

Análise da evolução espectral da sucessão da vegetação a partir da colonização das espécies pioneiras e ao longo do seu desenvolvimento, em uma floresta de várzea na região do médio rio Solimões

Juliana Maerschner Aguiar Peixoto¹
Bruce Nelson¹
Florian Wittmann²
Raphael Leduc¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA
Av. André Araújo, 2936, Manaus/AM, Brasil
{jump, bnelson, raphaell}@inpa.gov.br

²Instituto Max-Planck de Química
Johann J Becher-Weg, 27, Mainz, Alemanha
f-wittmann@web.de

Abstract. Six images of the TM sensor on board the Landsat 5 satellite, acquired for dates between 1984 and 2005, were used to analyze temporal behaviors of some spectral variables were also appraised (AFRI_{2,1}, NDVI and reflectance of TM bands 3, 4, 5 and 7) over the first 21 years of plant succession. The first step was to undertake procedures of pre-processing. The areas that underwent erosion or sedimentation were first mapped through the technique of change detection by subtraction of images of the vegetation index AFRI_{2,1}, for five intervals of time between 1984 and 2005. Regarding spectral changes during vegetation succession, the values of AFRI_{2,1} and of TM band 4, both showed a significant peak between 2 and 9 years of age. The values of NDVI reached a plateau between 2 and 9 years, without dropping significantly afterwards. The behavior of TM band 3 was complementary to the behavior of NDVI, dropping between 2 and 9 years and remaining stable in the subsequent ages. Between 16 and 21 years a significant drop was observed in bands 4 and 5. TM band 7 oscillated within a narrow range of 1% reflectance over the whole period of plant succession, and these differences were not considered reliable.

Palavras-chave: spectral changes, multitemporal analysis, vegetation index, amazon, mudança espectral, análise multitemporal, índices de vegetação, amazônia.

1. Introdução

As diferenças na estrutura do dossel e as características fisiológicas e morfológicas das folhas provocam uma resposta espectral diferenciada para cada tipo de vegetação, sendo possível distinguir ecossistemas, composição florística, estágios de sucessão e até o estado de conservação da vegetação.

Os níveis de reflectância esperados para uma cobertura vegetal, não se devem exclusivamente às propriedades fisiológicas e estruturais das folhas individuais, mas também a outros parâmetros de natureza geométrica (iluminação e visada), das propriedades das folhas (pigmentação, composição celular, espessura, quantidade de água), das propriedades espectrais dos elementos do dossel (forma geométrica, tamanho e densidade das copas, posicionamento das árvores, presença de folhas, galhos, frutos, flores, etc.), biofísica (índice de área foliar - IAF e densidade de área foliar - DAF), do solo e da atmosfera (Ponzoni, 2001). As propriedades espectrais de uma folha isolada e do dossel da qual fazem parte, apresentam formas das curvas de reflectância bastante semelhantes, considerando uma mesma faixa espectral (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

As formações florestais que ocorrem na Amazônia já têm seu padrão espectral amplamente conhecido. No entanto, ainda há certa confusão na tentativa de distinguir entre estágios de sucessão dentro de uma mesma tipologia florestal. Para contornar esse problema, é fundamental ter conhecimento acerca da evolução espectral da vegetação pioneira, a partir

do momento que ocorre a colonização da área até o desenvolvimento de uma floresta em estágio mais avançado.

Este padrão pode ser investigado utilizando-se uma série temporal de imagens, e em um ecossistema que tem seu padrão de sucessão vegetal amplamente estudado e conhecido, como é o caso das florestas de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM), no Estado do Amazonas.

A sucessão florestal na várzea e as condições de mudança da paisagem ao longo de um gradiente vertical estão fortemente inter-relacionadas (Wittmann *et al.*, 2006). Os bancos de sedimentos recém depositados pelo rio são colonizados por gramíneas e herbáceas, como a *Echinochloa polystachia* (canarana), seguidas por arbóreas pioneiras como a *Salix martiniana* e *Alchornea castaneifolia*, que toleram taxas de sedimentação de até 20 cm, aproximadamente (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann *et al.*, 2004). À medida que os bancos de sedimentos tornam-se mais altos, a velocidade da água diminui, e estágios monoespecíficos (por exemplo *Cecropia latiloba*) se desenvolvem, ocorrendo tolerando taxas de sedimentação de cerca de 1 cm (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann e Junk, 2003; Wittmann *et al.*, 2004). Essas formações monoespecíficas se estabelecem aproximadamente 20 anos após tornar-se efetiva a colonização da área pelas espécies pioneiras (Worbes *et al.*, 1992; Worbes, 1997).

Tendo conhecimento destas informações a respeito da sucessão vegetal nas florestas de várzea da RDSM, o intuito deste trabalho foi verificar se ocorrem mudanças em alguns atributos espectrais da vegetação a partir de sua colonização e ao longo de seu crescimento e desenvolvimento, ao longo de 21 anos.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado nos rios que delimitam a área focal da RDSM, localizada no Estado do Amazonas. As margens dos rios foram digitalizadas, e utilizadas para gerar um buffer de 3 km para cada lado. Sobreposta a esta, foi adicionada uma máscara cobrindo nuvens e sombras de cada data avaliada (Figura 1).

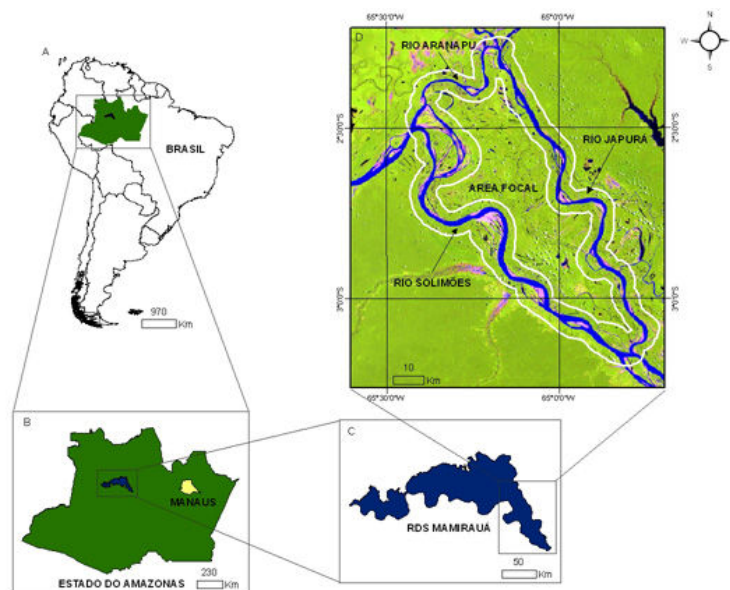


Figura 1. Em A e B, localização da RDSM no Estado do Amazonas. Em D área focal da RDSM com o polígono branco representando a área de estudo.

2.2 Imagens utilizadas

Foram utilizadas seis imagens do satélite Landsat sensor TM, referentes à cena 001/62, nas datas de 26/09/1984, 18/10/1986, 05/10/1993, 14/09/1997, 25/11/2000 e 04/09/2005. As datas das imagens foram escolhidas com base em duas características: o nível de inundação do dia, selecionadas aquelas tiradas no período de vazante do rio (setembro-novembro) e com alturas de inundação aproximadas; e aquelas que apresentaram menor área coberta por nuvens.

2.3 Pré-processamentos

As imagens foram georeferenciadas utilizando o mosaico ortoretificado Landsat TM (GeoCoverTM) como base. Todas as bandas foram convertidas para valores de reflectância utilizando o método descrito por Chen e Herz (1996). Como cada imagem apresenta condições atmosféricas e radiométricas diferentes, estas passaram por um processo de normalização radiométrica. A imagem utilizada como referência para este procedimento foi a de 1986, por ser a mais próxima da data de lançamento do satélite e apresentar menor quantidade de nuvens e névoa. Primeiro, a banda 3 da imagem de 1986 foi corrigida atmosféricamente utilizando metodologia COST, de Chavez (1996). Posteriormente as bandas foram normalizadas radiometricamente utilizando metodologia descrita por Roberts et al. (2002).

2.4 Processamentos

As áreas novas sedimentadas foram definidas como aquelas que na data inicial (1984) eram não vegetação (água ou sedimento) e na data seguinte tornaram-se vegetação. Então foi criada uma máscara de áreas vegetadas e não vegetadas utilizando um limiar do índice de vegetação AFRI_{2.1} (Karnieli et al., 2001), para cada data. A água foi identificada por meio de um limiar de reflectância na banda 7. Após aplicar os dois limiares, o resultado obtido foram imagens binárias (B), sendo o valor 1 áreas vegetadas (V) e o valor zero áreas não-vegetadas (NV) para cada data: B₁₉₈₄, B₁₉₈₆, B₁₉₉₃, B₁₉₉₇, B₂₀₀₀ e B₂₀₀₅.

A determinação das áreas recém colonizadas por vegetação foi feita através da técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens, realizada par a par, com as 6 imagens binárias, totalizando 5 pares (B₁₉₈₄₋₁₉₈₆, B₁₉₈₆₋₁₉₉₃, B₁₉₉₃₋₁₉₉₇, B₁₉₉₇₋₂₀₀₀ e B₂₀₀₀₋₂₀₀₅). Como resultado desta técnica, obteve-se 5 imagens mudanças representando as diferenças nos valores dos pixels entre a imagem tempo 1 e a imagem tempo 2. As imagens mudança obtidas foram classificadas com a técnica de fatiamento em três classes: erosão (V para NV), área recém colonizada por vegetação (NV para V) e não-mudança (V para V ou NV para NV). O produto final foram as imagens T₁₉₈₄₋₁₉₈₆, T₁₉₈₆₋₁₉₉₃, T₁₉₉₃₋₁₉₉₇, T₁₉₉₇₋₂₀₀₀ e T₂₀₀₀₋₂₀₀₅.

As informações contidas nas imagens temáticas geradas para cada período foram reunidas em um único mapa da dinâmica de processos de erosão e sedimentação na RDSM. O resultado dessa operação sai em forma de tabela e imagem, onde cada pixel contém todas as informações sobre qual categoria pertence em cada imagem temática (T₁₉₈₄₋₁₉₈₆, T₁₉₈₆₋₁₉₉₃, T₁₉₉₃₋₁₉₉₇, T₁₉₉₇₋₂₀₀₀ e T₂₀₀₀₋₂₀₀₅). Na imagem dinâmica gerada, foi selecionada a seqüência de mudança que caracterizava áreas sedimentadas e colonizadas em T₁₉₈₄₋₁₉₈₆, e que permaneceram na classe não mudança nos imagens seguintes. Essa seqüência foi transformada em uma máscara que foi sobreposta aos seguintes atributos espectrais: índice de vegetação AFRI_{2.1}, o índice de vegetação NDVI, e os valores de reflectância nas bandas 3, 4, 5 e 7 do Landsat 5/TM.

Esses atributos foram comparados com a idade aproximada da vegetação em cada data. Considerando que todas as imagens são da época da seca, período em que as macrófitas pioneiras iniciam a colonização das áreas recém sedimentadas (Worbes et al., 1992; Worbes, 1997), é possível afirmar que a vegetação que colonizou determinada área atingiu a densidade

suficiente para exceder o limiar do índice $AFRI_{2,1}$, em algum momento entre 26 de setembro de 1984 e um pouco antes de 18 de outubro de 1986. Então a idade aproximada da vegetação em cada data de estudo foi estimada de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1. Idade aproximada da vegetação, presente nos polígonos mapeados, em cada data da série de vinte e um anos.

Data	26/09/84	18/10/86	05/10/93	14/09/97	25/11/00	04/09/05
Tempo em relação a data inicial	início	2 anos	9 anos	13 anos	16 anos	21 anos
Idade aproximada da vegetação (anos)	0	0 a 2	7 a 9	11 a 13	14 a 16	19 a 21

3. Resultados e discussão

As médias dos valores dos atributos espectrais extraídos dos polígonos de vegetação foram plotados em gráfico com as idades aproximadas. Foram utilizados 24 polígonos, sendo utilizados os mesmos em todas as datas para extrair as médias dos valores das células para as variáveis espectrais avaliadas (índices de vegetação $AFRI_{2,1}$ e NDVI, e reflectância nas bandas 3, 4, 5 e 7).

Os valores extraídos dos índices de vegetação $AFRI_{2,1}$ e NDVI apresentaram um comportamento de acordo com o padrão descrito na literatura (Amaral et al., 1996; Karnielli et al., 2001; Moreira, 2001; Steininger, 1996). O NDVI apresentou valores mais baixos do que o $AFRI_{2,1}$ (Figura 2), porém, a curva da relação entre o valor do índice e a idade aproximada da vegetação comportou-se da mesma maneira para os dois índices, semelhante ao descrito por Karnielli et al. (2001). No primeiro ano os valores foram baixos, pois não há presença de vegetação. No ano seguinte, após a colonização da área, os valores dos índices aumentam consideravelmente, pois também aumenta a densidade de vegetação, com folhas jovens e saudáveis. Nos anos seguintes observa-se uma estabilização nos valores, tendendo a diminuir na medida em que a textura do dossel aumenta, o que diminui a fração de folhas iluminadas pelo sol em cada pixel.

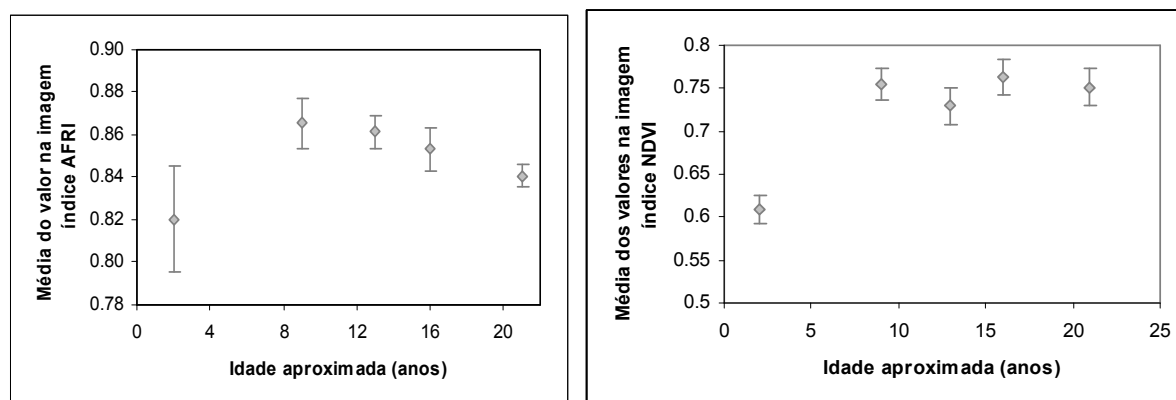


Figura 2. Médias dos valores dos índices de vegetação $AFRI_{2,1}$ (esquerda) e NDVI (direita). As barras representam +/- 2 erros padrão.

Na terra firme da Amazônia, a vegetação mais madura, com maior índice de área foliar, tem suas folhas distribuídas de forma mais difusa em todo o perfil vertical do dossel. A superfície superior do dossel mais maduro também exibe uma topografia irregular, de modo que as copas de muitas árvores são sombreadas pelos vizinhos ao lado, o que escurece o

brilho médio do pixel e também o valor do índice de vegetação. Em terra firme, as capoeiras jovens e densas (a partir de ≈ 2 anos de idade) têm suas folhas concentradas no topo do dossel. O dossel da capoeira é um tapete de folhas mais densas, fechadas e planas do que a floresta primária. Estes atributos estruturais tornam o valor do índice de vegetação mais alto em floresta jovem, decrescendo conforme o amadurecimento da floresta.

O comportamento dos índices de vegetação $AFRI_{2,1}$ e NDVI nas áreas de várzea é semelhante ao que ocorre na terra firme. De acordo com a Figura 2, as barras de dois erros padrão de cada média ($n = 24$ para cada média) mostram uma diferença significativa entre as idades de 9 e 13 anos e as idades de 2 e 21 anos, descrevendo um pico de valores $AFRI_{2,1}$. A vegetação mais jovem (2 anos) não apresentou diferença significativa da vegetação mais velha (16 e 21 anos) possivelmente porque a vegetação mais desenvolvida apresenta maior quantidade de sombra, e baixos valores de $AFRI_{2,1}$. Já a vegetação jovem pode não estar totalmente estabelecida, com porções de solo exposto e/ou vegetação seca, que também apresentam baixos valores de $AFRI_{2,1}$ (Figura 3). Para os valores de NDVI, se nota um aumento significativo na média de valores entre uma floresta de 2 anos e 9 anos. No entanto, de 9 a 21 anos não foram registradas diferenças significativas nas médias dos valores do índice NDVI.



Figura 3. As fotos de cima mostram a colonização pioneira em bancos de sedimentos depositados pelo canal do rio Solimões (Fotos: Leduc, R.). Nas fotos de baixo, grandes extensões de canarana (*Echinochloa sp.*) e ao fundo formação mono-específica de *Cecropia sp.* (Fotos: Peixoto, J.M.A.).

A média dos valores de refletância da vegetação nas bandas 3, 4, 5 e 7 obtidos em diferentes idades de seus primeiros vinte anos de crescimento, está demonstrada na Figura 4. As bandas 3 e 4, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, apresentaram diferença significativa nas médias dos valores de refletância entre a vegetação com aproximadamente 2 anos e o restante das idades. A refletância na banda 3 caiu 2% entre 2 e 9 anos, como já era esperado à medida que ocorre incremento de cobertura vegetal ou a substituição de tapetes de gramínea seca por vegetação arbórea. Há uma queda significativa da refletância da banda 4 entre as idades 16 e 21 anos de 3%, possivelmente relacionada com o aumento de sombra e textura do dossel. Na banda 5 (infravermelho médio) as refletâncias aos 13, 16 e 21 anos foram maiores aos 2 anos, ocorrendo um pico significativo aos 16 anos. Na banda 7 (infravermelho médio) houve diferenças significativas ao longo do tempo, mas a variabilidade temporal da refletância foi de aproximadamente 1%, o que pode estar incluído no erro da normalização radiométrica

Na banda 5 (infravermelho próximo), apesar de apresentar diferença significativa entre algumas médias, os valores encontrados são muito pequenos e próximos, representando não mais que 3% de diferença entre os valores de reflectância. Embora os valores de erro padrão indiquem que essas diferenças são significativas, nos procedimentos de normalização radiométrica é possível obter erros superiores a esses. Levando em consideração também a variabilidade de valores entre os polígonos (n = 24) essas diferenças encontradas na banda 5 não podem ser consideradas confiáveis.

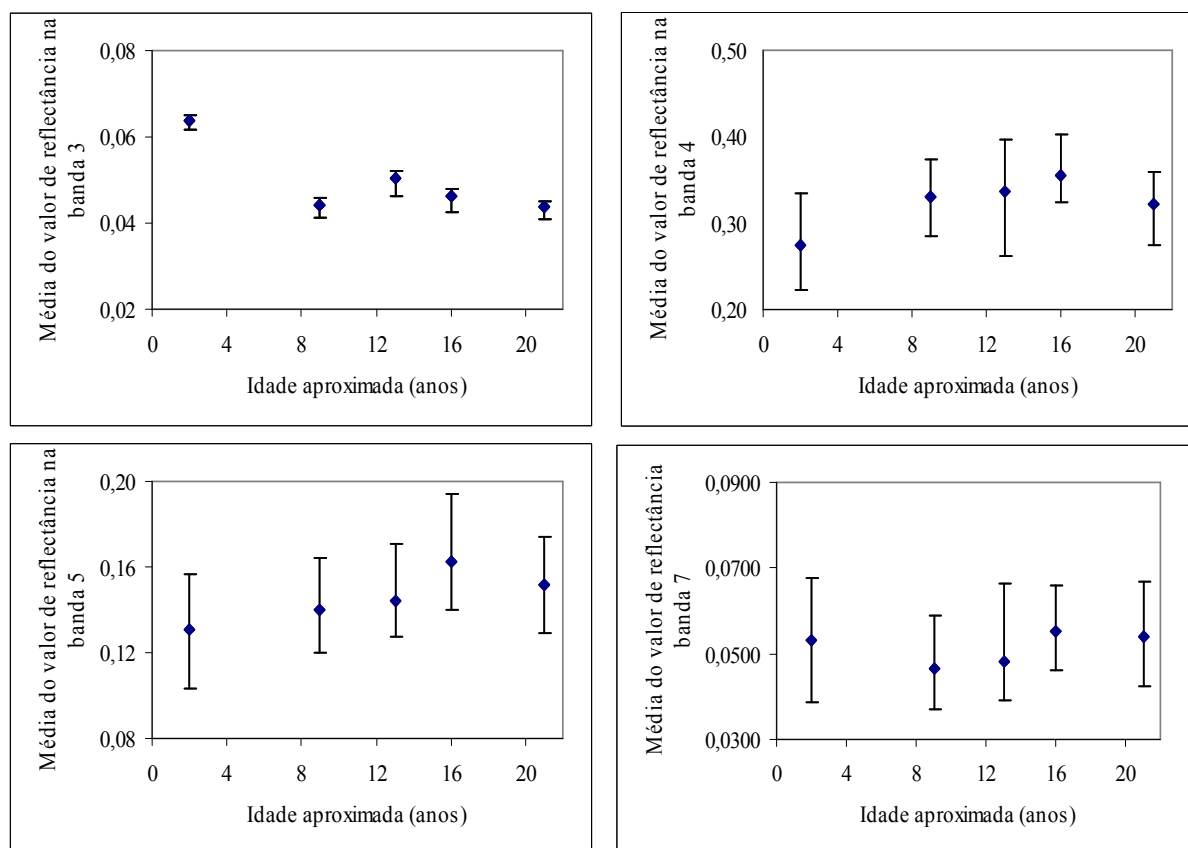


Figura 4. Média dos valores de refletância nas bandas 3, 4, 5 e 7 em florestas de várzea jovem em diferentes idades. As barras indicam +/- 2 erros padrão (n = 24).

Nos primeiros anos de crescimento, a reflectância da vegetação na banda 4 tende a aumentar devido ao crescimento e adensamento da vegetação. Em folhas maduras isoladas, Gausman et al. (1969 apud Ponzoni, 2001) afirmam que a reflectância aumenta na região do infravermelho próximo, pois aumenta o número de espaços intercelulares no mesófilo, dentro de uma pilha de folhas sobrepostas. Os dosséis mais homogêneos, característicos de estágios jovens de sucessão, devido ao baixo número de espécies, com grande quantidade de folhas verdes, apresentam alta reflectância na região do infravermelho próximo. Em dosséis mais heterogêneos, característicos de florestas mais maduras, os elementos da vegetação não estão uniformemente distribuídos, o espaçamento vertical e horizontal entre folhas é maior, e as folhas nas camadas inferiores e das copas de árvores de menor porte são sombreadas. Estes dosséis com estrutura mais complexa tendem a diminuir sua reflectância no infravermelho próximo (Mather, 2004; Ponzoni, 2001), semelhante ao que ocorre com o índice de vegetação.

4. Conclusões

Um pico significativo de médias entre a idade de 2 e 9 anos foi observado em quase todas as variáveis espectrais analisadas. Na banda 7 foi possível observar esse pico significativo, no entanto a diferença de apenas 1% na variabilidade temporal da reflectância pode estar dentro da faixa de erro da normalização radiométrica. Tornando essa diferença, aparentemente significativa, não confiável. Na banda 5 não foi detectado esse pico entre 2 e 9 anos de idade.

Apesar da similaridade espectral e florística que ocorre nas florestas de várzea na faixa de idade entre 9 e 21 anos, foi possível separar a vegetação jovem entre 16 e 21 anos de idade nas bandas 4 e 5 (infravermelho próximo e médio) e na vegetação com 9 e 13 anos da vegetação com 21 anos no índice $AFRI_{2,1}$. No entanto, não é possível afirmar exatamente quando entre 2 e 9 anos de idade se atinge o pico no valor de $AFRI_{2,1}$, ou um platô nos valores de NDVI e reflectância no infravermelho próximo, pois há uma lacuna de dados entre essas idades neste estudo. É provável que ocorra, pois a vegetação pioneira na área da RDSM é constituída por gramíneas de rápido crescimento e sincronizadas com o ciclo hidrológico, algumas desenvolvem formações mono-específicas de grandes extensões (Junk, 1970; Junk e Piedade, 1993), como a *Echinochloa polystachya* e *Paspalum fasciculatum* (Conserva e Piedade, 2001).

Seria interessante repetir o estudo cobrindo a lacuna de dados entre 2 e 9 anos de idade para verificar o comportamento espectral da vegetação nessa faixa. É provável que se encontre alguma diferença significativa de valores de índice de vegetação e reflectância.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento da bolsa de estudo dos autores Juliana M. A. Peixoto e Raphael Leduc. Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) por ceder a estrutura física necessária à realização do estudo. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por fornecer as imagens. Ao Instituto Max-Planck, pelo financiamento da expedição de campo. Ao Dr. Paulo Maurício Graça pelos valiosos comentários e sugestões na época do desenvolvimento do trabalho.

Referências bibliográficas

Amaral, S.; Soares, J.V.; Alves, D.S.; Mello, E.M.K.; Almeida, S.A.S.; Silva, O.F.; Silveira, A.M. 1996. Relações entre Índice de Área Foliar (LAI), Área Basal e Índice de Vegetação (NDVI) em relação a diferentes estágios de crescimento secundário na Floresta Amazônica em Rondônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 8, 1996, Salvador. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: INPE, 1996. CD-ROM, On-line. Artigo p.485-489. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/1996>>.

Chavez Jr., P.S. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1025-1036, 1996.

Chen, S.C. e Herz, R. Estudos quantitativos e calibração radiométrica de dados digitais do Landsat-5. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 8, 1996, Salvador. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: INPE, 1996. CD-ROM, On-line. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/1996>>.

Conserva, A.S.; Piedade, M.T.F. Influence of flood pulse and land-use on the composition of herbaceous species on a floodplain in central Amazonia. **Verth. Internat. Verein. Limnology**, v. 26, p. 994-996, 2001.

Junk, W.J. Investigations on the ecology and production biology of the “floating meadows” Paspalum-Echinochloetum on the Middle Amazon. The floating vegetation and its ecology. **Amazoniana**, v. 2, n. 4, p. 449-495, 1970.

Junk, W.J.; Piedade, M.T.F. Herbaceous plants of the Amazon floodplain near Manaus: species diversity and adaptations to the flood pulse. **Amazoniana**, v. 3, n. 4, p. 467-484, 1993.

Karnieli, A.; Kaufman, Y.J.; Remer, L.; Wald, A. AFRI – aerosol free vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, p. 10-21, 2001.

Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images**. An introduction. 2ª ed. Wiley. 2004, 292 p.

Moreira, M.P. **Uso de sensoriamento remoto para avaliar a dinâmica de sucessão secundária na Amazônia Central**. 2001. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 2001.

Ponzoni, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: Meneses, P.R.; Netto, J.S.M. (Org.). **Sensoriamento remoto – reflectância dos alvos naturais**. 1ªed. UnB/Embrapa. 2001. p.157-202.

Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. Vol. 1, 135p.

Roberts D.A.; Numata I.; Holmes K.; Batista G.; Krug T.; Monteiro A.; Powell B.; Chadwick O.A. Large area mapping of land-cover change in Rondonia using multitemporal spectral mixture and decision tree classifiers. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D20, 2002.

Steininger, M.K. Tropical secondary forest growth in the Amazon: age, area and change estimation with Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 1, p. 9-27, 1996.

Wittmann, F.; Anhuf, D.; Junk, W. J. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote-sensing techniques. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, p. 805-820, 2002.

Wittmann, F.; Junk, W. J.; Piedade, M. T. F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, p. 199-212, 2004.

Wittmann, F.; Schongart, J.; Montero, J.C.; Motzer, T.; Junk, W.J.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Worbes, M. Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 1334-1347, 2006.

Worbes, M.; Hans, K.; Revilla, J.D. ; Christopher, M. On the dynamics, floristic subdivision and geographical distribution of várzea forests in central Amazonia. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, p. 553-564, 1992.

Worbes, M. The forest ecosystem of the floodplains. In: Junk, W. J. (Org.). **The central amazon floodplain: Ecology of a pulsating system**. Ecological Studies, Springer, Berlin, v. 126, p. 223-265, 1997.