

Efeito da fenologia foliar sobre variações sazonais de reflectância de dossel em florestas de várzea na Amazônia Central

Rodrigo Nunes de Sousa ¹
Bruce Rider Forsberg ¹
Liana Oighstein Anderson ^{2,3}

1 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Caixa Postal 69060-001 – Manaus – AM, Brasil
rodrigounessousa@gmail.com
brforsberg@gmail.com

2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

3 Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais – CEMADEN
Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, São José dos Campos - São Paulo, 12247-016
liana.anderson@cemaden.gov.br

Abstract. Amazon floodplain forests show phenological patterns associated with flood seasonality. The major cause is stress on trees caused by flood, e.g. roots anoxia and soil release of toxic compounds. This study focused on testing a possible effect of local flooding on leaf phenology causing forest canopy reflectance changes. The field study sampled 4 transects (1ha each) in floodplain forests at Manacapuru, Amazonas, Brazil. Local water depth and litterfall samples were taken monthly from April to November/2012. Ten litterfall traps were spaced at 25m intervals along each transect. Litterfall samples were oven dried at 60°C over 72 hours and dry weighed at 1g precision. Canopy reflectance was extracted from the LISS-3 sensor (2,3,4,5 bands), as well the respective vegetation indexes, NDVI and NDWI. Multiple regression modelling suggested a stronger correlation between leaf fall (Mg/ha/month) and red band ($N=62; p<0.0001; R^2=0.335; \text{Pearson's}=0.578$) and NDVI ($N=62; p<0.0001; R^2=0.254; \text{Pearson's}=-0.504$). As local flood started, NDVI dropped. This was due to increased band 3 (red channel) reflectance caused by a greater contribution of sediment rich Amazon river waters to the spectral mixture. This event was followed by NDWI reduction during the high water period, associated with leaf senescence and leaf fall caused by the flood stress. NDVI and NDWI started increasing as river stage fell, probably due to leaf flush. These results corroborate previous studies relying on field measurements of leaf phenology and flood conditions. We concluded that canopy reflectance data could be used to monitor changes on floodplain forests for possible effects of climatic changes.

Palavras-chave: central Amazon, floodplain forests, surface reflectance, leaf phenology, LISS-3 (IRSP6) Sensor; Amazônia central, florestas de várzea, reflectância de superfície, fenologia foliar, sensor LISS-3 (IRSP6)

1. Introdução

As florestas localizadas em planícies de inundação de rios de água branca, conhecidas como florestas de várzea, ocupam extensa área da bacia fluvial Amazônica, estimada em aproximadamente 400.000 km² (Melack e Hess, 2010). Estas áreas representam o principal componente da produção primária aquática na bacia amazônica (Melack e Forsberg, 2001), além de apresentarem elevados estoques de carbono, aproximadamente 128 MgC.ha⁻¹ (Saatchi *et al.*, 2007). Constituem portanto, elementos importantes para o balanço global de carbono. Nestas florestas, as folhas representam um importante estimador da produção primária florestal, constituindo aproximadamente 75% da biomassa de liteira fina (Schöngart *et al.*, 2010).

A fenologia foliar em florestas de várzea apresenta variabilidade sazonal significativa, e diversos autores apontam o pulso de inundação como principal fator indutor desta sazonalidade. Segundo estes autores, a alternância entre fase aquática e fase terrestre seriam os principais fatores influenciando a fenologia foliar em florestas de várzea (Junk *et al.*, 1989; Nebel, *et al.*, 2001; Schöngart *et al.*, 2002, 2010; Parolin e Wittmann, 2010).

Sabe-se atualmente que árvores completamente submersas podem sofrer stress por atenuação da radiação fotossinteticamente ativa, déficit hídrico e limitação de trocas gasosas essenciais ao metabolismo. Durante a fase de cheia dos rios, os solos apresentam baixas concentrações de oxigênio, elevadas concentrações de CO₂, maior solubilidade de minerais como ferro, manganês e alumínio nas formas reduzidas, que são tóxicos para as plantas em concentrações elevadas (Joly, 1982; Kozłowski, 1984). Além disto, altas taxas de sedimentação, como as observadas em florestas de várzea do Rio Solimões, podem reduzir o transporte de gases e favorecer a redução da concentração de oxigênio disponível para as plantas (Wittmann et al., 2004; Wittmann e Parolin, 2005).

Estudos realizados na Ilha da Marchantaria e na reserva Mamirauá (Amazonia Central), sugerem que o pico de queda de folhas (*leaf shedding*) ocorre durante a primeira metade da fase aquática, e o pico de produção de novas folhas (*leaf flushing*), ocorreria ao final da fase aquática. Contudo, ocorrem variações temporais interespecíficas (Schöngart et al., 2010).

Diversos estudos sugerem que variações em índices de vegetação, como EVI e NDVI, são sensíveis a alterações biofísicas do dossel florestal, e que portanto, seriam úteis para representar a fenologia foliar (Rouse et al., 1973; Huete et al., 1997, 2002; Zeilhofer et al., 2012). Hess et al. (2003) apresentam dados que sugerem associação temporal entre o pulso de inundação e variações do índice de vegetação EVI/MODIS, em florestas de várzea, e associam esta variação à fenologia foliar.

O objetivo do presente estudo é testar a associação temporal entre o pulso de inundação e variações de fenologia foliar e reflectância de dossel em florestas de várzea na Amazônia Central.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Caracterização das áreas de estudo

A área de estudo compreende um trecho de 4 ha de florestas de várzea localizado entre a sede do município de Manacapuru e a Ilha do Pratari, no rio Solimões, delimitada pelas coordenadas geográficas 3°17'43" S e W 60°37'14" e S 3°39'7" e W 60°54'24" (Figura 1).

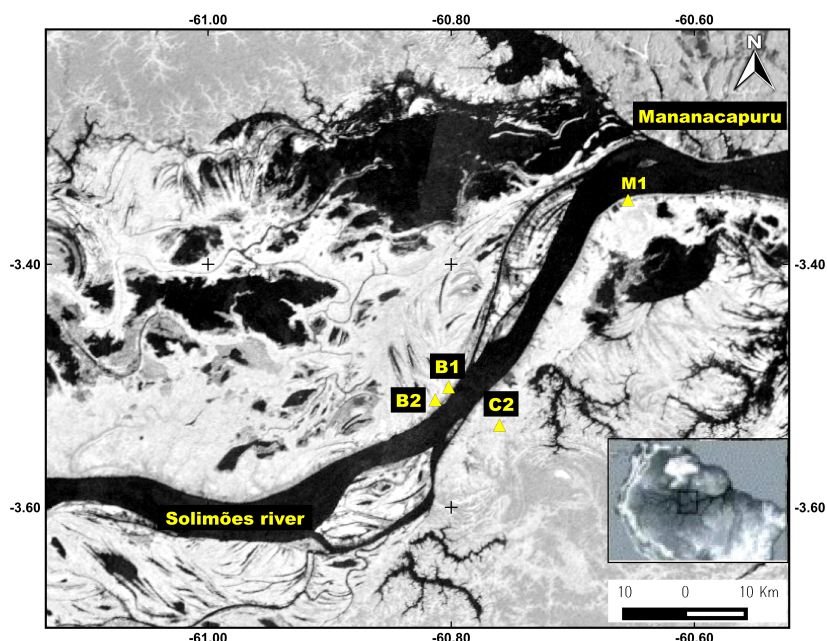


Figura 1. Carta imagem da área de estudo, pico da cheia de 1996, JERS-1 (banda-L) (Rosenqvist et al., 2002). Tons de cinza claro representam florestas de várzea, e tons de cinza escuro representam florestas de terra firme e herbáceas. As unidades amostrais são: Marrecão 1 (M1), Cururu 2 (C2), Butija 1 e 2 (B1, B2).

A região apresenta clima equatorial úmido - Af (Peel, et al., 2007), com temperatura média anual de $26.5^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ e precipitação média de 2100 mm/ano. A estação chuvosa ocorre entre janeiro e maio, e a estação seca ocorre entre julho a outubro, com precipitação média menor que 100 mm.m^{-1} (INMET, 2012). O pico de vazante do rio Solimões na região ocorre entre outubro e dezembro, com cota mínima média de 721 cm, e o pico da enchente ocorre entre junho e julho, com cota máxima média de 1.859 cm (ANA, 2012). Os solos da região são tipicamente aluvionares, classificados como Plintossolos Argilúvicos (Quesada et al., 2011). A principal fitofisionomia da região são florestas de várzea baixa, com altura de dossel média entre 20 e 30m e árvores emergentes com até 40m (Sousa, observação pessoal).

2.2 Dados de Campo

A coleta de dados de campo foi realizada mensalmente em 4 transectos com dimensões de 40 x 250 metros (1 ha cada). Cada transecto foi instalado em fitofisionomias típicas de florestas de várzea, com altura de dossel mínima de 20 metros e que não apresentassem sinais recentes de desflorestamento ou queimadas. A coleta de liteira e medidas profundidade da inundação local foram realizadas mensalmente entre 6/04/2012 e 02/12/2012, compreendendo um período de 5 meses de enchente e 3 meses de vazante do rio Solimões.

Para coleta de dados de biomassa de queda de folhas, utilizaram-se coletores de formato cônico, com raio de 25 cm. Os coletores de liteira foram instalados em intervalos de 25 m ao longo de cada transecto, totalizando 10 coletores por transecto (40 coletores ao todo). Estes foram afixados suspensos a 1,30m acima do solo ou da água. A altura dos coletores foi reajustada a cada 30 dias, conforme a variação das cotas de inundação nos locais de amostragem. As amostras de liteira foram triadas e secas a 60°C por 72h em estufa elétrica. As folhas assim preparadas foram pesadas em balança de precisão mínima de 0,1g para obtenção do peso seco de folhas. Estes dados foram normalizados pela área de cada coletor e expressos como taxa de queda de folhas (Mg/ha/mês).

2.3 Dados do sensor LISS-3 (IRS-P6)

A reflectância de superfície foi calculada utilizando imagens do sensor LISS-3 (IRS-P6) disponíveis no portal do Departamento de Geração de Imagens do INPE (DGI/INPE, 2014). Foram obtidas 4 imagens com cobertura de nuvens menor que 40%, referentes a dois meses de enchente (21/04/2012, 26/07/2012) e dois meses de vazante do rio Solimões (12/09/2012 e 06/10/2012), órbita/ponto (313/078). Estas imagens são disponibilizadas inicialmente em formato de número digital, nível de correção L1T (*Standard Terrain Correction*). Estes dados foram processados na seguinte ordem: correção geométrica > correção atmosférica > correção radiométrica, descritos abaixo.

Para coleta de dados de sensoriamento remoto, foram selecionados 10 pixels (24m cada) por transecto, correspondendo aproximadamente à área de cada transecto delimitada em campo. As análises estatísticas dos dados foram realizadas no software R (R Core Team, 2013).

2.4 Correção Geométrica

O registro das imagens utilizou como referência uma imagem GeoCover 2000 (NASA, 2014). Para registro das imagens foram selecionados 25 pontos de controle com RMS (Root Mean Square) médio menor que 0,58 entre a imagem ortorretificada GeoCover e a imagem a ser registrada. Utilizou-se o método de ajuste polinomial de primeiro grau com reamostragem pelo vizinho mais próximo, mantendo a resolução espacial de 24m.

2.5 Correção Atmosférica e Normalização Radiométrica

A correção atmosférica e radiométrica objetiva permitir a correlação entre os valores de reflectância e parâmetros biofísicos da vegetação, como fenologia foliar, entre diferentes imagens e diferentes datas. Para tanto, a imagem com menor cobertura de nuvens - imagem referência (12/09/2012) - passou por correção radiométrica, sendo transformada para radiância no topo da atmosfera, seguida de correção atmosférica para reflectância de superfície. O modelo de transferência radiativa utilizado foi MODTRAN 4, no ambiente ENVI 4.8, módulo FLAASH (Matthew *et al.*, 2000). As outras 3 imagens, adquiridas em datas distintas, foram normalizadas radiometricamente por meio de transformação para reflectância no topo da atmosfera e normalizadas pelo módulo iMAD (Canty e Nielsen, 2008). Este procedimento remove a influência de variações não lineares de sensibilidade dos detectores correspondentes às distintas bandas LISS-3 ao longo do tempo, da geometria de iluminação e das condições atmosféricas. Esta técnica seleciona alvos pseudo-invariantes na imagem de referência, e através de uma transformação linear por regressão entre as bandas, normaliza as demais imagens em relação à imagem referência. A correção radiométrica compreendeu as bandas 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (infravermelho próximo) e 5 (infravermelho médio) do sensor LISS-3, centradas nos comprimentos de onda 0.558, 0.652, 0.813 e 1.620 μm , respectivamente. Adicionalmente, foram produzidos os índices de vegetação por diferença normalizada - NDVI (Rouse *et al.*, 1973) e NDWI (Gao, 1996).

3. Resultados e Discussão

A fase aquática para a maioria das unidades amostrais (coletores de liteira) ocorreu entre Fevereiro e Julho de 2012, enquanto a fase terrestre ocorreu entre Agosto e Dezembro de 2012 (Figura 2).

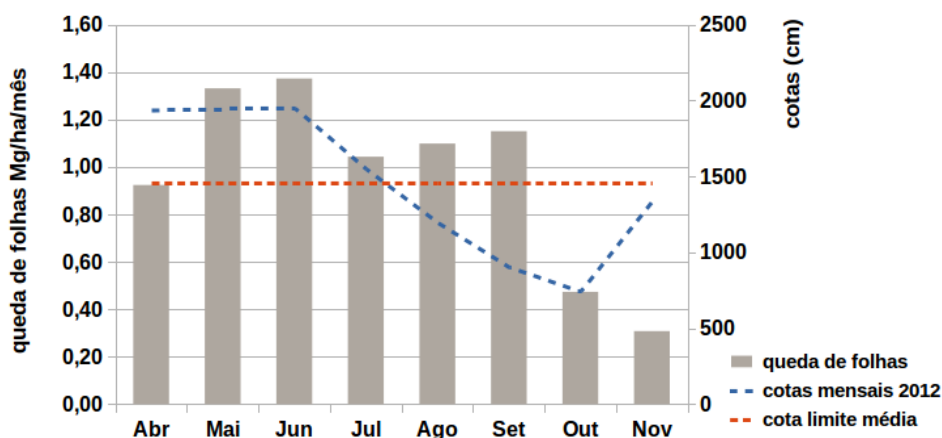


Figura 2. Cotas mensais do rio Solimões em Manacapuru (2012), cota limite de inundação para os 4 transectos e taxa de queda de folhas (Mg/ha/mês).

As maiores taxas de queda de folhas (Mg/ha/mês) ocorreram entre Julho e Setembro, final da inundação e início da fase terrestre (Figura 3). Por outro lado, as menores taxas de queda de folhas ocorreram entre os meses de Outubro e Novembro. Observaram-se diferenças significativas nas médias de queda de folhas entre as fases aquática e terrestre ($p\text{ANOVA} < 0.000001$). Isto pode ser interpretado como uma resposta adaptativa ao stress causado no início da inundação e à troca de folhas senescentes e folhas cobertas de sedimentos por folhas novas (*leaf flushing*) no início da fase terrestre.

Entre os meses de Julho e Setembro houve uma pequena redução nos índices NDVI e NDWI. Isto pode refletir uma redução do vigor (verdor) da vegetação, com mais folhas senescentes e menor fechamento do dossel (Figura 4).

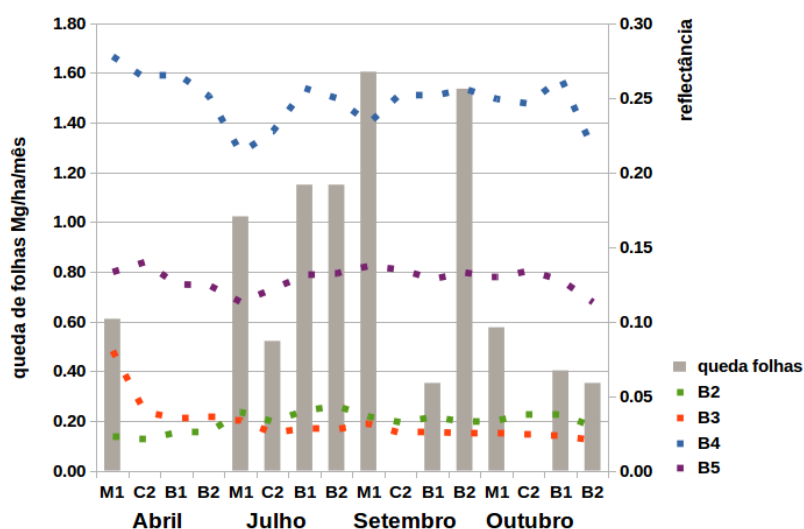


Figura 3. Valores médios de queda de folhas (Mg/ha/mês) e Reflectância das bandas (B2, B3, B4, B5).

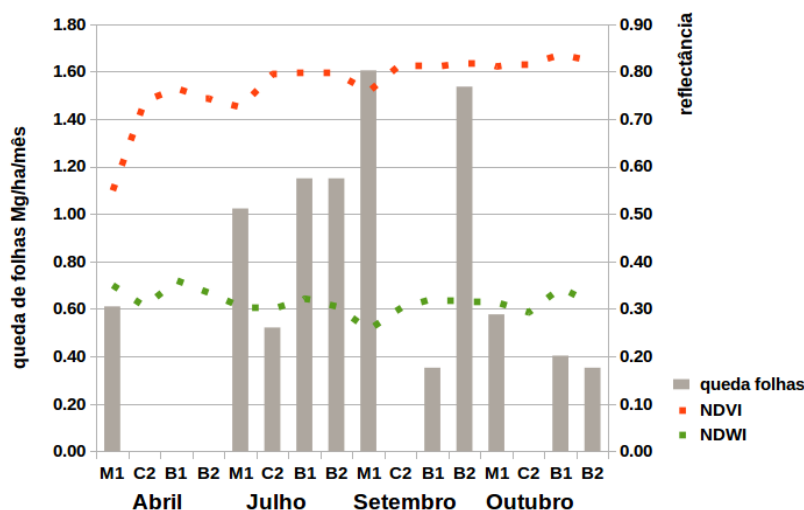


Figura 4. Valores médios de queda de folhas (Mg/ha/mês) e índices de vegetação NDVI e NDWI

No início da inundação na várzea (Abril), observou-se alta reflectância na banda do vermelho visível (B3), como efeito de mistura espectral de água com alta concentração de sedimentos em suspensão. No período seguinte ocorreu a decantação dos sedimentos em suspensão, reduzindo a reflectância em B3 (Sousa, observação pessoal; Alcântara *et al.*, 2010).

Observou-se uma correlação positiva fraca, porém significativa entre a taxa de queda de folhas e reflectância na banda B3, vermelho ($N=60$; $p<0.0001$; $R^2=0.335$; Pearson's $cor=0.578$) (Figura 5A). Também foi possível observar uma correlação negativa fraca, porém significativa entre a taxa de queda de folhas e NDVI ($N=62$; $p<0.0001$; $R^2=0.254$, Pearson's $cor=-0.504$) (Figura 5B).

Sabe-se que a fração da vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV) reflete mais fortemente a radiação na faixa do vermelho, infravermelho próximo e médio (bandas 3, 4 e 5 do sensor LISS-3). E que a vegetação fotossinteticamente ativa (PV) apresenta alta absorção na faixa do vermelho pela clorofila e água presentes nas folhas (Asner *et al.*, 1998). Portanto, o aumento da reflectância na banda 3 (vermelho visível) apresenta-se positivamente correlacionada com aumento da taxa de queda de folhas (*leaf fall*) (Figura 5A). Isto pode ser explicado pela maior quantidade de folhas senescentes, ou por maior abertura do dossel,

expondo galhos, troncos e liteira (NPV). O mesmo efeito não pôde ser observado nas bandas 4 e 5 do sensor LISS-3, talvez devido à saturação do sinal de retroespalhamento. Esta saturação pode ser resultante da elevada biomassa florestal nestes sítios ou mesmo porque as variações biofísicas sazonais não geram um sinal detectável pelo sensor LISS-3, cuja resolução radiométrica é de 7 bits.

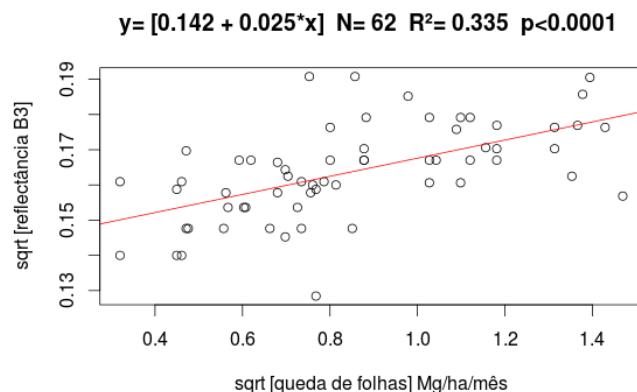


Figura 5.A Regressão linear entre queda de liteira Mg/ha/mes (coletores de liteira como unidade amostral) e reflectância da B3, incluindo dados de todos os transectos.

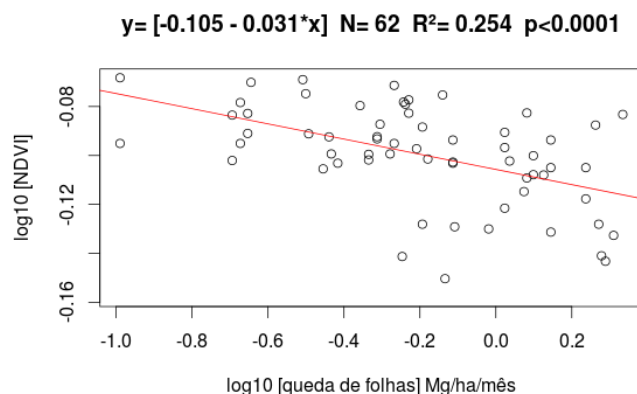


Figura 5B. Regressão linear entre queda de liteira Mg/ha/mes (coletores de liteira como unidade amostral) e NDVI, incluindo dados de todos os transectos.

4. Conclusões

As florestas de várzea amazônicas apresentam forte efeito de variações hidrológicas sazonais sobre a fenologia foliar. Este efeito poderia ser monitorado em toda área da bacia amazônica utilizando-se dados de sensoriamento remoto orbital. No entanto, serão necessárias pesquisas de longa duração e que representem as variações fitofisionômicas regionais. Estas pesquisas possibilitariam aumentar a confiabilidade da correlação entre dados de sensoriamento remoto e variações biofísicas *in loco* das florestas de várzea.

Este estudo demonstra que dados de reflectância de superfície nas bandas do vermelho visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e índices de vegetação como NDVI poderiam ser empregados no monitoramento de mudanças biofísicas em florestas de várzea amazônicas. Exemplos deste tipo de aplicação poderiam ser: monitoramento de efeitos de alterações climáticas futuras ou possíveis efeitos de alterações hidrológicas promovidas pela construção de represas hidrelétricas e hidrovias.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pelo financiamento desta pesquisa, inclusa no projeto PRONEX: “Dinâmica de Mercúrio e Carbono na Bacia Amazônica”; ao Programa de Pós Graduação em Ecologia do INPA, pelo curso de Mestrado; à Coordenação de Dinâmica Ambiental (CDAM/INPA) pelo custeio de combustível, e ao laboratório BIONTE/INPA pela autorização de uso de equipamentos e instalações. Agradecemos aos Drs Bruce Nelson e Jochen Schöngart, pesquisadores do INPA, pelo aconselhamento científico. Agradecemos ao Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Florestas (LAF) do INPE pelo apoio técnico e logístico para realização das análises de dados.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional das Águas – ANA. **HidroWeb**, 2012. <<http://hidroeb.ana.gov.br>> Acesso em 12/12/2012.

Alcântara, E.; Novo, E.; Stech, J.; Lorenzzetti, J.; Barbosa C.; Assireu, A.; Souza, A. 2010. A contribution to understanding the turbidity behaviour in an Amazon floodplain. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14.

Asner, G.P. 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**. 64. Elsevier Science.

Canty, M. J.; Nielsen, A. A. 2008. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1025–1036.

Gao, Bo-Cai. 1996. NDWI – A Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment** 58:257-266. Elsevier Science.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Novo, E.M.L.M.; Barbosa, C.C.F.; Gastil, M. 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing Environment**, 87:404–428.

Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Van Leeuwen, W. 1997. A comparison of Vegetation Indices over a global set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 59:440-451.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Divisão de Geração de Imagens (DGI). **Catálogo ResourceSat-1 LISS3**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em 12/03/2014

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. 2012. BDMEP - **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em 12/12/2012.

Joly, C.A.; Crawford, R. M. M. 1982. Variation in tolerance and metabolic responses to flooding in some tropical trees. **Journal of Experimental Botany**, 33:799–809.

Junk, W. J.; Bayley, P. B.; Sparks, R. E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: *Dodge D.P. Proceedings of the International Large River Symposium*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 106:110–127.

Kozlowski, T. T. 1984. **Responses of woody plants to flooding**. In: Kozlowski, T. T. (Ed.) *Flooding and plant growth*. Orlando: Academic Press; pp. 129–163.

Matthew, M. W., S. M. Adler-Golden, A. Berk, S. C. Richtsmeier, R. Y. Levine, L. S. Bernstein, P. K. Acharya, G. P. Anderson, G. W. Felde, M. P. Hoke, A. Ratkowski, H.-H. Burke, R. D. Kaiser, and D. P. Miller, 2000. *Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm*. **SPIE Proceedings**, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI. Vol. 4049, pp. 199-207.

Melack, J.; Forsberg, B., R. 2001. Biogeochemistry of Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands. In: McClain, M. E.; Richey, J.E.; Victoria, R. J. (Org.). **The Biogeochemistry of the Amazon Basin and its Role in a Changing World**. Oxford, England: Oxford University Press, v.1, p. 235-376.

- Melack, J. M.; Hess, L. L. 2010. Remote Sensing of the Distribution and Extent of Wetlands in the Amazon Basin. In: Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P. (eds) **Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. Dordrecht: Springer, Ecological Studies, 210.
- NASA, 2014. GeoCover 2000. **Global Land Cover Facility**. <<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>
- Nebel, G., J; Dragsted; A, Salazar, Vega. 2001. Litter fall, biomass and net primary production in floodplain forests in the Peruvian Amazon, **Forest Ecology and Management**, 150, 93–102.
- Parolin, P.; Wittmann, F.; Schöngart, J. 2010. Tree Phenology in Amazonian Floodplain Forests. In: Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Wittmann, F.; Schöngart, J.; Parolin, P. (eds) **Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. Dordrecht: Springer Ecological Studies 210.
- Peel, M. C.; Finlayson, B. L.; MCMAHON, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth Systems. Science** 11: 1633–1644.
- Quesada, C.A., Lloyd, J., Anderson, L.O., Fyllas, N.M., Schwarz, M., Czimczik, C.I. 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, 8 (6). pp. 1415-1440.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org/>>
- Rosenqvist, A., Forsberg, B. R., Pimentel, T., Rauste, Y. A.; Richey, J. E. 2002. The use of spaceborne radar data to model inundation patterns and trace gas emissions in the central Amazon floodplain. **International Journal of Remote Sensing** , 23, 1303 – 1328.
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1973. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- Saatchi, S. S.; Houghton, R. A.; Alvalá, R. C. S.; Soares, J. V.; Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology** 13:813–837.
- Schöngart, J., Piedade, M., Ludwigshausen, H., Worbes, M. 2002. Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests. **Journal of Tropical Ecology** 18: 581-597.
- Schöngart, J., Wittmann, F., Worbes, M. 2010. Biomass and Net Primary Production of Central Amazonian Floodplain Forests. In: Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P. (eds) **Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. Dordrecht: Springer. Ecological Studies, v. 210, p. 347-388.
- Zeilhofer, P; Sanches, L.; Vourlitis, G. L; Lui, Andrade, N.R. 2012. Seasonal variations in litter production and its relation with MODIS vegetation indices in a semi-deciduous forest of Mato Grosso. **Remote Sensing Letters**, Vol. 3, No. 1, 1–9.