

Caracterização das unidades da paisagem em ambiente de floresta tropical por meio de imagens-fração MESMA

Gustavo Bayma-Silva¹
Luciana Spinelli-Araujo¹
Sandra Furlan Nogueira¹
Janice Freitas Leivas¹
Yosio Edemir Shimabukuro²
Lucieta Guerreiro Martorano³

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite
Av. Soldado Passarinho, 303 – 13070-115- Campinas - SP, Brasil
{gustavo.bayma, luciana.spinelli, sandra.nogueira, janice.freitas}@embrapa.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
yosio@dsr.inpe.br

³ Embrapa Amazônia Oriental
Tv. Enéas Pinheiro, s/n,- 66095-100 – Belém - PA, Brasil
lucieta.martorano@embrapa.br

Abstract. One of the goals of the Project ‘Role of biodiversity in climate change mitigation in Latin America’ (ROBIN) is to quantify the role of biodiversity in terrestrial ecosystems in climate change mitigation in South and Mesoamerica. In ROBIN’s context, landscape cohesion, i.e. the proportion of intact remnant habitats, is an indicator for biodiversity, whereas changes in natural habitats causes decrease in extension, integrity and biodiversity. Land-use/ Land-cover (LULC) changes would therefore have direct effects on biodiversity and also have implications on climate changes. According to the Brazilian conservation unit classes, at a National Forest (FLONA), forest resources are used for multiple and sustainable uses and for scientific research, with emphasis on methods for the sustainable exploration of native forests. Despite the historical anthropic pressure at its surroundings, Tapajos National Forest (TNF) is still preserved; guaranteeing natural landscape, and consequently its biodiversity is maintained. Outside its boundaries there are forest fragments at different succession stages resulting in changes in structure and floristic diversity. Thus, the aim of this investigation was to discriminate LULC classes using multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) applied to TM/ Landsat data at TNF area. The results showed that MESMA-based fraction images can help on discrimination of landscape patterns in a tropical forest domain. This research presented an initial methodology to be applied to moderate spatial resolution images. Future researches should point to discrimination of secondary forests in different succession stages using MESMA-based fraction images derived from both medium and moderate spatial resolution images.

Palavras-chave: Amazon, LULC, Landsat, Kruskal-Wallis, Amazônia, uso e cobertura da terra, Landsat, Kruskal-Wallis.

1. Introdução

O Projeto “Role of biodiversity in climate change mitigation in Latin America – ROBIN” tem como um de seus objetivos avaliar a biodiversidade em ecossistemas terrestres da América do Sul e Mesoamérica. No contexto do projeto, a coesão da paisagem, ou a proporção de habitat intacto remanescente segundo Galindo-Leal et al. (2005), considera-se como um indicador de biodiversidade. Assim, as alterações em habitats naturais, com sua diminuição em extensão e integridade, podem ser consideradas como indicativos de declínio da biodiversidade. As mudanças no uso e cobertura da terra, conversão do ecossistema original para outros usos como agricultura, mineração, pecuária, urbanização e

desenvolvimento de infraestrutura, teriam, portanto, efeitos diretos sobre a biodiversidade e o clima (Pielke, 2003, Foyle et al, 2004).

Uma das áreas de estudo do ROBIN é a Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós, no estado do Pará, Brasil. De acordo com as categorias de unidades de conservação brasileiras (BRASIL, 2000), a floresta nacional tem o objetivo de uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas. Nas FLONAs, os usos permitidos são restritos a pesquisa científica, visitação pública e permanência de populações tradicionais. Dessa forma, considera-se que a FLONA Tapajós tenha sua vegetação ainda preservada, apesar da histórica pressão antrópica no entorno (Espírito-Santo, 2005), garantindo a integridade da paisagem natural e consequentemente a manutenção da biodiversidade. Por outro lado, fora de seus limites, os fragmentos de vegetação de diferentes estágios de sucessão apresentam alterações na estrutura e diversidade florística (Santos et al., 2003).

Assim, o objetivo deste trabalho foi discriminar classes de uso e cobertura da terra por meio de imagens-fração derivadas do modelo múltiplo de mistura espectral (*multiple endmember spectral mixture analysis* - MESMA), considerando as diferentes formações florestais e sistemas agropecuários na FLONA Tapajós e seu entorno, com vistas à caracterização dos principais padrões da paisagem na região.

2. Materiais e Métodos

A área de estudo corresponde à área da FLONA do Tapajós e um *buffer* de 30km ao longo de seu limite, entre as coordenadas 55° 30' e 54° 30' de longitude oeste e 02° 45' e 04° 00' de latitude sul, no estado do Pará. Esta região apresenta as seguintes regiões fitoecológicas: floresta ombrófila densa das terras baixas (DB), floresta ombrófila densa submontana (DS), Floresta Ombrófila Aberta Submontana (AS) e Savana Parque (SP).

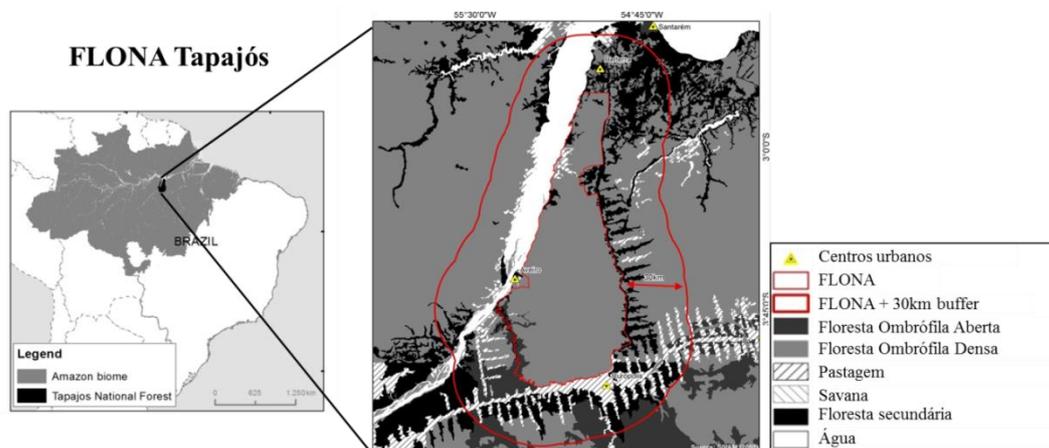


Figura 1. Localização da FLONA Tapajós e seu entorno.

Em imagens de sensoriamento remoto, a mistura espectral ocorre em função da resolução espacial dos sensores, no qual um pixel da imagem é formada pela resposta espectral de mais de um tipo de cobertura do terreno (Ozdogan e Woodcock, 2006). Esta mistura espectral de respostas de diferentes alvos pode ser linear ou não linear. Considerando a relação linear, o valor da radiância em cada pixel, em qualquer faixa espectral, pode ser simplificado como a combinação linear das radiâncias de cada componente presente na mistura (Shimabukuro e Smith, 1991).

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) estima as radiâncias parciais dos alvos presentes na formação da radiância que caracterizará o pixel (Shimabukuro e Smith, 1991). Além disto, gera imagens sintéticas que representam as proporções de cada componente da

mistura dentro dos pixels. O número de bandas é reduzido para o número de componentes do modelo de mistura espectral, o que classifica o modelo como um método que reduz o volume dos dados. O modelo de mistura espectral com três componentes pode ser escrito como:

$$r_i = a \cdot \text{veg}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{agua}_i + e_i \quad (1)$$

onde, r_i é a resposta do pixel na banda i ; a = proporção de vegetação; b = proporção de solo; c = proporção de sombra ou água; veg_i = resposta espectral do componente vegetação na banda i ; solo_i = resposta espectral do componente solo na banda i ; agua_i = resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ; e e_i = erro na banda i .

A metodologia do MESMA consiste na construção de uma grande biblioteca espectral, com a seleção de membros puros para compilação da biblioteca espectral final e cálculo das imagens-fração. Diferentemente do MLME, permite que o número de membros puros varie na modelagem do *pixel* e testa diferentes modelos para cada *pixel* da imagem. Permite também utilizar quatro membros puros (Quintano et al., 2012).

Os membros puros mais adequados são indicados após avaliação daqueles que modelam o maior número de membros puros dentro de sua classe (Count based Endmember Selection - CoB) (Roberts et al., 2003), possuem a menor média do ângulo espectral (Minimum Average Spectral Angle – MASA) (Dennison, 2004), e produzem o menor erro médio quadrático (RMSE) dentro de uma classe (Endmember Average RMSE – EAR) (Dennison, 2003).

O algoritmo do MESMA está disponível no aplicativo *Viper Tools*, desenvolvido em linguagem IDL com interface disponível no programa ENVI (Roberts et al., 2007). No *Viper Tools* a componente sombra é calculada pela diferença entre o somatório definido pelo usuário e os valores das outras componentes, dispensando o usuário da seleção de membros puros desta componente. As restrições utilizadas neste trabalho foram o somatório dos valores das imagens-fração (vegetação verde, solo e sombra) igual a um e erro RMSE inferior a 0,025. Os espectros escolhidos para cálculo dos modelos podem ser observado na Figura 2.

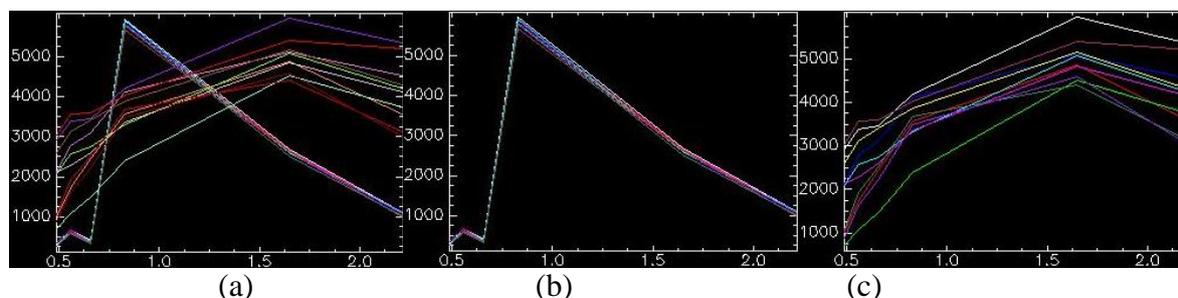


Figura 2. Visualização dos membros puros selecionados para geração dos modelos (a), vegetação verde (b) e solo (c).

As imagens TM/Landsat foram obtidas no catálogo *U.S. Geological Survey - Earth Explorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Nesse catálogo, foram selecionadas as imagens com correção geométrica e radiométrica “Level 1Gt”. Esse produto utiliza dados de referência de campo (*ground control points* - GCPs) e dados de elevação digital do terreno (DEM) para obter melhor acurácia possível da superfície terrestre. Para o recobrimento da área foram utilizadas as imagens 227-62 e 227-63, de 12 e 28 de julho de 2009, respectivamente.

As amostras das classes de cobertura de vegetação natural foram geradas com base no mapa de vegetação da Amazônia Legal (PROJETO SIVAM, 2002), sendo AS, DS, DB e SP. Foram geradas amostras, de forma aleatória, das classes de cobertura de vegetação natural e estas foram sobrepostas à máscara de desmatamento até 2009, disponibilizado pelo PRODES (Câmara et al., 2006), de forma a manter as amostras em áreas de vegetação natural até o ano

de 2009. As amostras das classes de uso antrópico foram selecionadas através de uma inspeção visual nas imagens Landsat, auxiliadas pelas séries temporais de EVI-2 (Jiang et al., 2008) disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Freitas et al., 2011), considerando as classes: agricultura (AC), solo com palhada (PALH) e pastagem (PAST).

Com relação ao tratamento estatístico dos dados amostrais, empregou-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis ANOVA (StatSoft, 2014). Este procedimento promove a ordenação dos valores de todos os tratamentos e estabelece a posição (*ranks*) dos valores individuais. Desse modo, as medianas dos tratamentos são adotadas como critério de comparação. Com base nos p-valores do teste Kruskal-Wallis e na soma dos ranks, os diferentes tratamentos (sistemas de preparo de solo) foram comparados, com relação ao atributo EVI-2. As comparações foram realizadas para cada classe em cada componente. O teste Kruskal-Wallis ANOVA foi utilizado porque, após a aplicação do teste de Shapiro-Wilk, não foi observada normalidade dos dados.

3. Resultados e Discussão

A biblioteca espectral foi composta por nove espectros da componente vegetação e dez da componente solo, totalizando 90 modelos. Todos os modelos atenderam as restrições de somatório das componentes e valor do erro RMSE adotados.

A Tabela 1 e Figura 3 apresentam as médias, desvios-padrão e *boxplots* das componentes das classes selecionadas. A classe AC apresentou os maiores valores de vegetação verde (0,756), seguida pelas classes DS (0,466), DB (0,446) e AS (0,459). Esta diferença entre agricultura e classes de floresta pode ser explicada pela estrutura de dosséis presente na classe de floresta, aumentando os valores da componente sombra. Enquanto a classe AC, na componente sombra, apresentou valor médio de 0,197, as classes de floresta apresentaram valores superiores a 0,516.

A classe PALH apresentou o maior valor médio da componente solo (0,607). As classes PAST e SP foram modeladas de forma semelhante com as proporções das três componentes, com uma pequena diferença da componente solo. A classe SP apresentou os maiores desvios-padrão na componente solo (0,155) e sombra (0,109), e isto pode ser explicado por esta se caracterizar pela presença de um extrato de gramíneas com uma cobertura não contínua de árvores e arbustos (IBGE, 2012). A classe PAST também apresentou desvios-padrão elevados das componentes vegetação e solo, (0,095 e 0,1), indicando uma possível influência das plantas invasoras em diferentes alturas, como capim duro e moita de cipós, ou regeneração (juquira).

Tabela 1. Média e desvios-padrão dos valores de vegetação, solo e sombra das classes de uso e cobertura da terra.

Classe		DS	DB	AS	AC	PALH	PAST	SP
Vegetação	Média	0,466	0,446	0,459	0,756	0,109	0,380	0,244
	Desvio-padrão	0,063	0,058	0,066	0,087	0,093	0,095	0,095
Solo	Média	0,018	0,022	0,022	0,047	0,607	0,279	0,363
	Desvio-padrão	0,020	0,017	0,029	0,043	0,082	0,100	0,155
Sombra	Média	0,516	0,523	0,519	0,197	0,285	0,340	0,394
	Desvio-padrão	0,060	0,056	0,059	0,063	0,056	0,054	0,109

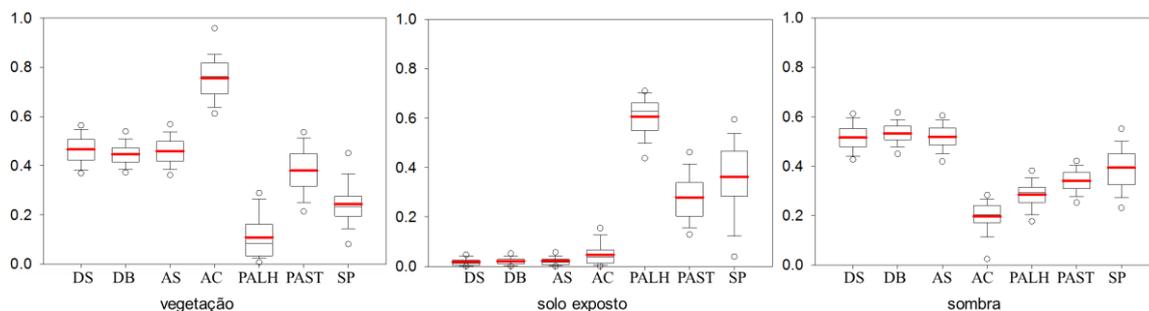


Figura 3. *Boxplots* dos valores de vegetação, solo e sombra das classes de uso e cobertura da terra.

A análise estatística Kruskal-Wallis ANOVA permitiu comparar os valores das componentes e verificar, em cada imagem-fração, quais classes apresentaram diferenças significativas em cada componente (Tabela 2 a 4). De forma geral as classes apresentaram diferenças significativas, em todas as componentes. Apenas, na imagem-fração vegetação, as classes de floresta (DS, DB e AS) não apresentaram diferença significativa entre si, porém este grupo e todas as outras classes foram diferentes. Na imagem-fração solo as classes de floresta também não apresentaram diferenças entre si, e também não foram diferentes de AC. Além disto, não houve diferença entre as classes PAST-SP. A imagem-fração sombra não apresentou diferença significativa entre as classes AC-PAST-SP e entre AS-DB-DS.

Tabela 2. Valor *p* ajustado do teste de *rankings* (Kruskal Wallis ANOVA, 95% de confiança) referente aos valores de vegetação.

Vegetação	AS	DB	DS	SP	AC	PALH	PAST
AS	-	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
DB	1,000	-	0,166	0,000	0,000	0,000	0,000
DS	1,000	0,166	-	0,000	0,000	0,000	0,000
SP	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,002	0,000
AC	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000
PALH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000
PAST	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-

p < 0,05 apresentam diferenças significativas.

Tabela 3. Valor *p* ajustado do teste de *rankings* (Kruskal Wallis ANOVA, 95% de confiança) referente aos valores de solo.

Solo	AS	DB	DS	SP	AC	PALH	PAST
AS	-	1,000	1,000	0,000	0,000	0,786	0,000
DB	1,000	-	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
DS	1,000	1,000	-	0,000	0,140	0,000	0,000
SP	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,232
AC	0,786	1,000	0,140	0,000	-	0,000	0,000
PALH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000
PAST	0,000	0,000	0,000	0,232	0,000	0,000	-

p < 0,05 apresentam diferenças significativas.

Tabela 4. Valor p ajustado do teste de *rankings* (Kruskal Wallis ANOVA, 95% de confiança) referente aos valores de sombra.

Sombra	AS	DB	DS	SP	AC	PALH	PAST
AS		1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
DB	1,000	-	0,315	0,000	0,000	0,000	0,000
DS	1,000	0,315	-	0,000	0,000	0,000	0,000
SP	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,002	0,000
AC	0,000	0,000	0,000	0,000	-	1,000	0,000
PALH	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	-	0,134
PAST	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,134	-

$p < 0,05$ apresentam diferenças significativas.

Os dendrogramas permitem visualizar os agrupamentos das classes (Figura 4). A imagem-fração vegetação pode ser indicada para discriminar e classificar áreas de floresta. A imagem-fração solo agrupou as classes de dossel mais fechado (AS, DB, DS e AC) e as separou das classes com vegetação mais esparsa e menos densa (AC, PALH e PAST), corroborando o trabalho de Silva et al. (2010), que encontraram na mesma imagem fração a separação entre classes densas de Cerrado (Savana Florestada e Savana arborizada) e mais esparsas (Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa). A imagem-fração sombra agrupou as classes de vegetação natural (AS, DB, DS e SP) e as separou das classes de uso antrópico (AC, PAST e PALH), corroborando os resultados encontrados por Vasconcelos e Novo (2004).

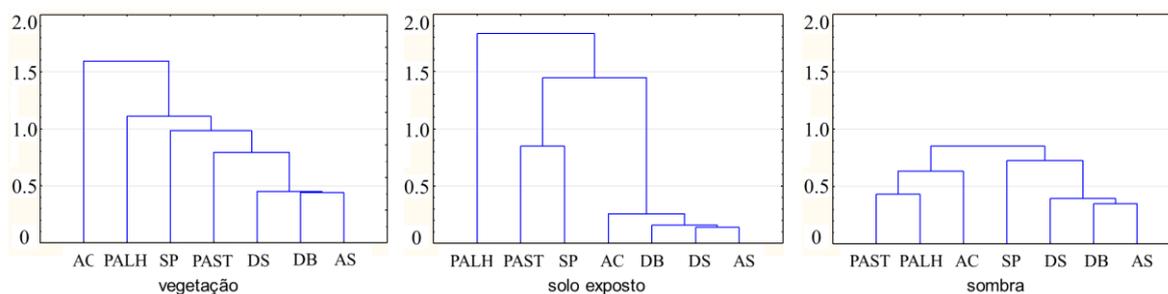


Figura 4. Dendrogramas dos valores de vegetação, solo e sombra das classes de uso e cobertura da terra.

O diagrama ternário permite observar a distribuição das amostras das classes de uso e cobertura da terra (Figura 5), possibilitando verificar o valor de cada componente na composição dos alvos. Nota-se que as classes de floresta (DS, DB e AS) localizam-se na parte inferior do diagrama em função dos valores baixos da componente solo, sugerindo que esta classe possa ser modelada basicamente com valores de vegetação e sombra. As amostras de PAST e SP localizam-se na porção central indicando que estas foram modeladas a partir das três componentes. Na parte superior estão algumas amostras de SP e quase a totalidade de amostras de PALH, indicando a modelagem destas com as componentes sombra e solo. As classes de AC podem ser discriminadas das demais com maior facilidade pelos elevados valores de vegetação e valores baixos de sombra e solo.

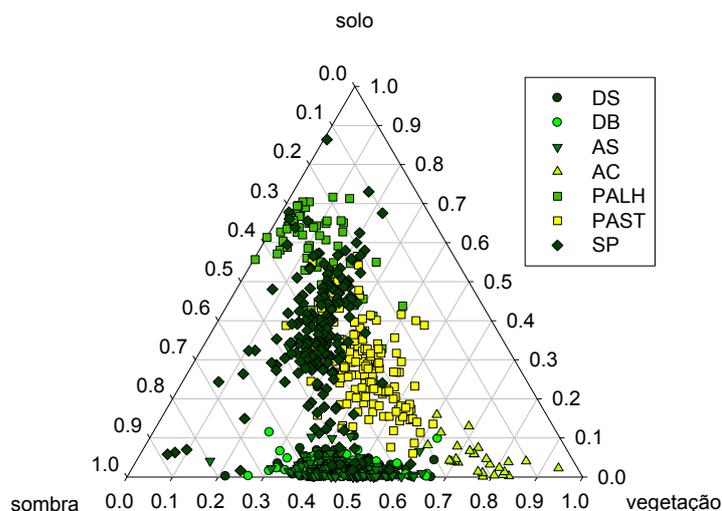


Figura 5. Diagrama ternário dos valores de vegetação, solo e sombra das classes de uso e cobertura da terra.

4. Considerações Finais

Pode ser verificado que as imagens-fração derivadas do MESMA podem auxiliar na discriminação de padrões da paisagem em domínio da floresta tropical. A metodologia tem se mostrado promissora na caracterização de classes de uso e cobertura da terra pelos valores das imagens-fração. Esta pesquisa apresenta uma metodologia inicial aplicada em imagens de resolução espacial média. Futuras pesquisas devem apontar para a caracterização da fenologia das classes e a discriminação de florestas secundárias em diferentes estágios de sucessão, utilizando imagens-fração derivadas do MESMA com imagens de resolução espacial média e moderada.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao projeto “Role of biodiversity in climate change mitigation in Latin America – ROBIN-BRAZIL”.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Casa Civil. Decreto nº 9.985, de 18 de julho de 2000. D Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acessado em: 11 set. 2014.

Câmara, G.; Valeriano, D. M.; Soares, J. V. “Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal”. INPE, 24p. (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>), 2006.

Dennison, P. E.; Halligan, K. Q.; Roberts, D. A. A comparison of error metrics and constraints for multiple Endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 359-367, 2004.

Dennison, P. E.; Roberts, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 123-135, 2003.

Espirito-Santo, F. D. B.; Shimabukuro, Y. E.; Aragão, L. E. O. C.; Machado, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites, **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 155-173, 2005.

Freitas, R. M.; Arai, E.; Adami, M.; Ferreira, A. S.; Sato, F. Y.; Shimabukuro, Y. E.; Rosa, R. R.; Anderson, L. O.; Rudorff, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2011.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Snyder, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, p. 570–574, 2005

Galindo-Leal, C.; Câmara, I. G.; Benson, P. J. Mata Atlântica: Biodiversidade, Ameaças e Perspectivas, Fundação SOS Mata Atlântica, São Paulo, 2005.

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, n. 10, p. 3833–3845, 2008.

Ozgodan, M.; Woodcock, C. Resolution dependent errors in remote sensing of cultivated areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 2, p. 203-21, Jul 2006.

Projeto SIVAM. Relatório metodológico de trabalho, Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro, 2002.

Pielke, R. A. Land Use and Climate Change, **Science**, v. 310, n. 5754, p. 1625-1626, 2005.

Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Shimabukuro, Y. E.; Pereira, G. Spectral unmixing. **International Journal of Remote Sensing**, n. 33, v. 17, p. 5307-5340, 2012.

Roberts, D. A.; Dennison, P. E.; Gardner, M.; Hetzel, Y.; Ustin, S. L.; Lee, C. Evaluation of the potential of Hyperion for fire danger assessment by comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p.1297–1310, 2003.

Roberts, D.; Halligan, K.; Dennison, P. VIPER Tools user manual. UC Santa Barbara, Department of Geography, Visualization and Image Processing for Environmental Research Laboratory, 2007. Disponível em <<http://www.vipertools.org/?q=content/envi-plugin-0>>. Acessado em out 2010.

Santos, J. R.; Freitas, C. C.; Araujo, L. S.; Dutra, L. V.; Mura, J. C.; Gama, F. F.; Soler, L. S.; Sant'Anna, S. J. S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest, **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 482-493, 2003.

StatSoft, **STATISTICA (data analysis software system)**, version 12. Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em : 25 out 2014.

Silva, G. B. S.; Formaggio, A. R.; Shimabukuro, Y. E.; Sano, E. E.; Adami, M. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 186-194, 2010.

Shimabukuro, Y. E.; Smith, J. A. The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n.1, p. 16-20, 1991.

Vasconcelos, C.H.; Novo, E.M.L.M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens-fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat 5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazonica**, v.34, n .3, p. 487-493, 2004.