

## **Análise multitemporal do sistema fluvial do Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do rio Madeira**

José Max González Rozo<sup>1</sup>  
Afonso César Rodrigues Nogueira<sup>1</sup>  
Albertino de Souza Carvalho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Amazonas - UFAM  
Programa de Pós-graduação em Geociências  
Av. Gal. Rodrigo O.J. Ramos, 3000, Coroado, Manaus - AM, Brasil  
{jmaxgr, anogueira, alsocar}@ufam.edu.br

**Abstract.** An analysis of fluvial dynamics of the Amazonas river, between Careiro island and the mouth of the Madeira river, southeast of Manaus, was carried out for the last 15 years using remote sensing image processing techniques to compare Landsat images produced between 1986 and 2001. The multitemporal analysis revealed minimal changes in the Amazonas river morphology, consisting of flood plains, a main channel and islands. The low average channel migration rates (0,002%) and lateral accretion area of islands (-3.08%) indicate high stability of the channel in the last 15 years, which confirms the current anastomosing pattern of the Amazonas river. This type of analysis provides important basic information for subsequent detailed geomorphological and sedimentological studies, and is an excellent tool for understanding the dynamics of Holocene Amazon fluvial systems.

**Palavras-chave:** Amazonas river, remote sensing, multitemporal analysis, anastomosing pattern, rio Amazonas, sensoriamento remoto, análise multitemporal, padrão anastomosado.

### **1. Introdução**

Os rios da Amazônia distribuem-se na porção centro-norte da América do Sul e cortam a maior floresta tropical da Terra. Os principais cursos fluviais nascem nos Andes peruanos, transitam pela Amazônia brasileira e deságuam no Oceano Atlântico, num percurso de mais de 5.000 km. Desde a década de 60, estas drenagens têm sido investigadas através de imagens do projeto RadamBrasil e imagens de satélite que desvendaram o padrão geral caracterizado por um sistema fluvial misto formado por todos os estilos de canal, como o meandrante, entrelaçado, retilíneo e anastomosado (Baker 1978). A análise de produtos de sensoriamento remoto na Amazônia central é a técnica que ainda persiste como a principal ferramenta para desvendar os vários segmentos desta “mega-mesopotâmia” difundida em diversos trabalhos científicos (Sternberg 1950, Iriondo 1982, Almeida 1989, Franzinelli & Igreja 1990, Mertes et al. 1996, Souza Filho 1999, Franzinelli & Igreja 2002, Latrubesse & Franzinelli 2002, Rozo et al. 2003, Rozo 2004). O uso desta técnica em sistemas fluviais amazônicos auxilia na cartografia precisa da distribuição espacial das morfologias enquanto que a comparação de imagens geradas em diferentes anos permite avaliar a evolução da dinâmica sedimentar ao longo do tempo (Novo 1992, Mertes 2003). A disponibilidade de dados sequenciais converte a análise multitemporal em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos geomorfológicos e sedimentológicos de detalhe, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico ou mesmo paleogeográfico recente, e resulta fundamental para o entendimento da história evolutiva de sistemas deposicionais holocênicos. Este trabalho analisa o segmento do rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do rio Madeira, sudeste de Manaus, limitado pelas coordenadas 2°59'51” a 3°30'11” de latitude sul e 58°43'52” a 59°54'14” de longitude oeste, dentro das cartas MI579 Manaus E, MI580 Bom Sucesso e MI581 São José do Amatari, na escala 1:100.000 (**Figura 1**).

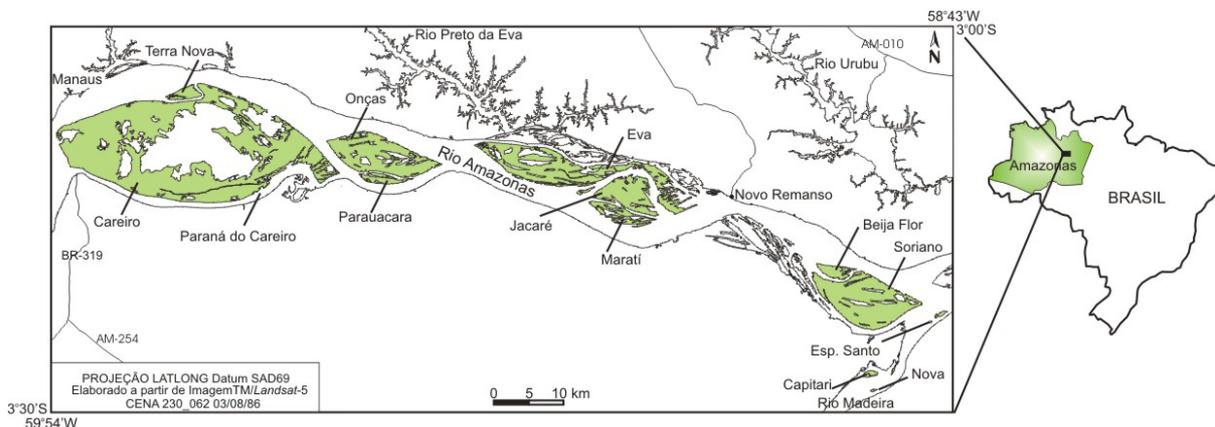


FIGURA 1 – Localização da área estudada, com destaque de algumas feições morfológicas do rio Amazonas.

## 2. Materiais e Métodos

Na execução deste trabalho foi utilizada uma série de seis (6) imagens digitais, cena WRS-2 230-062; selecionadas de acordo com a mínima cobertura de nuvens e geração coincidente com o período de vazante do rio Amazonas (**Tabela 1**). As imagens foram processadas através do Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas SPRING-DPI/INPE, versão 3.6 e 4. Como suporte cartográfico foram usadas cartas digitais e em papel à escala 1:100.000 (MI579 Manaus E, MI580 Bom Sucesso e MI581 São Jose do Amajari). As variações sazonais do nível da água do rio Amazonas, medida nas estações Jatuarana e Careiro (dentro da área de estudo), foram fornecidas pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, Manaus). As variações foram registradas de acordo com a data de aquisição das imagens.

**TABELA 1 – Dados Landsat utilizados no estudo**

SÉRIE LANDSAT	DATA DE AQUISIÇÃO	FORNECEDOR
5 (TM)	03/08/1986	EarthSat <a href="http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp">http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp</a>
5 (TM)	12/09/1989	INPE
5 (TM)	13/09/1995	LSR/UFAM
7 (ETM+)	01/08/1997	INPE
7 (ETM+)	03/07/2001	INPE
7 (ETM+)	04/08/2001	EarthSat <a href="http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp">http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp</a>

O estudo foi realizado em quatro etapas: 1) Pré-processamento; 2) Processamento; 3) Avaliação qualitativa e 4) Avaliação quantitativa.

A etapa de *pré-processamento* dos dados consistiu na aplicação da correção geométrica. Os pontos de controle foram coletados no campo com receptor GPS e nos casos dos locais de difícil acesso, através das cartas topográficas na escala 1:100.000.

Na etapa de *processamento* das imagens foram aplicadas as técnicas de realce linear de contraste, segmentação e classificação. O método de segmentação aplicado foi por crescimento de regiões nas composições coloridas R(5)G(4)B(3).

Logo após a segmentação foi feita em cada imagem uma classificação por regiões. O classificador usado foi o Isoseg. As áreas classificadas pelo sistema foram agrupadas em duas classes pré-definidas: terra firme e água. Este processo permitiu a delimitação por regiões das áreas cobertas por água das áreas emersas. As imagens classificadas foram submetidas individualmente a um processo de geração de vetores, a partir das matrizes (formato da imagem classificada).

O processamento digital das imagens proporcionou para cada data do conjunto de dados de trabalho (imagens Landsat), a extração dos contornos do sistema fluvial do rio Amazonas entre a ilha do Careiro até a foz do rio Madeira, os quais foram organizados como planos de informação dentro de um projeto no SPRING-DPI/INPE.

Na etapa de *avaliação qualitativa*, os planos de informação com os contornos do sistema fluvial foram comparados com base na data de aquisição mais antiga (03/08/1986) com relação às datas mais recentes (12/09/1989, 13/09/1995, 01/08/1997 e 03/07/2001).

Na etapa de *avaliação quantitativa*, com o intuito de eliminar o erro induzido ao comparar contornos do sistema fluvial de imagens adquiridas no período da vazante, mas em meses diferentes, onde a variação da cota média é de até 8 metros (**Tabela 2**), foi obtida uma segunda imagem do ano de 2001 cuja aquisição data do mesmo período (com diferença de apenas um dia) da imagem de 1986 e uma variação de cota de 82 cm, que representa a menor diferença entre a imagem de 1986 em relação às demais datas.

**TABELA 2 – Variação das cotas médias do rio Amazonas em relação à data de aquisição das imagens Landsat**

IMAGEM Landsat (data de aquisição)	NÍVEL (cm)			Variação a partir da imagem de 1986 (cm)
	Estação Jatuarana	Estação Careiro	Média	
03/08/1986	798	1.458	1.536	-
12/09/1989	-	1.324	1.324	212
13/09/1995	1.614	646	722	814
01/08/1997	1.458	1.306	1.382	154
03/07/2001	1.691	1.549	1.620	84
04/08/2001	1.524	1.383	1.453	82

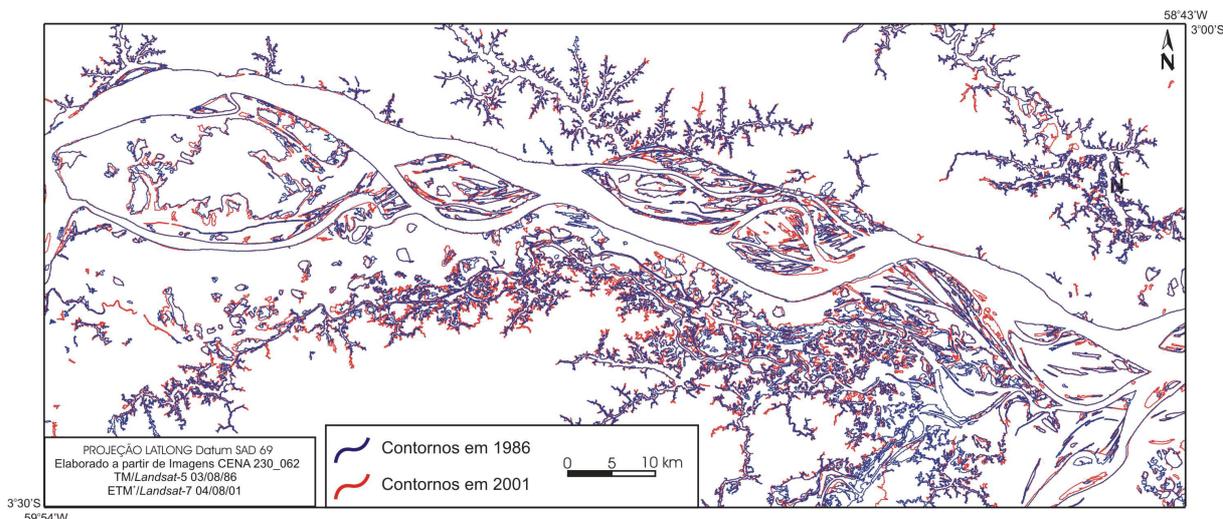
Os contornos das imagens 03/08/1986 e 04/08/2001 foram comparados e através da edição cadastral no SPRING-DPI/INPE foram obtidas as áreas do canal fluvial e das principais ilhas para estas duas datas (**Figura 1**).

A magnitude da mudança do canal foi considerada segundo Mertes et al. (1996) como o total da área erodida e depositada, dividida pelo total da superfície de água entre os bancos do canal principal e dividida pelo número de anos, sobre os quais a mudança ocorreu. As taxas de migração do canal foram medidas directamente nas áreas de maior mudança do canal.

### 3. Análise multitemporal

Na avaliação qualitativa da área estudada não foram encontradas, visualmente, modificações substanciais na morfologia do canal fluvial, ou seja, poucas variações puderam ser detectadas na migração das barras, geometria do canal fluvial, extensão da planície fluvial e na geração ou erosão total de ilhas e margens. Mesmo a comparação de imagens com a maior diferença nas datas de aquisição e menor variação da cota do nível do rio (03/08/1986 e 04/08/2001) revelou mudanças pouco significativas no traçado do sistema fluvial Amazonas (Figura 2). As maiores variações ocorrem fora do canal fluvial e estão relacionadas às diferenças em dias do registro da cota do nível do rio; eliminação de lagos por colmatagem de sedimentos ou ainda por geração de lagos ou modificação de cursos fluviais menores devido à atividade antrópica.

Dois análises com maior detalhe para o canal principal do rio Amazonas foram realizadas. A primeira em função das variações das áreas das principais feições de geomorfologia fluvial e a segunda que considera áreas com maior intensidade aos processos erosivos e áreas onde a deposição é predominante.



**FIGURA 2** – Mapa da variação do sistema fluvial no período entre 03/0/1986 e 04/08/2001.

### 3.1 Variação das áreas das principais feições de geomorfologia fluvial

A comparação das áreas do canal fluvial e das principais ilhas para as datas 03/08/1986 e 04/08/2001 permite obter a porcentagem de variação areal de cada feição para o período de estudo (15 anos) (**Tabela 3**). Assim, obtém-se aumento em 3,9% para a área do canal do rio Amazonas, 10,7% para a ilha Parauacara, 3,3% para a ilha da Eva, 4,4% para a ilha do Matarí, e diminuição nas ilhas do Careiro (7,1%), Terra Nova (11,8%), Onças (7,7%), Jacaré (14,8%), Soriano (0,9%) e Beija Flor (4,0%); com uma taxa média de variação da área das ilhas do canal de -3,08% o que indica predominância de processos erosivos em relação às taxas de deposição para o trecho considerado.

A porcentagem de mudança do canal para o trecho de estudo correspondeu a 0,002%, o que representa um canal muito estável no período de tempo considerado (15 anos).

**TABELA 3** – Variação das áreas das principais feições do rio Amazonas, entre a ilha do Careiro e a foz do rio Madeira.

FEIÇÃO	ÁREA (m <sup>2</sup> )		Δ ÁREA (m <sup>2</sup> )	% VARIAÇÃO
	1986	2001		
Rio Amazonas	757.745.024,00	787.320.030,97	29.575.006,97	3,90
Ilha do Careiro	264.562.505,11	245.843.944,43	-18.718.560,68	-7,08
Ilha Terra Nova	5.758.547,81	5.078.186,97	-680.360,84	-11,81
Ilha das Onças	50.678.919,80	46.772.808,23	-3.906.111,57	-7,71
Ilha Parauacara	5.909.322,25	6.541.988,52	632.666,27	10,71
Ilha da Eva	66.430.614,55	68.635.112,18	2.204.497,63	3,32
Ilha do Jacaré	27.185.295,45	23.163.922,21	-4.021.373,24	-14,79
Ilha do Maratí	9.687.807,41	10.114.543,10	426.735,69	4,40
Ilha do Soriano	66.788.192,34	66.218.879,77	-569.312,57	-0,85
Ilha Beija Flor	6.372.208,55	6.120.507,45	-251.701,1	-3,95

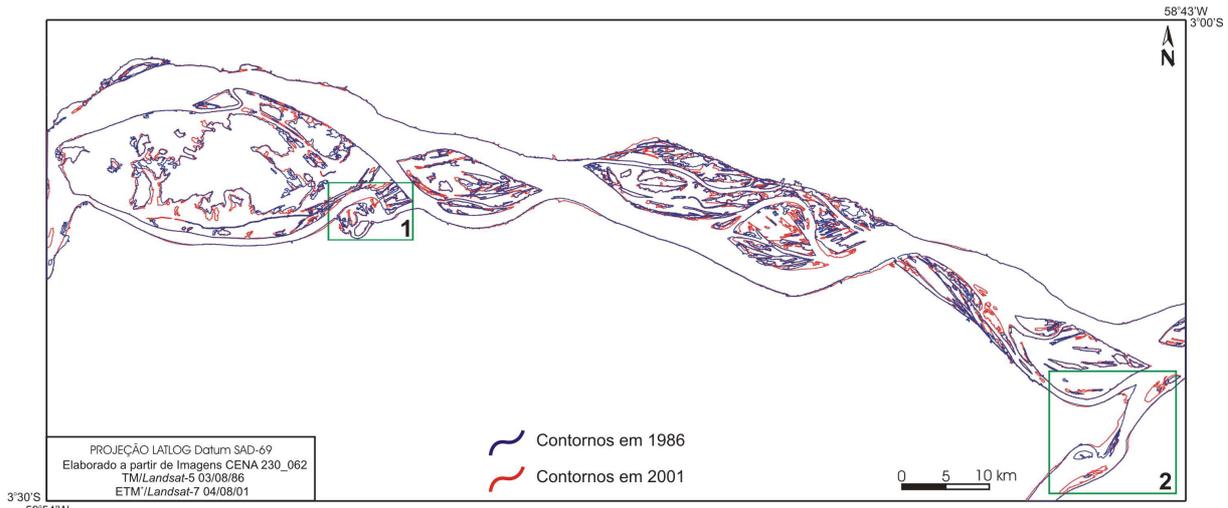
Uma avaliação preliminar para o trecho restrito do rio Madeira, dentro da área de estudo entre 1986 e 2001, obteve um aumento do canal fluvial de 4,0%, valor próximo do encontrado para o rio Amazonas (3,9%), mas com uma variação significativa nas ilhas, como pode ser visto na **Tabela 4**. A Ilha do Espírito Santo teve um aumento de 304%, e a ilha Nova de 1478,45%, enquanto que a ilha Capitari foi completamente erodida entre 1986 e 2001.

**TABELA 4 – Variação das áreas do rio Madeira e ilhas dentro da área de estudo (1986-2001)**

FEIÇÃO	ÁREA (m <sup>2</sup> )		Δ ÁREA (m <sup>2</sup> )	% AUMENTO
	1986	2001		
Rio Madeira	55.571.472,41	57.817.591,91	2.246.119,50	4,04
Ilha Espírito Santo	768.997,66	3.109.191,07	2.340.193,41	304,32
Ilha Nova	180.014,91	2.841.453,88	2.661.438,97	1.478,45
Ilha Capitari	1.348.842,56	0,00	-1.348.842,56	-100,00

### 3.2 Áreas de erosão e deposição

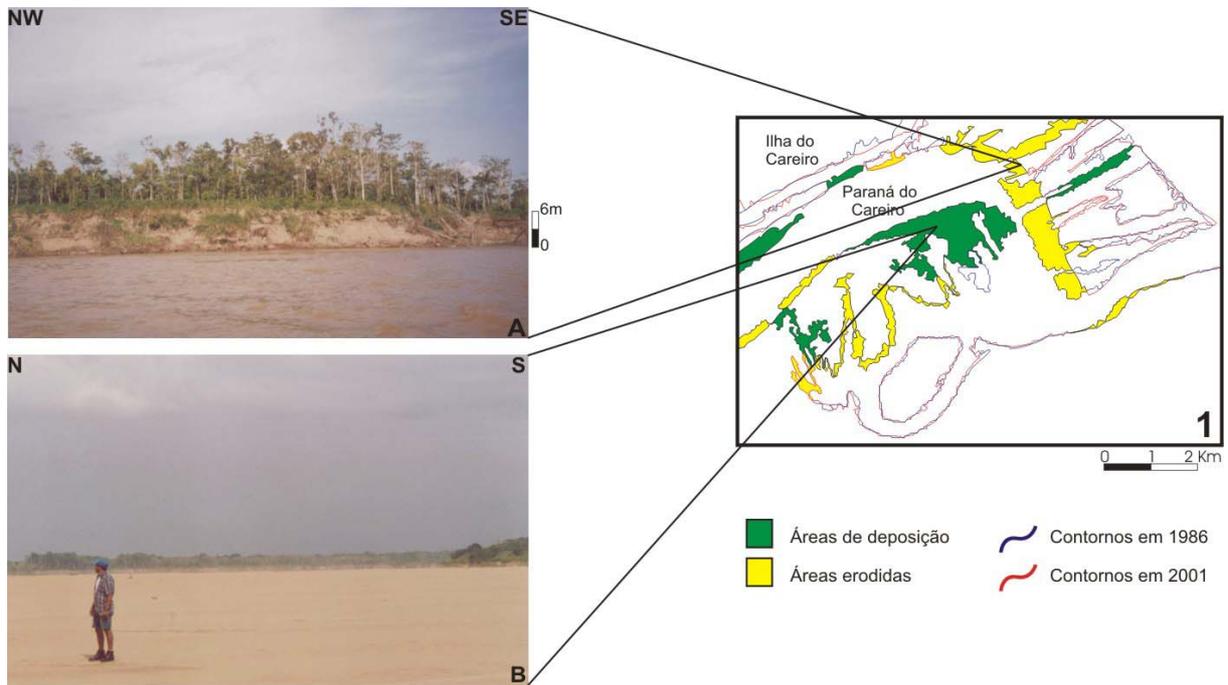
Embora ocorra uma mudança mínima no traçado do canal principal, o cruzamento dos planos de informação com os contornos do canal principal para as datas 03/08/1986 e 04/08/2001 indica áreas locais sujeitas a intensos processos de erosão e/ou deposição (**Figura 3**), no período considerado (15 anos), relacionadas às condições hidráulicas do canal. As principais áreas onde estes processos são identificados são detalhadas nas **Figuras 4 e 5**, com máximas taxas de migração do canal de 29,73 m/ano no Oeste da ilha do Careiro, 41,98 m/ano do Paraná do Careiro, 36,80 m/ano na margem direita do Amazonas frente à ilha da Eva e de 96,93 m/ano no rio Madeira.



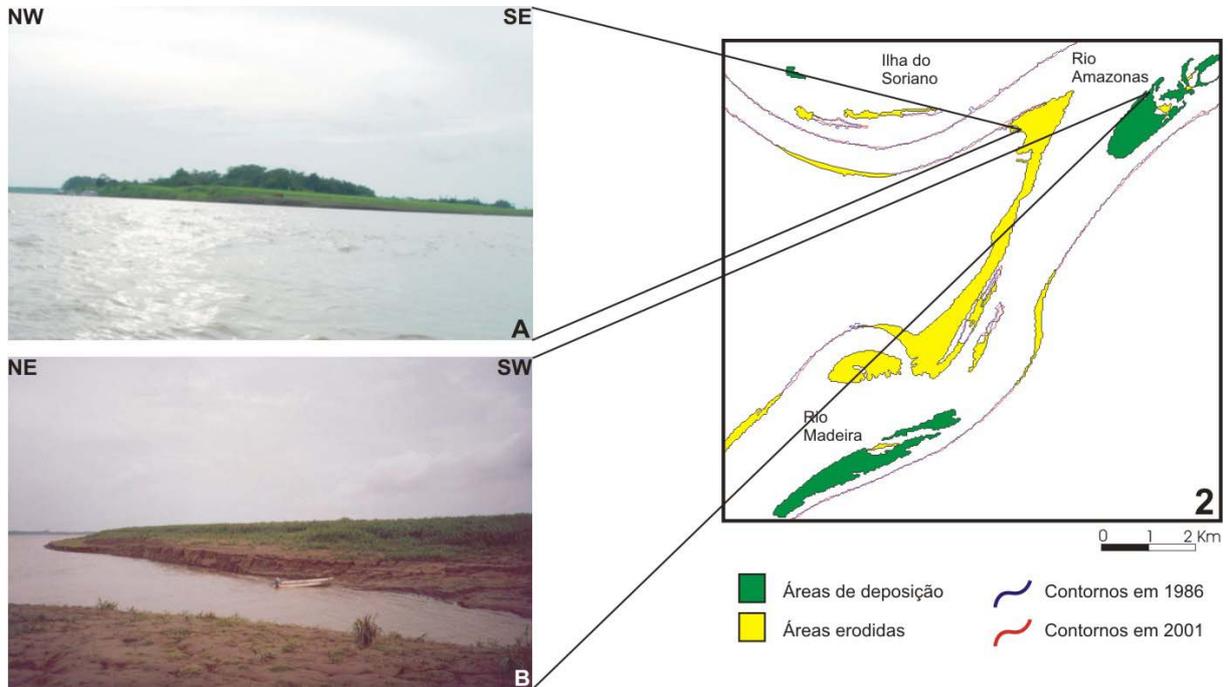
**FIGURA 3** – Mapa da variação dos contornos do canal fluvial e das ilhas no período entre 03/0/1986 e 04/08/2001. As áreas destacadas foram consideradas como as mais afetadas pelos processos de erosão/deposição.

### 4. Discução

A análise multitemporal apontou elementos importantes de estabilidade dos contornos do canal fluvial e ilhas do rio Amazonas no período de 15 anos (1986-2001). O comportamento estacionário do conjunto de barras e a estabilidade geométrica do canal é notável quando comparada com o canal do rio Madeira, que apresenta migração de barras e formação de novas ilhas num período inferior a 15 anos. A porcentagem de mudança no trecho do canal estudado de 0,002% é considerada muito estável quando comparada com a porcentagem de 37% (Kalliola et al. 1992) para o rio Amazonas no Peru. As máximas taxas de migração encontradas no trecho de estudo (41,98 m/ano), embora pontuais, são baixas quando comparadas às taxas de 200 m/ano do Rio Paraná na Argentina (Drago 1990), de 400 m/ano do rio Amazonas no Peru (Kalliola et al. 1992), e de 140 m/ano do Rio Amazonas próximo a Fonte Boa no Brasil (Mertes et al. 1996).



**FIGURA 4** – Região leste do paraná do Careiro, no período 03/08/1986 e 04/08/2001. (A) Margem erosiva do meandro com formação de escarpa. (B) Barra do canal principal. Localização do mapa na Figura 3.



**FIGURA 5** – Foz do rio Madeira, no período 03/08/1986 e 04/08/2001. (A) Margem erosiva na foz do rio Madeira. (B) Acúmulo de argilas e areias finas parcialmente estabilizadas pela vegetação. Localização do mapa na Figura 3.

Estas baixas porcentagens de mudança encontradas no trecho de estudo correspondem às mínimas taxas de mudança estimadas através de idades  $C^{14}$  em material orgânico (Absy 1979), e fragmentos de cerâmica (Sternberg 1960) dentro de depósitos de barras em crescente, que indicam que as ilhas Terra Nova e Careiro têm estado na sua presente posição pelo menos nos últimos  $2050 \pm 120$  anos AP.

A magnitude de mudança do canal para o rio Solimões-Amazonas, entre os rios Purus e Madeira, foi estimada por Mertes et al. (1996) através de imagens do projeto RADAMBRASIL (1971 e 1972) e cartas de navegação da Marinha do Brasil (1979 e 1980), com porcentagens menores de 0.2% em Manacapuru, 0.3% em São José do Amajari e 0.4% na confluência com o rio Madeira. Estes autores especificam que estas medidas são consideradas de baixa acurácia devido a diferentes técnicas de mapeamento que incluem aparentes variações no canal. A precisão da porcentagem de mudança do canal de 0,002%, obtida neste trabalho esta relacionada diretamente aos métodos utilizados, ou seja, uso de imagens adquiridas sob as mesmas condições, do mesmo período com variação de um dia e com dados de cota média que variam em 82 cm, além do uso de técnicas de processamento digital das imagens para cálculo com exatidão das áreas do canal principal e aquelas sujeitas à erosão/deposição.

Estes resultados alcançados permitem uma comparação com os dados apresentados por Almeida (1989), das áreas das ilhas fluviais obtidas a partir de diferentes produtos de sensoriamento remoto para o trecho localizado entre o oeste da ilha do Careiro e as proximidades da ilha do Barroso (rio Solimões). A análise destes dados permite comparar a mudança das ilhas para um período de 11 anos (1976-1987), que corresponde ao período mais espaçado temporalmente e com menor variação da vazão, do conjunto de dados que o autor apresenta, e revelam uma diminuição das áreas das ilhas Xiborena (1,8%), Mouras (0,1%), Paciência (0,4%), Barroso (2,4%), (**Tabela 5**) o que evidencia, também, a predominância de processos erosivos em comparação às taxas de deposição, mas com uma significativa estabilidade dos contornos do canal, ao serem as porcentagens muito baixas.

**TABELA 5 – Porcentagem de variação das ilhas do canal fluvial do rio Amazonas entre o Oeste da ilha do Careiro e ilha do Barroso (Almeida 1989).**

FEIÇÃO	ÁREA (km <sup>2</sup> )		$\Delta$ ÁREA (km <sup>2</sup> )	% VARIAÇÃO
	1976	1987		
Ilha Xiborena	24,39	23,95	-0,44	-1,8
Ilha Mouras	31,48	31,45	-0,03	-0,1
Ilha Paciencia	51,42	51,23	-0,19	-0,4
Ilha Barroso	29,28	28,58	-0,7	-2,4

A natureza estacionária do rio Amazonas no trecho estudado, associado a ausência de cursos meandrantos principais favorece considerá-lo como um rio com estilo anastomosado de acordo com a classificação de Miall (1992).

## 5. Conclusões

1. A análise multitemporal mostrou ser uma boa ferramenta para identificar as mudanças dos sistemas fluviais quando são comparados dados adquiridos sob as mesmas condições, da mesma época (em relação ao período do ano vazante/enchente) e que possuam mínimas variações entre as cotas médias do corpo da água.

2. A migração lateral do canal do rio Amazonas foi mínima no período entre Agosto de 1986 e Agosto de 2001. Esta estabilidade do sistema fluvial confirma o padrão anastomosado atual.

## Referências bibliográficas

- Absy M.L. **A palynological study of Holocene sediments in the Amazon basin**. 1979. Ph.D. Thesis – Universiteit van Amsterdam, Amsterdam. 1979.
- Almeida W. S. de. **Metodologia de Sensoriamento Remoto no Monitoramento de Modificações no Canal Fluvial e Atualização de Cartas Náuticas**. 1989. 174p. (INPE-4863-TDL/374). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1989.
- Baker V.R. **Adjustment of fluvial systems to climate and source terrain in tropical and subtropical environments**. In: Miall A. D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, 1978. p. 211-230.
- Drago E.C. Geomorphology of large alluvial rivers: Lower Paraguay and middle Paraná. **Interciencia**, v. 15, p. 378-387, 1990.
- Franzinelli E.; Igreja H.L.S. Modern Sedimentation in the Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 259-271, 2002.
- Franzinelli E.; Igreja H.L.S. Utilização do sensoriamento remoto na investigação na área do Baixo Rio Negro e Grande Manaus. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., 1990, Manaus. **Anais...** Manaus: UFAM, 1990, v. 3. p. 641-648.
- Iriondo M. Geomorfologia da planície Amazônica. In: SBG, Simpósio do Quaternário do Brasil, 4, 1982. **Anais...** p. 323-348.
- Kalliola R., Salo J., Puhakka M., Rajasilta M., Häme T., Neller R.J., Rasänen M.E., Danjoy Arias W.A. Upper Amazon channel migration. **Naturwissenschaften**, v. 79, p. 75-79, 1992.
- Latrubesse E.M.; Franzinelli E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 241-257, 2002.
- Mertes L.A.K. Remote sensing of riverine landscapes. **Freshwater Biology**, v. 47, p. 799-816, 2002.
- Mertes L.A.K., Dunne T., Martinelli L.A. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. **Geological Society of American Bulletin**, v. 108, p. 1089-1107, 1996.
- Miall A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided rivers: a summary. In: Miall, A.D. (ed.) **Fluvial Sedimentology**. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, 597-604.
- Miall A.D. Alluvial deposits. In: Walker R.G. & James N. P. (eds.) **Facies Models: response to sea level change**. Geological Association of Canada, IV. Series, 1992. p. 119-142.
- Novo E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações. 2. ed.** São Paulo: Ed. Edgard Blücher. 1992. p. 266-296.
- Rozo J.M.G. **Evolução Holocênica do rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do rio Madeira**. 2004. 93p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2004.
- Rozo, J.M.G. Carvalho A. S. Nogueira A.C.R. Análise morfológica de depósitos holocênicos do rio Amazonas, setor ilha do Careiro-Ilha Grande do Soriano. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 8., 2003, Manaus. **Anais...** Manaus: UFAM, 2003. CD-ROW.
- Souza Filho P.W.M.; Quadros M.L.E.S.; Scandolaro J.E.; Silva E. P.; Reis M.R. Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Marmoré Alto Madeira, Rondônia, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29 n. 4, p. 469-476, 1999.
- Sternberg H.O'R. Radiocarbon dating as applied to a problem of Amazonian morphology. In: Congrès International de Géographie, 18, 1960, **Proceedings**, v. 2, p. 399-424.
- Sternberg H.O'R. Vales tectônicos na Planície Amazônica?. **Separata da Revista Brasileira de Geografia**, n.4, 1950.