

## A dinâmica do Pulso de inundação: aplicações de sensoriamento remoto na avaliação da área de águas abertas e morfologia dos lagos de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - Amazônia Central

Dayson Jardim-Lima <sup>1 3</sup>  
Maria Teresa Fernandez Piedade <sup>1</sup>  
Helder Lima de Queiroz <sup>2</sup>  
Evllyn Márcia Leão de Moraes Novo <sup>3</sup>  
Camilo Daleles Rennó <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Projeto INPA/Max Planck Institute  
Av. André Araújo, 2936 - Caixa Postal 470 - 69011-970 - Manaus-AM, Brasil  
{djardim, maitepp}@inpa.gov.br

<sup>2</sup> Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - IDSM (OS-MCT)  
Av. Brasil, 197 - 69470-000 - Tefé-AM, Brasil  
helder@mamiraua.org.br

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos-SP, Brasil  
{dayson, evlyn, camilo} @ltid.inpe.br

**Abstract.** The Mamirauá Sustainable Development Reserve-RDSM (total area of 1,124,000 ha) is characterized for a myriad of small lakes, either isolated or connected among themselves. The degree of lake connection to main rivers (Solimões and Japurá) along time is a key aspect for the understanding of biogeochemical processes taking place in the area. This paper reports the use of Image Restoration techniques to improve spatial resolution of TM-Landsat 5 images and Normalized Difference Water Index-NDWI to quantify the inundation area of RDSM lakes. The morphology of the RDSM lakes (round or long) seems to influence differently in the extension of the area of flooded area for flooding pulse of 11 of m that characterizes the region. The linear regression was significantly positive ( $r^2= 0,95$ ;  $p<0,01$ ) to a significance level ( $\alpha$ ) of 1%. Round lakes present a bigger flooding relative area than those from long lakes, due to their geomorphological characteristics.

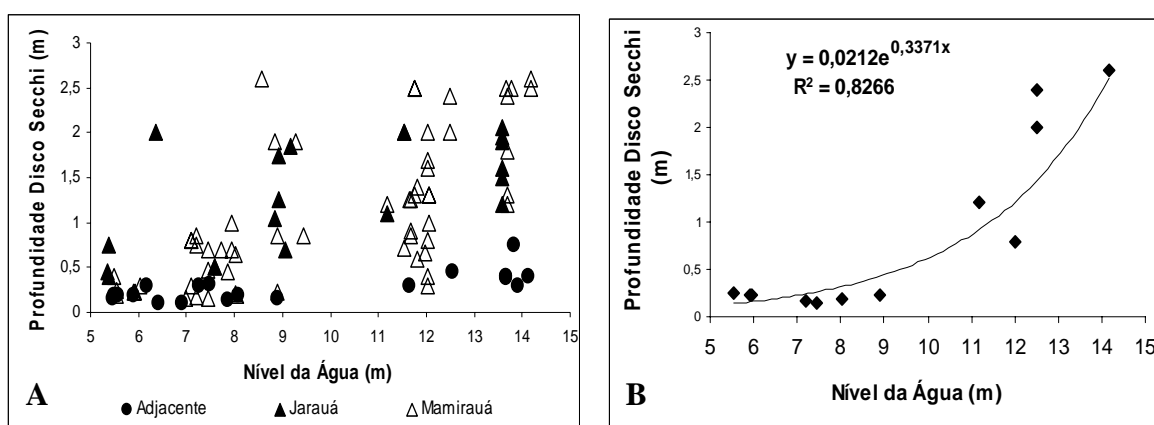
**Palavras-chave:** remote sensing, TM-Landsat 5 images, hydrology, flood pulse, várzea lakes; sensoriamento remoto, imagens TM-Landsat 5, hidrologia, pulso de inundação, lagos de várzea.

### 1. Introdução

O pulso de inundação verificado nos grandes rios da Amazônia, resultante do somatório das chuvas de toda a bacia de drenagem e do degelo anual do verão andino, é responsável pela complexidade sazonal dos ecossistemas aquáticos da região (Junk et al., 1989). As Áreas Alagáveis associadas aos grandes rios da Amazônia ocupam um total de 300.000 km<sup>2</sup>, sendo que o complexo Solimões/Amazonas inunda periodicamente cerca de 200.000 km<sup>2</sup> (Junk 1993), representando o maior sistema hidrológico do planeta. O alagamento sazonal do rio Solimões causa uma elevação no nível da água de 10 a 12 metros todos os anos, atingindo na Amazônia Central sua máxima inundação aproximadamente nos meses de junho-julho e o período de vazão mínima de outubro-novembro (Ayres, 1995; Piedade et al., 2000).

Segundo Junk et al. (1989), a área de superfície (águas abertas) e a profundidade dos lagos amazônicos são submetidas a flutuações do nível da água que influenciam sazonalmente as características limnológicas, ecológicas e biológicas desses corpos de água amazônicos.

Segundo Jardim-Lima et al. (2003; 2004b), os lagos da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) possuem uma variação sazonal e espacial de turbidez (**Figura 1a**) de acordo com os diferentes níveis de água e conforme sua localização na reserva que compreende os Sistemas Mamirauá, Jarauá e Adjacente (rios Solimões e Japurá). Verifica-se no Sistema Mamirauá, por exemplo, na cota de 12 m, uma forte variação na turbidez da água com valores de profundidade de Disco Secchi desde 0,30 m até 2,5 m. Os autores citam que a relação entre profundidade de Disco Secchi e o nível da água (**Figura 1b**) mostra uma variação temporal da turbidez do Paraná do Apara, ponto de coleta 03°02'11"S 64°51'19"W, sendo a relação exponencial significativamente positiva ( $p < 0,00004$ ). Os resultados obtidos por Jardim-Lima et al. (2004b) sugerem que a turbidez dos lagos na RDSM é influenciada, entre outras variáveis ambientais, pela (1) distribuição espacial dos lagos no interior da Área Focal como função da distância e da conectividade dos mesmos entre si e os rios Solimões e Japurá, estes últimos, responsáveis pela entrada de sedimentos na reserva; e (2) a forma dos lagos, que influencia a ação dos ventos em contato com a superfície da água, permitindo assim, a circulação da coluna de água e a re-suspensão de sedimentos decantados durante a estação de enchente/cheia. A forma dos lagos também afeta a interação entre o ecossistema aquático e terrestre provocando uma maior ou menor compartimentação das massas de água.



**Figura 1.** (a) Variação temporal e espacial da profundidade Disco Secchi (turbidez) em relação ao nível da água entre o período de seca (3 m) e o período de cheia (14 m) dos sistemas aquáticos da Área Focal da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - RDSM; (b) Regressão da relação temporal entre o nível da água e a profundidade Disco Secchi no Paraná do Apara em um mesmo local de coleta (S 03°02'11" W 64°51'19"). Adaptado de Jardim-Lima et al. (2004b).

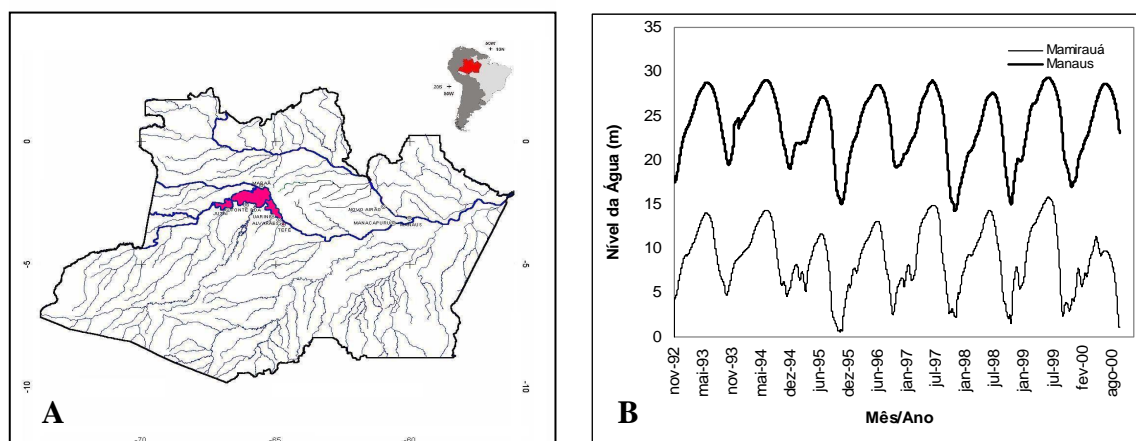
Várias pesquisas aplicaram técnicas de sensoriamento remoto no estudo de ambientes aquáticos, na detecção e delineamentos de corpos de água (Smith, 1997; Frazier e Page, 2000; Fortin et al., 2000). Pesquisas realizadas por Sippel et al. (1992), Novo et al. (1997), Hess et al. (2003) aplicam essa ferramenta na documentação da extensão da planície de inundação das várzeas amazônicas em termos regionais. Esses estudos, entretanto, têm caráter regional e não apresentam claramente os efeitos das flutuações dos níveis da água sobre esta planície de inundação, faltando ainda, uma avaliação da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para análises locais que permitam avaliar a dinâmica da água em sistemas de lagos complexos (com ampla variação no tamanho e forma dos lagos) como é o caso da RDSM (**Figura 2a**).

O presente estudo objetivou quantificar a área de inundação dos lagos da Área Focal da RDSM em relação ao pulso de inundação característico da Amazônia Central, a partir da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto.

## 2. Metodologia

### 2.1. A Área de Estudo

A RDSM (1.124.000 ha) está localizada na Amazônia Central (**Figura 2a**), na confluência das bacias dos rios Solimões e Japurá e foi utilizada para avaliar o potencial de aplicação da técnica de Restauração (Fonseca et al. 1993) de imagens na definição espacial das bordas de lagos e da conectividade entre lagos de várzea, bem como avaliar a aplicação do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) (McFeeters, 1996) na quantificação da área de inundação a partir do pulso de inundação característico da região. A RDSM, a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã e o Parque Nacional do Jaú compõem o maior bloco de floresta tropical contínua protegida do planeta (5.766.000 ha), denominado Corredor Ecológico da Amazônia Central. Maiores informações sobre a área de estudo podem ser encontradas em Jardim-Lima et al. (2003, 2004b).



**Figura 2.** (A) Localização da RDSM no Estado do Amazonas (Fonte: IDSM) e (B) Comportamento do pulso monomodal de inundação no período de 1992 a 2000, para a RDSM e Manaus (Fontes: IDSM e Portobrás).

### 2.2. Modelagem Hidrológica e Seleção das imagens TM-Landsat 5

As imagens TM-Landsat 5 que compõem o banco de imagens do projeto, pertencentes a órbita-ponto 001-62, foram selecionadas mediante o comportamento do pulso de inundação verificado na Amazônia Central. Barbosa (2002) sugere que para contornar problemas de cobertura de nuvens em imagens de um mesmo ano hidrológico, é necessário selecionar imagens de vários anos, sendo estas representativas de diferentes níveis da água, compondo um ciclo hidrológico entre as estações de seca, enchente, cheia e vazante. O comportamento do pulso monomodal de inundação referente aos anos da série histórica de imagens selecionadas são apresentados na **Figura 2b**.

A amplitude de variação do nível da água das imagens (**Tabela 1**) está entre 3 m e 14 m; o nível da água referente ao ano de 1984 foi modelado utilizando a equação  $Y = 0,8209x - 10,697$  ( $r^2 = 0,74$ ;  $p < 0,001$ ), obtida a partir da relação entre a variação do nível da água em Mimirauá e em Manaus (Jardim-Lima et al. 2004b). Os níveis da água para cada data são apresentados na **Tabela 1** segundo um nível de água crescente e não pela data de aquisição,

pelo fato de que o mais importante na aplicação de imagens ópticas para ambientes aquáticos é o momento ecológico representado pelo nível da água na área de estudo. No presente trabalho, foram utilizadas as imagens de 24/08/95 e 03/08/99 referentes a uma vazão mínima (estação seca) de 3 m e uma máxima inundação (estação cheia) de 14 m. Vale ressaltar que as datas selecionadas são representativas da amplitude de variação do pulso de inundação de 10 a 12 m na região da Amazônia Central (Ayres, 1995). A metodologia detalhada para seleção das imagens de estudo e a definição do comportamento da hidrógrafa nas datas citadas são descritas em Jardim-Lima et al. (2004b).

**Tabela 1.** Imagens selecionadas (órbita/ponto 001-62) e nível da água correspondente à data de aquisição.

<b>Data</b>	<b>Nível da Água (m)</b>
<b>24/08/95</b>	<b>3,00</b>
<b>25/11/00</b>	<b>5,52</b>
<b>11/02/00</b>	<b>6,65</b>
<b>21/08/00</b>	<b>7,56</b>
<b>26/09/84</b>	<b>7,78*</b>
<b>12/01/95</b>	<b>8,15</b>
<b>19/08/99</b>	<b>12,10</b>
<b>03/08/99</b>	<b>14,33</b>

Fonte: Adaptado de Jardim-Lima et al. (2004b).

\*modelado

### **2.3. Restauração de Imagens e Definição de Bordas dos Lagos**

A técnica de restauração tem o objetivo de corrigir as distorções radiométricas e geométricas inseridas pelo sensor óptico no processo de geração das imagens digitais. O resultado são imagens com qualidade espacial e radiométrica melhor que àquelas com dados brutos da imagem original. A correção radiométrica é realizada por um filtro linear, obtido a partir das características do sensor, da banda espectral e do tamanho do pixel da imagem de saída (5x5 m, 10x10 m, 15x15 m e 20x20 m) (Fonseca et al., 1993). A partir dos resultados obtidos por Jardim-Lima et al. (2004a, b), o nível de restauração em 15 x 15 m foi o que apresentou o melhor resultado no delineamento de bordas dos lagos e de sua conectividade. As bandas-TM pós-restauradas foram registradas pelo método imagem-imagem, tomando como base a cena 001-62 pertencente ao mosaico Solimões/Amazonas (Shimabukuro et al., 2002). A metodologia detalhada da aplicação da técnica de restauração está descrita em Jardim-Lima et al. (2004c).

### **2.4. Índice de Diferença Normalizada da Água e Área de Inundação dos Lagos**

O Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) foi concebido com a finalidade de delinear ambientes de águas abertas, automatizando a determinação do limiar entre água e terra (vegetação terrestre e solo), permitindo (1) maximizar a reflectância típica da água usando o comprimento de onda da luz verde (TM2), (2) minimizar a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho-próximo (TM4) e (3) realçar o contraste entre a água e a superfície terrestre proporcionada pela banda infravermelha (McFeeters, 1996). As imagens restauradas foram normalizadas  $((TM2+TM4)/(TM2-TM4))$  para obtenção das imagens-índice NDWI nas datas referentes ao período de seca e cheia (24/08/95 e 03/08/99, respectivamente). O fatiamento de histograma permitiu obter uma imagem binária

correspondente aos temas de interesse (água = 1; solo+vegetação terrestre = 0). Estas imagens, compostas por polígonos referentes aos lagos, canais de comunicação entre os lagos e destes com os rios Solimões e Japurá, foram posteriormente vetorizadas para obtenção dos delineamentos da área de águas abertas nos níveis de 3 m e 14 m de inundação. Foram realizadas edições manuais visando selecionar apenas os lagos a serem utilizados na análise e editar os polígonos quanto aos densos bancos de macrófitas aquáticas que foram classificados/fatiados como sendo vegetação terrestre. O cálculo da área de inundação em hectares (ha) e percentual (%) dos lagos analisados levou em consideração o número e o tamanho do pixel restaurado (15m). Uma análise de regressão da relação entre a área de inundação na seca (variável independente) e na cheia (variável dependente) foi realizada adotando-se o nível de significância ( $\alpha$ ) de 1%.

### 3. Resultados e Discussão

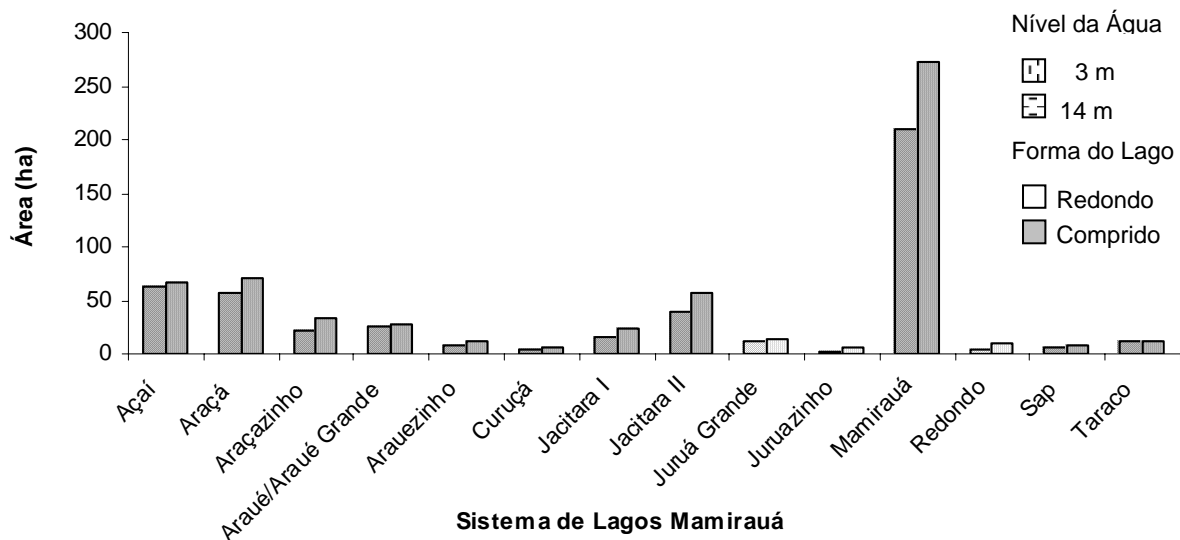
Quantificou-se a área de inundação de 37 lagos em períodos de vazão mínima e máxima, com níveis de água entre 3 m e 14 m, respectivamente, a partir da aplicação das imagens-índice NDWI. Estes lagos estão distribuídos aleatoriamente nos Sistemas Mamirauá, Jarauá e Ingá, localizados na Área Focal da RDSM. A análise estatística descritiva (médias, desvios padrão, valores mínimos e valores máximos) da área de inundação dos lagos avaliados conforme a forma dos mesmos é apresentada na **Tabela 2**. Dentre os dados analisados, foram levantados 15 lagos redondos e 22 lagos compridos. A forma dos lagos parece estar proporcionalmente refletida em sua área de inundação (diferença entre seca e cheia), o que foi verificado para os três sistemas estudados, nos quais os lagos redondos mostraram o percentual de inundação de 94%, valor que foi de apenas 60% nos lagos compridos (**Tabela 2**). Nas **Figuras 3 e 4**, são apresentadas a área de inundação segundo a forma de cada lago dos Sistemas Mamirauá e Jarauá, respectivamente, indicadas através das cores cinza (lagos compridos) e branco (lagos redondos).

**Tabela 2.** Média (desvio padrão) da área de inundação (diferença entre cheia e seca) em hectares (ha) e percentagem (%) dos Sistemas de Lagos da RDSM.

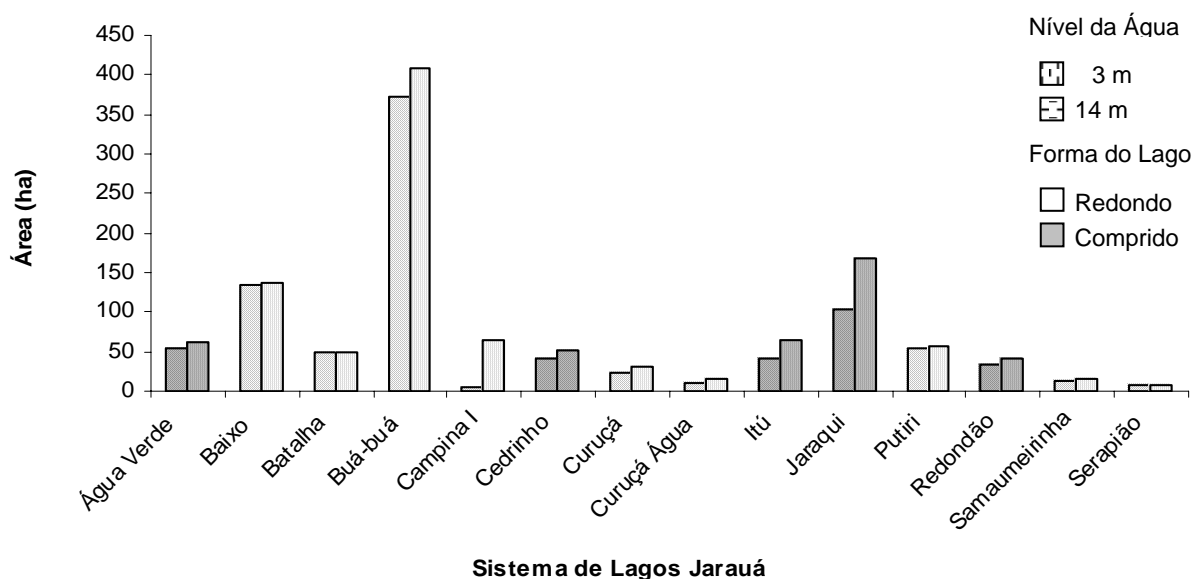
Sistemas de Lagos	Forma	n	Média (DP) (ha)	Mín. - Máx. (ha)	Média (DP) (%)	Mín. - Máx. (%)
Mamirauá	Redondo	3	3,86 (1,31)	2,41 - 4,95	44,40 (24,70)	16,67 - 64,04
	Comprido	11	11,23 (18,07)	0,38 - 63,16	20,45 (12,61)	3,29 - 41,06
Jarauá	Redondo	8	15,15 (21,03)	1,89 - 58,23	21,83 (28,87)	2,11 - 90,02
	Comprido	6	18,46 (24,11)	1,64 - 65,12	23,70 (10,61)	13,92 - 38,79
Ingá	Redondo	4	7,17 (6,10)	1,69 - 15,77	27,68 (8,58)	21,15 - 53,57
	Comprido	5	2,11 (2,46)	0,43 - 6,37	15,65 (12,52)	2,31 - 47,96

Observa-se que os lagos Mamirauá e Buá-buá (**Figura 3 e 4** respectivamente) são os que possuem a maior área em relação aos lagos analisados e, por isso, são os únicos para os quais é apresentada a interpretação visual das respectivas áreas de inundação (**Figura 5**). Em períodos de cheia, neste caso com 11 m acima do nível de água em relação ao período da seca, toda a reserva transforma-se em um imenso lago. No entanto o sensor TM apenas imageia as regiões de águas abertas, não sendo representados os níveis de cinza referentes às características espectrais da água/área inundada que fica sob a floresta, mas sim da cobertura florestal. É importante salientar também que os dados podem estar subestimados em função: (1) da resolução espacial das imagens restauradas (15 m) não permitir a detecção dos bancos de macrófitas menores que 15 m; (2) destes bancos estarem localizados espacialmente nas margens dos lagos e possuírem similaridade espectral com a vegetação secundária terrestre

nos lagos com margens do tipo praia. Entretanto, em ambos os casos, os erros de subestimativa da área de inundação dos lagos da RDSM são aceitáveis por estarem dentro do erro do próprio sensor.



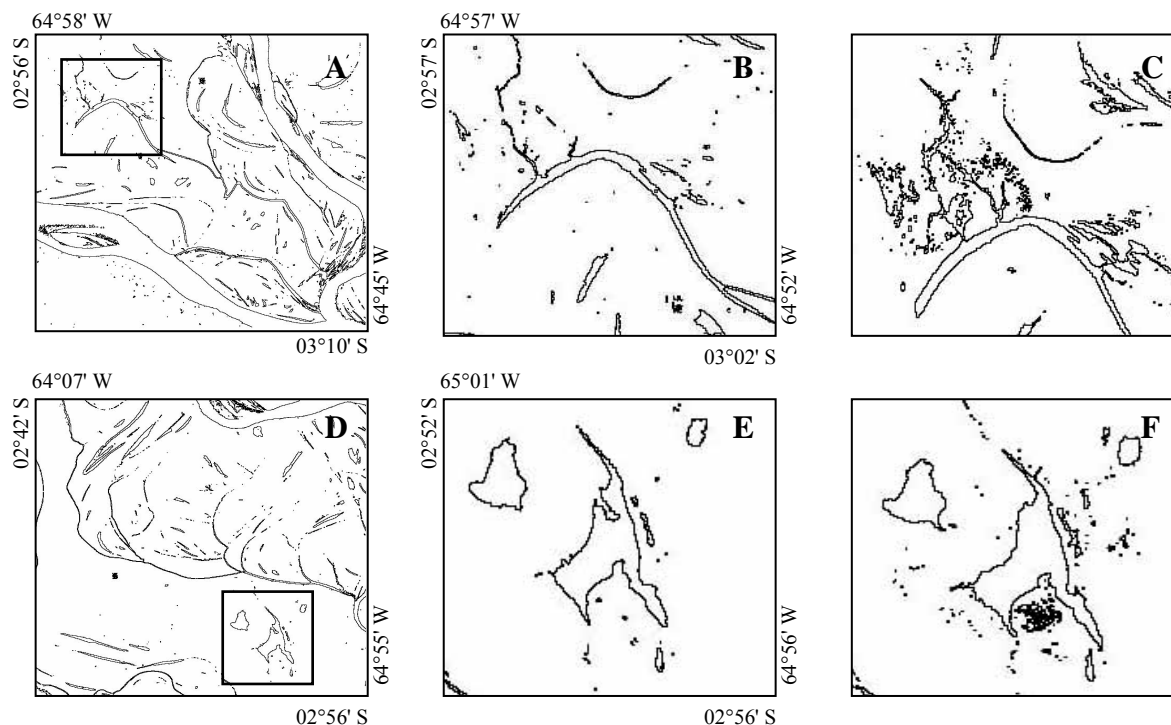
**Figura 3.** Área de inundação segundo a forma dos lagos do Sistema Mimirauá para os níveis de água de 3 m e 14 m.



**Figura 4.** Área de inundação segundo a forma dos lagos do Sistema Jarauá para os níveis de água de 3 m e 14 m.

A geomorfologia da área de estudo é o principal fator ambiental que explica a variabilidade (desvio padrão) dos dados e, portanto, um indicador da complexidade do sistema de lagos da Área Focal da RDSM. Os lagos compridos geralmente possuem margens com ângulo acentuado de inclinação, escavados, contornado por florestas mais altas; por outro lado, nos lagos redondos (ou não-compridos), o barranco é substituído por uma praia de declividade suave, presença de gramíneas e macrófitas em suas margens e/ou contornados por vegetação de arbustos, lenhosa, porém, pouco densa. A forma dos lagos influencia as características limnológicas, as cadeias tróficas, a ecologia florestal e o uso dos recursos

naturais da reserva pelos ribeirinhos residentes na RDSM. A análise de regressão preliminar da área de inundação dos lagos na seca (3 m) e na cheia (14 m), nível de significância ( $\alpha$ ) de 1%, mostrou-se significativamente positiva ( $r^2 = 0,95$ ;  $p < 0,01$ ).



**Figura 5.** Delineamentos dos lagos e canais do Sistema de Lagos Mamirauá (A) e Jarauá (D); interpretação visual da área de inundação dos lagos Mamirauá (B e C) e Buá-buá (E e F) nos períodos de seca (3 m) e cheia (14 m) respectivamente.

#### 4. Conclusões

A partir dos dados apresentados neste estudo, conclui-se, através da avaliação da área de inundação dos lagos da Área Focal da RDSM, que os lagos Mamirauá e Buá-buá são os maiores lagos da área de estudo, mas não são os que possuem a maior área de inundação entre seca e cheia. A morfologia dos lagos, redondos ou compridos, parece influenciar diferentemente na extensão da área de inundação para o pulso de inundação de 11 m que caracteriza a região. Lagos redondos apresentam área relativa de inundação maior que os lagos compridos, em função das características geomorfológicas desses corpos de água. Este aspecto, verificado para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, possivelmente aplica-se a lagos da bacia Amazônica em geral, com igual conformação. Provavelmente lagos de forma comprida têm seus níveis de água fortemente influenciados pela velocidade de corrente que, nessa tipologia, tende a ser mais direcional, isto é, com maior característica de transporte do que de acumulação. Dentre as metas futuras deste estudo, encontra-se o teste dessa hipótese.

#### Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-Projeto INPA/Max-Planck Institute pela concessão da bolsa de pesquisa no contexto do Projeto GEOMA/MCT/CNPq; ao Dr. Gilberto Câmara e Dr. João Viane (INPE/OBT-DSR) pelo apoio e infra-estrutura no desenvolvimento do projeto; aos técnicos e pesquisadores associados do Projeto INPA/Max-

Planck Institute, do Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (IDSMA) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo apoio direto e indireto em várias etapas desta pesquisa no contexto da Rede Temática de Modelagem Ambiental da Amazônia - GEOMA, Componente Áreas Alagáveis.

## Referências citadas

- Ayres, J.M. 1995. As matas de várzea do Mamirauá: Médio Rio Solimões. 2ed. Brasília, DF: CNPq; Tefé, AM: Sociedade Civil Mamirauá 124p.
- Barbosa, C.C.F.; Novo, E.M.L.M.; Costa, M. 2002. Remote Sensing for Sampling Station selection in the study of water circulation from river system to and Amazon floodplain lakes: a methodological proposal. *In: II Conferência Científica Internacional do Experimento LBA, Manaus (AM), julho de 2002.* < [http://www.icesb.ucsb.edu/LBA/pubs/posters/painel\\_LBA\\_Manus.pdf](http://www.icesb.ucsb.edu/LBA/pubs/posters/painel_LBA_Manus.pdf)>
- Fonseca, L.M.G.; Prasad, G.S.S.D.; Mascarenhas, N.D.A. 1993. Combined interpolation – restoration of Landsat images through FIR filter design techniques. **Int. J. Remote Sensing**, 14(13): 2547-2561.
- Fortin, M.J.; Olson, R.J.; Ferson, S.; Iverson, L.; Hunsaker, C.; Edwards, G.; Levine, D. Butera, K.; Klemas, V. 2000. Issues related to the detection of boundaries. **Landscape Ecology**, 15: 453-466.
- Frazier, P.S.; Page, K.J. 2000. Water body detection and delineation with Landsat-TM data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 66 (12):1461-1467.
- 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 of Environment**, 87: 404-428.
- Jardim-Lima, D.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Novo, E.M.L.M. 2003. Remote sensing application to monitor seasonal white water input into floodplain (várzea lakes) in Central Amazon: Mamirauá Sustainable Development Reserve In: Seventh LBA-ECO Science Team Business Meeting, Fortaleza-CE.
- Jardim-Lima, D.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Novo, E.M.L.M. 2004a. Landsat-TM image restoration for mapping narrow water channels connecting small lake systems in Central Amazon: Mamirauá Sustainable Development Reserve. In: III Conferência Científica Internacional do LBA, 2004, Brasília-DF.
- Jardim-Lima, D.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Novo, E.M.L.M. 2004b. Monitoramento sazonal da circulação de água branca na planície de inundação da Amazônia Central: Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. **Acta Amazonica**, Submetido em 28/09/04.
- Jardim-Lima, D.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Novo, E.M.L.M. 2004c. Avaliação da aplicação de imagens TM-Landsat 5 no delineamento de borda e quantificação da área de inundação de lagos de várzea na Amazônia Central: Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Relatório Técnico. 15p.
- Junk, W.J., 1993. Wetlands of tropical South America. In: D.F. Whigham, S., Hejny, Dykyjova, D. (eds). **Wetlands of the World**. Kluwer Publishers, The Netherlands. pp. 679-739.
- Junk, W.J.; Bayley, P.B.; Sparks, R.E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic**, 106: 110-127.
- Piedade, M.T.F.; Junk, W.J.; Parolin, P. 2000. The flood pulse and photosynthetic response of trees in a white water floodplain (várzea) of the Central Amazon, Brazil. **Verh. Internat. Verein. Limnol.** (27):1-6.
- Queiroz, H.L. 2000. *Natural history and conservation of pirarucu *Arapaima gigas*, at the Amazonian Várzea: Red giants in muddy waters*. Ph.D. Thesis. University of St. Andrews.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of the normalized water index (NDWI) in delineation of open water features. **Int. J. Remote Sensing**, 17(7):1425-1432.
- Shimabukuro, Y.E.; Novo, E.M.; Mertes, L.K. 2002. Amazon river mainstream floodplain Landsat TM digital mosaic. **Int. J. Remote Sensing**, 23(1): 57-69.
- Sippel, S.J.; Hamilton, S.K.; Melack, J.M. 1992. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon river floodplain, Brazil. **Arch. Hydrobiol.**, 123(4):385-400.
- Smith, L.C. 1997. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. **Hydrological Process**, 11: 1427-1439.