

Estudo da representatividade do NDVI proveniente do sensor AVHRR/NOAA em relação aos padrões fenológicos da ecorregião Tapajós-Xingu

Fabício Brito Silva¹
Fábio Marcelo Breunig¹
Gabriel Pereira¹
Francielle da Silva Cardozo¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Luiz Eduardo Aragão²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fabricio, breunig, gabriel, cardozo, yosio} @dsr.inpe.br

²Exeter University
College of Life and Environmental Sciences - School of Geography
L.Aragao@exeter.ac.uk

Abstract.

Remote sensing data have contributed to the study of ecosystems forests phenology in order to represent the magnitude of vegetative growth responses as a function of environmental stimulus related to the seasonal climate, at large spatial and temporal scale. The aim of this study was to evaluate the representativeness of Normalized Difference Vegetation Index data of AVHRR sensor, in relation to forest vegetation development, as well as identifying the phenological patterns presents in the ecoregion of Tapajós-Xingu. The AVHRR-NDVI was compared with the better spatial resolution data of MODIS sensor and with the field data relating to leaves collected in litter and leaf area index. The results show that the temporal time series of AVHRR sensor vegetation index represents the phenology of the study area, with the heat being the main meteorological forcing of the vegetative forest development in the studied ecoregion.

Palavras-chave: amazon forest, leaf growth, wavelet, floresta amazônica, crescimento de folhas, ondoletas.

1. Introdução

A determinação do ciclo fenológico florestal é fundamental para os estudos que envolvem o ciclo do carbono em ecossistemas terrestres. A fenologia florestal pode ser definida como a dinâmica da vegetação no tempo em função de variáveis ambientais relacionadas ao clima, solo, fitofisionomia, entre outras. Estudos em ampla escala, demandam um robusto aporte de dados e a utilização de técnicas de análise espacial e temporal que permitam suprir a escassez de dados de campo.

Nas últimas décadas, o aumento acentuado de estudos envolvendo essa temática foi influenciado pela crescente disponibilidade de dados de sensoriamento remoto, o que permitiu observações dos ecossistemas terrestres em escala global e regional com alta periodicidade. As séries temporais de índices de vegetação provenientes dos sensores orbitais AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration*) e MODIS/Terra, Aqua (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) proporcionaram significativos avanços no entendimento da resposta fenológica às variações climáticas e ações antrópicas (White e Nemani, 2006).

Outro aspecto relevante é o aumento da multidisciplinaridade nas equipes científicas, o que proporcionou a adequação de metodologias oriundas das mais diversas áreas da ciência aos estudos da dinâmica florestal de ecossistemas. Exemplo de convergência de esforços é a aplicação de técnicas de tratamento de sinais eletrônicos como a transformada “*wavelet*” no estudo de séries temporais de índice de vegetação (Martinez e Gilabert, 2009) ou mesmo conceitos da física como “resiliência”, referindo à capacidade de recuperação de ecossistemas mediante uma ação antrópica ou anomalia climática.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da série temporal de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) do sensor AVHRR em representar a fenologia florestal da ecorregião Tapajós-Xingu, e identificar regiões que possuem o mesmo ritmo fenológico, em uma abordagem que utiliza a avaliação espectral no domínio do sinal de séries temporais.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de estudo

O presente trabalho foi realizado considerando a ecorregião Tapajós-Xingu (Figura 1), delimitada por Olson et al. (2001), em uma área de 338.552,72 km², localizada entre os rios Tapajós e Xingu, sendo considerada uma região de transição entre a floresta amazônica e o cerrado.

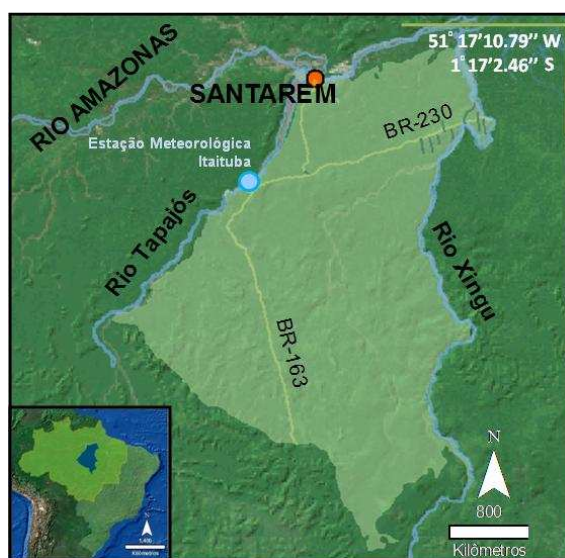


Figura 1. Localização da área de estudo: Ecorregião Tapajós-Xingu.

2.2. Aquisição dos dados

Para este trabalho, foram adquiridas as imagens de NDVI provenientes dos sensores MODIS e AVHRR (Tabela 1), assim como dados da estação meteorológica de Itaituba (Figura 1). Além disso, foram utilizados dados de campanhas de campo do Projeto LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), referentes à coleta de folhas em liteira, na Floresta Nacional do Tapajós, para a validação dos resultados alcançados.

Tabela 1. Descrição dos dados utilizados.

Descrição	Origem	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Período
NDVI	AVHRR	8km	16 dias	1981-2006
	MODIS	1km		2001-2006
Precipitação Temperatura Insolação Folhas Coletadas em Liteira	Estação Meteorológica de Itaituba	Pontual	16 dias	2001-2006
	Projeto LBA	Pontual	16 dias	2001-2002

2.3. Análise dos dados

Para fazer a seleção dos membros de referência (espectros temporais de referência) da série temporal de NDVI (1981-2006) proveniente do sensor AVHRR, foram utilizadas sequencialmente as técnicas: a) função de Transformada pelo Mínimo Ruído (MNF) para reduzir a dimensionalidade dos dados; b) Índice de Pureza de Pixels para identificar pixels com maior probabilidade de ser um espectro de referência e; c) visualizador n-Dimensional, utilizado para refinar os espectros temporais de NDVI identificados pelo PPI (ITT, 2009).

Em seguida, foi utilizado o mapeamento através do ângulo espectral (SAM – *Spectral Angle Mapper*) (Dennison et al., 2004) como método de reconhecimento de padrões, aplicado sobre a série temporal de NDVI do sensor AVHRR. Este método tem como objetivo, determinar o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas por sensores hiper/multiespectrais ou disponíveis em bibliotecas espectrais, permitindo a identificação de um espectro desconhecido usando um ou mais espectros de referência (comparação da forma dos espectros). O algoritmo usado está implementado no aplicativo ENVI4.7 (*Environment for Visualizing Images*) (ITT, 2009).

Neste trabalho, cada espectro temporal foi utilizado como referência em termos de variabilidade fenológica (*a priori*, representam áreas homogêneas quanto ao ciclo fenológico).

A qualidade do mapeamento e dos espectros de referência selecionados foi avaliada através da estatística descritiva, análises de correlação e regressão, considerando os dados da série temporal (2001-2006) de NDVI dos sensores MODIS e AVHRR, dados meteorológicos, folhas coletadas em liteira (Projeto LBA) e índice de área foliar coletados em campo (Malhado et al., 2009). Para tanto, foram utilizados os valores de NDVI médio de cada padrão (por data), assim como da área total.

A variabilidade temporal de cada padrão foi também avaliada pelo método de “*wavelet*” (Torrence e Compo, 1998), considerando os valores médios por data, sendo estes comparados com os dados meteorológicos.

Finalmente, os padrões fenológicos mapeados foram avaliados a partir das características ambientais da área de estudo, utilizando para tanto os mapas de geologia, tipo de solos, tipo de vegetação e elevação (MMA, 2010).

3. Resultados e Discussão

Baseados na metodologia proposta de seleção de espectros temporais de referência foram mapeados cinco padrões fenológicos para região de estudo. Estes padrões refletem uma alta relação de vizinhança e agrupamento (Figura 2). As áreas não classificadas estão na sua maioria situadas nas regiões mais elevada e nas margens do Rio Amazonas (Figura 2).

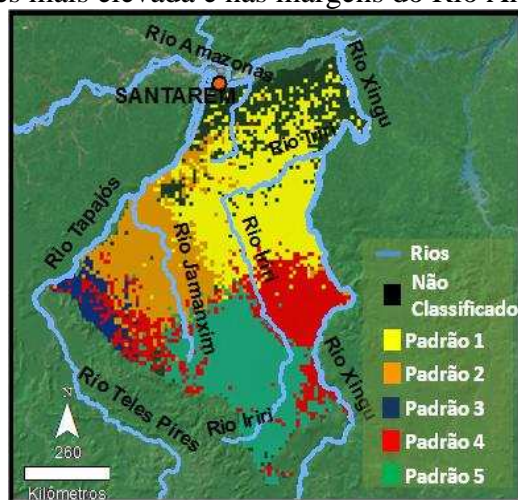


Figura 2. Distribuição dos padrões fenológicos identificados através de espectros temporais de referência do NDVI-AVHRR e da classificação através do SAM.

O coeficiente de variação, calculado considerando a média e o desvio padrão de todas as imagens NDVI, indica que as áreas de maior variabilidade temporal estão localizadas na região pertencente ao Padrão 1 (cor amarela na Figura 2), ou seja, possuem maior amplitude do índice considerando a série temporal (Figura 3a). Tomando como referência os dados entre os anos de 2001 e 2006, verificou-se que o coeficiente de variação calculado para cada data indica que a variabilidade espacial aumenta no período seco com a diminuição do NDVI (Figura 3b). Assim, a variabilidade sazonal é passível de ser averiguada através de técnicas de sensoriamento remoto.

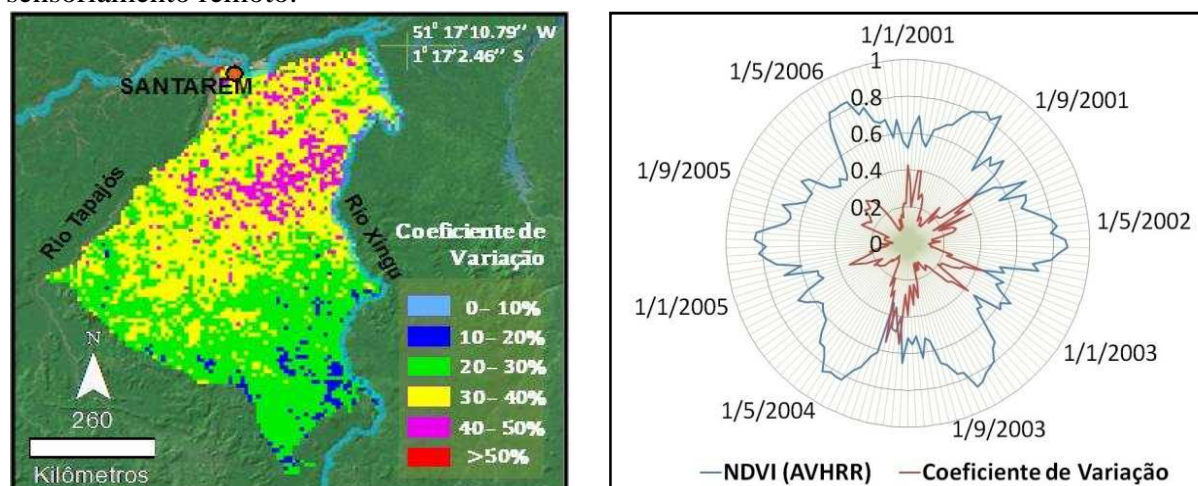


Figura 3. Avaliação da variabilidade espacial para toda a área através: (a) do coeficiente de variação total, considerando a série temporal completa e; (b) coeficiente de variação para cada imagem, considerando o Padrão 1.

Considerando a área total, a correlação entre os índices provenientes do sensor AVHRR e MODIS foi de 0,76. No entanto, o NDVI-MODIS apresentou valores suavizados e superiores ao NDVI-AVHRR ao longo da série temporal utilizada para a comparação (2001-2006). A diferença entre os sensores é maior no período seco (Figura 4).

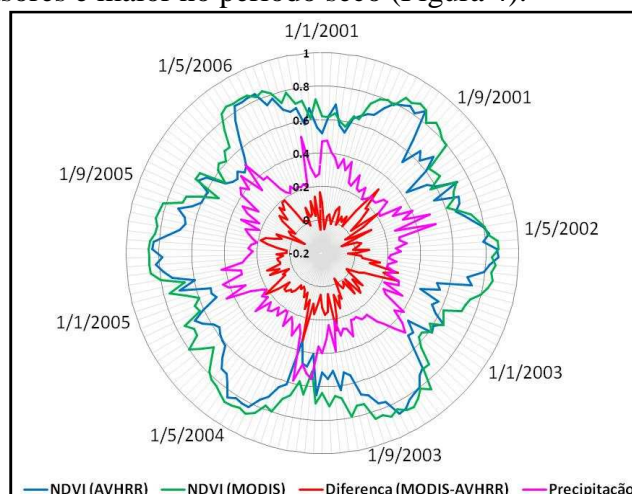


Figura 4. Comparação entre o NDVI proveniente dos sensores MODIS e AVHRR para o período de 2001 a 2006, considerando toda a ecorregião Tapajós-Xingu.

Outros trabalhos mostram que os principais fatores que influenciam na atenuação do NDVI em florestas tropicais é a presença de nuvem e aerossóis. Kobayashi e Dye (2005) mostram que na região central da Amazônia o efeito dos aerossóis é menor, sendo a presença de nuvens o principal fator que determina a sazonalidade desse índice.

Mesmo considerando composições de 16 dias e um tempo de revisita entre um e dois dias, muitas vezes é difícil obter imagens livres dos efeitos atmosféricos na região amazônica. No entanto, Brown et al. (2006) sugerem que a seleção de pixels através do “método de máximo valor” para elaborar as composições de 15 dias atenua o efeito da presença de nuvens, assim como, sugere que a alta correlação entre os dados fornecidos pelos sensores AVHRR e MODIS credencia a utilização da série histórica do NDVI-AVHRR em estudos de ampla escala espacial e temporal.

Contudo, como as imagens são obtidas com geometrias de visada extremas, a adoção do procedimento de seleção de pixels através do método de máximo valor tende a selecionar pixels na direção do espalhamento frontal possuindo maior influência da sombra (Meyers et al., 1995; Breunig et al., 2011). Embora não avaliado no presente trabalho, o efeito da escala (representada pelo tamanho do pixel no terreno) deve ser considerado porque modifica a variabilidade dos dados e modifica a homogeneidade das regiões identificadas.

Considerando as características ambientais (Figura 5) dos padrões identificados, o Padrão 1 é caracterizado por uma vegetação (Dbe - Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas e Dossel emergente) mais dinâmica em relação às demais, por um tipo de solo (FRx – Latossolo Amarelo) que possui propriedades físico-químicas favoráveis ao desenvolvimento radicular (Quesada et al. 2009) e por um relevo relativamente plano e elevado (platô), que permite intensificação dos processos de intemperismo.

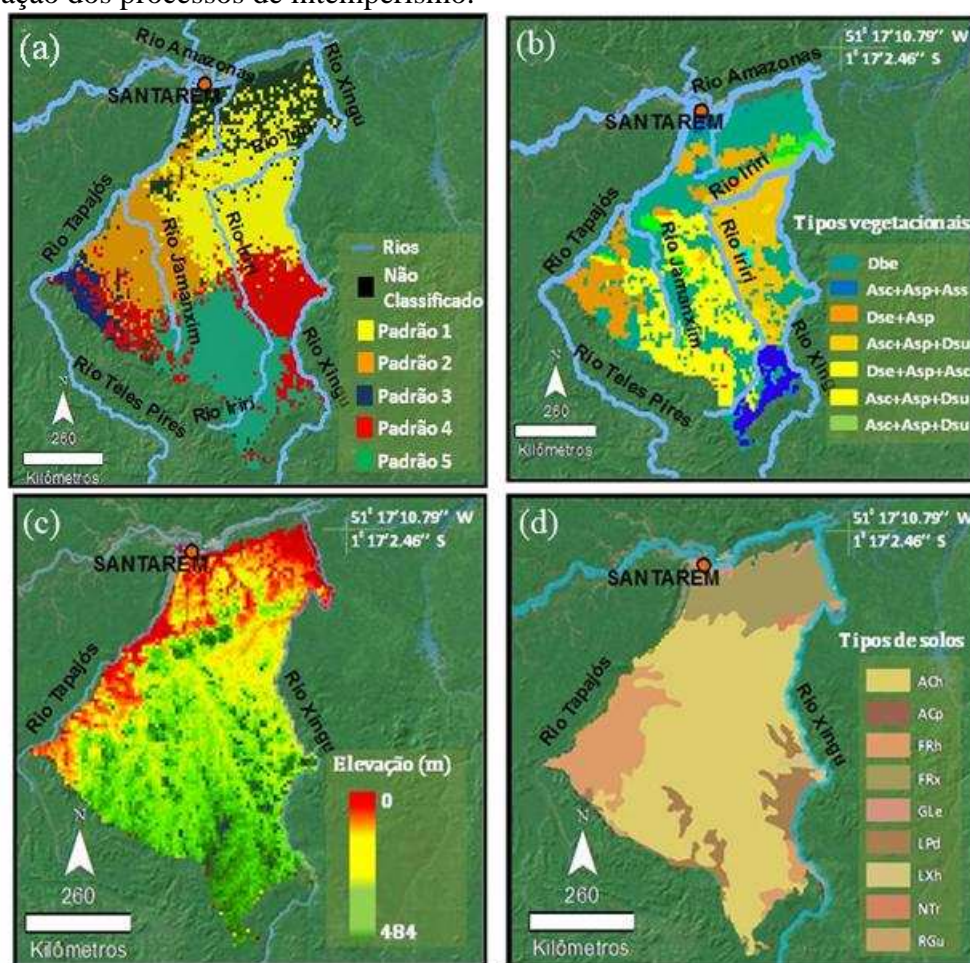


Figura 5. Comparação da distribuição dos padrões fenológicos (a) identificados com: (b) a distribuição da vegetação; (c) a variação da altitude e; (d) a variabilidade dos tipos de solo na área de estudo.

Além dessas características, a intensa atividade antrópica ocorrida na região pode ter favorecido a alta densidade de madeira (Malhiet al., 2009) e a maior produtividade primária (Aragão et al., 2009), o que também pode estar relacionado à alta amplitude nos valores de NDVI ao longo da série estudada.

Através das análises por *wavelet* dos padrões fenológicos mapeados foi possível observar uma escala de variação anual dos cinco Padrões identificados para o período de 2001-2006. Em geral, todos os padrões fenológicos apresentaram correlação negativa em relação à precipitação e positiva em relação à insolação (Figura 6). Os Padrões 3 e 4 apresentaram esse ciclo anual com maior intensidade ao longo de toda a série temporal (Figura 6b e 6c).

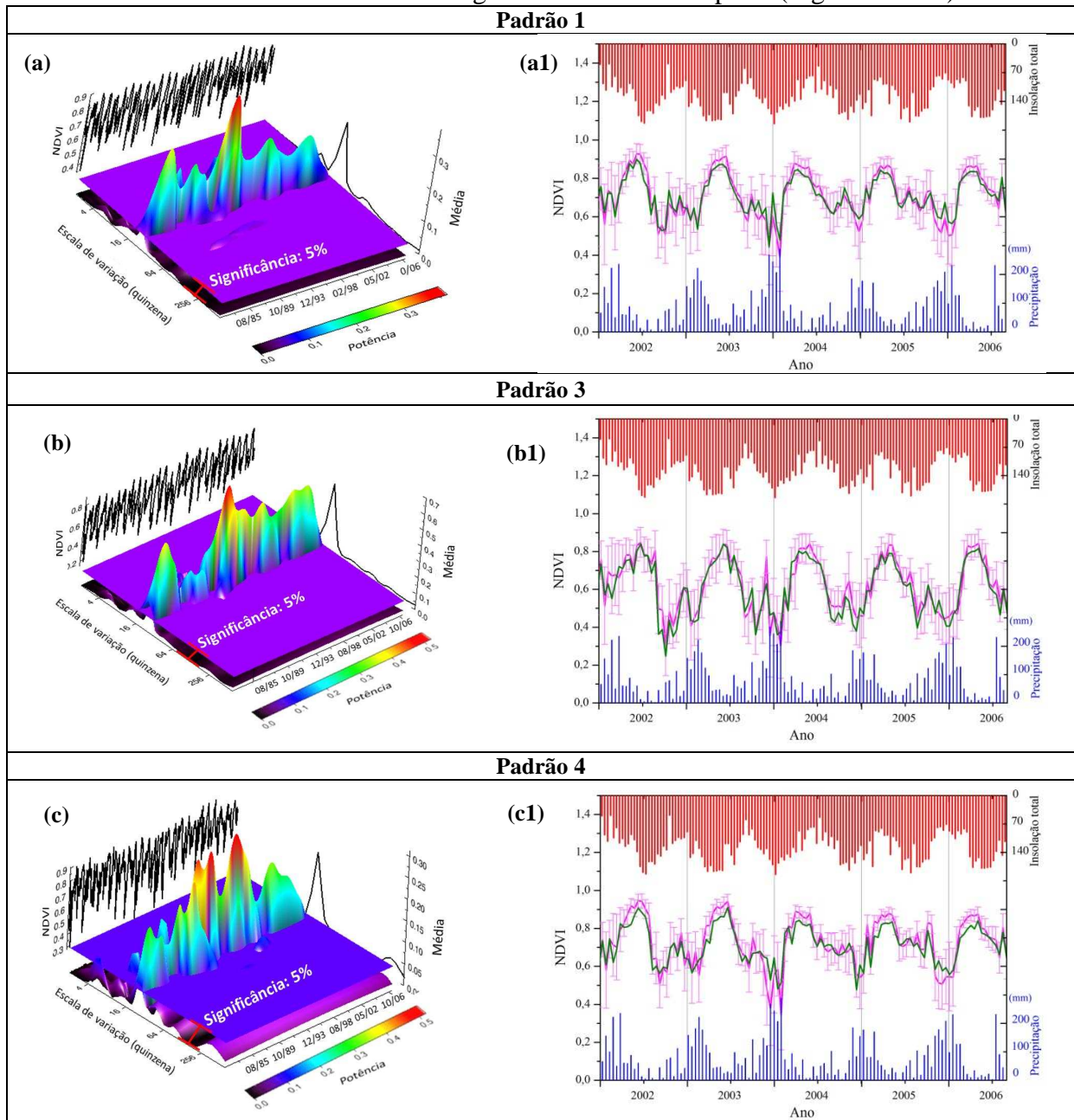


Figura 6. (a, b, c) Gráficos de potência das transformadas *wavelet*, utilizando a série de dados AVHRR (2001-2006);(a1, b1, c1) comparação entre dados meteorológicos, membros de referência pelo método SAM (linha verde) e NDVI médio de cada padrão (linha magenta).

A comparação entre os valores de NDVI do Padrão 1 com os dados de folhas coletadas em liteira na FLONA do Tapajós indica que os dados provenientes do sensor AVHRR

apresentam maior correlação com os dados de campo quando comparado aos dados do sensor MODIS ($R^2=0,42$ e $0,34$, respectivamente). No entanto, em ambos essa relação acontece com uma defasagem de 45 dias entre a coleta realizada em campo e a data das imagens NDVI.

Uma vez constatada a coerência do NDVI-AVHRR com os dados coletados em campo, foi possível observar a insolação como principal variável meteorológica forçante do desenvolvimento vegetativo. Essa constatação pode ser validada pela correlação entre os dados coletados em campo referentes à folhas coletadas em liteira e os dados meteorológicos (Figura 7).

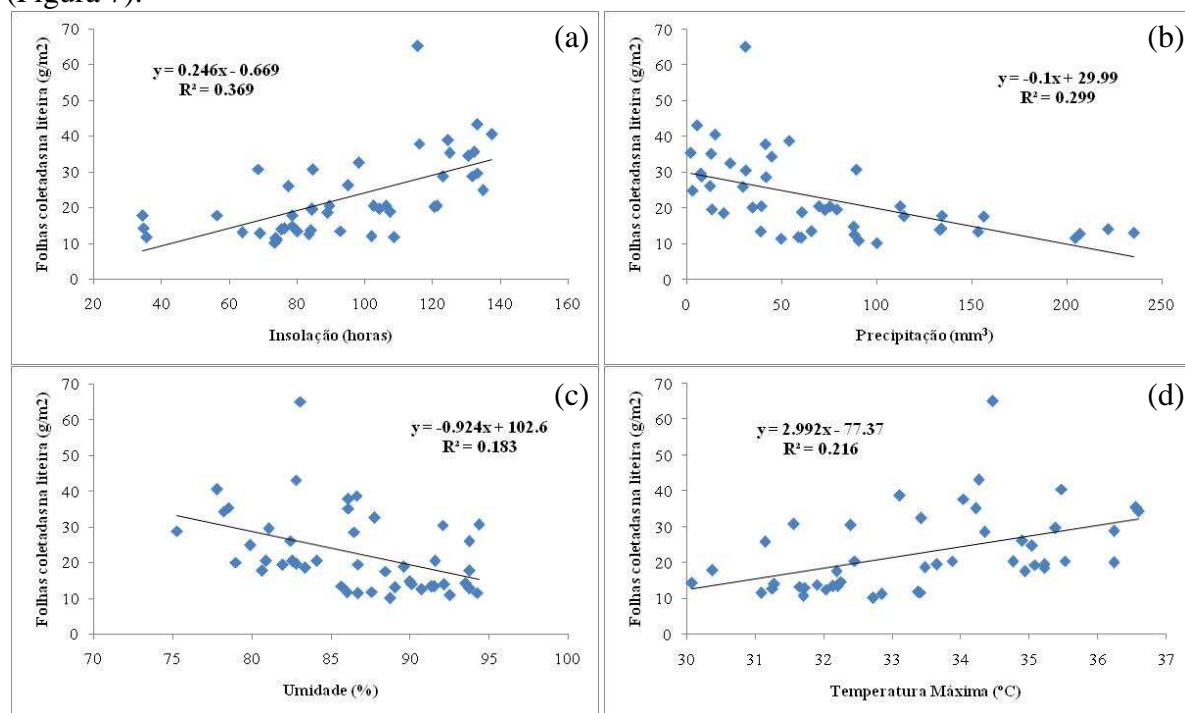


Figura 7. Relações entre a quantidade de folhas coletadas em liteira e as variáveis meteorológicas: (a) insolação, (b) precipitação, (c) umidade, e (d) temperatura máxima.

Comparando padrão fenológico da série NDVI-AVHRR do Padrão 1 e das folhas coletadas em liteira com a série de 12 dados de Índice de Área Foliar coletados em campo ao longo do ano de 2004 por Malhado et al. (2009) na FLONA do Tapajós, é possível observar concordância na representação da dinâmica sazonal das folhas, tendo o período de maior desenvolvimento vegetativo correspondendo ao período de junho a outubro, sendo este o período seco, conseqüentemente, maior insolação e menor precipitação.

4. Conclusões

Os dados de NDVI dos sensores MODIS e AVHRR apresentaram alta correlação entre si, assim como possuem o mesmo padrão de correlação com os dados meteorológicos e fenológicos coletados em campo.

Todos os padrões fenológicos identificados através da série temporal de NDVI apresentaram correlação negativa com a precipitação e positiva com a insolação, evidenciando que a radiação é o principal forçante meteorológico do desenvolvimento vegetal na ecorregião Tapajós-Xingu.

Os dados da série temporal de NDVI provenientes do sensor AVHRR representam de forma significativa a dinâmica sazonal fenológica da ecorregião Tapajós-Xingu.

Referências Bibliográficas

- Aragão, L.E.O.C.; Malhi, Y.; Metcalfe, D.B.; Silva-Espejo, J.E.; Jiménez, E.; Navarrete, D.; Almeida, S.; Costa, A.C.L.; Salinas, N.; Phillips, O.L.; Anderson, L.O.; Baker, T.R.; Goncalvez, P.H.; Huamán-Ovalle, J.; Mamani-Solórzano, M.; Meir, P.; Monteagudo, A.; Peñuela, M.C.; Prieto, A.; Quesada, C.A.; Rozas-Dávila, A.; Rudas, A.; Silva Junior, J.A.; Vásquez, R. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. **Biogeosciences Discussions**. v. 6, n. 1, p. 2441-2488, 2009.
- Breunig, F.M.; Galvão, L.S.; Formaggio, A.R.; Epiphanyo, J.C.N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 34-42, 2011. (aceitoparapublicação)
- Brown, M.E.; Pinzon, J.E.; Didan, K.; Morisette, J.T.; Tucker, C.J.; Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 44, n. 6, p. 1787 – 1793, 2006.
- Dennison, P.E.; Halligan, K.Q.; Roberts, A.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.
- ITT - Visual Information Solutions. ENVI. Version 4.7. Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions, 2009.
- Kobayashi, H.; Dye, D.G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**. v. 97, n. 4, p. 15, 2005.
- Malhi, Y.; Aragão, L.E.O.C.; Metcalfe, D.B.; Paiva, R.; Quesada, C.A.; Almeida, S.; Anderson, L.; Brando, P.; Chambers, J.Q.; Da Costa, A.C.L.; Hutya, L.R.; Oliveira, P.; Patiño, S.; Pyle, E.H.; Robertson, A.L.; Teixeira, L.M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**. v. 15, p. 1255–1274, 2009.
- Martinez, B.; Gilabert, M.A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. **Remote Sensing of Environment**. v. 113, n. 9, p. 1823-1842, 2009.
- Meyer, D.; Verstraete, M.; Pinty, B. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. **Remote Sensing Reviews**. v. 12, p. 3–27, 1995.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). Geoprocessamento. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/mapas/> >. Acesso em 20 Out. 2010.
- Olson, D.M.; Dinerstein, E.; Wikramanayake, E.D.; Burgess, N.D.; Powell, G.V.N.; Underwood, E.C.; D'Amico, J.A.; Strand, H.E.; Morrison, J.C.; Loucks, C.J.; Allnutt, T.F.; Lamoreux, J.F.; Ricketts, T.H.; Itoua, I.; Wettengel, W.W.; Kura, Y.; Hedao, P.; Kassem, K. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. **BioScience**. v. 51, n. 11, p. 933-938, 2001.
- Quesada, C.A.; Lloyd, J.; Schwarz, M.; Czimczik, C. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences Discussions**. v. 6, n. 2, p. 3851-3921, 2009.
- Torrence, C.; Compo, G.P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 79, p. 61-78, 1998.
- White, M.A.; Nemani, R.R. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. **Remote Sensing of Environment**. v. 104, n. 1, p. 43–49, 2006.