

Dinâmica temporal da cobertura de macrófitas nos lagos de Mamirauá

Adriana Gomes Affonso¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹
Helder Lima de Queiroz²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{affonso, evlyn}@dsr.inpe.br

²Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá
Estrada do Bexiga, 2584, FonteBoa, Tefé, AM, Brasil
helder@mamiraua.org.br

Abstract: The aim of this paper is to analyze the macrophyte coverage dynamics during two phases of the hydrograph (flood and drought) in different types of lakes at Mamirauá Sustainable Development Reserve. Twenty Landsat TM images were selected, corresponding to the drought and flood hydrograph phases for each year from 1999 to 2009, except 2003. The images were classified using the maximum likelihood algorithm using bands 3, 4 and 5 being mapped the following classes: 1) Water, 2) macrophytes, 3) Clouds and 4) Bare soil. Lakes were visually classified based on satellite imagery as circular, elongated (direct and simple) and complexes. Results showed that macrophyte coverage extent varied according to hydrography phases, interannually and lake shapes. The elongated lakes showed the greatest variation in macrophyte cover between hydrograph phases and the circular lakes had the smallest variation between phases. We observed an inverse correlation between macrophyte cover and water level in different types of lakes. The direct elongated lakes (with direct connection to the main channel) showed the highest inverse correlation with water level. These lakes are subject to seasonal bank exposure favoring macrophyte colonization. Therefore, these lakes are more susceptible to large variations in water level, and hence to climate change.

Palavras-chave: macrophyte, Amazon lakes, Landsat-TM, macrófitas, lagos Amazônicos, Landsat-TM

1. Introdução

Estima-se que 17% da bacia Amazônica seja ocupada por diferentes tipos de áreas inundáveis (Hess et al., 2003), que incluem, por exemplo, os mangues costeiros, as regiões pantanosas de floresta aberta com palmeiras (costa do Amapá e região oeste na Ilha de Marajó), as savanas inundadas (campos inundados, como os Llanos de Moxos, na Bolívia) e as planícies de inundação ao longo dos rios amazônicos (Junk; Piedade, 2011).

A vasta planície de inundação do Rio Amazonas (também conhecida como várzea) é formada por um complexo sistema de rios, canais, lagos, ilhas e barreiras que são modificados constantemente devido à sedimentação e ao transporte de sedimentos em suspensão.

Uma das comunidades bióticas mais características da região de várzea são as macrófitas aquáticas, que podem ser definidas como plantas que podem crescer na água, em solos cobertos por água, e ainda em solos saturados de água (Junk, 1984, Sioli, 1984). Essas plantas são ambientes-chave para a proteção e conservação de diversas espécies de peixes de várzea amazônica (Sanchez-Botero; Araújo-Lima, 2001), atuando ainda como abrigo e local de forrageamento para diversos organismos (Junk, 1984) e apresentando ainda uma alta riqueza de espécies de peixes (Petry et al., 2003). Além disso, elas são responsáveis pela emissão de aproximadamente 243 kg/km²/dia de metano nas áreas de várzea (Melack et al., 2004) e produzem de 4 a 9 x 10³ Mg/km²/ano de biomassa seca (Silva et al., 2009).

Silva et al., (2010) observou, através de imagens de satélite, a grande variabilidade sazonal e inter-anual da cobertura de macrófitas no lago Grande de Monte Alegre, PA, no período de 2003 à 2004. Os autores observaram uma correlação inversa entre o nível da água e a cobertura de macrófitas, e sugeriram que o aumento na frequência de eventos de seca

extremos, devido a mudanças climáticas, pode alterar o papel das macrófitas na ciclagem do carbono (Silva, et al., 2010).

Dada a enorme dimensão da planície de inundação Amazônica e a grande variabilidade nas formas e tamanhos dos lagos, surge a questão. Será que os mesmos padrões de variabilidade temporal e espacial da cobertura de macrófitas se repetem em outras regiões da várzea?

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é analisar a dinâmica da cobertura de macrófitas, nas fases de seca e cheia, em diferentes tipos de lagos da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, no período de 1999 à 2009 por meio da análise de uma série temporal de imagens Landsat-TM.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM), no Estado do Amazonas, na planície de inundação dos Rios Solimões e Japurá, próximo à cidade de Tefé, e a cerca de 600 km de Manaus ($02^{\circ} 49'S$; $65^{\circ} 00'W$). A região é formada por uma planície de inundação, com uma variação anual do nível da água de aproximadamente de 10 m, sendo que na cheia os canais, lagos, canos, ressacas e rios permanecem interconectados, e na seca, somente os rios principais, alguns canais de conexão e os lagos contêm água (Ayres, 1993, Ramalho et al., 2009). A região apresenta diversos diques marginais, canais anastomosados e diversos lagos, temporários ou perenes. O período de água alta ou cheia inicia em maio estendendo-se até meados de julho, seguido pela vazante que se prolonga até o mês de setembro. A seca, ou água baixa, vai de setembro até novembro, quando se inicia a enchente que vai até o mês de maio (Ramalho et al., 2010).

3. Metodologia

Foram selecionadas 20 imagens do satélite Landsat/TM da órbita/ponto 001/62, com a menor cobertura de nuvens, correspondentes as fases de cheia e seca da hidrografia para cada ano no período de 1999 à 2009, com exceção do ano de 2003 (figura 1). O ano de 2003 foi excluído porque as imagens disponíveis e sem cobertura de nuvens apresentavam ruídos. As imagens foram restauradas de 30 para 15 metros, para recuperar o sinal degradado durante o seu processo de formação e realçar os detalhes suavizados nas imagens (Fonseca et al., 1993; Giovanni, 2003). Essa técnica permite compensar o efeito de borramento (degradação) da imagem durante seu processo de aquisição, restaurando sua qualidade radiométrica a partir do uso de um filtro inverso modelado a partir da função de transferência de modulação do sensor (Boggione, 2003). Posteriormente as imagens foram registradas com base nas imagens GEOCOVER disponibilizadas gratuitamente pela National Aeronautics and Space Agency (NASA).

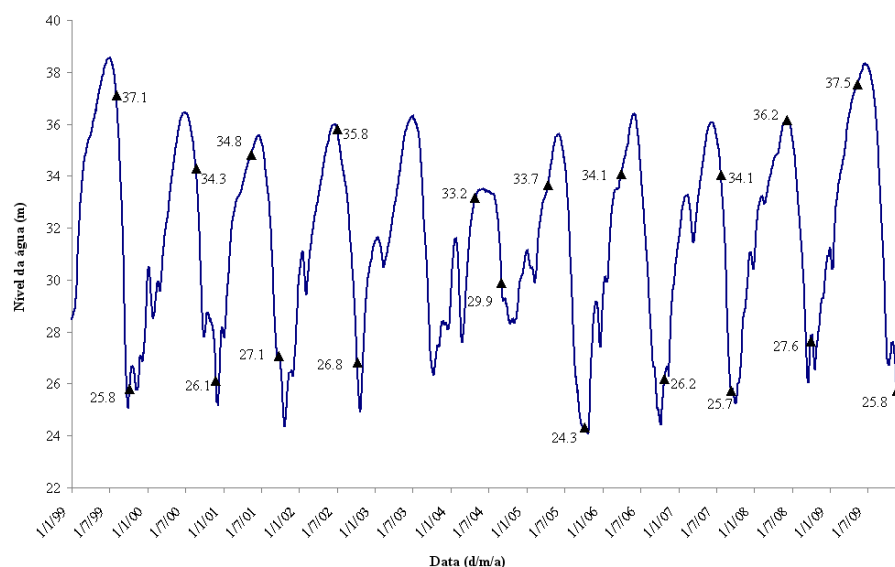


Figura 1: Nível da água no período de 1/1/1999 à 31/12/2009 (em azul) derivados das medições da régua localizada no Lago Mimirauá, na RDSM, e o nível da água das imagens selecionadas (em preto).

Os dados de nível da água utilizados nesse estudo são resultantes da medição da cota diária a partir da régua localizada no Lago Mimirauá na RDSM. Esses dados são disponibilizados gratuitamente no site do Instituto Mimirauá (<http://www.mimiraua.org.br/fluviometrico/>) e possuem medição contínua desde 1991.

Para esse estudo foram selecionados 85 lagos da área de estudo localizados no Setor Jarauá. O limite dos lagos foi definido a partir do mapeamento do espelho d'água máximo (até o limite com a área de floresta) com base nas imagens Landsat/TM referentes a 3/8/1999 (maior nível da água com menor cobertura de nuvens no período estudado) e 24/7/2007 (imagem de cheia sem cobertura de nuvens) e ainda com o auxílio das imagens de alta resolução do Google Earth.

3.1. Caracterização da extensão de macrófitas e do espelho d'água

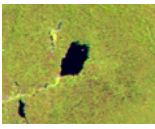

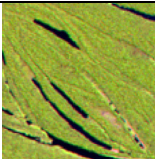

As amostras de treinamento para a classificação foram baseadas em fotografias obtidas nos trabalhos de campo dos períodos de seca de 2008 e 2009 (descritos em Affonso, 2012) e a partir de alvos semelhantes no tocante ao comportamento espectral, à forma e localização. (Silva et al., 2009). Foi realizada uma classificação supervisionada ao partir do algoritmo de Máxima Verossimilhança, utilizando as bandas 3, 4 e 5 (Bayley; Moreira, 1978; Arraut, et al., 2010), sendo mapeadas as seguintes classes: 1) Espelho d'água; 2) Macrófitas; 3) Nuvens; e 4) Solo exposto: áreas sem água ou vegetação, ocorrendo somente na seca. A qualidade das classificações foi avaliada com base na matriz de confusão das amostras de aquisição e teste para cada data das imagens, e com base nos pontos coletados em campo, para as imagens da seca e da cheia de 2009. Posteriormente os mapas foram editados para a correção de pequenos erros. As sombras das nuvens foram editadas, pois, quando muito densas foram classificadas erroneamente como espelho d'água. Para cada lago foi calculada a área de cada classe (espelho d'água, solo exposto, macrófitas aquáticas e nuvem) e a porcentagem em relação a área total do lago para cada mapa. Os lagos que apresentaram 100% de cobertura de nuvens foram excluídos da análise.

3.2. Tipo e forma dos lagos

Foi realizada uma classificação visual a partir da análise das imagens quanto ao tipo de forma dos lagos, sendo esses classificados em circulares, alongados e compostos (Tabela 1).

Dada a grande quantidade e variabilidade dos lagos alongados (ou ambientes alongados), essa classe foi subdividida de acordo com o tipo de conexão principal: 1) Simples: lagos em que a conexão com o canal principal é feita através de canais de pequena largura e, geralmente, de grande comprimento. No período de seca os canais de conexão secam, deixando os lagos isolados. 2) Direta: lagos em que a conexão é direta com o canal principal e podem ser considerados uma extensão do canal principal. Muitos deles secam completamente durante a seca, apesar do canal principal ainda conter água e geomorfologicamente podem ser considerados paleocanais.

Tabela 1: Tipo, descrição e uma imagem de exemplo dos tipos de lagos.

Tipo	Descrição	Imagem
Circular	Lagos de forma circulares, subcirculares e elípticas	
Composto	Lagos que não apresentam uma forma definida e são combinações de outras classes.	
Alongada	Lagos que apresentam forma alongada, foram subdivididas de acordo com a conexão:	
Simples	Conexão com o canal principal (Paraná do Jarauá) através de canos de pequena largura, ficando isolados no período de seca	
Direta	Conexão direta com o canal principal (Paraná do Jarauá). São os paleo meandros	

Fonte: Adaptado de Melack (1984).

4. Resultados

A extensão da cobertura de macrófitas variou entre as fases da hidrógrafa, entre os anos observados e entre lagos. A tabela 2 apresenta os valores de porcentagem da cobertura de macrófitas em cada ano para cada fase. O menor valor da % de cobertura de macrófitas ocorreu na cheia de 1999, e o maior na seca de 2009. A cheia de 1999 foi a maior que ocorreu na região da reserva desde 1991, quando começaram os registros de nível da água, com a máxima de 38,55 m.a.n.m. Esse nível foi maior do que o da cheia de 2009, quando o nível da água subiu até 38,33 m.a.n.m. na região. No sistema dos rios Negro e Solimões perto da cidade de Manaus, contudo, essa cheia foi considerada a maior dos últimos 107 anos (CPRM, 2009). Estudos anteriores mostram a correlação inversa entre o nível da água e a cobertura de macrófitas nos lagos Amazônicos (Silva et al., 2010, Silva et al., 2011), na qual quanto maior o nível da água menor a cobertura de macrófitas

Tabela 2: Porcentagem da área total dos lagos para cobertura de macrófitas e de nuvem em cada fase da hidrógrafa por ano.

Ano	Cheia		Seca	
	Macrófitas	Nuvem	Macrófitas	Nuvem
1999	4,93	1,53	34,23	14,73
2000	10,69	0,67	34,00	13,14
2001	12,00	18,31	30,98	0,00
2002	22,31	0,00	11,67	1,19
2004	16,92	22,22	23,84	6,89
2005	22,17	0,12	49,34	0,00
2006	22,60	5,19	41,94	6,63
2007	23,75	0,00	34,70	0,00
2008	26,96	19,09	37,78	0,00
2009	12,81	7,68	52,80	1,17

Da mesma forma, esse padrão foi observado no presente estudo, a correlação inversa e significativa ($r = -0,76$, $p < 0,01$) entre a cobertura de macrófitas e o nível da água (Figura 2). Demonstrando que, de uma forma geral, com a diminuição do nível da água, ocorre o aumento da cobertura de macrófitas nos lagos na região.

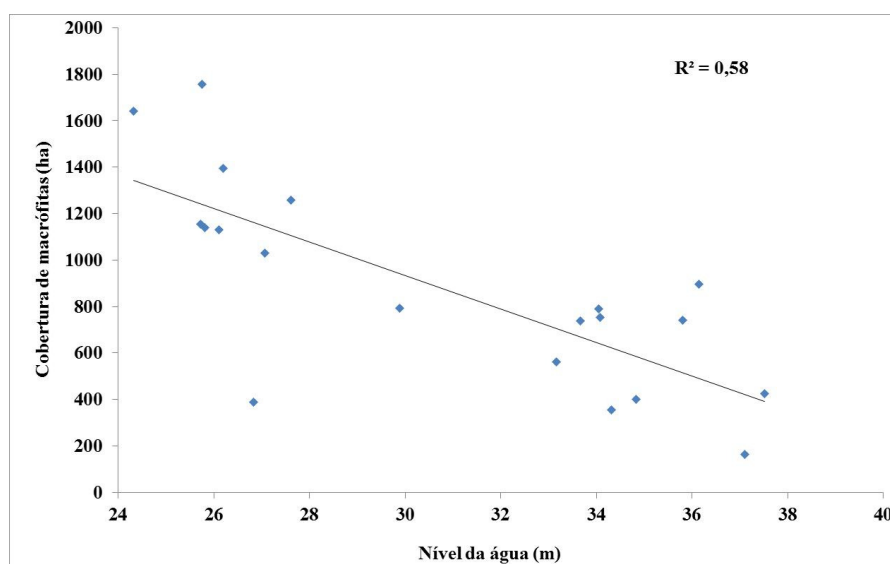


Figura 2: Correlação entre a área da cobertura de macrófitas e o nível da água nos lagos de Mamirauá no período de 1999 à 2009, nas fases de seca e de cheia

Alguns lagos não apresentaram a classe espelho d'água aparente na imagem, por se encontrarem recobertos por macrófitas, ou ainda devido à grande cobertura de nuvens em algumas datas. Os períodos de seca apresentaram o maior número de lagos com 100 % de cobertura por macrófitas, seja presente em suas margens (na fase terrestre) ou sobre o espelho d'água.

Ao analisarmos a forma dos lagos, observamos uma variação espacial e temporal da cobertura de macrófitas entre eles (Figuras 3 e 4). Os lagos dos tipos alongados (simples e direto) e compostos apresentaram uma variação maior da cobertura de macrófitas (e também do espelho d'água) do que os lagos circulares. Estes últimos praticamente mantiveram a porcentagem de espelho d'água constante entre a cheia a seca, com pelo menos 80% da área classificada como espelho d'água em todas as datas, com exceção da seca de 2006, provavelmente devido a intensa cobertura na data que comprometeu o mapeamento preciso em todos os lagos. Da mesma forma, é possível observar que em anos, com ou sem cobertura

de nuvens, a porcentagem de cobertura de macrófitas é praticamente a mesma nesses lagos. Isso sugere que os lagos circulares são mais isolados, mais dependentes da reciclagem de nutrientes local, do que do aporte externo. E provavelmente menos sensíveis a grandes amplitudes de variação.

Nos lagos do tipo alongado, durante a seca, a porcentagem tanto de cobertura de macrófitas (e do espelho d'água) é muito variável, podendo na seca alcançar em média 70% do lago. Esses lagos são canais abandonados, os quais durante a cheia se transformam em sistemas semi-lóticos, conectados aos canais e rios principais, apresentando fluxo e direção variáveis em função da fase do pulso de inundação. A variação espacial da área ocupada por macrófitas foi maior nesses lagos do que nos lagos do tipo circular. Tais lagos estão sujeitos a uma exposição sazonal de suas margens a qual favorece a colonização por macrófitas (Silva et al, 2010). Além disso, com a conexão dos rios principais em grande parte do ano, tais lagos recebem constante aporte de nutrientes possuindo uma maior produtividade primária (Melack; Forsberg, 2001). Esses lagos, provavelmente estão mais susceptíveis às grandes variações do nível da água, e consequentemente às mudanças climáticas.

Ao analisarmos a correlação do nível da água com a cobertura de macrófita nos lagos em função da forma, também observamos uma correlação significativa, para um $p < 0.01$. Os lagos alongados diretos apresentaram um $r = -0,76$, os lagos compostos um $r = -0,71$, os lagos alongados simples um $r = -0,67$ e os circulares um $r = -0,58$, mostrando novamente a relação inversa do nível da água com a dinâmica das macrófita nos diferente tipos de lagos.

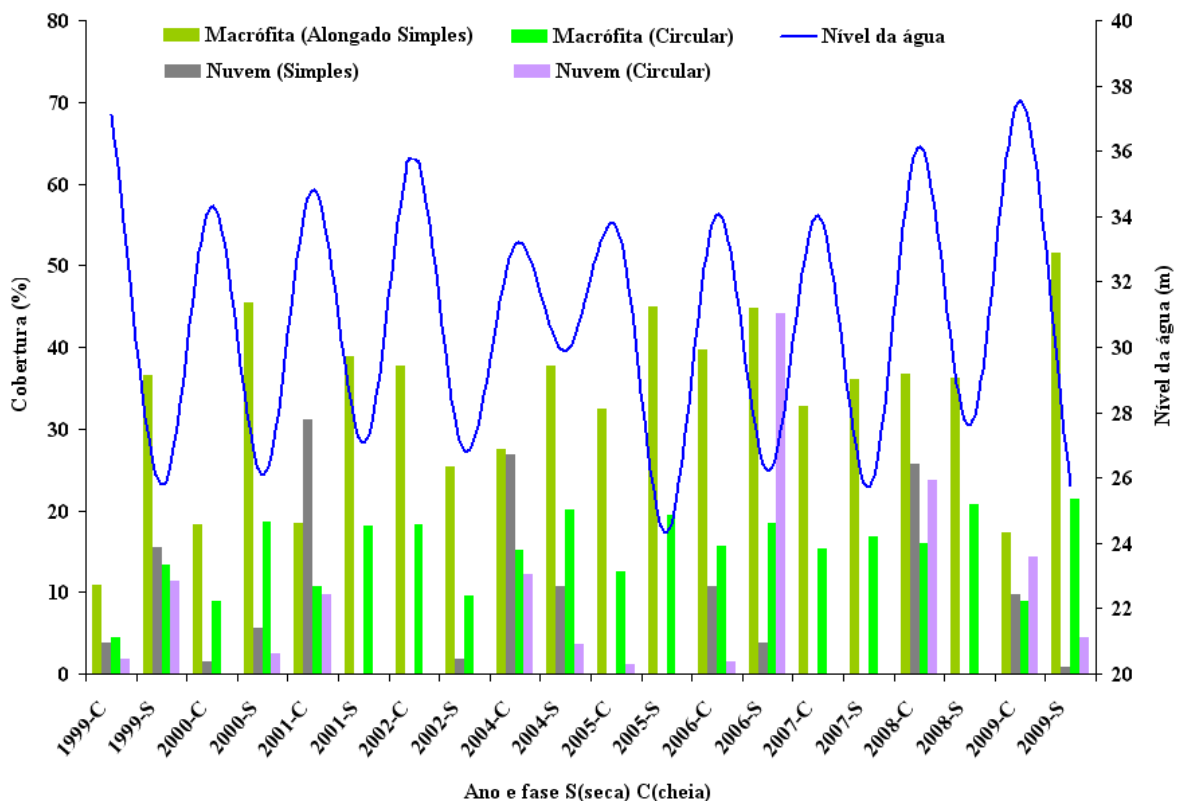


Figura 3: Porcentagem total da cobertura de macrófitas e de nuvem dos lagos alongados-simples e circulares no período de 1999 à 2009 nas fases de cheia e de seca, e o correspondente nível da água em cada data.

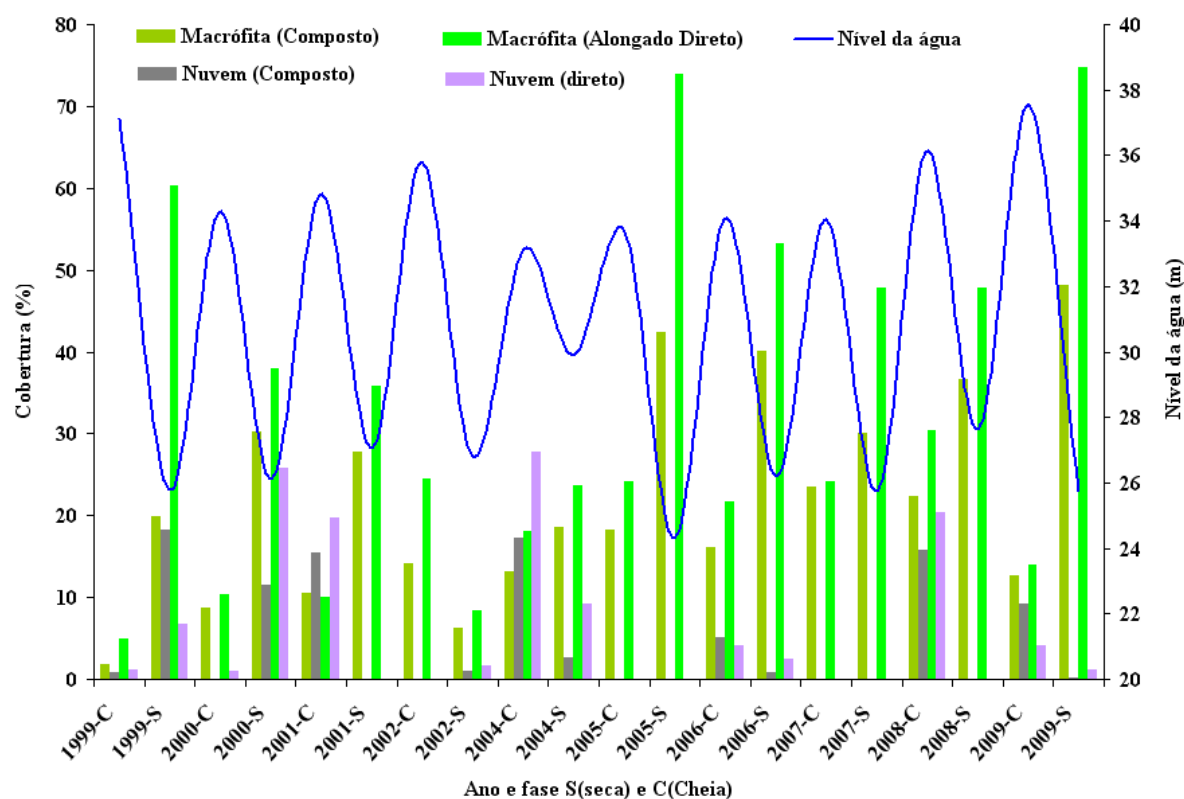


Figura 4: Porcentagem total da cobertura de macrófitas e de nuvem dos lagos alongados-diretos e compostos no período de 1999 à 2009 nas fases de cheia e de seca, e o correspondente nível da água em cada data.

5. Conclusões

Os resultados mostram que existe uma correlação inversa e significativa entre a cobertura de macrófitas e o nível da água nos lagos da RDSM. Essa relação também é dependente da forma do lago, que irá definir a área de exposição para a colonização das macrófitas. Os lagos circulares mostraram-se menos sensíveis a variações do nível da água, ao contrário dos lagos alongados diretos, que estão sujeitos a uma exposição sazonal de suas margens favorecendo a colonização das macrófitas. Esses lagos provavelmente estão mais susceptíveis as grandes variações do nível da água, e conseqüentemente às mudanças climáticas. Futuros estudos são necessários para determinar a cobertura de macrófitas nos lagos nas outras fases da hidrógrafa (enchente e vazante) e ainda em outras regiões da Amazônia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processo 08/07537-1), ao CNPq (Projeto 477885/2007-1; Processo 550373/2010-1), Adriana Gomes Affonso agradece a FAPESP (bolsa de doutorado, 2008/06661-0)

6. Referências

Ayres, J.M.C. *As matas de várzea do Mamirauá.*, Vol.I.. Brasília: SCM-CNPq/MCT. 123p. Série Estudos do Mamirauá.

Arraut, E. M.; Marmontel, M.; Mantovani, J.E.; novo, E.M.L.M.; Macdonald, D.W.; Kenward, R.E. The lesser of two evils: seasonal migrations of Amazonian manatees in the Western Amazon. **Journal of Zoology**, v. 280, n. 3, p. 247–256, 2010.

Bayley, P.B.; Moreira, J.C. Preliminary interpretations of aquatic resources in the central amazon basin using Landsat Multispectral imagery. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1. (SBSR), 1978, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 1978. p. 854-865. Printed, On-line. ISBN

978-85-17-00045-4. (INPE-7731-PRE/3578). Disponível em:

<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/09.25.13.57>>. Acesso em: 03 set. 2012.

Boggione, G. A. **Restauração de imagens do satélite Landsat-7**. 2003. 160 p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.19.08.48>>. Acesso em: 03 set. 2012.

Fonseca, L. M. G.; Prasad, G. S. S. D.; Mascarenhas, N. D. A. Combined interpolation-restoration of landsat images through fir filter design techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 2547-2561, 1993.

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

Junk., W.J.; Piedade, M.T.F. An introduction to South American wetland forests: distribution, definitions and general characterization. In: Junk, W.; Piedade, M.T.F.; Wittmann, F.; Schongart, J.; Parolin P. **Amazonian floodplain forests**. Ecological Studies, p.3-25, 2011

Junk, W. J. Ecology, fisheries and fish culture in Amazonia. In: SIOLI, H.(ed.). **The Amazon. limnology and landscape ecology of a Mighty River and its basin**. Dordrecht: Dr W. Junk Publishers. 1984. p. 443-476

Melack, J. M. Amazon floodplain lakes: Shape, fetch, and stratification. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* v. 22, p. 1278-1282, Oct. 1984.

Melack, J. M.; Hess, L. L.; Gastil, M.; Forsberg, B. R.; Hamilton, S. K.; Lima, I. B. T.; Novo, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology** vol. 10, p.530-544, 2004

Petry, P.; Bayley, P.B.; Markle, D. F. Relationships between fish assemblages, macrophytes and environmental gradients in the Amazon River floodplain. **Journal of Fish Biology**, v.63, n. 3, p. 547 – 579, 2003.

Ramalho, E.E., Macedo, J.,Vieira, T. M.,Valsecchi, J.,Calvimontes, J.,Marmontel, M.,Queiroz, H.L.Ciclo Hidrológico nos ambientes de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá- Médio Solimões, período de 1990 a 2008. **Uakari**, v.5, n.1, p. 61-87, 2009

Sanchez-Botero J.I.; Araújo-Lima, C.A.R.M. As macrófitas aquáticas como berçário para a ictiofauna da várzea do Rio Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 31, n. 3, p. 437-447, 2001.

Silva, T.S.F. **Spatial and temporal variability of macrophyte growth and productivity in the Amazon floodplain**, 2009. Tese de doutorado University of Victoria, Canada.

Silva, T.S.F.; Costa, M.P.F.; Melack, J.M. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1998-2010, 2010.

Silva, T.S.F., Costa, M.P. Melack, J., Novo, E.M.M. Influência de variações na intensidade do pulso de inundação sobre a cobertura e crescimento da vegetação herbácea aquática na Amazônia. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1. (SBSR), 2011, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 3205-3212. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0729.pdf>> Acesso em: 03 set. 2012.

Sioli, H. **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dordrecht: Dr W. Junk Publishers, 1984.