

Uso combinado do sensor MODIS e imagens Landsat para monitorar áreas embargadas no estado do Pará (PA)

Andrés Barrera Vilarmau¹
Thaise da Silva Rodrigues¹
Karina Serra Silvestre¹
Edson Eyji Sano²
Camila Aparecida Lima Lopes¹

¹ HEX Informática Ltda
SCN Quadra 1 Bl F Sala 1406 Ed. América Office Tower - CEP 70.711-905 - Brasília – DF, Brasil
{andrés.vilarmau, thaise.rodrigues, karina.silvestre,camila.lima}@hexgis.com

² Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA
Centro de Sensoriamento Remoto
SCEN Av. L4 Norte Bloco F CEP 70818-900 - Brasília - DF, Brasil
edson.sano@ibama.gov.br

Abstract. The conservation of the Amazonia is essential because of its richness of natural resources. Nevertheless, large areas of Amazonia have been deforested. The Brazilian Institute for Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) is making significant efforts to reduce deforestation in this ecosystem. For instance, law enforcement procedures are used whenever an ongoing deforestation is illegal. The illegal deforested areas should be left over by law for regeneration. Time series of vegetation indices have potential to monitor embargoed areas as well as to estimate the time of deforestation. In this study, we analyzed the time series of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data converted into enhanced vegetation indice (EVI2) from 30 embargoed areas located in the Para State to estimate the time of deforestation as well as to indicate if a specific embargoed area is in process of regeneration. Landsat imageries obtained in different points in time along the MODIS time series were also analyzed to support the interpretation of EVI2 time series. Results showed great potential of EVI2 to subsidize the monitoring activities of embargoed areas in Amazonia.

Palavras-chave: áreas embargadas, Landsat, EVI2, monitoramento ambiental.

1. Introdução

A Amazônia possui a maior reserva de biodiversidade do mundo e é o maior bioma brasileiro em extensão, ocupando 49,29% do território nacional (Portal Brasil, 2009) com aproximadamente 4.000.000 de km². No Brasil, este bioma cobre totalmente cinco estados (Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima), quase que totalmente o estado de Rondônia (98,8%) e parcialmente os estados de Mato Grosso (54%), Maranhão (34%) e Tocantins (9%) (Portal Brasil, 2009). Apesar da elevada importância ambiental, a Amazônia vem perdendo sua vegetação natural significativamente ao longo de décadas. Segundo os dados divulgados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2013, a média anual sobre a retirada da cobertura florestal na região foi superior a 11 mil km² na última década. Entre os diversos fatores que promovem o desmatamento na Amazônia estão o preço dos produtos agropecuários, a construção de estradas, o crédito rural, o preço da terra, o nível de renda e a presença da população (FERRAZ, 2001 *apud* FEARNESIDE, 2006 e PRATES e SERRA, 2009). O Pará é o estado que mais sofreu desmatamento nos últimos oito anos. Nele, são encontrados 45% das florestas derrubadas na Amazônia Legal. Nesse estado, as regiões sul e leste são dominadas por grandes fazendas onde a pecuária está consolidada (ALENCAR *et al.*, 2004). Já ao longo da rodovia Transamazônia (BR-230) e Cuiabá-Santarém (BR-163), o cenário de desmatamento é caracterizado principalmente pela abertura de pequenas áreas localizadas nas faixas destinadas aos projetos de assentamentos (ALENCAR *et al.*, 2004; FEARNESIDE, 2006; TANCREDI *et al.*, 2009).

Entre as medidas mitigadoras e compensatórias dos impactos relacionados ao desmatamento ilegal da vegetação natural amazônica, estão punições administrativas e penais, oriundas dos órgãos

legalmente instituídos, aos infratores responsáveis pelo dano ambiental. Para tanto, o governo brasileiro conta com sua base legal que é potencialmente eficiente para a redução do desmatamento. A Constituição Federal trata do assunto em seu artigo 225, o qual prevê responsabilizações por danos ambientais. As aplicações de sanções administrativas, competência dos órgãos federais e estaduais, são reguladas pela Lei de Crimes Ambientais nº 9.605 de 1998, pelo Decreto nº 6.514 de 2008 (antigo Decreto nº 3.179 de 1999) e pela Instrução Normativa do Ibama nº 08 de 2003 (BRITO e BARRETO, 2007). No caso de áreas irregularmente desmatadas, há determinação legal expressa no art. 16 do Decreto 6.514 de 2008 para aplicação da medida acautelatória e da penalidade de embargo. O embargo é aplicado no momento da fiscalização para atender aos objetivos de “prevenir a ocorrência de novas infrações, resguardar a recuperação ambiental e garantir o resultado prático do processo administrativo” (§ 1º do art. 101 do Decreto 6.514/08). Assim, o objetivo da aplicação do auto de infração de embargo é impedir a continuidade do dano ambiental e viabilizar a regeneração e recuperação da área degradada.

Neste sentido, os órgãos competentes para lavrar os autos de infração contam com técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento que permitem maior eficiência no monitoramento ambiental. Por meio do sensoriamento remoto, é possível a geração de dados do ilícito ambiental com exatidão de área e localização, em tempo relativamente rápido e escalas estaduais. Os resultados obtidos no geoprocessamento são facilmente disseminados para a fiscalização que pode atuar de forma mais eficiente (ALENCAR *et al.*, 2004; TANCREDI *et al.*, 2009). A partir dos produtos advindos de imagens de satélite, podem ser extraídos dados contínuos do uso e ocupação do solo. Como forma de monitorar e conter o desmatamento, foram criados projetos que utilizam produtos obtidos com sensoriamento remoto, como o TerraClass, Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira (DEGRAD), DETEX, Projeto de Monitoramento do Desflorestamento na Amazônia Legal (PRODES) e o Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER). O presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o uso combinado de imagens do programa Landsat com a série temporal de imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) realçados por um índice de vegetação para detecção do início do desmatamento ilegal no estado do Pará e monitoramento do cumprimento do embargo nessas áreas.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

Foram selecionadas 30 áreas embargadas por desmate ilegal com mais de 10 hectares distribuídos na mesorregião do Sudeste Paraense (Figura 1). A área de estudo foi delimitada aproximadamente entre as latitudes 5° 36' S e 9° 42' S e entre as longitudes 48° 51' W e 52° 55' W, correspondendo às seguintes órbitas-pontos: 223-63, 224-64, 224-66, 224-67, 225-64, e 225-67. Os embargos considerados nesse estudo possuem autos de infração lavrados entre os anos de 2006 e 2012 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Elas podem ser acessadas pelo Sistema Compartilhado de Informações Ambientais do órgão (<http://siscom.ibama.gov.br/>).

2.2 Detecção do início do desmatamento ilegal e descumprimento do embargo

A data inicial do desmatamento e a análise do cumprimento do embargo foram estimadas com base na série histórica (2000-2013) do sensor MODIS realçadas pelo índice de vegetação denominado EVI2 (JIANG *et al.*, 2008). Tais informações são disponibilizadas gratuitamente pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no endereço eletrônico: www.dsr.inpe.br/laf/series/index.php.

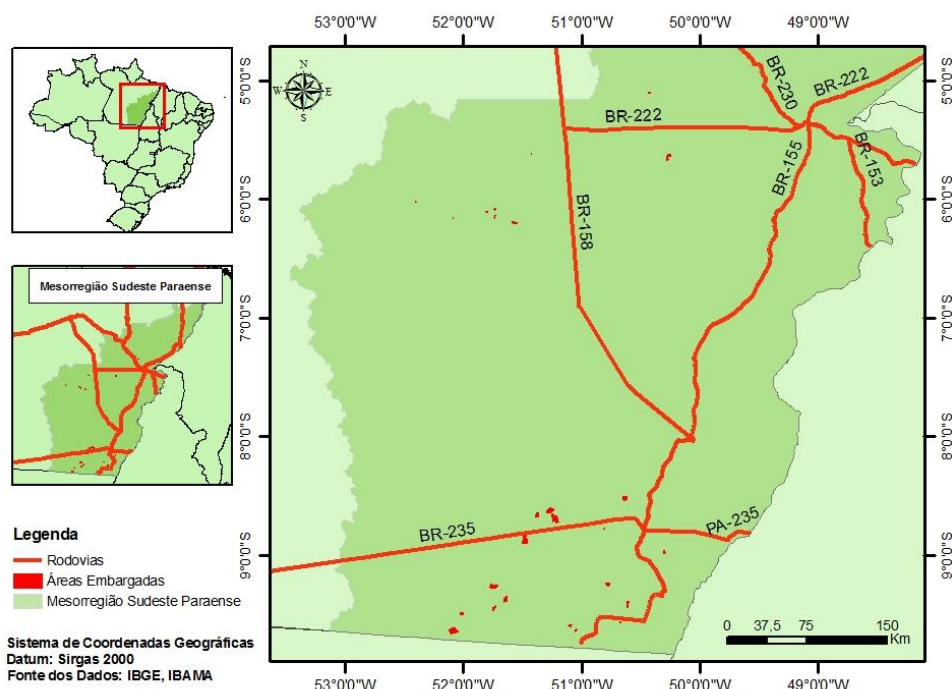


Figura 1. Localização das áreas embargadas na mesorregião do Sudeste paraense utilizadas no presente estudo.

O EVI2 é um índice de vegetação altamente correlacionado com o índice de vegetação realçado (EVI), desenvolvido por Huete et al. (2002) e que faz parte da lista de produtos do MODIS prontos para serem utilizados (*ready-to-use*). O EVI2 foi desenvolvido basicamente por causa da ausência da banda espectral na faixa do azul por parte de alguns sistemas sensores. Sua equação é dada por (MIURA et al., 2008):

$$EVI2 = 2,4 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 1} \quad (1)$$

onde ρ_{NIR} = reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo; e ρ_{RED} = reflectância na faixa espectral do vermelho.

O cálculo do EVI2 utiliza o produto MOD13, com resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias, sendo disponibilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). A série representa os valores observados em um determinado pixel nas imagens MODIS ao longo do tempo. Este índice de vegetação pode variar entre 0 e 1, sendo que os valores mais próximos de 0 são referentes ao solo exposto e os valores mais próximos de 1 indicam maior cobertura de vegetação. Esta técnica de sensoriamento remoto permite analisar as variações da vegetação. Segundo Jesus e Miura (2009), os índices de vegetação são tipos específicos de transformação radiométrica, que por apresentarem uma relação direta com a fitomassa foliar verde, são muito utilizados para avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal. Para detectar o ano em que se deu o início do desmatamento, foram comparados os valores históricos (2000-2013) de EVI2 das 30 áreas embargadas com 30 amostras de floresta. Foi selecionado ainda um pixel do MODIS correspondente à área de floresta primária, próximo à cada embargo. Essas amostras foram usadas como pontos de controle, no intuito de verificar se há um padrão de comportamento de áreas inalteradas. Ademais, a análise foi realizada mediante a interpretação de gráficos contendo informações da série temporal do índice vegetativo nessas áreas. A data em que o valor do EVI2 de cada área embargada apresentou uma queda abrupta e significativa em relação a amostra de floresta próxima ao embargo, foi considerado o início do desmate.

Para monitorar o cumprimento do embargo, a análise baseou-se no comportamento do EVI ao

longo de toda a série histórica, e não mais na primeira queda do índice vegetativo. Para este caso, foi assumida a hipótese de que haveria cumprimento do embargo caso a curva do EVI apresentasse aumento dos valores de EVI2, assemelhando-se assim, aos valores encontrados nas amostras de florestas. Caso contrário, ou seja, se a curva apresentasse declínios acentuados, seria um indício de que a área estaria em uso. Para constatar o comportamento do índice de vegetação quando há cumprimento do embargo, foram selecionadas 15 amostras de áreas que foram alteradas em algum momento e que estavam em processo de regeneração natural, conforme detalhado na próxima subseção.

2.3 Validação dos dados obtidos

A aferição da data do início do desmatamento foi realizada com base em interpretação visual de imagens do programa Landsat (satélites Landsat 5, 7 e 8). As imagens dos sensores Landsat 5 e 7 foram georreferenciadas e obtidas no banco de dados do Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) do IBAMA na composição colorida RGB 543. As cenas do Landsat 8 foram disponibilizadas com ortorretificação e gratuitamente no *site* da United States Geological Survey (USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>). As bandas utilizadas para a composição colorida foram RGB 654. Com isso, pretendeu-se confirmar a compatibilidade entre os valores do EVI2 do sensor MODIS e a resposta visual das imagens do sensor Landsat. As análises foram realizadas nos pacotes computacionais de sistemas de informações geográficas Quantum GIS 2.2 Valmiera e ArcGIS 10.

3. Resultados e Discussão

A análise visual de dados de EVI2 relativos a 30 áreas embargadas mostraram que existe diferença entre os índices das áreas desmatadas em relação aos das florestas primárias. Em todos os embargos, foi possível verificar o período em que se iniciou o desmatamento. Vale ressaltar que, na maioria dos casos, o desmatamento já havia ocorrido antes do ano de lavratura do auto de infração dos embargos.

Ademais, o EVI2 apresentou-se como uma ferramenta eficaz em identificar o início do desmate das áreas embargadas a partir de análises da série temporal (2000-2013). Um gráfico de EVI2 típico de área desmatada por corte raso pode ser visualizado na Figura 2. Até o ano de 2003, as duas curvas temporais apresentavam padrão bastante similar. Entre 2003 e 2004, percebe-se uma redução drástica no valor de EVI2 da curva identificada como Polígono 2 na figura, passando de ~ 0,6 para menos de 0,2. Em seguida, esse mesmo pixel passa a apresentar picos de EVI2 mínimo e máximo muito mais acentuados em relação à série temporal da floresta. Esse padrão espectral é típico de áreas ocupadas por plantios em desenvolvimento e corroboram com os resultados obtidos por Galfor et al. (2008), que caracterizaram a curva EVI para agricultura e pecuária no Mato Grosso.

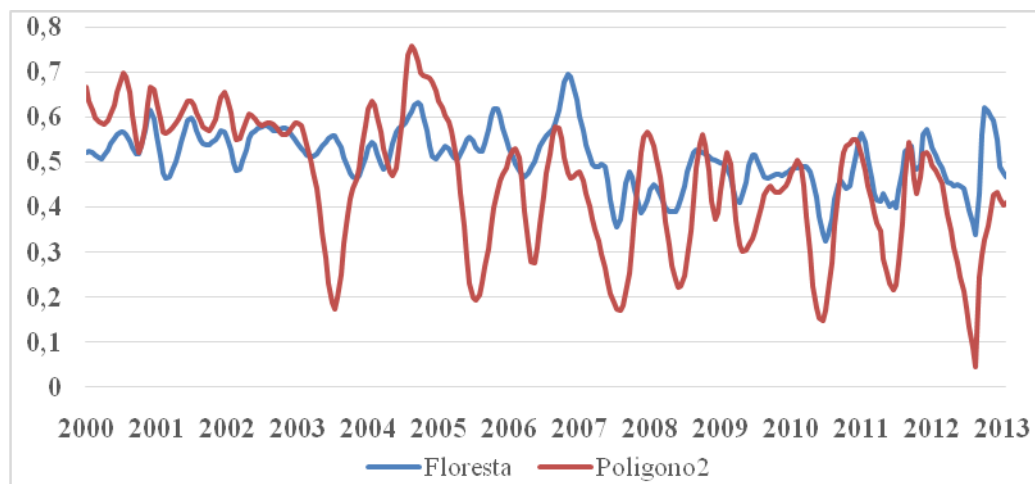


Figura 2. Curva temporal da variação do índice EVI2, em floresta natural e no Polígono 2.

As amostras de florestas foram eficientes para servir como padrão do índice de vegetação de áreas inalteradas, possibilitando a minimização dos efeitos da sazonalidade climática que interferem na análise das séries temporais dos polígonos relativos às áreas desmatadas. A ocorrência de declíneos bruscos do índice de vegetação entre o padrão do EVI das amostras de floresta e das áreas embargadas pode ser considerado como um indicativo de supressão da cobertura vegetal. A Figura 3A mostra uma área antes do desmatamento, que começou, de acordo com a série temporal de EVI2, em maio de 2003 (Figura 2). Na Figura 3B, percebe-se que essa área está sendo utilizada provavelmente para produção de grãos em 2014.

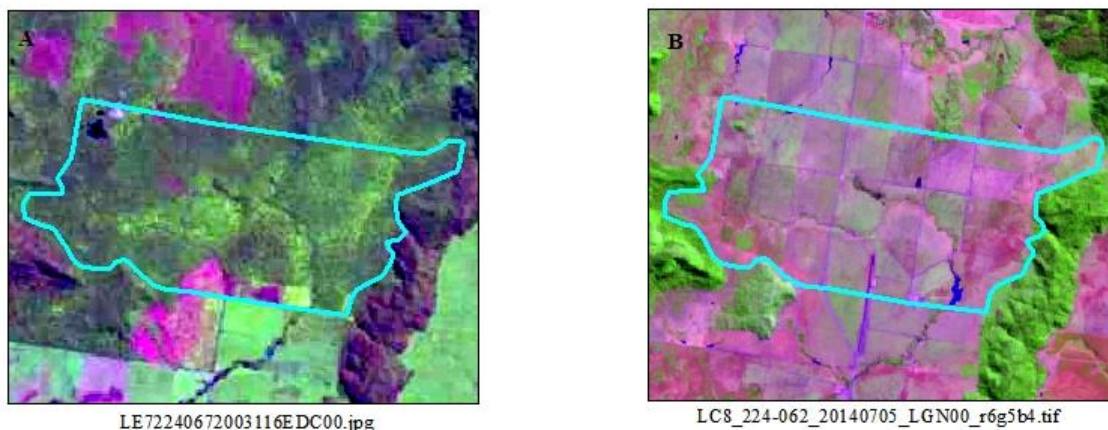


Figura 3. Imagens Landsat do Polígono 2, com informações do tipo de satélite, órbita ponto, data e bandas espectrais

Na análise do descumprimento do embargo, a série histórica dos valores do EVI2 também mostrou-se adequada. Na Figura 4, é possível observar o constante uso do solo na área embargada em questão, ou seja, todos os anos seguintes à autuação do embargo apresentaram picos de decréscimo nos valores de EVI, indicando solos sem cobertura vegetal verde (preparados para plantio ou cobertos com palhada seca), caracterizando descumprimento do embargo.

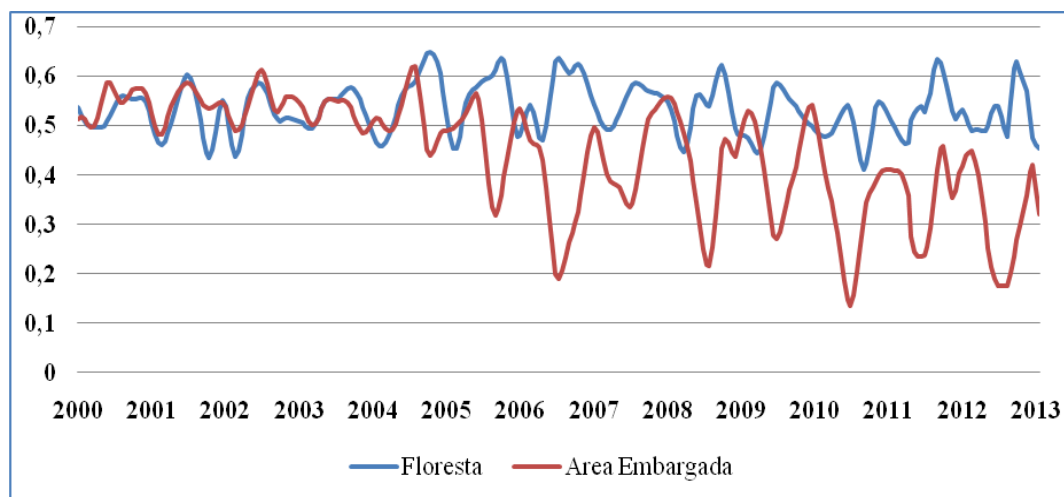


Figura 4. Curva temporal da variação do índice EVI, em floresta natural e no Polígono 2.

Para validar esse dado, foi feita a comparação entre as imagens Landsat-5 do ano de 2006 (ano da autuação) e Landsat-8 de 2014, observando-se que realmente houve quebra do embargo, conforme ilustrado na Figura 5 abaixo.

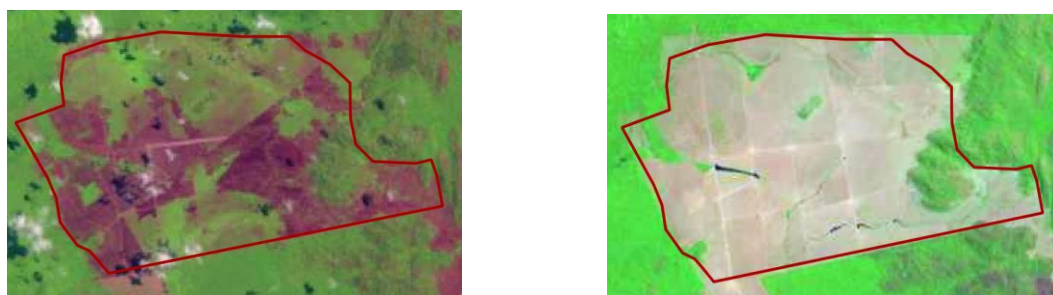


Figura 5. Imagens Landsat-5 no ano de 2006 (imagem após a data de autuação) e Landsat-8 de 2014.

Das 30 amostras de embargos selecionados, em nenhum caso verificou-se o cumprimento do embargo. No entanto, através das amostras de regeneração obtidas, foi possível encontrar um padrão de comportamento do EVI para áreas em processo de regeneração natural, podendo verificar como seria a resposta espectro-temporal típica de EVI2, caso houvesse cumprimento de embargo.

As Figuras 6 e 7 correspondem às áreas que foram desmatadas e posteriormente abandonadas. Este abandono induziu a uma regeneração natural destas áreas. Na série temporal de EVI2, a regeneração produz uma suavização nas oscilações periódicas, passando de picos marcantes, típicos do antropismo (2002-2008), para curvas mais tênues, comuns em vegetação natural. De acordo com a Figura 6, também se observa que as áreas degradadas recuperam os valores originais do índice de vegetação, correspondente a floresta nativa, à medida que a regeneração vai ocorrendo (2008 em diante).

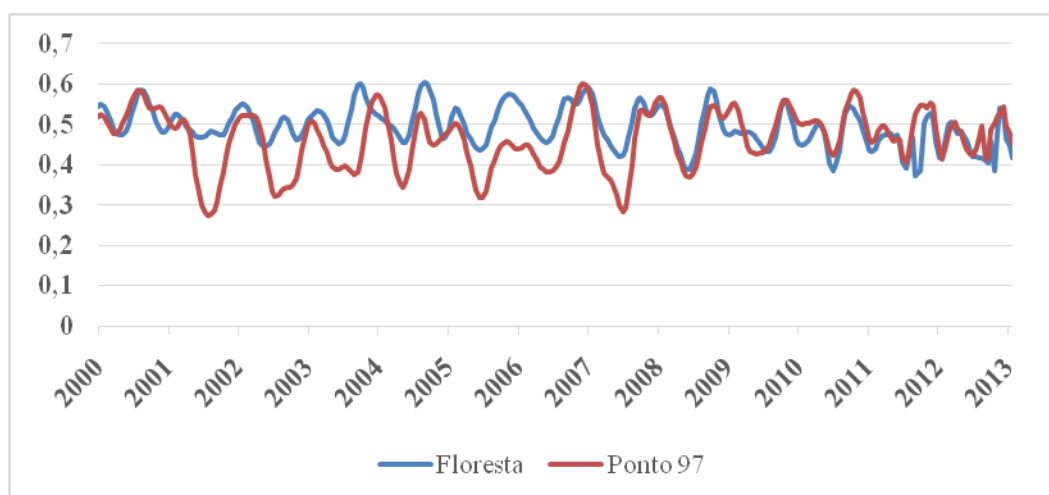


Figura 6. Séries temporais de EVI2 de uma área com processo de regeneração (Ponto 97) e de uma outra área-testemunho (floresta primária) adjacente.

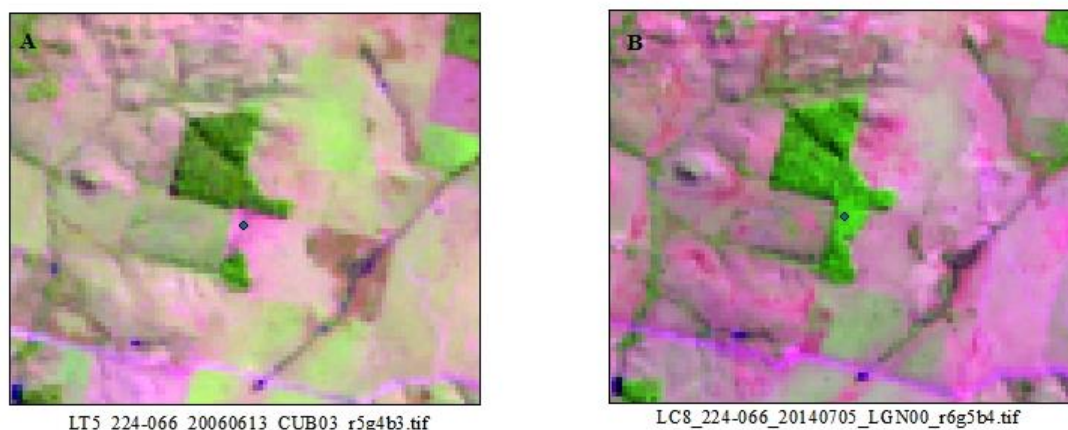


Figura 7. Imagens Landsat do Ponto 97 (área em processo de regeneração), mostrando uma área desmatada em 2006 e praticamente regenerada em 2014.

Observa-se que, em áreas regeneradas, alguns valores de EVI2 são superiores aos valores observados em áreas de floresta natural. Isto pode ser devido à ocupação da área com plantas de crescimento rápido que provocam um aumento nos valores de índice de vegetação, resultado da sua atividade fotossintética mais intensa. Outra explicação pode estar relacionada com efeitos de sombreamento no dossel que é menos intenso em áreas de regeneração. Em outras palavras, segundo Moura et al. (2009), áreas de capoeira apresentam um comportamento sazonal em que os valores de índice de vegetação são mais altos na época de chuva. No entanto, para estas formações florestais, a disponibilidade hídrica propicia uma estabilidade mesmo na época seca, devido à atividade fotossintética e conseqüente produção de fitomassa foliar mantidas nesta estação (Huete et al., 2006). No gráfico da Figura 6, percebe-se que os valores de EVI2 do Ponto 97 se aproximam dos correspondentes valores da floresta natural, e esta recuperação é comprovada Figura 7B.

4. Considerações Finais

O uso do EVI2 do sensor MODIS mostrou-se adequado para a detecção do início do desmatamento em áreas embargadas. Na análise do descumprimento do embargo, o índice também apresentou-se como ótimo recurso de suporte para a fiscalização. Depreende-se ainda dos resultados obtidos que, em casos de cumprimento de embargo, os valores do índice de vegetação aproximam-se dos valores apresentados em áreas de florestas inalteradas, o que prova a eficácia do índice como ferramenta de monitoramento ambiental.

Os resultados indicam o elevado potencial das análises espectro-temporais de índices de vegetação para o monitoramento da cobertura vegetal, sendo uma ótima ferramenta para o uso combinado com imagens do programa Landsat para análise de áreas embargadas.

Agradecimentos

Agradecemos ao coordenador da Coordenação Geral de Monitoramento Ambiental do IBAMA, Dr. George Porto Ferreira; ao coordenador de Tecnologia de Informação Geoespacial, Dr. Marcelo Aguiar; ao chefe-substituto do Centro de Sensoriamento Remoto, Dr. Daniel Freitas, pelo apoio e auxílio na elaboração desse estudo. Agradecemos também aos sócios-diretores da Hex, Mariano Pascual e Leonardo de Barros, pelo incentivo e suporte à equipe.

Referências Bibliográficas

- Alencar, A.; Nepstad, D.; McGrath, D.; Moutinho, P.; Pacheco, P.; Diaz, M. D. C. V.; Soares Filho, B. **Desmatamento na Amazônia indo além da “emergência crônica”**. Belém: IPAM, 2004, 89 p.
- Brito, B.; Barreto, P. **A eficácia da aplicação da lei de crimes ambientais pelo IBAMA para proteção de florestas no Pará**. Belém: Imazon, 2007, 33 p.
- Fearnside, P. M.. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.
- Galford, G.L.; Mustard, J.F.; Melillo, J.; Gendrin, A.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. P. **2008**. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *RemoteSensing of Environment*, v. 112, p. 576–587, 2008.
- 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**, v. 83, p. 195–213, 2002.
- Huete A. R.; Kamel, D.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutyrá, L. R.; Yang, W.; Nemani, R. R.; Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, 4 p., 2006.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas e de vegetação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em: 14.Nov.201

Jesus, S. C.; Miura, A. K. Análise de regressão linear múltipla para estimativa do índice de vegetação melhorado (EVI) a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1103-1110.

Jiang, Z.; Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008.

Miura, T.; Yoshioka, H.; Fujiwara, K.; Yamamoto, H. Inter-comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring. **Sensors**, v. 8, p. 2480-2499, 2008.

Moura, Y. M.; Shimabukuro, Y. E.; Silva, G. B. S.; Fisch, G.; Dias, N. W.; Gadioli, D. **2009**. Análise comparativa entre índices de vegetação NDVI e EVI e sua relação com o balanço hídrico na Bacia do Una – SP. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL, 2. Taubaté, SP. **Anais...** Taubaté: IPABHi, p. 33-40, 2009.

Portal Brasil. **Meio Ambiente. Conheça os biomas brasileiros**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2009/10/biomas-brasileiros>>. Acesso em: 10.Nov.2014.

Prates R. C.; Serra, M.. O impacto dos gastos do governo federal no desmatamento no Estado do Pará. **Nova Economia**, v. 19, n. 1, p. 95-116, 2009.

Tancredi, N. S. H.; Santos, P. M. C.; Cohenca, D. Esforço do laboratório de geoprocessamento da gerência executiva do IBAMA em Santarém para o monitoramento ambiental da região oeste do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 14., Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 4481-4488.