

## Utilização de dados TRMM e EVI-MODIS para análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação e da vegetação na Amazônia brasileira

Yhasmin Mendes de Moura<sup>1</sup>, Ricardo Dal'Agno da Silva<sup>1</sup>, Lênio Soares Galvão<sup>1</sup>, João Roberto dos Santos<sup>1</sup>, Fábio Marcelo Breunig<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Caixa Postal 54, 98400-000; Sete de Setembro, s/n. km 40 BR386 – Frederico Westphalen – RS, Brasil.  
{breunig}@ufsm.br

**Abstract.** The objective of this work was to evaluate the relationship between the vegetation cover and the spatial variability of rainfall over the Brazilian Amazon. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data were used to estimate rainfall. In order to characterize the vegetation cover, the Enhanced Vegetation Index (EVI) was obtained from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)/Terra MOD13Q1 product (Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m) in the period 2000-2010. The EVI datasets were submitted to principal component analysis (PCA) to evaluate the spatial behavior of the vegetation. Results derived from the inter-annual analysis of the TRMM data showed high spatial variability of rainfall among all analyzed years. They were consistent with the climatological patterns found for the region. Variations in rainfall were observed in specific areas and the time series analysis showed shifts in the start of the decline in precipitation (beginning of the dry season) between them. The PCA of the EVI data showed clear differences between the tropical forests and the savannas (*Cerrados*), including the agricultural land covers. The observed transitional gradient of vegetation cover from southeast to northwest was closely similar to the observed precipitation gradient. The methodology was adequate for the analysis of the spatial-temporal patterns of precipitation and of their relationships with the observed gradients in the Amazonian vegetation cover.

**Palavras-chave:** MODIS, TRMM, floresta tropical, análise por componentes principais, Amazônia.

### 1. Introdução

Eventos climáticos extremos na Amazônia têm sido reportados recentemente na literatura, como períodos de secas severas de 2005 e 2010 e de cheia em 2009 (Marengo et al., 2011). Os episódios de secas, cada vez mais severas e frequentes, compõem o cenário futuro previsto para a Amazônia pela modelagem de mudanças climáticas globais (Malhi et al., 2009). O entendimento dos processos hidrológicos que controlam o funcionamento das florestas tropicais é de extrema relevância, principalmente quando relacionados às estimativas de fixação e/ou liberação de carbono.

A Amazônia possui cerca de  $120 \pm 30$  Pg de carbono estocado na biomassa (Malhi et al., 2006) com uma distribuição variável em seu território, alcançando valores de  $300 \text{ Mg ha}^{-1}$  nas porções Central, Leste e Norte, e de  $100\text{-}200 \text{ Mg ha}^{-1}$  nas florestas de transição do Sul e Noroeste (Saatchi et al., 2007). A estação seca na região exerce não apenas uma influência sobre a quantidade de biomassa acima do solo, como também sobre o comportamento da composição florística (Steege et al., 2006; Saatchi et al., 2007).

A análise dos padrões e de distribuição da precipitação contribui para a compreensão da funcionalidade da paisagem regional, de maneira contínua e interligada, pois permite avaliar as relações entre parâmetros atmosféricos (precipitação, radiação e temperatura) no comportamento fisiológico, composição e distribuição de espécies na Amazônia. Esta variabilidade na distribuição da precipitação modifica a disponibilidade hídrica e o nível de efeitos da sazonalidade nas diversas tipologias florestais deste domínio fitogeográfico.

Diversos estudos têm abordado a questão da influência sazonal da precipitação sobre o comportamento fenológico da floresta, principalmente na análise dos efeitos derivados de períodos de secas severas, com resultados ainda contraditórios (Huete et al., 2006; Saleska et al., 2007; Samanta et al., 2010). Alguns estudos relatam que durante os períodos de seca sazonal ocorre um aumento no estoque de serrapilheira e diminuição do índice de área foliar (IAF) (Vourtilis et al., 2004; Chave et al., 2010). Para algumas regiões, esta perda de folhas pode ser reduzida devido à capacidade fisiológica do alcance das raízes em níveis mais profundos das reservas de água no solo (Nepstad et al., 2007). Além disso, o entendimento consistente destas relações na Amazônia apresenta grandes desafios devido à falta de continuidade espacial e temporal de medidas de precipitação, vazões fluviais, armazenamento de água no solo, etc. (Fisch et al., 1998), acrescentando-se ainda a escassez de inventários contínuos representativos da variada tipologia encontrada nesse domínio amazônico.

A variabilidade climática interanual e sazonal da Amazônia é diretamente relacionada com os padrões oceano-atmosfera de grande escala. Estes padrões estão associados ao ciclo do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre o Oceano Pacífico e às fases do gradiente meridional inter-hemisférico de anomalias de temperatura da superfície do mar (ATSM) sobre o Oceano Atlântico intertropical (Nobre e Shukla, 1996; De Souza et al., 2000), os quais modulam, portanto, o padrão de distribuição de precipitação na região.

Atualmente, dados de sensoriamento remoto constituem uma das principais fontes de informações para análises das relações entre os sistemas atmosfera-biosfera, pois permitem ampla cobertura da superfície terrestre de forma sinóptica e periódica. Técnicas de análise de séries temporais têm sido comumente utilizadas na avaliação espaço-temporal da variabilidade da precipitação, da fenologia e mesmo do grau e direção do processo de antropização de florestas tropicais, como aquelas derivadas da análise por componentes principais (ACP) (Jiaju, 1998).

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da precipitação a partir de dados do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), e sua relação com os padrões espaciais representados pela cobertura vegetal na Amazônia com a aplicação da técnica ACP sobre os dados do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) obtidos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/Terra).

## 2. Materiais e Métodos

Estimativas de precipitação acumulada mensal do TRMM, produto 3B43 (V6), foram utilizadas para análise da variabilidade dos padrões de precipitação anuais no período de 2000 a 2010. Os dados TRMM utilizados possuem resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e permitem a avaliação espacial e temporal para toda a região amazônica. O radar meteorológico TRMM estima a precipitação das áreas tropicais a partir de uma combinação de instrumentos. Detalhes da missão podem ser encontrados em Kummerow et al. (2000) e sobre a validação dos produtos TRMM sobre o Brasil são discutidos por Franchito et al. (2009).

Foram também utilizadas as imagens do produto MOD13A3 (*Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m*), referente ao índice de vegetação EVI, (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) para o período de 2000 a 2010, o que resultou num total de 250 imagens (pós-mosaico). O conjunto de imagens EVI do MODIS foi convertido do formato *Hierarchical Data Format* (HDF) para o formato *geotiff* pelo aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT), onde também foi realizado o mosaico de 12 *tiles* para representação espacial de toda a Amazônia brasileira. Esse índice de vegetação é comumente utilizado devido à sensibilidade em avaliar variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete et al., 2008). O EVI é dado pela equação 1 abaixo:

$$EVI = G * \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + C_1 * \rho_V - C_2 * \rho_A + L} \quad (1)$$

Onde:

$\rho_{IVP}$  = reflectância do infravermelho próximo;

$\rho_V$  = reflectância do vermelho;

$\rho_A$  = reflectância do azul;

$C_1$  = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho;

$C_2$  = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul;

L = fator de ajuste para o solo;

G = fator de ganho.

Esse índice utiliza informações espectrais da banda do vermelho (*Red*, 620-670 nm), infravermelho próximo (*NIR*, banda 841-876 nm) e do azul (*Blue*, 459-479 nm), servindo como um indicador do vigor da vegetação. As imagens EVI do produto MOD13Q1 são composições de 16 dias, que representam uma seleção dos melhores valores do índice no período, ou daqueles com menor influência de nuvens ou contaminação atmosférica. Posteriormente, o mesmo conjunto de imagens EVI MODIS foi inserido no *software Environment for Visualizing Images* (ENVI 4.5), onde foram processadas por meio da ACP para extrair as informações da variabilidade espacial do EVI no período de 2000 a 2010.

O método ACP foi adotado por realçar a dinâmica da série temporal das imagens e reduzir a dimensionalidade dos dados, permitindo a avaliação espacial desta variabilidade (Jiaju, 1988). A ACP tem como fundamento analisar a correlação entre a série de imagens e produzir um novo conjunto de imagens sem correlação entre si, concentrando a variância (informações relevantes) de forma decrescente ao longo das componentes.

A Figura 1 apresenta as etapas desenvolvidas do presente trabalho. Primeiramente, foi avaliada a variabilidade interanual da precipitação para toda a Amazônia com os dados TRMM. Também foi feita uma análise das variações espaciais interanuais da precipitação estratificadas em quatro regiões. Essa estratificação permitiu o acompanhamento de regiões que apresentassem diferenças em termos de regime pluviométrico. Ainda, foram abordados os sistemas atmosféricos que atuam sobre a região amazônica e sua relação com os padrões de precipitação encontrados. Posteriormente, fez-se uso das imagens EVI do MODIS, com a utilização da técnica ACP, para avaliação da relação entre os gradientes de vegetação e a variabilidade espacial da precipitação.

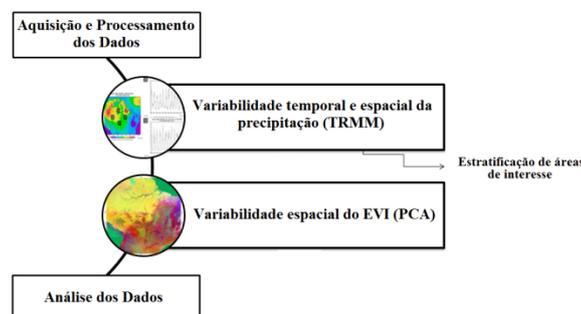


Figura 1. Fluxograma representativo das principais etapas do trabalho.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a variabilidade espacial interanual da precipitação para a região Amazônica (2000-2010). Observa-se uma alta variabilidade espacial da precipitação, sendo

mais constante na região norte (p. ex., estado do Amazonas), onde um alto índice pluviométrico é observado em praticamente todos os anos analisados.

De acordo com Fisch et al. (1998), a Amazônia possui uma precipitação média de aproximadamente  $2.300 \text{ mm.ano}^{-1}$ , embora algumas regiões apresentem um total anual em torno de  $3.500 \text{ mm}$  (p.ex., fronteira do Brasil com Colômbia e Venezuela). Também na região costeira, no litoral do Pará ao Amapá, a precipitação é alta e sem período de seca definido.

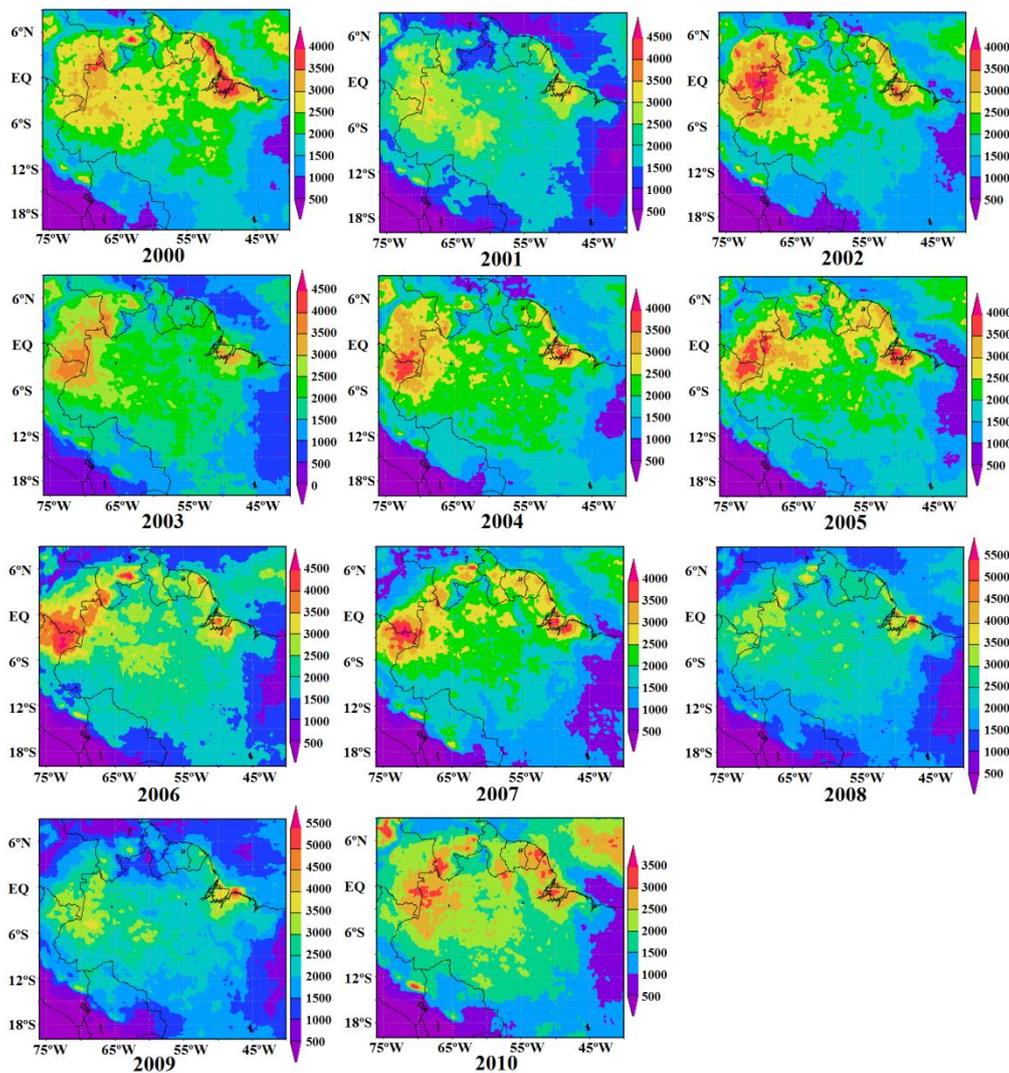


Figura 2. Variabilidade espacial e interanual da precipitação para a região Amazônica no período de 2000 a 2010.

Nota-se que, para estas regiões, a variabilidade interanual se mantém com altos níveis pluviométricos devido à proximidade com a cordilheira dos Andes, o que resulta na formação de precipitação orográfica, derivada da umidade transportada pelos ventos alísios de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No caso da região costeira têm-se a influência da massa de ar Equatorial Atlântica, devido às linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa, efeito este que causa aumento nos índices pluviométricos (Fisch et al., 1998). A expansão e contração desta massa de ar continental durante o verão e inverno são por sua vez responsáveis pelo regime de chuvas da parte central, o que tradicionalmente tem sido considerada um centro de baixas pressões acentuadas no verão (janeiro- março), quando as

massas de ar atraídas do Atlântico Norte contribuem para o aumento sazonal da precipitação (Salati et al., 1983).

A Figura 3 apresenta a variabilidade espacial da precipitação para todo o período analisado (2000 a 2010), e a seleção de áreas teste para avaliação de diferenças quanto ao regime pluviométrico. Pode-se verificar que não ocorre uma continuidade espacial do regime pluviométrico entre as áreas e isto é evidenciado pela análise temporal, em que ocorre um deslocamento no início da queda da precipitação entre as áreas testes analisadas.

Para avaliação deste deslocamento da estação seca entre as áreas testes, a Figura 4 apresenta a variabilidade temporal da precipitação no período de 2000 a 2010. As linhas pontilhadas representam o início da queda na precipitação para a área teste A, e a representação do correspondente para as outras áreas testes. Pode-se observar que o início da redução da precipitação da área A não corresponde ao início da queda na precipitação das outras áreas, demonstrando, de maneira mais clara, o deslocamento do início do período seco entre as áreas analisadas. Esta variabilidade espacial da precipitação se constitui num fator predominante para a distribuição dos tipos de vegetação na Amazônia, que em conjunto com as características edáficas de cada região compõem fatores determinantes para o entendimento da variabilidade espacial e do comportamento fenológico das tipologias.

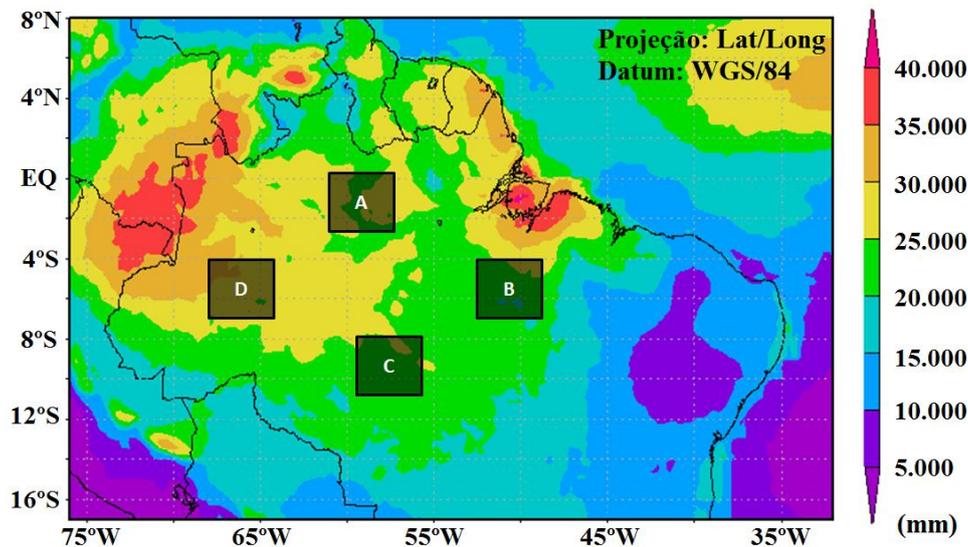


Figura 3. Variabilidade espacial da precipitação no período de 2000 a 2010. Em destaque, as áreas teste A, B, C e D.

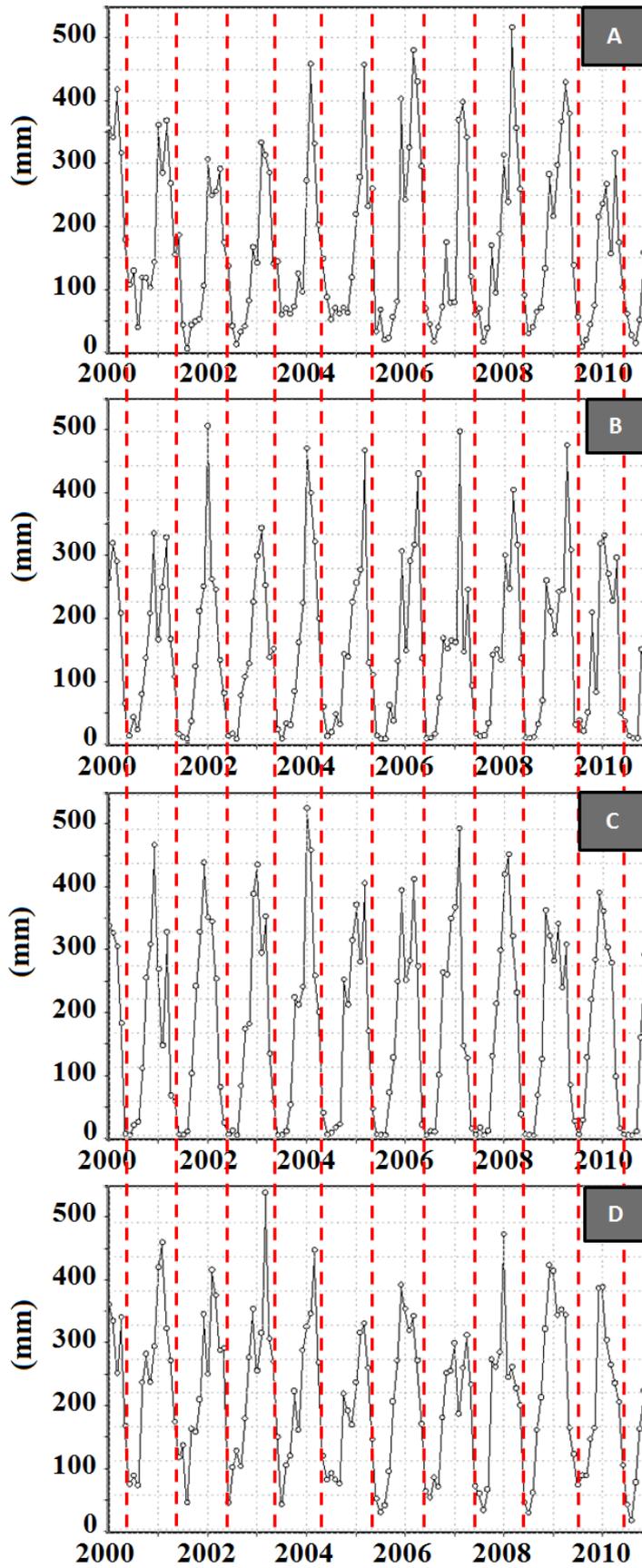


Figura 4. Precipitação inter-anual das áreas teste A, B, C, e D. Linhas pontilhadas representam o início da queda na precipitação na área teste A, e sua posição correspondente nas demais áreas.

A Figura 5 apresenta uma composição colorida das três primeiras CPs (CP1, CP2 e CP3 em RGB, respectivamente), proveniente da aplicação da técnica ACP sobre a série temporal do EVI do sensor MODIS. Pode-se observar um gradiente transicional da vegetação de sudeste para noroeste, similar ao gradiente de precipitação (Figura 3) com alta concentração de chuvas a noroeste e presença das “florestas sempre verdes” (*evergreen forest*). Também é possível verificar regiões representadas por tons avermelhados a sul-sudeste da região, sobre o estado do Mato Grosso, caracterizado principalmente pelas áreas de cerrado e de fronteira agrícola neste estado. Estas regiões, já com processo de antropização consolidado, refletem o processo de desmatamento estabelecido desde a época de aquisição das imagens MODIS (ano 2000). Verifica-se que as formações savânicas de Roraima e do Amapá aparecem em tons esverdeados, pois apresentam um ciclo fenológico bem definido e variável ao longo do tempo, diferente daqueles observados nas áreas cobertas por florestas, como os observados no estado do Amazonas, por exemplo. Este gradiente, visualizado na vegetação, apresenta estreita relação com os padrões espaciais da precipitação discutidos anteriormente, aliado ainda com certas condicionantes edáficas dessas formações.

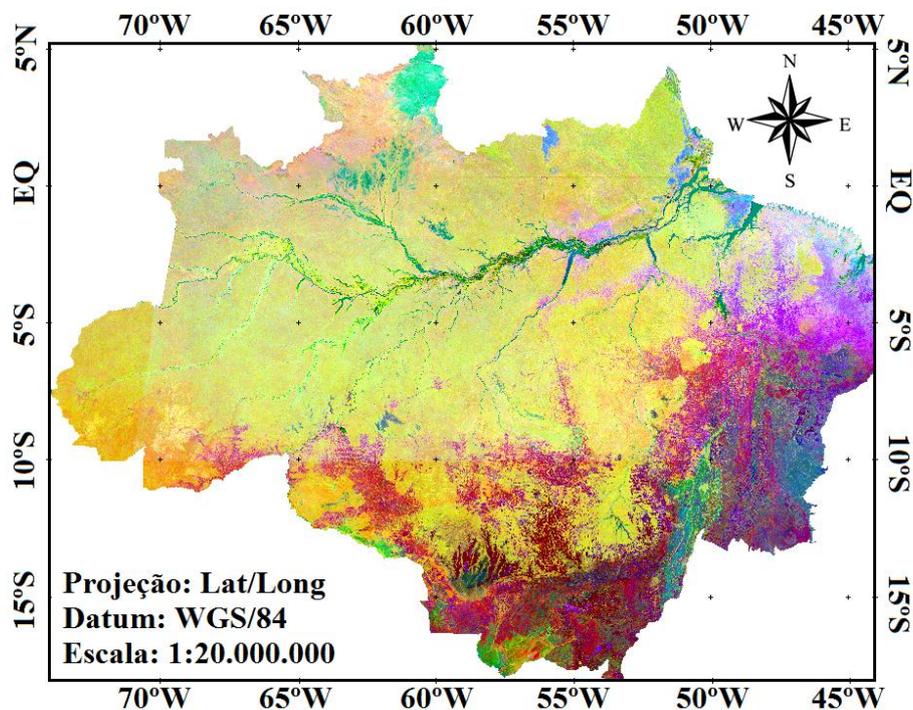


Figura 5. Imagem derivada da aplicação da ACP sobre o conjunto de dados EVI do sensor MODIS para o período de 2000 a 2010. Na composição colorida, as imagens CP1, CP2 e CP3 são mostradas em vermelho, verde e azul, respectivamente.

#### 4. Conclusões

Padrões de precipitação mostraram alta variabilidade espacial ao longo da região Amazônica, em que foi possível verificar diferenças quanto ao início do período sêco entre as áreas testes analisadas. A partir da ACP do EVI foi possível observar um gradiente transicional sobre as tipologias florestais, o qual se mostrou relacionado com os padrões observados na análise espacial da precipitação. A metodologia empregada se mostrou eficiente para a análise da variabilidade espaço-temporal dos padrões de precipitação da Amazônia, bem como para avaliar sua relação com os padrões observados sobre a cobertura florestal. Recomenda-se ainda a análise desta variabilidade com a aplicação de um procedimento estatístico em termos de análise de significância.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- Chave J., Navarrete D., Almeida S., Álvarez E., Aragão L. E. O. C. et al. Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America. **Biogeosciences**, v.7, p.43-55, 2010.
- de Souza, E.B. et al. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.
- Fisch, G.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. Uma Revisão Geral sobre o Clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, p.101-126, 1998.
- Franchito, S. H.; Rao, V. B.; Vasques, A. C.; Santo, C. M. E.; Conforte, J. C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D02105, p. 1-9, 23 jan 2009.
- Huete, A. R.; Didan, K.; 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, p. 1-4, 2006.
- Jiaju, L. Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n.12, p.1895-1907, 1988.
- Kummerow, C. W. S., Olson, Giglio, L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.34, p. 1213-1232, 1996.
- Malhi, Y.; Aragão, L. E. O. C.; Galbraith, D.; Huntingford, C.; Fisher, R.; Zelazowski, P.; Sitch, S.; Mcsweney, C.; Meir P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 106, p. 20610–20615, 2009.
- Nepstad D. C., Tohver I. M., Ray D., Moutinho P., Cardinot G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v. 88, n. 9, p. 2259-2269, 2007.
- Nobre, P., And J. Shukla, J.. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464-2479, 1996.
- Saatchi S. S., Houghton R. A., dos Santos Alvala R. C., Soares J.V., Yu Y.. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v.13, p.816-837, 2007.
- Salati, E., Lovejoy, T. E., Vose, P. B. Precipitation and water recycling in Tropical Rain Forests with special reference to the Amazon Basin. **The Environmentalist**, v. 3, n.1, p. 67-71, 1983.
- Saleska S. R., Didan K., Huete A. R., da Rocha H. R.. Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. **Science**, v.318, p.612, 2007.
- Samanta, A.; Ganguly, S.; Hashimoto, H.; Devadiga, S.; Vermote, E.; Knyazikhin, Y.; Nemami, R. R.; Myneni, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. 1-5, 2010.
- Ter Steege H., Pitman N. C. A., Phillips O. L., Chave J., Sabatier D., Duque A., Molino J. F., Prevoist M. F., Spichiger R., Castellanos H., von Hildebrand P., Vasquez R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**. v. 443, p.444-447, 2006.
- Vourlitis G. L., Priante-Filho N., Hayashi M. M. S., Nogueira JD. S., Raiter F., Hoegel W., Campelo J. H. Effects of meteorological variations on the CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian transitional tropical forest. **Ecological applications**. v.14, p.89–100, 2004.