

MAPEAMENTO DA HIDROGRAFIA DA AMAZÔNIA POR MEIO DE IMAGENS ORBITAIS APÓS ESTUDO HIDROLÓGICO PRELIMINAR DO COMPLEXO FLUVIAL SOLIMÕES/AMAZONAS

SÁLUA SALDANHA MARINI

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Av. Brasil, 15671 - 21241-051 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
salua@ibge.gov.br

Abstract. The Amazonian Basin, located in a vast rain forest area, is subjected to the fluvial oscillations that determine the two seasons in this region: *the one of flooding* and *the other of drought*. Because of this incessant rhythm of *forwards* and *backwards* of water, allied to a prevailing plain topography, whatever experience of mapping Amazonia must consider the hydrography as the main regional circulation way and, then, draw its permanent elements (like permanent waterways) and temporary ones (like flooding terrains) – so important in the human occupation process of an area where accessibility to some places is still possible only by fluvial streams. Based on a hydrographic study and using orbital scenes taked from the Amazonian Basin at the maximum flooding and drought periods, this research discusses some important steps to map this region, always considering the geomorphological changes caused by these fluvial variations, so that the cartographic document created will offer some utility to regional inhabitants and to the urban planning projects of the area.

Keywords: fluvial oscillations, hydrography, mapping, flooding terrains, orbital scenes.

1.Introdução

Na Bacia Amazônica, o principal meio de locomoção se dá, certamente, através da navegação fluvial. O alcance de locais inacessíveis só pode ser realizado, em grande parte, graças às hidrovias. Assim, torna-se imprescindível a existência de documentos cartográficos atualizados e que indiquem, com elevado grau de confiabilidade, o traçado dos cursos fluviais perenes. Como todo o Complexo Fluvial Solimões/Amazonas sofre as conseqüências da subida e do recuo das águas ao longo do ano, não se pode mapear a área sem considerar a existência de pelo menos dois elementos hidrográficos: os cursos fluviais permanentes por onde podem ser conduzidas as embarcações ao longo de todo o ano – aparentes no período da vazante máxima – e as áreas sujeitas à inundação, detectadas em toda sua extensão, na máxima cheia.

Para cartografar esses elementos, deve-se, inicialmente, estabelecer as datas das máximas cheia e vazante ocorridas nos últimos anos. Isso pode ser feito analisando-se as séries históricas de cotas de um certo período, além da análise de informações estatísticas que forneçam as datas de nível máximo e mínimo dos rios durante um período de tempo considerado.

Optando-se pelo mapeamento através de Sensoriamento Remoto, parte-se, em seguida, para a fase de aquisição das imagens orbitais referentes às datas pré-estabelecidas, que irão servir de base para o traçado da hidrografia.

2.Localização da Área de Estudo

O Complexo Hidrológico Solimões/Amazonas situa-se, aproximadamente, entre as latitudes 0°S e 5°S e as longitudes 45°W e 70°W (**Figura 1**).

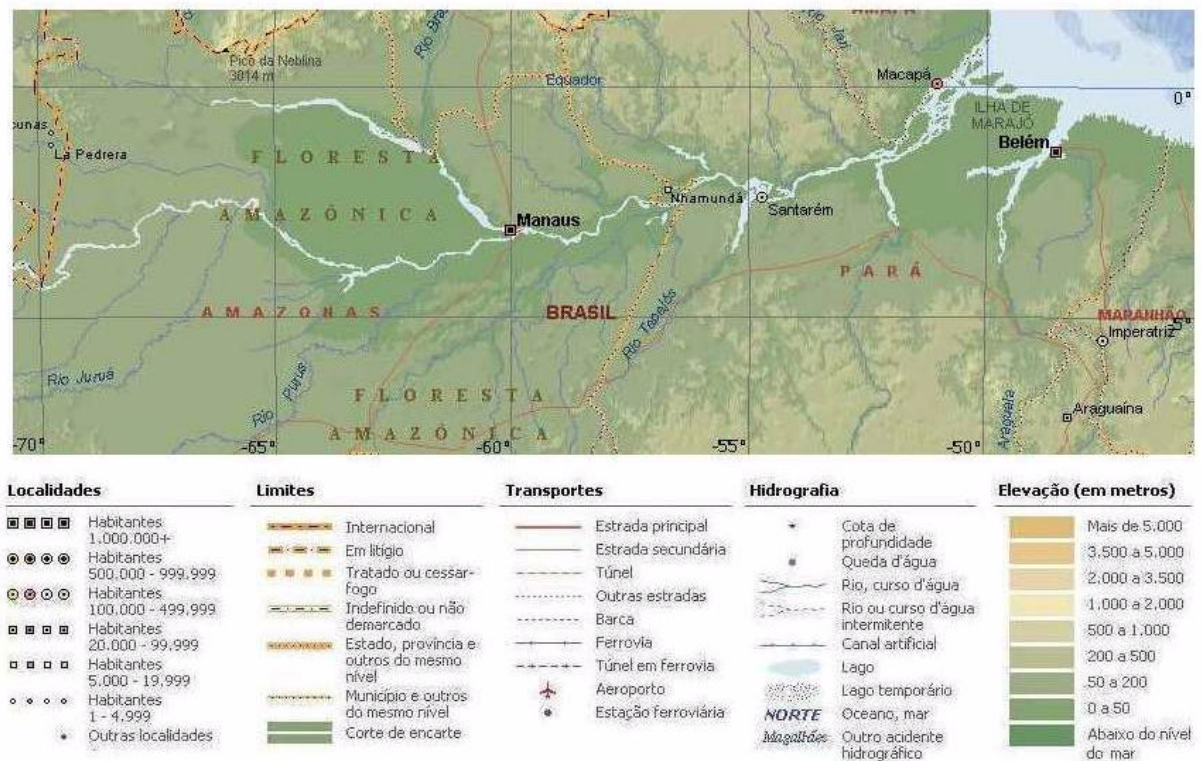


Figura 1: Área de Estudo. Modificado de Atlas Mundial Microsoft® ENCARTA®.

3. Manipulação dos Dados Fluviométricos

Na condução do estudo hidrológico do complexo Solimões/Amazonas foi adotada a **Sistemática para Análise de Consistência de Dados Fluviométricos** (DISTRITO FEDERAL, 1982) desenvolvida pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE e, ainda hoje, utilizada na Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (que herdou as antigas atribuições do DNAEE).

As etapas necessárias ao desenvolvimento dessa fase do projeto foram:

- levantamento dos mapas planimétricos/temáticos da área do entorno da Bacia Hidrográfica do Complexo Solimões/Amazonas;
- levantamento das estações fluviométricas existentes dentro da área de estudo;
- solicitação dos dados fluviométricos ao órgão responsável;
- incorporação dos dados fluviométricos solicitados a um banco de dados com vistas a sua manipulação e análise;
- tratamento dos dados fluviométricos brutos e verificação da consistência dos dados tratados (consistidos) fornecidos;
- geração e plotagem dos gráficos de Séries Mensais de Cotas dos principais rios localizados no entorno do Complexo;
- geração das estatísticas das cotas fluviométricas de cada rio da área de pesquisa;
- análise dos gráficos e dos dados estatísticos gerados;
- apresentação dos períodos de máximas cheia e vazante de cada curso fluvial analisado com fins à determinação das datas ideais para aquisição das imagens da área.

O inventário de todas as estações fluviométricas – operadas ou não pela ANEEL – distribuídas na Bacia Amazônica foi obtido através de consulta à *Home Page* da ANEEL (<http://hidroweb.aneel.gov.br>).

Os dados fornecidos pela ANEEL foram organizados em um banco de dados específico para que pudessem ser manipulados no programa de análise de dados fluviométricos desenvolvido pela própria Agência e cedido aos pesquisadores interessados em utilizar esse tipo de informação – o Sistema *Hidro 1.01*.

Após a identificação dos principais tipos de erros nos cotogramas preliminares (com médias diárias) de cada estação, e análise dos relatórios de cotas médias diárias (ambos gerados pelo Sistema *Hidro*), a correção dos dados fluviométricos foi conduzida. Deve-se ressaltar que a análise foi sempre realizada em conjunto, utilizando-se cotogramas de cada par de estações mais próximas ou mais, quando necessário.

Após a verificação dos dados fluviométricos, foram gerados, a partir desses, Gráficos de Séries Mensais de Cotas (utilizando-se valores de cotas médias diárias) e informações estatísticas de vários cursos fluviais relativas ao período de 1990-2000.

4. Variação Temporal das Máximas Cheias e Máximas Vazantes

A variação dos períodos de máximas enchentes e vazantes no entorno do Complexo Solimões/Amazonas ao longo da década de 90 pode ser visualizada nos mapas gerados com o programa *Surfer 6.03* da *Golden Program Inc.* (**Figuras 2 e 3**).

De posse da **Figura 2**, observa-se que as máximas cheias, para o período considerado ocorrem, principalmente, nos meses de julho na porção mais ocidental da Bacia, e, à medida que aumenta a proximidade do Oceano Atlântico, as enchentes tendem a se antecipar (concentrando-se nos primeiros meses do ano, a partir de março). Esse comportamento evidencia a influência cada vez mais significativa das marés na porção oriental do Complexo. Outra influência importante é oriunda do rio Branco (afluente do rio Negro pela margem esquerda), cuja nascente situa-se no hemisfério norte; visto que o período de máxima pluviosidade naquele hemisfério ocorre em julho, é exatamente nesse mês que o rio Branco apresenta sua máxima inundação, e, ao despejar seu grande volume de água no rio Negro, este, conseqüentemente, transbordará e apresentará, nas proximidades dessa confluência, seu período de máxima cheia também nesse mês. Outros afluentes menores provenientes do hemisfério norte – embora não representados na **Figura 2** – também exercem tal influência.

Em contraposição, os períodos de máxima estiagem no Complexo Solimões/Amazonas variam de setembro a março (**Figura 3**); na parte ocidental da Bacia fluvial, a variação temporal ocorre na direção geral N-S, concentrando-se, na porção mais ao sul, nos meses de setembro a novembro, e, com a proximidade do hemisfério norte, de dezembro a março, resultado da influência dos índices pluviométricos relativamente mais baixos nessa época do ano naquele hemisfério. Na porção oriental da Bacia nota-se também uma variação – embora menos acentuada – na direção geral N-S; nessa região as máximas secas ocorrem entre novembro e dezembro.

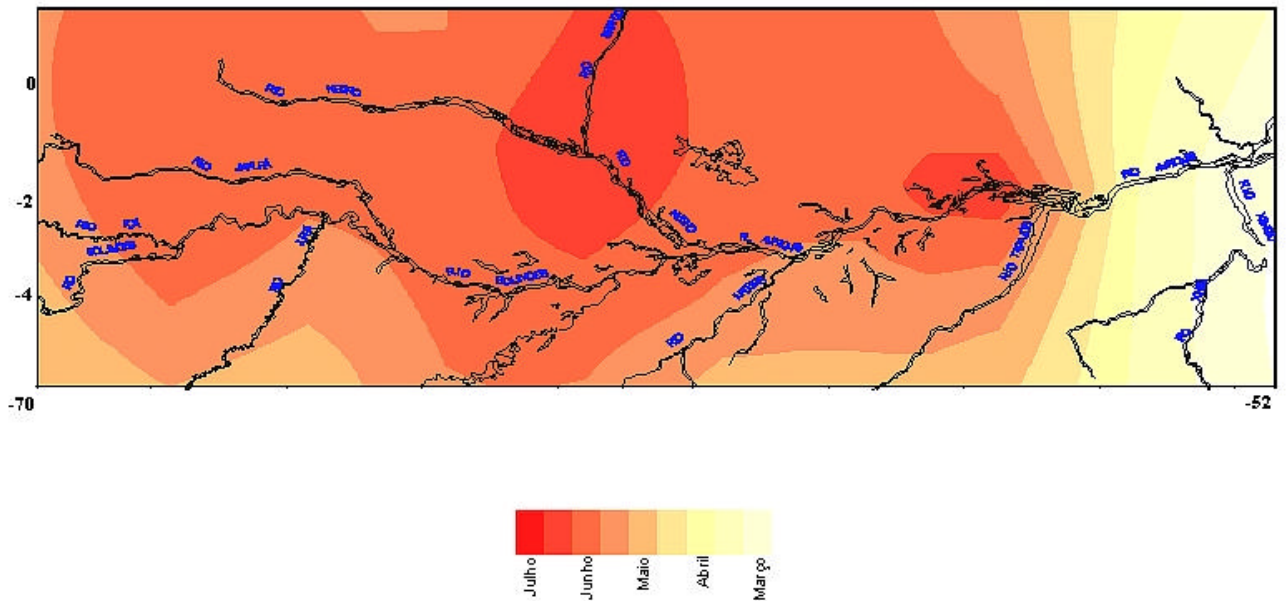


Figura 2: Variação temporal dos períodos de máximas cheias no entorno da área de estudo (período de 1990-2000).

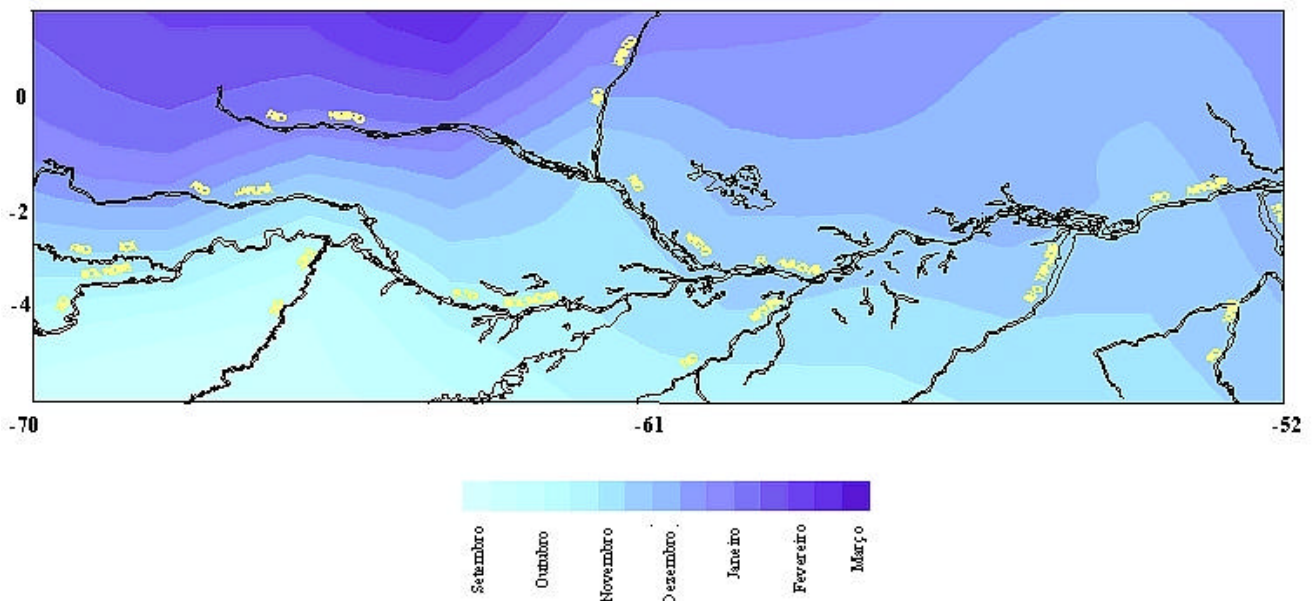


Figura 3: Variação temporal dos períodos de máxima estiagem no entorno da área de estudo (período de 1990-2000).

É importante destacar que a ocorrência de fenômenos globais como o *El Niño* e a *La Niña* podem interferir no comportamento hidrológico da Região Amazônica, antecipando ou retardando os períodos extremos de oscilação fluvial (UNESCO, 1992).

5. Definição da Área-Teste para Mapeamento da Hidrografia

A escolha da área-teste da Bacia Amazônica na qual serão realizados testes de processamento digital com fins ao mapeamento da hidrografia baseou-se, principalmente, nos seguintes critérios:

- existência de estação fluviométrica com Série Histórica de Cotas no período compreendido entre 1990-2000 o mais completa possível e com dados confiáveis;
- área com hidrografia bastante representativa (presença do rio principal e seus vários afluentes e extensa área de inundação);
- existência de pontos de controle de campo (PCTs) obtidos com GPS (IBGE/Projeto SIVAM) após o fim da SA (*Selective Availability*).
- existência de documentos cartográficos em meio digital que pudessem servir como apoio ao georreferenciamento das imagens;

A Cartografia recomenda a utilização, em caso de mapeamento de áreas extensas como a Região Amazônica (onde a densidade demográfica é inferior a 1 hab/km²), da escala 1:250.000, razão pela qual a mesma foi adotada para o mapeamento neste trabalho.

A área-teste localiza-se entre as latitudes 2° S e 3°S e as longitudes 54° W e 55° 30' W, correspondente à carta 1:250.000, MIR 98, denominada *Santarém*.

Nesse trecho da Bacia os documentos cartográficos existentes (em meio analógico e digital) são:

- carta topográfica da DSG na escala 1:250.000 (SA. 21-Z-B), de 1983;
- cartas topográficas da DSG na escala 1:100.000 (SA. 21-Z-B-I, II, III, IV, V e VI), de 1982/1983;
- carta planimétrica do Projeto RADAM na escala 1:250.000, de 1976.

Após definição da área-teste, definiu-se, através dos mapas de variação temporal dos períodos de máximas cheia e vazante (**Figuras 2 e 3**) e da Série Histórica de Cotas e dos dados estatísticos da estação fluviométrica localizada na área em questão que, ao longo da década de 90, o ano de 1997 foi o mais representativo em termos de variação dos níveis fluviais, apresentando, para essa região, a maior enchente da década no mês de maio e a máxima vazante em outubro/novembro, ambos no mesmo ano.

De posse de vários documentos cartográficos da área de estudo em meio digital (*raster*) – 1 carta topográfica da DSG na escala 1:250.000, 6 cartas topográficas da DSG na escala 1:100.000 e 1 carta planimétrica do Projeto RADAM, na escala 1:250.000 – foi executado o georreferenciamento dos mesmos pelo método adotado pelo Projeto de Mapeamento por Sensoriamento Remoto do Departamento de Cartografia do IBGE, que utiliza um *grid* vetorial georreferenciado como base para aplicação do modelo afim de transformação linear a cada arquivo *raster* correspondente aos fotolitos originais do mapa, adaptado de DOYTHER e HALL (1997).

Posteriormente, esses documentos foram comparados entre si e confrontados com os pontos de controle obtidos com GPS de modo a avaliar sua qualidade geométrica e determinar a potencialidade dessas bases cartográficas para a extração de pontos de controle (juntamente com os pontos obtidos por GPS) para o georreferenciamento das imagens.

O Erro Planimétrico Padrão(EP) para cada escala encontra-se na **Tabela 1** Em função da dificuldade de marcação de pontos de controle nos arquivos *raster* devido ao tamanho do *pixel* nesses arquivos situar-se em torno de 3 m, tolera-se, para cada escala, o erro planimétrico máximo admissível (EA) correspondente à diferença entre o erro planimétrico padrão e o tamanho de 1 (um) *pixel*.

ESCALA	1:100.000	1:250.000
EP (m)	30	75
EA (m)	27	72

Tabela 1: Erro Planimétrico Padrão (EP) e Erro Planimétrico Máximo Admissível (EA) para cada escala.

Após o georreferenciamento, os arquivos em formato *raster* correspondentes à carta planimétrica 1:250.000 apresentaram deslocamentos em relação ao *grid* de referência inferiores ao *EA* (72 m); porém, confrontando-se os elementos internos da carta planimétrica com os correspondentes nas cartas topográficas, observaram-se discrepâncias planimétricas muito grandes, muitas vezes superiores a esse valor.

Com deslocamentos inferiores ao *EA* para as folhas topográficas na escala 1:100.000 e na escala 1:250.000, todos os arquivos das folhas topográficas foram aprovados. Comparando-se as 6 folhas topográficas de escala 1:100.000 com a de escala 1:250.000, compilada a partir daquelas, notou-se um encaixe quase perfeito entre os quatro cantos de ambas, porém, os elementos planimétricos internos (hidrografia, sistema viário etc.) apresentaram deslocamentos médios significativos (129 m).

Todos os documentos cartográficos digitais georreferenciados tiveram sua qualidade avaliada em relação aos pontos obtidos com GPS. Pôde-se notar que os documentos cujos elementos internos apresentaram os menores erros (deslocamentos) em relação aos pontos obtidos com GPS foram os arquivos em formato *raster* referentes às cartas topográficas de escala 1:100.000. Os deslocamentos médios encontrados entre os elementos das cartas *raster* escala 1:100.000 e os pontos GPS situaram-se em torno de 56 m, valor abaixo do erro padrão aceitável para o mapeamento na escala 1:250.000. Em função disso, essas cartas georreferenciadas foram também utilizadas como apoio no georreferenciamento da cena correspondente ao período de máxima cheia, visto que oferecem uma quantidade maior de elementos que podem ser utilizados como pontos de controle; outro aspecto que contribuiu para o uso desses documentos cartográficos como apoio ao georreferenciamento foi a dificuldade de localização de alguns pontos obtidos com GPS na referida cena em função da presença de nuvens recobrimo grandes extensões.

Deve-se esclarecer, entretanto, que PCTs obtidos em campo com GPS são, certamente, os mais adequados a serem empregados no georreferenciamento de imagens. Na situação apresentada neste trabalho, a visualização desses pontos foi prejudicada em função da nebulosidade; buscou-se, então, uma alternativa na qual alguns pontos extraídos de folhas topográficas digitais georreferenciadas através de um método refinado, quando usados em conjunto com pontos GPS mostraram um resultado satisfatório. Considerando-se a dificuldade de penetração na Região Amazônica e a disponibilidade de apenas uma única cena correspondente à máxima cheia, esta alternativa foi bastante útil.

Ressalta-se, porém, que, para garantir uma boa precisão no georreferenciamento de imagens, a utilização de PCTs obtidos com GPS – principalmente após o fim da SA – é imprescindível.

6. Procedimentos Adotados no Mapeamento da Hidrografia – Produto Gerado

O INPE cedeu duas cenas LANDSAT 5 (órbita 227/ponto 062) para esta pesquisa: uma de 24-05-97 (cheia) e outra de 15-10-97 (seca). Utilizaram-se as duas imagens disponíveis da área de estudo em seus momentos mais críticos para que fosse possível mapear as áreas máximas sujeitas à inundação e os cursos fluviais perenes.

Em ambas trabalhou-se com a banda 4 do sensor TM (faixa do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho próximo), ideal para esse tipo de mapeamento devido à elevada absorção da radiação infravermelha próxima pelos corpos d'água (conferindo, aos mesmos, a coloração preta na imagem) e, à alta reflectância apresentada pela vegetação nessa faixa espectral, tornando-a clara e garantindo um bom contraste entre esses dois tipos de alvo.

Assim, procedeu-se à interpretação visual de cada uma das duas cenas referentes a um trecho da carta SA.21-Z-B (Santarém): aproximadamente entre as latitudes 2° S e 2° 20' S e

as longitudes 54° 30' W e 55° W, englobando a desembocadura do rio Tapajós no Amazonas próximo à cidade de Santarém.

Na vetorização manual de todos os elementos planimétricos mapeados foram utilizadas as convenções cartográficas (cores, símbolos, tamanho etc) adotadas para a escala 1:250.000 do IBGE (RIO DE JANEIRO, 1996).

A representação dos cursos fluviais permanentes – bem como dos “furos” e “paraná”¹ perenes mesmo em épocas de volume d’água mínimo – só foi possível com a utilização da imagem referente à data da máxima estiagem ocorrida na região. Assim, todos os elementos de hidrografia representados como permanentes no trecho do mapa produzido, podem ter sua perenidade assegurada em qualquer outra época do ano, conferindo-lhes o potencial de utilização como hidrovias permanentes (**Figura 4**). Em uma região onde a maioria do transporte de pessoas e mercadorias é realizado por vias fluviais, o mapeamento cuidadoso dessas hidrovias permanentes deve ser considerado tão importante quanto aquele das vias de circulação terrestres em outras regiões.

Analogamente, as áreas máximas atingidas pelas inundações (tracejadas) foram registradas a partir da interpretação visual da imagem correspondente à máxima cheia.

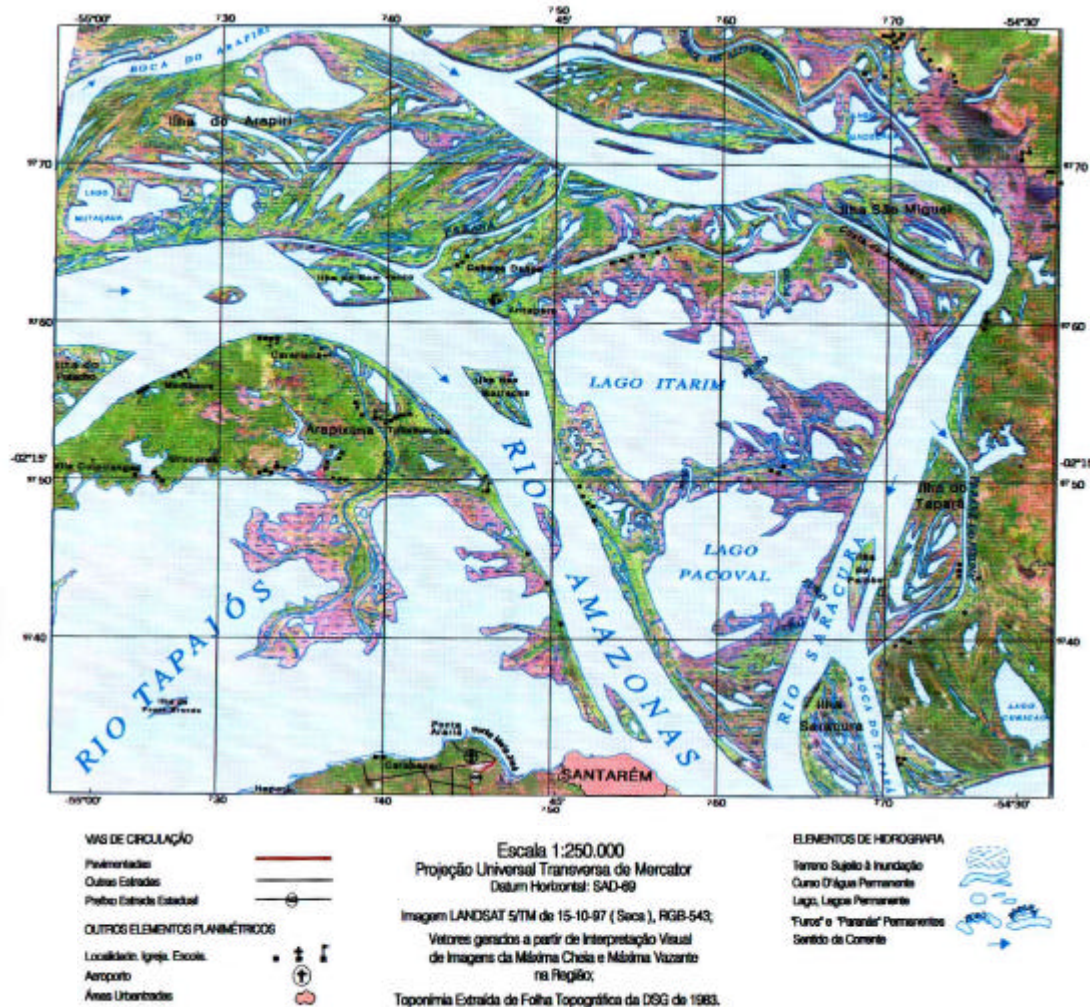


Figura 4: Carta-imagem gerada na escala 1:250.000 referente a um trecho da carta SA.21-Z-B

¹ Elementos hidrográficos típicos dessa região; o “furo” consiste em um canal que conecta lagos, um rio a um lago ou um rio a ele mesmo, sendo, nesse último caso, fora da planície aluvial; “paraná” é o termo utilizado para designar um canal de drenagem que sai de um rio e retorna ao mesmo rio, dentro da planície aluvial (PROJETO RADAM, 1974-78)

7. Referências Bibliográficas

CARVALHO, N. O.; CUNHA, S.B. Estimativa da Carga Sólida do Rio Amazonas e seus Principais Tributários para a Foz e Oceano: uma Retrospectiva. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, v. 6, n. 10, p. 44-58, jun. 1998.

CDTECA do INPE. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. Apresenta informações sobre as imagens processadas e disponíveis no INPE. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br>>. Acesso em: 04 mar. 2002.

DADOS fluviométricos. Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000. Apresenta informações sobre as bacias hidrográficas brasileiras. Disponível em: <<http://hidroweb.aneel.gov.br>>. Acesso em: 04 nov. 2000.

DISTRITO FEDERAL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. *Sistemática para Análise de Consistência de Dados Fluviométricos*: manual técnico. Brasília, 1982. 97 p.

DOYTSHER, Y.; HALL, J.K. Gridded Affine Transformation and Ruber-Sheeting Algorithm with Fortran Program for Calibrating Scanned Hydrographic Survey Maps. *Computers and Geosciences/Pergamon*, Great Britain, v. 23, n. 7, p. 785-791, Feb. 1997.

FENÔMENOS meteorológicos: banco de dados. Disponível em: <<http://www.geocities.yahoo.com.br/meteorologiabr/macroescala>>. Acesso em: 22 jan. 2002.

FRANÇA. Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale. *Image Mapping Methods - Examples of Implementation*: manual de orientação. Toulouse, 1996. 110 p.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. *Processamento de Imagens Digitais*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000. 509 p., 24 cm. Inclui índice. ISBN 85-212-0264-4.

HIDRO, version 1.01: sistemas de informações hidrológicas. [S.I.]: ANEEL, 2001. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.

LUSCH, D.P. Introduction to Environmental Remote Sensing. In: GIS AND REMOTE SENSING SEMINAR, 1., 1999, Michigan. *Anais...Michigan*, 1999. p. 1-148.

MICROSOFT CORPORATION. Encarta Interactive World Atlas Division. *Atlas Mundial Microsoft Encarta*. Washington, 1999. Base de dados para Windows, versão 9.00.00.0702..

MIGUENS, A.P. Aspectos da Navegação Fluvial: Documentos Cartográficos, Publicações de Segurança da Navegação, Sinalização, Métodos e Técnicas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE HIDROVIAS, 1., 1981, Rio de Janeiro. *Anais Hidrográficos Tomo XXXVIII*: Rio de Janeiro, 1981. pp. 77-102.

PROJETO RADAM. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro: DNPM, v.5,7,10 e 18, 1974-78.

RIO DE JANEIRO (Estado). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Convenções Cartográficas*: manual técnico. Rio de Janeiro, 1996. 85 p.

SURFER, version 6.03: surface mapping system. [S.I.]: Golden Software Inc., 1996. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.

UNESCO. El Niño Returns. *International Marine Science Newsletter*, Washington, n. 62, p. 2-8, 1992.

UNESCO. River Inputs to Ocean Systems. Status and Recommendations for Research. *Technical Papers in Marine Science*, Washington, n. 55, p. 13-26, 1988.