

## **Análise de bandas espectrais e índices de vegetação NDVI e NBR para a reconstrução histórica da alteração da floresta de várzea do Baixo Amazonas através de série temporal Landsat**

Everton Hafemann Fragal<sup>1</sup>  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo<sup>1</sup>  
Thiago Sanna Freire Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{hafemann, evlyn}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup> Ecosystem Dynamics Observatory, Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE)  
UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro.  
tsfsilva@rc.unesp.br

**Abstract.** We examined which among two vegetation spectral indexes (NDVI or NBR) and original TM and ETM+ spectral bands are more suitable to reconstruct the historical baseline of disturbance and regeneration events in floodplain forests of the Lower Amazon. We studied Landsat temporal-spectral trajectories using the LandTrendr algorithm, for the 1984-2009 period. A time series of 37 Landsat images was given as input to the pixel-based temporal segmentation algorithm present in LandTrendr. Results showed that NDVI was efficient in establishing a historical baseline of disturbance and regeneration events for the floodplain forest, due to its spectral amplitude throughout the time-series. NBR was suitable for establishing a historical baseline, but did not detect forest to water body conversion events, as there was little spectral difference between the near infrared (band 4) and mid infrared (band 7) spectral regions. The near infrared band was able to identify events such as 2, 4 and 6, but with less efficiency than NDVI. The red (band 3) and mid infrared (band 7) regions had little spectral variation over the 25 years analyzed, preventing correct identification of disturbance events. Based on NDVI, the amplitude of spectral values in the time-series was similar between remaining forest (event 1) and fast loss of floodplain forest by anthropogenic causes (event 3), which hindered the discrimination of these events based on temporal-spectral trajectories.

**Palavras-chave:** Amazon, floodplain forest, LandTrendr, forest alteration, Amazônia, floresta de várzea, LandTrendr, alteração da floresta.

### **1. INTRODUÇÃO**

A reconstrução histórica dos eventos de alteração e pós-alteração (regeneração) da floresta de várzea amazônica, por causas naturais ou antrópicas, reduz incertezas nas estimativas de emissão e sequestro de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera (Melack et al. 2004). A reconstrução dos eventos de alteração permite também compreender os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a floresta de várzea no decorrer do tempo, uma vez que, trabalhos científicos (e.g. Marengo et al. 2011; Silva et al. 2013) indicam possíveis relações entre as mudanças climáticas e o aumento da frequência de eventos extremos de cheias (e.g. 1989 e 2009) e secas (e.g. 2005 e 2010) no ciclo hidrológico do rio Amazonas. Entende-se por regeneração da floresta o processo de recuperação após a alteração da floresta, assim como o crescimento da cobertura florestal em locais em que ela não existia previamente.

Para a reconstrução eficiente dos eventos de alteração e regeneração da floresta com informações espectro-temporais, é fundamental a existência de séries temporais de imagens com mais de três décadas, requisito preenchido pelos satélites da série Landsat (desde 1972). Além disso, devido ao grande volume de dados, essa reconstrução só pode ser operacionalizada a partir de algoritmos que permitam automatizar o processo de reconstrução da trajetória de mudança na cobertura do solo. Tais algoritmos constroem trajetórias espectrais ao longo do tempo, chamadas

de trajetórias espectro-temporais (Gómez et al. 2014), as quais possuem relação direta com os eventos ocorridos na floresta, e muitas vezes com seu agente causador (natural ou antrópico).

O algoritmo *Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery* (LandTrendr), desenvolvido por Kennedy et al. (2010), permite gerar as trajetórias espectro-temporais com base em índices de vegetação, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI; Rouse et al. 1973), *Normalized Burn Ratio* (NBR; Key e Benson, 2006) ou por bandas espectrais em reflectância de superfície (espectro óptico) do Landsat/TM e ETM+. Vários trabalhos utilizaram este algoritmo para o estudo de florestas temperadas (e.g. Griffiths et al. 2013; Meigs et al. 2011), mas sua eficiência para reconstruir o histórico de eventos de alteração e regeneração da floresta de várzea amazônica, caracterizada por maior heterogeneidade espacial e espectral, ainda é desconhecida.

Desta forma, o objetivo desse trabalho foi examinar qual índice de vegetação (NDVI ou NBR) ou banda espectral é mais eficiente para a reconstrução histórica da alteração e regeneração da floresta de várzea Amazônica. Para tal, foram usadas trajetórias espectro-temporais geradas pelo algoritmo LandTrendr no período de 1984 a 2009, para uma região antropizada do Baixo Amazonas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

A floresta de várzea estudada localiza-se em um trecho do Baixo Amazonas, no Estado do Pará, próximo as cidades de Juruti e Oriximiná (Figura 1). Esta região foi escolhida devido a carência de estudos sobre a alteração e regeneração da floresta de várzea, em comparação ao rio Amazonas na região central e oeste (e.g. Kallioli, 1991; Peixoto et al. 2009).

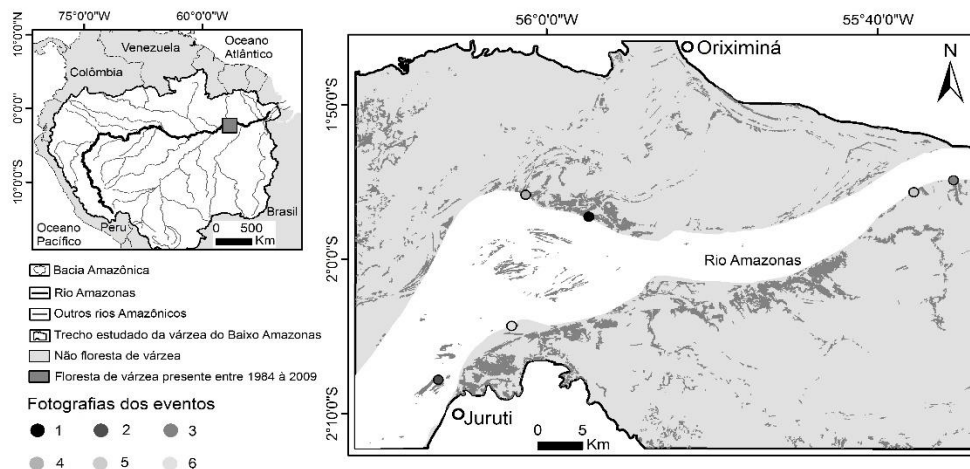


Figura 1. Mapa de localização do trecho da várzea do Baixo Amazonas estudado. Os pontos 1 a 6 mostram as posições onde foram extraídas as trajetórias espectrais-temporais, e fotografias de campanha de campo.

### 2.2 Aquisição de imagens e dados auxiliares

Utilizou-se uma série temporal composta por 34 imagens do sensor Landsat 5/TM e 4 imagens do sensor Landsat 7/ETM+, referentes à órbita/ponto 228/061 distribuídas ao longo do período de 1984 a 2009. Foram adquiridas no máximo duas imagens em cada ano, entre os meses de setembro e novembro os quais correspondem ao período de águas baixas do rio Amazonas, com menor ocorrência de nuvens e máxima irradiância, buscando maximizar o sinal radiométrico. As imagens foram obtidas no banco de dados Landsat CDR (<http://earthexplorer.usgs.gov>), o qual disponibiliza

imagens corrigidas geométrica e atmosféricamente, em reflectância de superfície, e incluindo máscaras de nuvens e sombras de nuvens.

## 2.3 Métodos

Foram geradas máscaras de cobertura florestal para os anos de 1984 e 2009, com base em imagens Landsat/TM, a fim de delimitar as áreas de florestas remanescentes, removidas e regeneradas entre o período inicial (1984) e final (2009) da série temporal. Para isso, foi utilizado o algoritmo *Random Forests* (RF) executado no software estatístico R, pacote “*randomforest*” (LIAW e WIENER, 2002), seguido de edição manual.

A geração de trajetórias espectro-temporais foi realizada com a aplicação do algoritmo LandTrendr, disponibilizado gratuitamente (<http://landtrendr.forestry.oregonstate.edu>). Sua aplicação assume que a série temporal de imagens representa o mesmo período do ano, uma vez que o algoritmo busca detectar modificações persistentes ao longo dos anos, e considera as variações intra-anuais como ruídos (e.g. ângulo solar, fenologia da floresta e período hidrológico).

O algoritmo LandTrendr permite a segmentação temporal pixel a pixel da série de imagens, gerando trajetórias espectro-temporais (Figura 2). Estas trajetórias são o resultado da junção de segmentos de retas, que expressam a tendência da variação do valor espectral da variável de entrada (reflectância espectral ou índices espectrais) em um dado intervalo de tempo. Nesta pesquisa, os segmentos de retas foram definidos segundo quatro parâmetros (Figura 2 A a D, respectivamente): 1) *despike* = 0.9: permite a remoção dos valores anômalos causados por nuvem e sombra de nuvem não mascarados corretamente; 2) *max\_segments* = 6: gerado a partir de sucessivas regressões lineares baseada pelo número máximo “n” de segmentos de retas que revelam tendências temporais. Este parâmetro é satisfeito quando o *Root Mean Square Error*, (RMSE) entre o índice espectral da trajetória original e da trajetória ajustada é pequeno; 3) *vertex count overshoot* = 3: promove a remoção de segmentos de retas se superado o número máximo definido pelo *max\_segments*; 4) *pval* = 0.05: expressa o ajuste entre a união dos segmentos de retas (trajetória espectro-temporal) em relação a trajetória original. Caso não haja bom ajuste entre todos os segmentos de retas, estes serão modificados simultaneamente até que um bom ajuste seja alcançado.

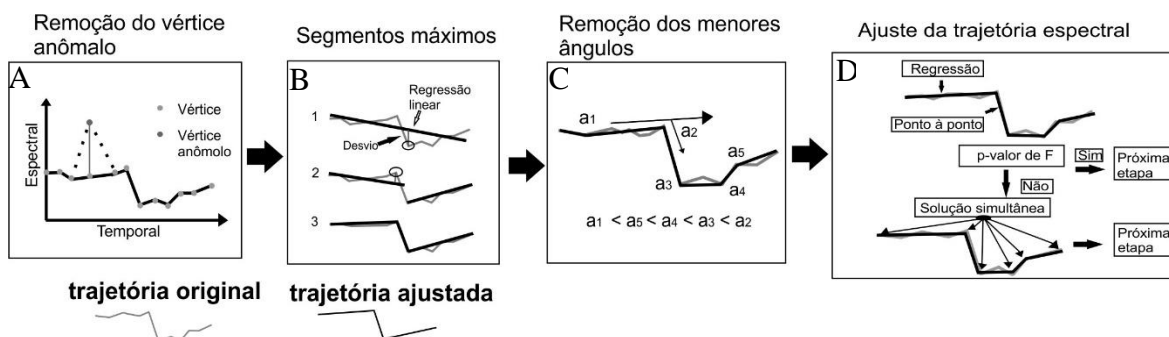


Figura 2. Síntese dos procedimentos aplicados na construção da trajetória espectro-temporal pelo LandTrendr. (A) (*despike*), remoção dos picos anômalos do índice espectral. (B) (*max\_segments*), parâmetros de segmento máximo; os números 1 a 3 representam a quantidade de segmentos. (C) (*vertex count overshoot*), parâmetro que garante a remoção do segmento de menor ângulo quando o número máximo de segmentos é ultrapassado. (D) (*pval*), ajuste do bom modelo da trajetória espectral-temporal do pixel. (Modificado de Kennedy et al. 2010).

Para execução do algoritmo LandTrendr são necessárias todas as bandas espectrais do visível e infravermelho próximo e médio do Landsat/ TM e ETM+, assim como as respectivas máscaras de nuvem e sombra de nuvem. Os índices de vegetação são calculados com base nas bandas

espectrais pelo algoritmo LandTrendr. Assim, foram geradas trajetórias espectro-temporais com o uso dos índices de vegetação NDVI e NBR (Equações 1 e 2 respectivamente), cujos valores se situam no intervalo de -1 a 1, sendo que valores próximos a -1 representam corpo d'água, enquanto valores mais próximos de 1 indicam maior biomassa da vegetação.

$$NDVI = \rho_{NIR} - \rho_{red} / \rho_{NIR} + \rho_{red} \quad (1)$$

$$NBR = \rho_{NIR} - \rho_{MIR} / \rho_{NIR} + \rho_{MIR} \quad (2)$$

Onde:  $\rho_{MIR}$ ,  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{red}$  = reflectância de superfície nas regiões espectrais do infravermelho médio (banda 7), infravermelho próximo (banda 4) e vermelho (banda 3), respectivamente.

Também foram geradas trajetórias espectro-temporais com as regiões espectrais do vermelho (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (banda 7). As regiões espectrais do azul e verde (bandas 1 e 2, respectivamente) e infravermelho médio (banda 5), não foram utilizadas devido a elevada correlação com as bandas 3 e 7, respectivamente. A extração da trajetória espectro-temporal de cada pixel é composta pelo valor médio de uma janela de 3x3 pixels (Kennedy et al. 2010).

As trajetórias espectro-temporais foram associadas a eventos de remoção, regeneração e permanência da floresta de várzea entre 1984 a 2009, sendo: Evento 1 = floresta de várzea remanescente; Evento 2 = rápida remoção da floresta de várzea causada por erosão fluvial; Evento 3 = rápida remoção da floresta de várzea causada por ação antrópica; Evento 4 = gradual remoção da floresta de várzea causada por erosão fluvial; Evento 5 = gradual remoção da floresta de várzea causada por ação antrópica; e Evento 6 = crescimento da cobertura florestal. Foram extraídas 35 trajetórias espectro-temporais para cada evento, a fim de conhecer a variação dos valores dos índices de vegetação e bandas espectrais no decorrer do tempo. A validação das trajetórias espectro-temporais foi realizada com base em fotografias digitais georreferenciadas, obtidas em uma campanha de campo realizada em outubro de 2014. A localização das trajetórias espectro-temporais e fotografias se encontram na Figura 1.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área de floresta de várzea em 1984 foi de 15,500 ha, enquanto em 2009 foi de 13,600 ha, representando uma diminuição de 1,900 ha (12 %). Contudo, este valor total mascara uma regeneração da cobertura florestal de 3,810 ha (24 %), a qual minimizou a perda real de floresta de várzea de 5,640 ha (36,4%).

Com o índice NDVI, foi obtida maior eficiência na reconstrução histórica de todos os eventos (Figura 3 e 4), por mostrar maior amplitude nos valores espectrais ao longo da série temporal (e.g eventos 2 e 4), sendo sensível e representativo aos eventos ocorridos. Também o valor da mediana do índice NDVI interanual apresentou-se mais adequado para associar a trajetória espectro-temporal aos eventos ocorridos sobre a floresta em comparação a outras medidas estatísticas (e.g. primeiro ou terceiro quartil).

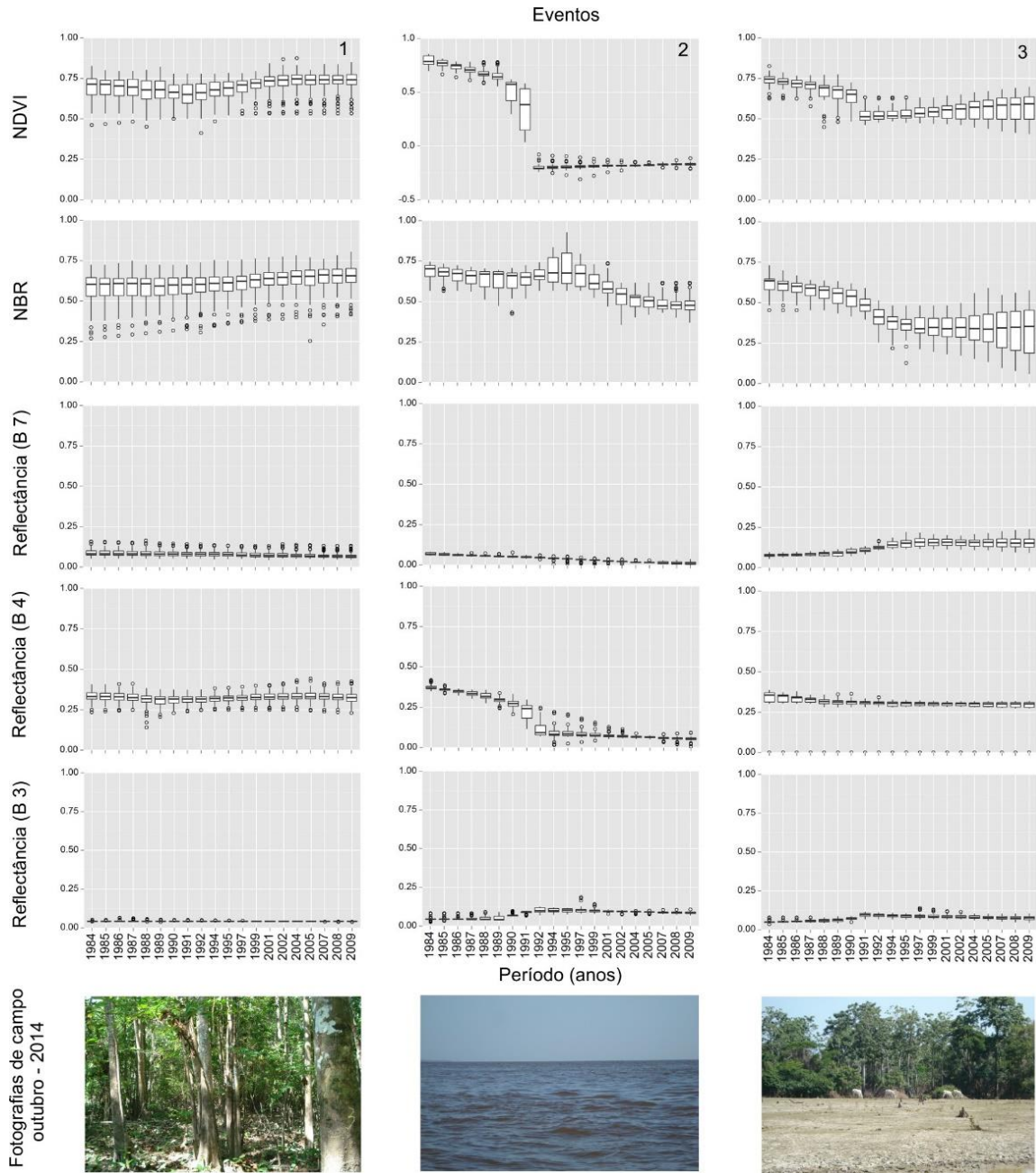


Figura 3. Trajetórias espectro-temporais associadas a eventos sobre a floresta de várzea. 1) Floresta de várzea remanescente entre 1984 a 2009; 2) Rápida remoção da floresta de várzea causada por erosão fluvial; 3) Rápida remoção da floresta de várzea causada por ação antrópica. Reflectância (B7, B4 e B3) significa reflectância de superfície das bandas 7, 4 e 3 respectivamente. As fotografias mostram a atual (outubro de 2014) cobertura do solo.

O índice de vegetação NBR, também mostrou ser sensível aos eventos 1, 3, 5 e 6, embora tenha apresentado incoerência na reconstrução histórica dos eventos 2 e 4. Isto pode ser explicado pela pequena diferença dos valores de reflectância de superfície das bandas 4 e 7, quando o pixel apresenta-se plenamente como corpo d'água. As bandas 3 e 7 isoladamente não foram adequadas para reconstruir os eventos devido à pequena variação da reflectância de superfície no decorrer da série temporal, enquanto a banda 4 mostrou ter capacidade para reconstruir alguns eventos (2, 4 e 6), porém com menor eficiência quando comparada ao índice de vegetação NDVI.





A reconstrução histórica dos eventos 4 e 5 mostraram a ocorrência de alterações graduais da floresta de várzea ao longo da série temporal, porém com diferentes amplitudes entre o início e o fim da série (cerca de 0.9 e 0.25, respectivamente). Estas reconstruções também confirmam a existência de diferentes coberturas do solo (gradual conversão da floresta para corpo d'água e pastagem, respectivamente). A ocorrência desses eventos pode ser explicada: 1) pelo modo de alteração da floresta de várzea, como no caso do evento 4, em que um pixel de floresta demora efetivamente entre 15 e 20 anos para ser completamente convertido para corpo d'água, devido à elevada resistência das margens florestadas à erosão fluvial; e 2) pelo uso de 35 trajetórias espectro-temporais, sendo que cada pixel foi alterado em anos diferentes, o que faz com que a mediana dessas trajetórias tenda a suavizar a alteração da floresta ao longo do tempo. Já o evento 6 mostrou crescimento florestal, a partir do ano de 1992, indicando para a floresta regenerada uma idade relativa de 17 anos.

A similaridade da amplitude interanual do momento crítico da alteração da floresta do evento 3 (0,20) e a amplitude intra-anual do evento 1 (0.25) causa incerteza na definição de um limiar que separe o momento crítico de remoção da floresta frente à variação intra-anual da floresta remanescente. Este limiar é necessário para gerar atributos (e.g. duração, intensidade e ano de início da alteração da floresta) a partir da trajetória espectro-temporal, possibilitando a classificação da causa e reconstrução histórica da alteração da floresta (Gómez et al. 2014). No entanto, os eventos 2 e 4 possuem grande amplitude interanual do NDVI, que se destoa da amplitude intra-anual da floresta remanescente (evento 1). Assim os eventos 2 e 4 possuem maior confiabilidade para definição de um limiar do momento crítico da alteração da floresta de várzea.

Desta forma, fica evidente que a floresta de várzea possui eventos de rápida (dois anos) e gradual (25 anos) alteração (eventos 2-3 e 4-5, respectivamente) causados por agentes naturais ou antrópicos. Também nota-se que o crescimento florestal (evento 6) foi constituído por três etapas: 1) entre 1984 e 1991 não houve crescimento florestal ou este não foi detectado pelo NDVI; 2) entre 1992 e 2004 o NDVI capturou o pleno crescimento florestal; e 3) entre 2004 e 2009, revelou-se uma estabilização do NDVI. A terceira etapa mencionada, sugere um estágio de sucessão florestal intermediário, por não apresentar tendência de diminuição da mediana do NDVI, pois isto ocorre em função do aumento da complexidade do dossel vegetal que é normalmente encontrada em floresta com estágio de sucessão avançada.

#### 4. Conclusões

O índice de vegetação NDVI demonstrou maior eficiência na reconstrução histórica da alteração e regeneração da floresta de várzea, quando comparado o índice NBR ou bandas espectrais. As trajetórias espectro-temporais com valores de NDVI identificaram os eventos ocorridos e foram diretamente ligados aos agentes causadores naturais ou antrópicos. Os eventos de alteração da floresta de várzea causados por erosão fluvial possuem momento crítico mais pronunciado do que os eventos causados por ação antrópica, que promove maior confiabilidade na geração de atributos para caracterizá-los.

A contribuição deste trabalho é a reconstrução histórica dos eventos de alteração e regeneração da floresta de várzea baseado no algoritmo automatizado LandTrendr e uma série temporal de imagens Landsat. Uma abordagem automatizada aliada a série de imagens Landsat, geram novas perspectivas nos estudos das históricas alterações da floresta de várzea da bacia amazônica, a qual é pouco conhecida espacialmente.

## Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela bolsa de Everton Hafemann Fragal no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A coleta de dados em campo foi parcialmente financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2011/23594-8.

## Referências bibliográficas

Barbosa, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 286p. (INPE – 14614 – TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Gómez, C.; White, J. C.; Wulder, M. A.; Alejandro, P. Historical forest biomass dynamics modelled with Landsat spectral trajectories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 93, p. 14–28, 2014.

Griffiths, P.; Kuemmerle, T.; Baumann, M.; Radeloff, V. C.; Abrudan, I. V.; Lieskovsky, J.; Munteanu, C.; Ostapowicz, K.; Hostert, P. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. **Remote Sensing of Environment**, v. 151, p. 72-88, 2013.

Peixoto, J. M. A.; Nelson, B. W.; Wittmann, F. Spatial and temporal dynamics of river channel migration and vegetation in central Amazonian white-water floodplains by remote-sensing techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2258–2266, 2009.

Kalliola, R.; Salo, J.; Puhaka, M.; Rajasilta, M. New site formation and colonizing vegetation in primary succession on the western Amazon floodplains. **Journal of Ecology**, v.79, p.877–901, 1991.

Kennedy, R. E.; Yang, Z.; Cohen, W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2897–2910, 2010.

Key, C. H.; Benson, N. C. **Landscape assessment: Ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio**. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. USDA Forest Service General Technical Report, 2006 (RMRS-GTR-164-CD).

Liaw A.; Wiener, M. Classification and regression by random- Forest. **News**, v. 2, p. 18–22, 2002.

Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Alves, L. M.; Soares, W. R.; Rodriguez, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38 p. 1-5, 2011.

Meigs, G. W.; Kennedy, R. E.; Cohen, W. B. A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3707–3718, 2011.

Melack, J. M.; Hess, L. L.; Gastil, M.; Forsberg, B. R.; Hamiltons, S. K.; Lima, I. B. T.; Novo, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, p. 530–544, 2004.

Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium, n. 3, 1973. **Proceedings...** Washington, p. 309–317, 1973.

Silva, T. S. F.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. Responses of aquatic macrophyte cover and productivity to flooding variability on the Amazon floodplain. **Global Change Biology**, v.19, p. 3379–3389, 2013.