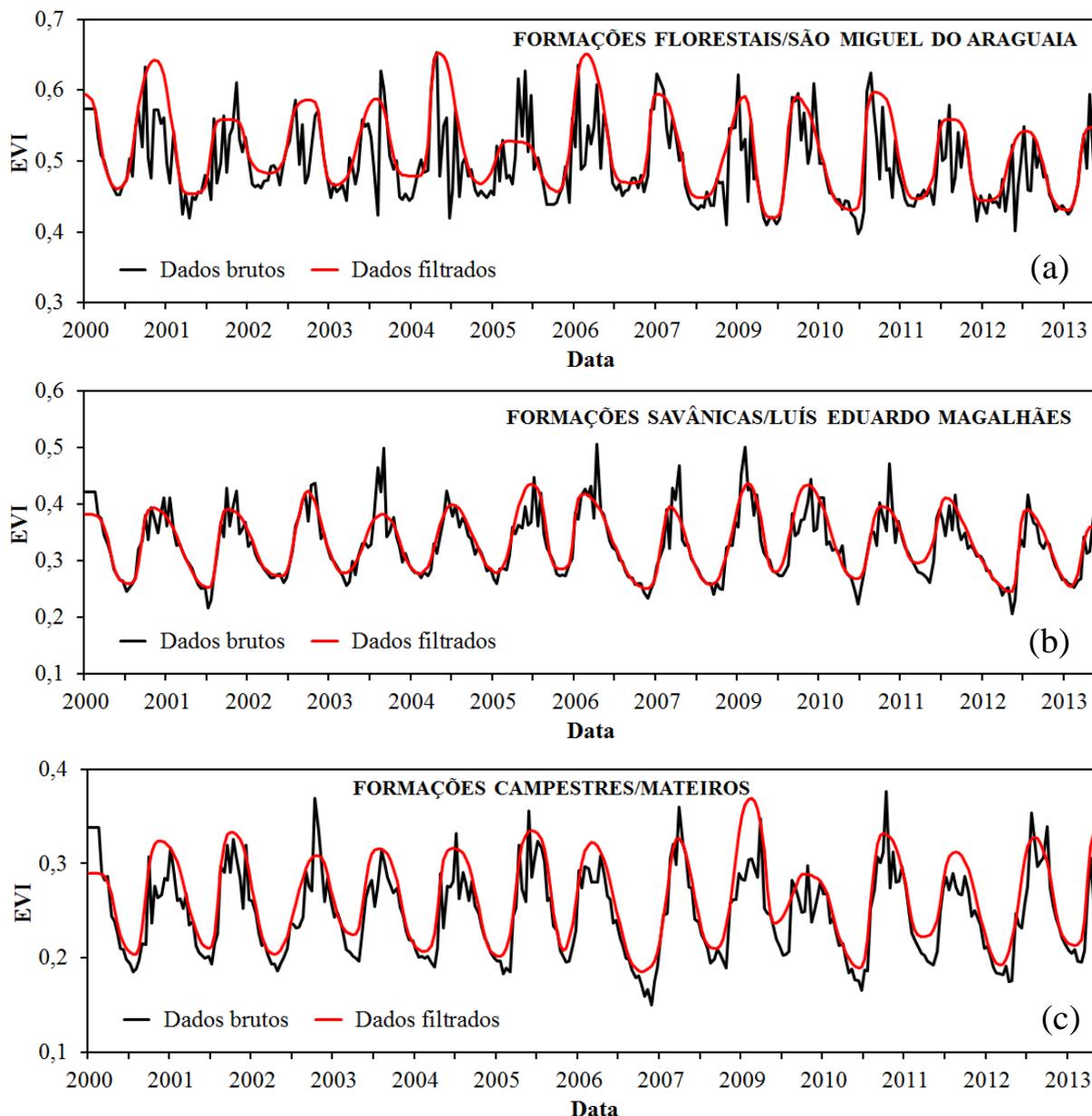


Figura 2: Dados originais e filtrados de séries temporais de EVI de formações florestais de São Miguel do Araguaia (a), formações savânicas de Luís Eduardo Magalhães (b) e formações campestres de Mateiros (c).

Na Figura 3, são mostradas as séries temporais de EVI correspondentes às formações florestais, savânicas e campestres encontradas nos quatro municípios considerados nesse estudo, filtradas pelo método de logística dupla. Esses valores das séries temporais estão de acordo com os encontrados por Borges *et al.* (2014): valores médios de EVI do oeste da Bahia variando de 0,26 a 0,38 para formações savânicas e de 0,24 para formações campestres. Apenas o valor médio de EVI para formações florestais (0,24, oeste da Bahia), ficou abaixo dos encontrados nesse presente estudo. Esse fato pode ser explicado pela densidade da cobertura florestal, mais densa em Jataí e SMA do que no oeste da Bahia, principalmente decorrente da precipitação média anual que é maior em Jataí e SMA do que no oeste da Bahia.

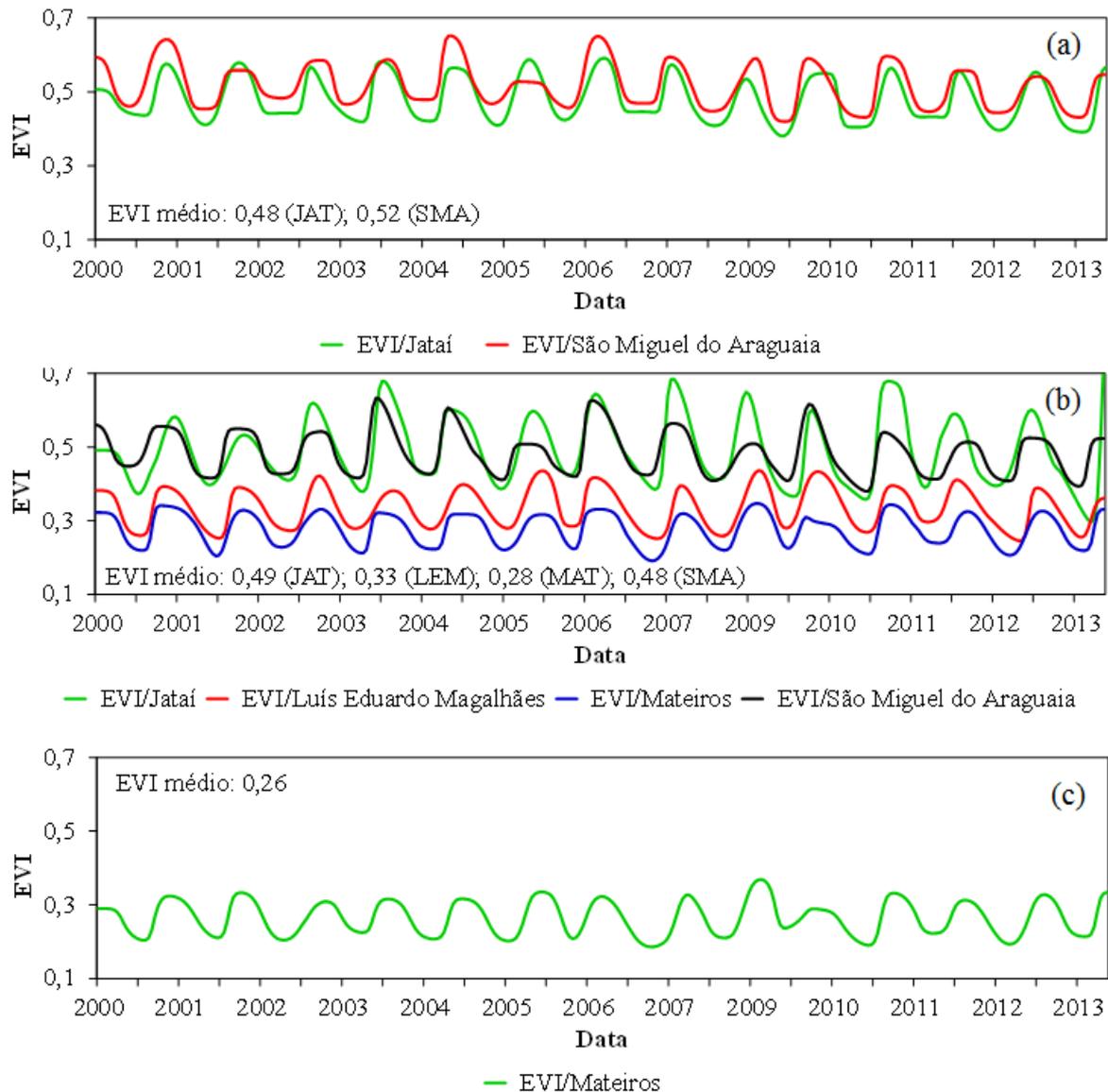


Figura 3: Séries temporais de EVI para as formações florestais (a), savânicas (b) e campestres (c), encontradas nos municípios de Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA, Mateiros/TO e São Miguel do Araguaia/GO e filtradas pelo método de logística dupla, disponível no programa TIMESAT. Dados baseados nas coordenadas GPS de campo e nos valores médios de EVI por formação vegetal. JAT = Jataí; LEM = Luís Eduardo Magalhães; MAT = Mateiros; SMA = São Miguel do Araguaia.

Nota-se a presença de dois padrões nas séries temporais de formações savânicas: o grupo formado pelos municípios de LEM e Mateiros, com valores de EVI mais baixos e o grupo formado pelos municípios de Jataí e SMA, com valores de EVI mais altos. Este fato pode estar novamente relacionado com o regime distinto de chuvas: menor para os municípios de LEM e Mateiros (zona de transição com o bioma Caatinga) e maior para os municípios de Jataí e SMA. Outro fator que pode estar relacionado com a igualdade entre as séries temporais dos índices de vegetação dos municípios que se situam na parte mais à oeste do bioma, Jataí e SMA, e dos dois outros situados na porção oeste, Mateiros e LEM, é a similaridade florística existente entre eles. Análise da composição florística de 376 áreas de cerrado e de savana amazônica, conduzida por Ratter *et al.* (2003), resultou em oito regiões com forte padrão fitogeográfico na distribuição do Cerrado. Considerando as áreas estudadas nesse trabalho, pode-se inferir que os municípios de

Jataí e SMA pertencem à província Centro-Oeste e os municípios de Mateiros e LEM, à província Norte-Nordeste.

Nota-se ainda que a transição, em termos de valores de EVI, entre as formações florestais, savânicas e campestres é gradativa e com sobreposição em mais de uma situação (por exemplo, EVI médio de formações florestais e savânicas de Jataí = 0,48 e 0,49, respectivamente). Este fato é reflexo da própria transição gradual entre as diferentes fitofisionomias do Cerrado: Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado Ralo, Cerrado Típico, Cerrado Denso e Cerradão, da menor para a maior densidade de biomassa do dossel. Por causa dessa passagem gradual, a identificação da fitofisionomia correta não é tarefa simples, mesmo em nível de campo.

Variações médias entre os valores máximo e mínimo de EVI foram de 0,12 para formações florestais, 0,12 para formações savânicas e 0,09 para formações campestres (dados não mostrados na Figura 3). Essas variações também estão de acordo com as obtidas por Ratana *et al.* (2005) que analisaram séries temporais de quatro anos do MODIS EVI e MODIS NDVI de formações naturais do Cerrado do Distrito Federal e do município de Planaltina de Goiás. Percebe-se que não há diferença significativa nas variações de valores mínimo e máximo de EVI entre as três formações, indicando que os efeitos da sazonalidade climática típica do Cerrado aparecem com magnitudes similares nas séries temporais do EVI. De uma maneira geral, as assinaturas temporais de NDVI foram similares aos obtidos para o EVI, porém, com valores mais altos. Por exemplo, para a formação florestal de Jataí, o valor de índice de vegetação aumentou de 0,48 para 0,76. Esse aumento foi verificado para todas as formações vegetacionais e em todos os municípios. Essa variação de 0,2 a 0,3 nos dois índices também já foram observados por outros autores como Liesenberg *et al.* (2007).

Testes não-paramétricos de Kruskal-Wallis envolvendo valores de EVI e NDVI (Tabelas 1 e 2) indicaram que as séries temporais de EVI das formações florestais de Jataí e SMA são estatisticamente diferentes. Já as formações savânicas de Jataí e SMA e de LEM e Mateiros demonstraram ser estatisticamente iguais, porém, entre todos os outros municípios foram diferentes. Conclusões similares foram encontradas para NDVI. Esses resultados indicam que os limiares de desmatamento de cada formação vegetacional não podem ser únicos para todo o Cerrado, uma vez que as séries temporais são estatisticamente diferentes, dependendo da região em que se encontra dentro do bioma. Não foi possível efetuar a análise para as formações campestres, uma vez que essa formação só foi encontrada no município de Mateiros.

Dessa forma, foram obtidos dois limiares de desmatamento para as formações florestais, isto é, valores correspondentes ao valor mínimo de EVI ou NDVI, abaixo do qual é considerado, nesse estudo, como início de um evento de desmatamento. Para as formações savânicas, também foram definidos dois limiares, um para os municípios de Jataí e SMA e outro para os municípios de LEM e Mateiros. Nesse caso, foi considerada a média aritmética simples dos limiares correspondentes aos pares de municípios envolvidos. Para as formações campestres, foi considerado o limiar obtido em Mateiros. Os limiares de desmatamento de EVI e de NDVI encontram-se na Tabela 3. Limiares de desmatamento para NDVI foram sempre maiores que os de EVI.

Tabela 1: Teste Kruskal-Wallis de igualdade de médias de valores de EVI (série temporal de 2000 a 2013) para a mesma formação vegetacional e diferentes municípios. JAT = Jataí; LEM = Luís Eduardo Magalhães; MAT = Mateiros; e SMA = São Miguel do Araguaia. Ho = séries temporais são estatisticamente iguais.

Formação	Municípios	Valor de P (P-valor)	Grau de liberdade (GL)	Valor Observado (H _{obs})	Valor Crítico (Q _{0,95})	Hipótese Nula (H ₀)
Florestal	JAT x SMA	0,0126	1	9,86	7,76	Rejeita
Savânica	JAT x LEM	0,0000	3	38,83	20,77	Rejeita
Savânica	JAT x MAT	0,0000	3	52,52	20,77	Rejeita
Savânica	JAT x SMA	0,0000	3	0,48	20,77	Aceita
Savânica	LEM x MAT	0,0000	3	13,70	20,77	Aceita
Savânica	LEM x SMA	0,0000	3	39,30	20,77	Rejeita
Savânica	MAT x SMA	0,0000	3	53,00	20,77	Rejeita

Tabela 2: Teste Kruskal-Wallis de igualdade de médias de valores de NDVI (série temporal de 2000 a 2013) para a mesma formação vegetacional e diferentes municípios. JAT = Jataí; LEM = Luís Eduardo Magalhães; MAT = Mateiros; e SMA = São Miguel do Araguaia. Ho = séries temporais são estatisticamente iguais.

Formação	Municípios	Valor de P (P-value)	Grau de liberdade (GL)	Valor Observado (H _{obs})	Valor Crítico (Q _{0,95})	Hipótese Nula (H ₀)
Florestal	JAT x SMA	0,0126	1	11,96	7,76	Rejeita
Savânica	JAT x LEM	0,0000	3	37,57	20,77	Rejeita
Savânica	JAT X MAT	0,0000	3	54,78	20,77	Rejeita
Savânica	JAT x SMA	0,0000	3	3,39	20,77	Aceita
Savânica	LEM x MAT	0,0000	3	17,22	20,77	Aceita
Savânica	LEM x SMA	0,0000	3	34,17	20,77	Rejeita
Savânica	MAT x SMA	0,0000	3	51,39	20,77	Rejeita

Tabela 3: Valores mínimos de EVI e de NDVI para as formações fisionômicas das áreas estudadas.

Município	Formações Vegetacionais					
	Florestal		Savânica		Campestre	
	EVI Mínimo	NDVI Mínimo	EVI Mínimo	NDVI Mínimo	EVI Mínimo	NDVI Mínimo
Jataí	0,38	0,64	0,37	0,46	-	-
São Miguel do Araguaia	0,42	0,64			-	-
Luís Eduardo Magalhães	-	-	0,22	0,39	-	-
Mateiros	-	-			0,19	0,26

A seguir, são apresentados alguns casos que demonstram o bom funcionamento desses limiares para identificar desmatamento a partir de séries temporais do MODIS EVI e MODIS NDVI. Na Figura 4, são mostradas as séries temporais de EVI e NDVI de uma área desmatada de formação florestal em Jataí, com os respectivos limiares de desmatamento. Nota-se que a assinatura espectral corta os limiares de desmatamento em meados de 2010. O desmatamento nesse período pôde ser confirmado pelas análises de três sequências de imagens do satélite Landsat de 1 de agosto de 2009 (área natural), 3 de julho de 2010 (área natural) e 22 de julho de 2011 (área desmatada).

Análises similares são apresentadas nas Figuras 5 (desmatamento de formação florestal em SMA), 6 (desmatamento em formação savânica de LEM), 7 (desmatamento em formação savânica de SMA), 8 (desmatamento em formação savânica de Mateiros) e 9 (desmatamento em formação campestre de Mateiros). Os eventos de desmatamentos foram nítidos em todos os exemplos ilustrados nessas figuras, com exceção do caso de formação campestre de Mateiros. Nesse último caso, a dificuldade em evidenciar ocorrências de desmatamentos pode estar associada à falta de sensibilidade do sensor MODIS em detectar pequenas variações nos valores dos índices de vegetação utilizados neste trabalho. Especificamente para formação campestre (amostrada unicamente no município de Mateiros, em que há predominância de estrato campestre em uma região de solo arenoso), o baixo valor de biomassa responde por altas refletâncias na faixa do vermelho e do infravermelho próximo devido à acentuada interferência do solo, resultando em baixos valores de NDVI e EVI.

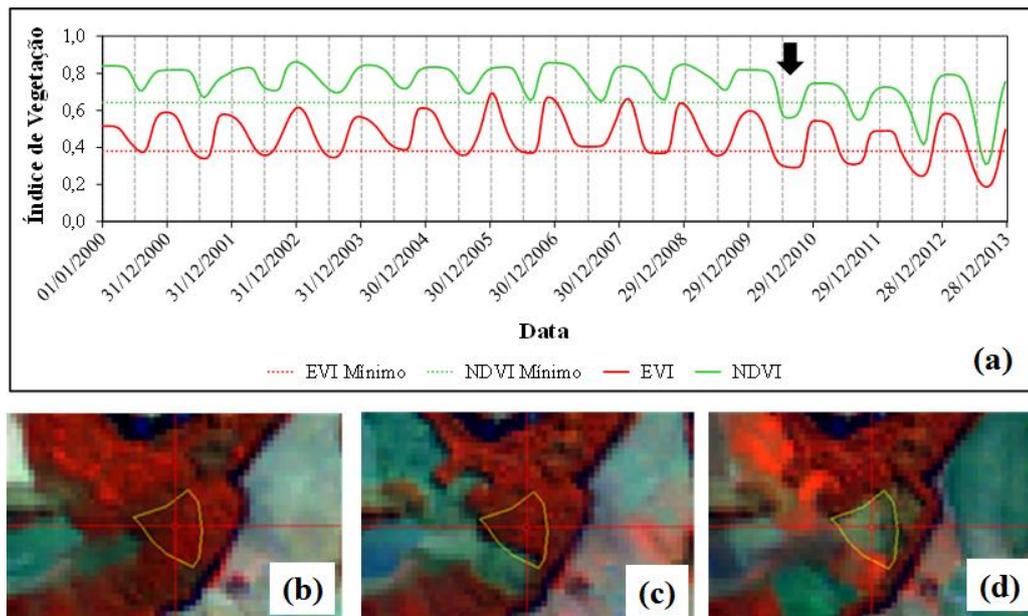


Figura 4: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em Jataí (latitude: $17^{\circ} 58' 54,79''$ S; longitude: $51^{\circ} 41' 37,54''$ W) com correspondentes limiaries de desmatamento de uma formação florestal (a). Em meados de 2010, as séries temporais cruzam os limiaries de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cenas do satélite Landsat de 1 de agosto de 2009 (não desmatado) (b), 3 de julho de 2010 (desmatamento nas adjacências do polígono) (c) e 22 de julho de 2011 (desmatado) (d).

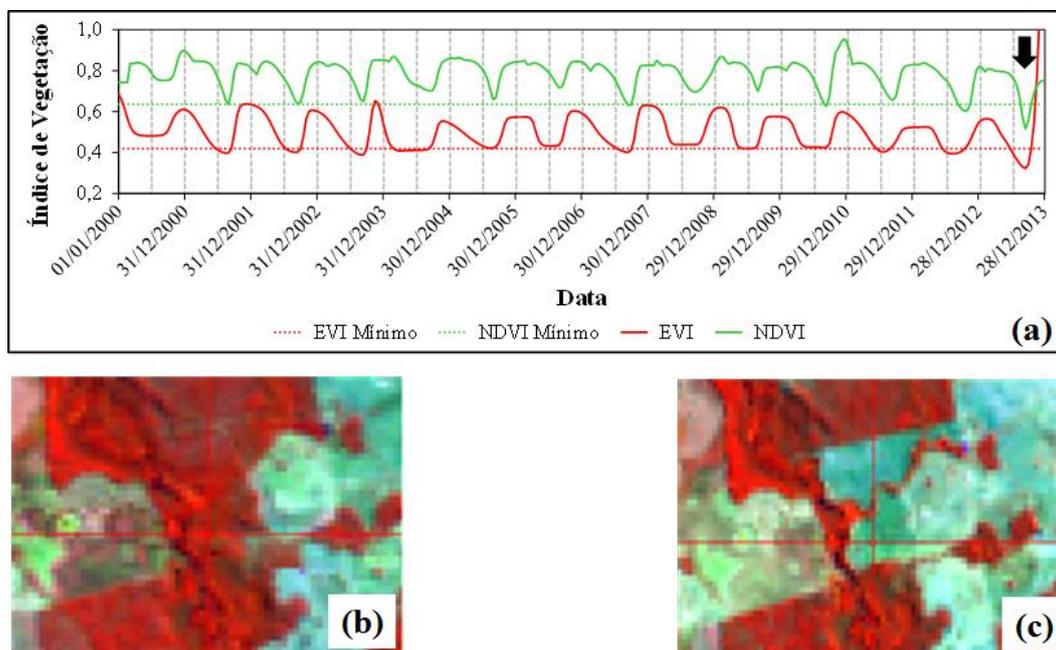


Figura 5: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em SMA (latitude: $13^{\circ} 20' 42,46''$ S; longitude: $49^{\circ} 58' 52,29''$ W) com correspondentes limiaries de desmatamento de uma formação florestal (a). Em meados de 2013, as séries temporais cruzam os limiaries de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cenas do satélite Landsat de 1 de agosto de 2012 (não desmatado) (b) e 12 agosto de 2013 (desmatado) (c).

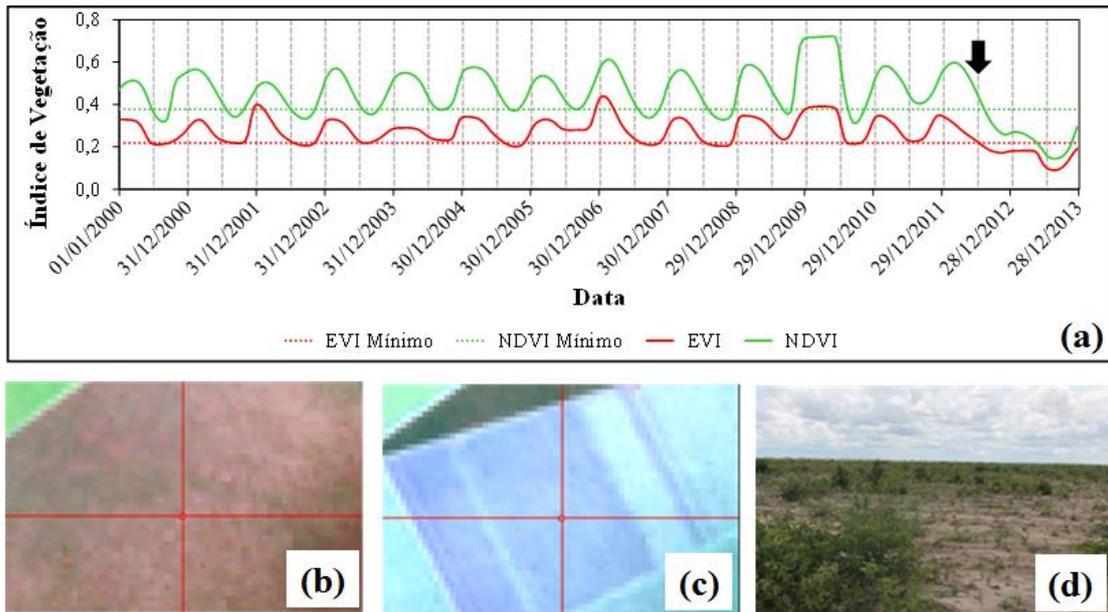


Figura 6: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em Luís Eduardo Magalhães (latitude: 11 ° 59' 27,50" S; longitude: 45 ° 58' 48,16" W) com correspondentes limiares de desmatamento de uma formação savânica (a). Em meados de 2012, as séries temporais cruzam os limiares de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cenas do satélite Landsat de 3 de setembro de 2011 (b) e 8 de setembro de 2013 (c). Fotografia de campo obtida em fevereiro de 2014 (d) também indica que a área foi desmatada. Foto: R. Trevizam.

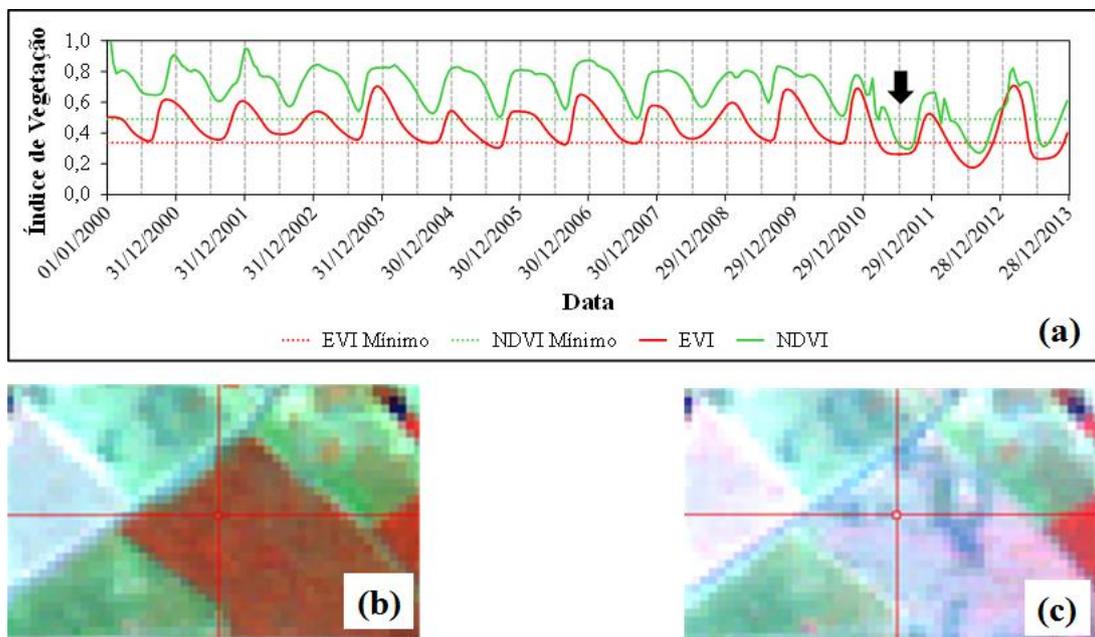


Figura 7: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em São Miguel do Araguaia (latitude: 13° 09' 15,89" S; longitude: 50° 02' 8,34" W) com correspondentes limiares de desmatamento de uma formação savânica (a). Em meados de 2011, as séries temporais cruzam os limiares de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cenas do satélite Landsat de 1 de agosto de 2011 (não desmatado) (b) e 7 de setembro de 2011 (desmatado) (c).

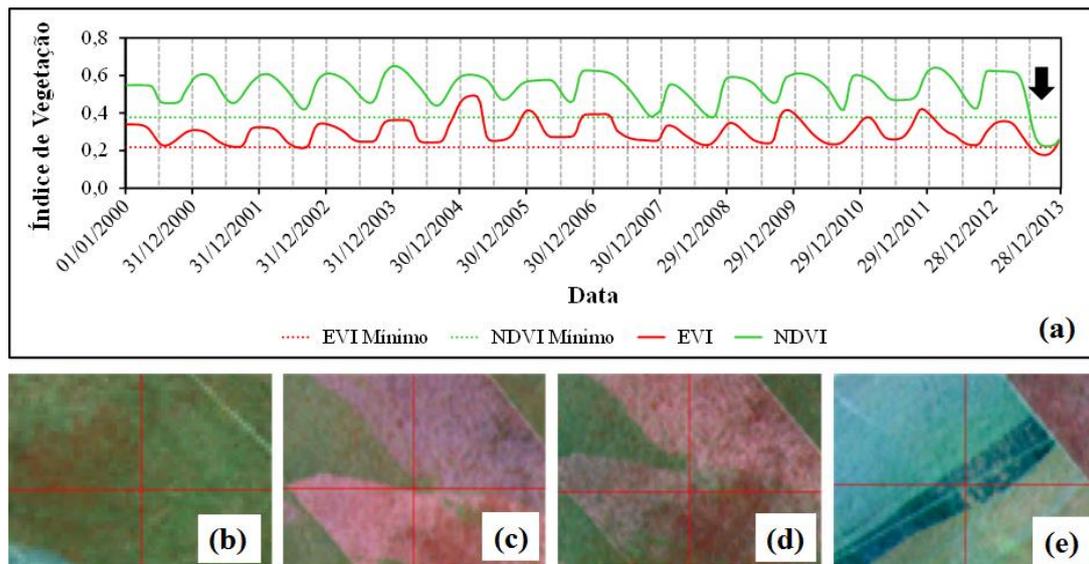


Figura 8: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em Mateiros (latitude: $10^{\circ} 27' 21,11''$ S; longitude: $46^{\circ} 02' 47,75''$ W) com correspondentes limiares de desmatamento de uma formação savânica (a). Em meados de 2013, as séries temporais cruzam os limiares de desmatamento (seta preta). O desmatamento nesse período pode ser confirmado pelos recortes de cena do satélite Landsat de 14 de agosto de 2010 (não desmatado) (b), recorte de cenas do Resourcesat LISS 3 de 2 de setembro de 2011 (não desmatado) (c) e 10 de julho de 2012 (não desmatado) (d) e recorte de cena do satélite Landsat de 29 de julho de 2013 (desmatado) (e).

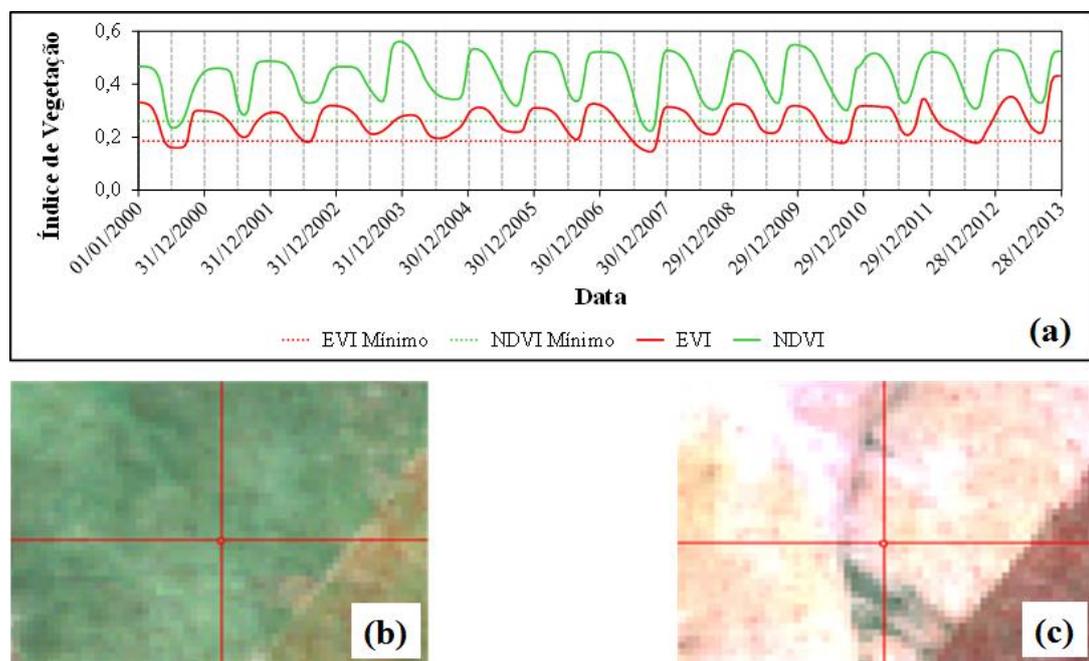


Figura 9: Séries temporais de EVI e de NDVI de um ponto em Mateiros (latitude: $10^{\circ} 19' 41,44''$ S; longitude: $47^{\circ} 00' 59,99''$ W) com correspondentes limiares de desmatamento de uma formação campestre (a). Os recortes de cenas do satélite Landsat mostram, respectivamente, área não desmatada em 14 de agosto de 2010 (b), e área desmatada em 15 de setembro de 2013 (c).

Esse desmatamento que ocorreu em algum momento no período de 2010 a 2013 não foi detectado pelas séries temporais.

4. Conclusões

A análise de séries temporais do sensor MODIS convertidos para dois índices de vegetação (EVI e NDVI) de quatro municípios do Cerrado (Jataí/GO, Luís Eduardo Magalhães/BA, Mateiros/TO e São Miguel do Araguaia/GO) demonstrou que é possível utilizar essas assinaturas temporais para detecção de desmatamentos no bioma Cerrado. Foram definidos limiares confiáveis de desmatamento para as formações florestais e savânicas; no entanto, para a formação campestre, a definição de limiar não se mostrou efetiva, pois não foi possível validar possíveis desmatamentos a partir de seu referencial.

Convém ressaltar que a reprodução da abordagem metodológica proposta nesse estudo para outras regiões depende da disponibilidade de um mapa confiável de uso e cobertura de terras, uma vez que o estudo parte do princípio de que áreas já antropizadas entram como máscaras na análise da série temporal do MODIS. Na ausência do referido mapa, o analista deve ter conhecimentos suficientes de campo e do comportamento espectral de alvos presentes na área de estudo, tanto naturais como antropizados para que limiares de desmatamento não sejam aplicados em áreas já antropizadas.

Outro resultado relevante gerado nesse estudo foi o de que não é possível gerar um limiar único de desmatamento para cada formação vegetacional do Cerrado, isto é, válido para todas as regiões do Cerrado. Embora os resultados obtidos por essa pesquisa tenham evidenciado que existe uma forte similaridade nas assinaturas temporais de formações savânicas de LEM e Mateiros ou de Jataí e SMA, não se pode afirmar o mesmo para os quatro municípios juntos.

Apesar de diversos estudos afirmarem que o desempenho do EVI é superior ao do NDVI, por exemplo, por causa de menor interferência de efeitos do solo e atmosfera no EVI, nesse estudo, o desempenho dos dois índices foi similar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Cerrado Jalapão por ter financiado as pesquisas de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, P. M.; Jeganathan C.; Dash J.; Atzberger, C. “Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time series data to estimate vegetation phenology.” *Remote Sensing of Environment* 123 (2012): 400-417.
- Becerra, J. A. B.; Shimabukuro, Y. E.; Alvalá, R. C. S. “Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação.” *Revista Brasileira de Meteorologia* 24 (2009): 125-134.

- Borges, E. F.; Sano, E. E.; Medrado, E. “Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil.” *Journal of Applied Remote Sensing* 8 (2014), Paper 083580-1.
- Carvalho Júnior, O. A.; Couto Júnior, A. F.; Silva, N. C.; Martins, E. S.; Carvalho, A. P. F.; Gomes, R. A. T. “Avaliação dos classificadores espectrais de mínima distância euclidiana e *spectral correlation mapper* em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO).” *Revista Brasileira de Cartografia* 61 (2009): 399-412.
- Chen, J.; Jönsson P.; Tamura, M.; Gu, Z.; Matsushita, B.; Eklundh, L. “A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter.” *Remote Sensing of Environment* 91 (2004): 332–344.
- Correia, A. H.; Formaggio, A. R.; Shimabukuro, Y. E.; Duarte, V. “Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia.” *Ambiente & Água* 1 (2006): 52-64.
- Dias, B. F. S. “A Conservação da Natureza.” In *Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas*, edited by Maria N. Pinto, 607-663. Brasília: Editora UnB, 1994.
- Eiten, G. “Vegetação do Cerrado.” In *Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas*, edited by Maria N. Pinto, 17-73. Brasília: Editora UnB, 1993.
- Eva, H. D.; Belward, A. S.; De Miranda, E. E.; Di Bella, C. M.; Gond, V.; Huber, O.; Jones, S.; Sgrenzaroli, M.; Fritz, S. “A land cover map of South America.” *Global Change Biology* 10 (2004): 731-744.
- Ferreira, M. E.; Ferreira, L. G.; Ferreira, N. C.; Rocha, G. F.; Nemayer, M. “Desmatamentos no bioma Cerrado: uma análise temporal (2001-2005) com base nos dados MODIS - MOD13Q1.” Paper presented at the *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, SC, April 21-26, 2007.
- Gao, X.; Huete, A. R.; Ni, W.; Miura, T. “Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination.” *Remote Sensing of Environment* 74 (2000): 609-620.
- Ginciene, B. R.; Bitencourt, M. D. “Utilização do EVI (*Enhanced Vegetation Index*) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual.” Paper presented at the *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, PR, April 30-May 5, 2011.
- Huete, A. R.; Liu, H. Q.; Batchily, K.; Van Leeuwen, W. “A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS.” *Remote Sensing of Environment* 59 (1997): 440-451.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.” *Remote Sensing of Environment* 83 (2002): 195-213.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. “*Monitoramento do Bioma Cerrado 2010*.” Last modified in July 10, 2013. http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/cerrado/RELATORIO%20FINAL_CERRADO_2010.pdf.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “*Mapa de Biomas do Brasil, 2004*.” Last modified December 26, 2014. <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>.

- Jönsson, P.; Eklundh, L. "Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (2002): 1824-1832.
- Jönsson, P.; Eklundh, L. "TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data." *Computers & Geosciences* 30 (2004): 833-845.
- Julien, Y.; Sobrino, J. A. "Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data." *Remote Sensing of Environment* 114 (2010): 618-625.
- Justice, C. O.; Townshend, J. R. G.; Vermote, E. F.; Masuoka, E.; Wolfe, R. E.; Saleous, N.; Roy, D. P.; Morisette, J. T. "An overview of MODIS land data processing and product status." *Remote Sensing of Environment* 83 (2002): 3-15.
- Klink, C. A.; Machado, R. B. "Conservation of Brazilian Cerrado." *Conservation Biology* 19 (2005): 707-713.
- Kronka, F. J. N.; Nalon, M. A.; Matsukuma, C. K.; Kanashiro, M. M.; Ywane, M. S. S.; Lima, L. M. P. R.; Guillaumon, J. R.; Barradas, A. M. F.; Pavão, M.; Manetti, L. A.; Borgo, S. C. "Monitoramento da vegetação natural e do reflorestamento no estado de São Paulo." Paper presented at the *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, GO, April 16-21, 2005.
- Liesenber, V.; Ponzoni, F. J.; Galvão, L. S. "Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do Cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/TERRA e AQUA." *Revista Árvore* 31(2007): 295-305.
- Ma, M.; Veroustraete, F. "Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time series data for the northwest of China." *Advances in Space Research* 37 (2006): 835-840.
- Machado, R.; Ramos Neto, M. B.; Pereira, P. G. P.; Caldas, E. F.; Gonçalves, D. A.; Santos, N. S.; Tabor, K.; Steininger, M. "*Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro.*" Brasília: Conservação Internacional, 2004.
- Mantovani, J. E.; Pereira, A. "Estimativa da integridade da cobertura vegetal de Cerrado através de dados TM/Landsat." Paper presented at the *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, SP, September 11-18, 1998.
- Ratana, P.; Huete, A. R.; Ferreira, L. G. "Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain." *Earth Interactions* 9 (2005), Paper no. 3.
- Ratter, J. A.; Bridgewater, S.; Ribeiro, J. F. "Analysis of the floristic composition of the Brazilian Cerrado vegetation. III: Comparison of the woody vegetation of 376 areas." *Edinburgh Journal of Botany* 60 (2003): 57-109.
- Sano, E. E.; Rosa, R.; Brito, J. L. S., and Ferreira, Laerte G. "Mapeamento semi-detalhado do uso da terra do Bioma Cerrado." *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43 (2008): 153-156.
- 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* 166 (2010): 113-124.
- Scolforo, J. R.; Carvalho, L. M. T. "Inventário e mapeamento da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais." Lavras: UFLA, 2006.
- Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Newnham, G.; Culvenor, D. "Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series." *Remote Sensing of Environment* 114 (2012): 106-115.

Recebido em fevereiro de 2015.

Aceito em agosto de 2015.