



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E NAVEGABILIDADE
DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS**

LAIZA RODRIGUES LEAL DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 268

BRASÍLIA - DF

Março de 2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA GERAL E APLICADA
LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA**

**GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E NAVEGABILIDADE
DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS**

LAIZA RODRIGUES LEAL DE OLIVEIRA

**ORIENTADOR: PROF. DR. AUGUSTO CÉSAR BITTENCOURT PIRES
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. MARCO IANNIRUBERTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOLOGIA NA ÁREA DE
PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE AMBIENTAL.**

**BRASÍLIA - DF
Março de 2010**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA GERAL E APLICADA
LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA**

**GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E NAVEGABILIDADE
DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS**

LAIZA RODRIGUES LEAL DE OLIVEIRA

Dissertação de mestrado submetida ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia.

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires (IG – UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dr. Marco Ianniruberto (IG – UnB)
(Co-orientador)**

**Prof. Dr. Henrique Llacer Roig (IG – UnB)
(Examinador Interno)**

**Dr. Éder de Sousa Martins (EMBRAPA - CPAC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 22 DE MARÇO DE 2010.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, L. R. R. (2010). Geomorfologia Fluvial e navegabilidade .do baixo curso do rio Tocantins. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Laiza Rodrigues Leal de Oliveira

Título: Geomorfologia Fluvial e navegabilidade .do baixo curso do rio Tocantins

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Laiza Rodrigues Leal de Oliveira

*O Tejo é mais belo que o rio que corre pela minha aldeia,
Mas o Tejo não é mais belo que o rio que corre pela minha aldeia
Porque o Tejo não é o rio que corre pela minha aldeia.*

*O Tejo tem grandes navios
E navega nele ainda,
Para aqueles que vêem em tudo o que lá não está,
A memória das naus.*

*O Tejo desce de Espanha
E o Tejo entra no mar em Portugal.
Toda a gente sabe isso.
Mas poucos sabem qual é o rio da minha aldeia
E para onde ele vai
E donde ele vem.
E por isso, porque pertence a menos gente,
É mais livre e maior o rio da minha aldeia.*

*Pelo Tejo vai-se para o Mundo.
Para além do Tejo há a América
E a fortuna daqueles que a encontram.
Ninguém nunca pensou no que há para além
Do rio da minha aldeia.*

*O rio da minha aldeia não faz pensar em nada.
Quem está ao pé dele está só ao pé dele.*

O Tejo é mais belo - Alberto Caeiro

*Dedico este trabalho ao meu marido Ivan Carlos,
meu bem mais precioso, exemplo de coragem e
imensa bondade. Pelo seu amor imensurável,
dedicação e carinho em todas as horas.
E ao Ivan Gabriel essa luz que está para chegar.*

Agradeço a todos que passaram pelo rio Tejo, o rio Tocantins e o rio da minha aldeia, que me ajudaram durante esta trajetória, meu apreço, em particular:

à família, pais, sogros, irmãos, e sobrinhos, pelo apoio em todos os momentos, meu amor e gratidão, que Deus os abençoe sempre;

à Adriana, Luís Henrique e Tuninha, que sempre foram mais do que amigos;

ao meu coorientador, Prof. Dr. Marco Ianniruberto, pelo apoio profissional e fraterno, meu respeito, amizade e infinita gratidão;

aos professores da UnB, em especial ao Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses, Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires, Prof. Dr. Éder de Souza Martins e Prof. Dr. Henrique Roig, minha admiração e carinho;

aos meus amigos da UnB, Verônica, Serjão, Frederico (Fred), Cristian, César, Consuelo minha amizade e eterna saudade, vocês me enriquecem;

ao CNPq pelo apoio financeiro fundamental para a execução deste trabalho;

à Diretoria de Hidrografia Nacional (DHN), em nome do Capitão-de-Corveta Torres, por todo apoio e as informações valiosas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO 1.....	17
INTRODUÇÃO.....	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS.....	18
1.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
1.3.1 Hidrografia.....	20
1.3.2 Clima.....	22
1.3.3 Biomas e Ecossistemas.....	22
1.3.4 Geologia.....	23
1.3.5 Geomorfologia e Pedologia.....	23
1.2.2 Demografia.....	23
CAPÍTULO 2.....	25
HIDROVIAS: POTENCIAL BRASILEIRO.....	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 POTENCIAL DA REDE HIDROGRÁFICA BRASILEIRA.....	27
2.3 COMBOIO-TIPO UTILIZADA NA NAVEGAÇÃO DAS HIDROVIAS BRASILEIRAS.....	31
CAPÍTULO 3.....	35
CARTOGRAFIA NÁUTICA: ELABORAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DA CARTA NÁUTICA ELETRÔNICA.....	35
3.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	35
3.2 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS E O DHN.....	36
3.3 IHO S 44 - STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS.....	39
3.4 IHO S 57 - TRANSFER STANDARD FOR DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA.....	41
3.5 PADRONIZAÇÃO DE CARTA NÁUTICA ELETRÔNICA (ENC) E DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA NAVEGAÇÃO (ECDIS).....	45
CAPÍTULO 4.....	47

GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E AS IMPLICAÇÕES NA NAVEGABILIDADE.....	47
4.1 MORFOLOGIA DA REDE DE DRENAGEM	47
4.2 SEDIMENTOLOGIA.....	50
4.3 O EMPREGO DE SENSORES REMOTOS NO ESTUDO DA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL	53
CAPÍTULO 5.....	58
MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
5.1 INTRODUÇÃO	58
5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT	58
5.3 LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO.....	61
5.3.2 <i>Redução das Cotas ao Datum Vertical</i>	64
5.3.3 <i>Etapa do processamento dados batimétricos</i>	68
5.3.4 <i>Interpolação dos pontos para geração do Modelo Digital de Fundo</i>	69
5.4 LEVANTAMENTO ESTRATIGRÁFICO.....	70
5.4.1 <i>Perfilador de Subfundo</i>	70
CAPÍTULO 6.....	72
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
6.1 DELIMITAÇÃO DAS MARGENS DO RIO	72
6.2 ANÁLISE DOS DADOS BATIMÉTRICOS	74
6.2.1 <i>Escala</i>	82
CAPÍTULO 7.....	93
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO 1 – MAPA BATIMÉTRICO DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS.....	103
ANEXO 2 – ESTRATIGRAFIA DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS	105
ANEXO 3 – REGIÕES VULNERÁVEIS DE MENOR PROFUNDIDADE DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área do Levantamento Hidrográfico	20
Figura 2 - Divisão Hidrográfica Nacional.....	29
Figura 3 - Jurisdições das Unidades Hidroviárias	31
Figura 4 - Formação do Comboio-Tipo	32
Figura 5 - Embarcação adotada na navegação do Rio Tocantins,	34
Figura 6 - Comboio completo: 108,3 x 16 x 1,5m.....	34
Figura 7 - Modelo Teórico de Dados da S-57	43
Figura 8 - Padrão de Canal Retilíneo	48
Figura 9 - Padrão de Canal Anastomosado	49
Figura 10 - Padrão de Canal Meandrante.....	50
Figura 11 - Área de dunas a ser dragada (Fonte:DHN, 2000).....	52
Figura 12 - Simulação do Ecobatímetro. Fonte: SIMRAD, 2008	56
Figura 13 - Resultados dos Métodos NDWI e PC.....	60
Figura 14 - Rotas utilizadas para orientar a navegação	61
Figura 15 - Equipamentos integrados para a aquisição de dados	62
Figura 16 - Barco Ilha Encantada	63
Figura 17 - Modelo de ondulação geoidal Fonte: IBGE, 2008	65
Figura 18 - Modelo de ondulação geoidal referida ao datum WGS84 (Fonte: IBGE).....	67
Figura 19 - Comparação da Classificação por K-Means	73
Figura 20 - Área 1 do Levantamento Batimétrico	76
Figura 21 - Área 2 do Levantamento Batimétrico	77
Figura 22 – Interseção entre banco de areia imerso e submerso.	78
Figura 23 – Afloramento em área de corredeiras	79
Figura 24 – Comparação do MDT e da declividade em áreas de fundo rochoso.....	80
Figura 25 - Comparação do MDT e da declividade em áreas de barras de areia.....	81

Figura 26 - Comparação do MDT e da declividade em um canal	82
Figura 27 - Classificação do fundo rochoso a partir do perfil estratigráfico.....	85
Figura 28 – Fundo rochoso com elevada rugosidade, característica de ambiente erosivo	86
Figura 29 - Classificação do fundo rochoso com cobertura rasa de areia a partir do perfil estratigráfico	87
Figura 30 - Fundo sub-aflorante com cobertura rasa de areia	88
Figura 31 - Classificação das barras de areia a partir do perfil estratigráfico	89
Figura 32 - Área de barras de areia sobre embasamento rochoso	90
Figura 33 - Classificação do canal a partir do perfil estratigráfico.....	91
Figura 34 - Secção longitudinal de um canal em área de embasamento rochoso sem cobertura sedimentar	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Impacto Ambiental dos Modais de Transporte	27
Tabela 2 - Expansão da Rede Hidroviária Brasileira.....	28
Tabela 3 - Comparativo entre a largura do rio e a largura média do canal	29
Tabela 4 – Classificação das Vias Navegáveis.....	37
Tabela 5 - Características espectrais e espaciais do sensor ETM+ (LANDSAT 7)	59
Tabela 6 - Características do Ecobatímetro multifeixe Reson Seabat 8102.....	83
Tabela 7 - Relação ângulo de visada e resolução	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHIMOC	Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental
AHIMOR	Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental
AHIPAB	Administração das Hidrovias do Parnaíba
AHIPAR	Administração da Hidrovia do Paraguai
AHITAR	Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia
AHRANA	Administração da Hidrovia Paraná
AHSFRA	Administração da Hidrovia do São Francisco
AHSUL	Administração das Hidrovias do Sul
ANA	Agência Nacional de Águas
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
DAQ	Diretoria de Infra-Estrutura Aquaviária
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global em Modo Diferencial)
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DNIT	Departamento Nacional Infra-Estrutura de Transportes
ENC	<i>Electronic Nautical Chart</i> (Carta Náutica Eletrônica)
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i> (Instituto de Pesquisas de Sistemas de Meio-Ambiente)
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
GEHPAQ	Gerência de Hidrovias e Portos Interiores
GIS	Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GRID	Grades raster
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IHO	<i>International Organization Hydrographic</i> (Organização Hidrográfica Internacional)
IMO	<i>International Maritime Organization</i> (Organização Marítima Internacional)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
ITRS	<i>Terrestrial Reference System</i> (Sistema de Referência Terrestre)
LANDSAT	<i>Land Satellite</i> (Satélite da terra)
LH	Levantamento Hidrográfico

MDE	Modelo Digital de Elevação
MINOR	Administração das Hidrovias do Nordeste
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i> (Índice Normalizado de Diferença de Água)
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCT	Transformação por Principais Componentes
PLTS	<i>Production Line Tool Set</i> (Ferramentas para Linha de Produção)
PPA	Programa Plurianual
PS	<i>Product Specification</i> (Especificação do Produto)
SIG	Sistema de Informação Geográfica
WGS	<i>World Geodetic System</i> (Sistema Geodésico Mundial)

RESUMO

Diversos projetos de desenvolvimento regionais estão carentes de complementação hidroviária, sendo o mais premente o da Zona de Frente de Expansão Centro-Norte. Esta região, banhada pelos rios Tocantins, Araguaia e Rio das Mortes, experimenta um novo ciclo de desenvolvimento, onde a pecuária começa a ceder espaço para a implantação de novos pólos de cultura de grãos, notadamente de soja, arroz, milho e sorgo. Sendo assim, o presente trabalho se insere como um estudo acerca da geomorfologia fluvial do rio Tocantins, visando à sua navegabilidade de forma perene e segura. Foram aplicadas técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto; uma metodologia para o levantamento hidrográfico, a partir do uso de um ecobatímetro multifeixe de alta resolução; uma proposta metodológica para o mapeamento e classificação das feições morfológicas do fundo da hidrovia por meio de um perfilador de subfundo; e, por fim, foram definidos os limites para o canal navegável, seu calado e as bocas máximas das embarcações ou comboios. Analisando os valores batimétricos encontrados na área mapeada e os valores adotados pela AHIMOR para o comboio-tipo, foram adotados, como valores de referência para navegação perene e segura, profundidades superiores a 5 metros e largura para o canal acima de 90 metros. Os resultados obtidos por meio do perfilador evidenciam cinco macroestruturas que são: a) barras de areia, b) canal, c) depressão morfológica, d) embasamento aflorante e, e) embasamento com cobertura rasa de areia. As análises preliminares mostraram que é viável o uso desta ferramenta na análise da geomorfologia fluvial e monitoramento das condições de navegabilidade. O estudo se mostrou eficaz para a análise da mobilidade dos bancos de areia presentes no leito do rio, medição das profundidades e avaliação estratigráfica do fundo. Portanto, a metodologia se apresentou, também, eficiente na aquisição dos dados.

Palavras-chave: Geomorfologia Fluvial, Navegação, Levantamento Hidrográfico, Batimetria, Estratigrafia.

ABSTRACT

Several projects of regional development are in need of waterway complementation, especially in the so called Center-North Front of Expansion. This region, where the Tocantins, Araguaia and das Mortes rivers are located, has been experiencing a new cycle of development, where cattle breeding is losing space to grain farming, especially soy, rice, corn and sorgo. This is a work in the field of fluvial geomorphology which addresses specifically the navigability in the Tocantins River. Several image processing techniques of remote sensing were employed, as well as a methodology for hydrographic survey using a high resolution multibeam echosounder along with the use of a sub-bottom profiler; in order to develop a methodology for mapping and classifying the morphology of the waterway bottom. The navigable section of the river was defined, as well as the maximum draft and waist for boats and convoy. Comparing the bathymetry values found in the area of study and the values suggested by AHIMOR for the convoy-type, we defined as reference values for perennial and safe navigation depths of 5 meters and width of at least 90 meters. The results obtained with the use of the profiler were useful to define 5 macrostructures: a) ripples; b) canal; c) morphological depression; d) rock exposure and e) rock floor with a shallow cover of sand. Preliminary analysis demonstrated that this is a useful tool for fluvial geomorphology analyses and for the monitoring of conditions of navigability. The study was efficient for studying the mobility of sandbanks in the riverbed, measuring depths and conducting stratigraphic assessments of the bottom. As a consequence, the methodologies here used were also efficient for collecting data.

Key-words: Fluvial Geomorphology; Navigation; waterway survey; bathymetry; stratigraphy.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transporte no Brasil sempre foi marcado por contradições no que se refere à escolha do modal mais eficiente e menos dispendioso para o transporte de cargas e passageiros, em casos de médias e longas distâncias. As características geográficas do território favorecem o modal ferroviário e hidroviário, mas o que se vê é a predominância do modal rodoviário. Atualmente cerca de 60% da produção brasileira é escoada por meio das rodovias, as ferrovias respondem por 21% e as hidrovias apenas 14%. Os 5% restantes da produção são de responsabilidade dos sistemas dutoviário e aéreo.

O Brasil possui uma das maiores redes fluviais do mundo, com capacidade para a implantação sistema hidroviário bastante vantajoso, considerado como o modal mais barato e eficiente na movimentação de granéis ou grandes cargas em geral. Dentre os 40.000 km de extensão fluvial, aproximadamente 8.500 km podem ser considerados navegáveis durante todo o ano.

Em se tratando de longas distâncias, a combinação de pelo menos dois modais permite uma melhor sustentabilidade da equação econômica. Neste sentido, esforços vem sendo realizados, com o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT), divulgado em abril de 2007, com o intuito de conectar o transporte multimodal, visando o respeito às atividades econômicas exercidas e seus possíveis impactos ambientais.

Diversos projetos de desenvolvimento regionais estão carentes de complementação hidroviária, sendo o mais premente o da Zona de Frente de Expansão Centro-Norte. Esta região, banhada pelos rios Tocantins, Araguaia e Rio das Mortes, experimenta um novo ciclo de desenvolvimento, onde a pecuária começa a ceder espaço para a implantação de novos pólos de cultura de grãos, notadamente de soja, arroz, milho e sorgo. O Cerrado, longe de ser uma região de passagem, constitui um pólo dinâmico da atividade agroindustrial, oferecendo vantagens combinadas de clima, topografia e solo, se comparadas às demais regiões produtoras.

Neste contexto, a hidrovia Tocantins-Araguaia se torna uma promissora via de transporte aquaviário, pela sua extensão e por sua posição geográfica, não tendo maior destaque devido à descontinuidade dos trechos navegáveis que necessitam de intervenções. Entretanto, os diversos estirões navegáveis podem ser utilizados em conexão com outros modais de transporte e com grande perspectiva de se constituir em eixo prioritário de transporte no Brasil Central (MMA a, 2006).

Além disso, a região está contemplada nos projetos do Plano Plurianual (PPA-2008/2011) e no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Os projetos prevêem a construção de mais sete usinas hidrelétricas na bacia, o que acarretaria na melhora da navegabilidade, criando os pressupostos para a implantação da hidrovia.

Segundo a ANA (2006), o maior entrave que se coloca para a efetiva navegação comercial de grandes comboios pelo Tocantins está relacionado com a falta da implantação de eclusas em áreas de barragens que, se por um lado afogam pontos críticos que dificultavam ou até impediam a passagem das embarcações, por outro, representam uma interrupção à hidrovia.

O quadro de desenvolvimento que se forma na região promoverá uma intensificação do tráfego fluvial, exigindo informações atualizadas sobre a navegabilidade, no intuito de garantir a segurança e até mesmo influenciar na redução dos custos do transporte fluvial. Por fim, o correto planejamento e manejo logístico destes trechos contribuiriam na eficiência do escoamento da produção de minérios e grãos.

Sendo assim, o presente trabalho se insere como um estudo a cerca da geomorfologia fluvial do rio Tocantins, visando à sua navegabilidade de forma perene e segura.

1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS

A navegação em águas internas requer um conhecimento prévio do ambiente, dos seus elementos topográficos e, conseqüentemente, da dinâmica do rio. As informações devem abarcar o modelado da superfície do terreno, visto que elas são essenciais a definição das regiões favoráveis e das regiões restritas à navegação.

O presente trabalho tem como objetivo principal propor um método de verificação das condições de navegabilidade de um trecho do rio Tocantins por meio de técnicas de sensoriamento remoto e prospecção acústica. O objeto de estudo localiza-se à jusante da represa de Tucuruí, no trecho entre o município de Tucuruí (PA) e o povoado de Nazaré dos Patos (PA). A caracterização da dinâmica do rio e sua topografia servirão como subsídio à navegação fluvial, de modo a permitir futuros projetos de intervenção no rio Tocantins e a atualização de cartas náuticas digitais em apoio aos projetos de segurança à navegação.

Foram aplicadas técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto, como o NDWI para a delimitação das margens do rio e os Principais Componentes para a identificação dos bancos de areia e ilhas; utilização do ecobatímetro multifeixe de alta resolução para o mapeamento de águas rasas; e por último apresentar uma proposta metodológica para o mapeamento e classificação das feições morfológicas do fundo da hidrovia por meio de um perfilador de subfundo.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, com uma área de 967.059 km² (11% do território nacional), abrange cinco estados: Mato Grosso (14,3%), Goiás (26,8%), Tocantins (34,2%), Pará (20,8%), Maranhão (3,8%) e o Distrito Federal (0,1%). Limita-se ao sul pelo Planalto Central, a oeste pela Serra dos Carajás, a leste pela Serra Geral de Goiás e, ao norte pelo estuário do rio Amazonas.

A malha fluvial da bacia permite a integração de todo o centro-norte do país. Sua importância estratégica se justifica em virtude da facilidade de transportes, a partir dos pólos agrícolas dos estados que o cercam rumo aos mercados europeus e asiáticos (CNT, 2002).

A **Figura 1** apresenta a área de estudo, que se estende do município de Tucuruí (PA) até o povoado de Nazaré dos Patos (município de Breu Branco / PA) percorrendo uma área de 40 km de extensão, à jusante da represa de Tucuruí.

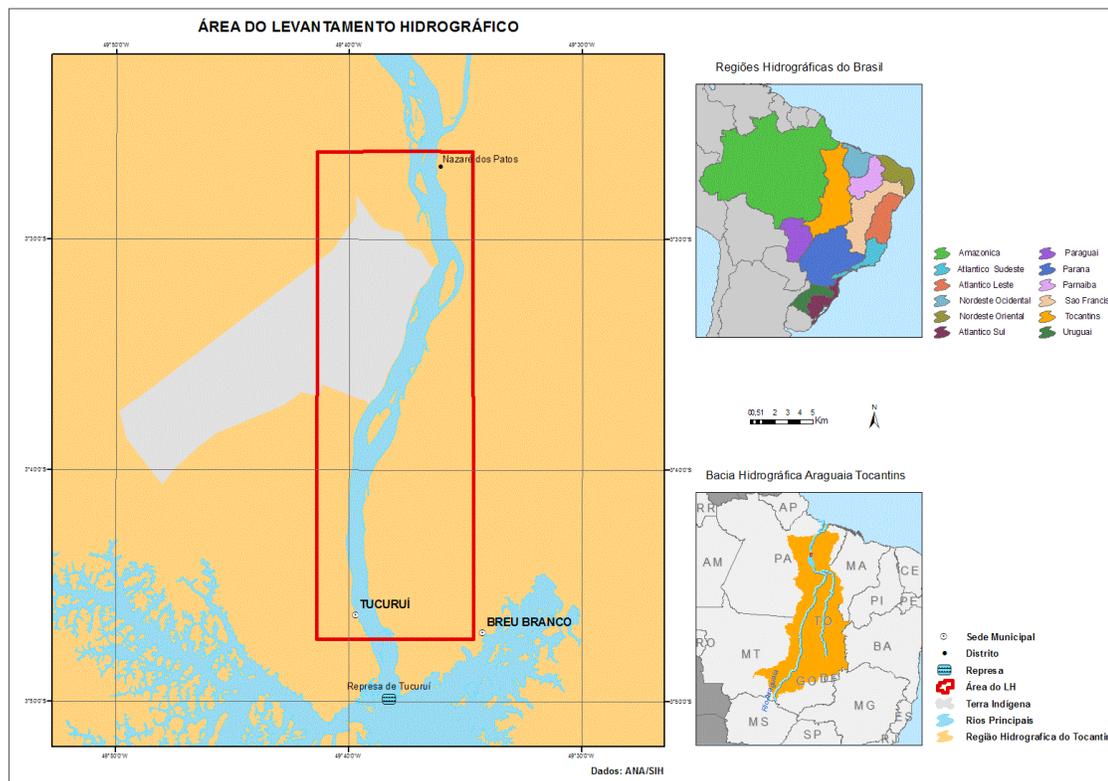


Figura 1 – Área do Levantamento Hidrográfico

1.3.1 Hidrografia

O rio Tocantins é formado a partir do rio Das Almas e do rio Maranhão, cujas nascentes situam-se na região central do País, e percorre cerca de 2.400 km até a sua foz, na Baía de Marajó, próxima a Belém do Pará. O trecho do rio à jusante da usina hidrelétrica de Tucuruí está integrado ao sistema hidroviário da Amazônia.

O principal tributário é o rio Araguaia (2.600 km de extensão), onde se encontra a Ilha do Bananal, maior ilha fluvial do mundo com 350 km de comprimento e 80 km de largura. Na margem direita, destacam-se os rios Bagagem, Tocantinzinho, Paraná, Dos Sonos, Manoel Alves Grande e Farinha; na margem esquerda os rios Santa Teresa e Itacaúnas.

Para fins de estudo, o Rio se divide em três segmentos:

- o Alto Tocantins compreendido entre suas nascentes e a Cachoeira do Lajeado, numa extensão de 1.060 km e desnível de 925 m. É nessa cachoeira, localizada abaixo da cidade de Palmas (TO), que será construída a Usina do Lajeado;

- o Médio Tocantins refere-se ao percurso entre Cachoeira do Lajeado e Cachoeira do Itaboca, numa extensão de 980 km e desnível de 149 m. É para esse trecho que se planeja a hidrovia, entre as cidades de Miracema (TO) e Estreito (MA), lembrando que a Cachoeira do Itaboca encontra-se submersa no reservatório de Tucuruí; e;

- o Baixo Tocantins corresponde ao segmento entre a Cachoeira de Itaboca até sua foz, com uma extensão de 360 km e desnível de 26 m, compreendendo parte do reservatório de Tucuruí.

As altitudes variam de 1.000 m, nas nascentes, para 100 m na foz, com altitudes entre 500 m e 200 m, na maior parte de sua bacia. Em seu baixo curso, esse trecho pode ser subdividido em dois segmentos, para fins de profundidades mínimas disponíveis:

1. O primeiro estende-se de sua foz até Cametá (PA) e possui profundidade de 8,5 m no período das águas altas (dezembro a maio), reduzindo-se a 5,0 m no período de estiagem (junho a novembro).
2. O segundo segmento tem início em Cametá (PA) e vai até Tucuruí (PA), variando entre 5,0 m e 2,5 m no período das águas altas, descendo a um mínimo de 2,0 m, na estiagem.

No rio Tocantins, em geral, as maiores vazões ocorrem entre os meses de fevereiro e abril, e as menores vazões se concentram nos meses de setembro e outubro (ANA, 2006).

O principal uso da água de sua bacia é destinado ao abastecimento público e geração de energia elétrica, destacando-se as usinas hidrelétricas de Tucuruí (PA), Serra da Mesa (GO), Lajeado (TO), São Salvador (TO), Peixe (TO) e Cana Brava (GO).

A transposição da barragem de Tucuruí exige a construção de um canal, além da conclusão da eclusa cujas obras principais de engenharia já foram construídas, junto à barragem. Quando concluído, o sistema de transposição de níveis em Tucuruí possibilitará o acesso ao porto de Marabá (PA), distante cerca de 100 km à montante da barragem, podendo-se chegar às corredeiras de Santa Isabel (PA). Lá também está prevista a construção de uma usina hidrelétrica com sistema de transposição (eclusas), que permitirá integrar o trecho superior do rio Tocantins ao complexo hidroviário do Amazonas. Restará solucionar o

problema de desníveis entre Imperatriz (MA) e Estreito (MA) para permitir o acesso pelo rio até Porto Nacional (TO).

Uma vez resolvidos os problemas das transposições, seriam integradas ao eixo de desenvolvimento e à rede de transporte as cidades de Imperatriz (MA), Porto Franco (MA), Estreito (MA), Carolina (MA), Porto Nacional (TO) e Palmas (TO).

1.3.2 Clima

O clima é tropical, com temperatura média anual de 26°C, e dois períodos climáticos bem definidos: o das chuvas, de outubro a abril e o da seca, de maio a setembro. Mais de 90% da precipitação anual ocorre no período da chuva, enquanto a principal característica do período da seca é a baixa umidade relativa do ar.

A precipitação média na região hidrográfica Tocantins-Araguaia é da ordem de 1.869 mm/ano, chegando a 2.565 mm no litoral do Pará. A vazão é de 11.800 m³/s, fornecendo uma vazão específica média de 15,6 L/s km². A evapotranspiração real média está na faixa de 1.200 mm/ano e o coeficiente médio de escoamento superficial é de aproximadamente 0,30 (MMA a, 2006).

1.3.3 Biomas e Ecossistemas

A região caracteriza-se pela presença de dois importantes biomas. A Floresta Amazônica que ocupa a porção norte e noroeste da região e corresponde a 35% da área total e o Cerrado que ocupa os 65% restantes.

No Alto Tocantins e Araguaia, prevalecem o Bioma Cerrado, enquanto que no Baixo Tocantins, domina o Bioma Amazônia. O Ecótono Amazônia-Cerrado situa-se ao sul da unidade Baixo Tocantins. Já a pequena porção do Ecótono Cerrado-Caatinga localiza-se à nordeste da unidade hidrográfica Tocantins-Araguaia (MMA a, 2006).

1.3.4 Geologia

A região possui um contexto geológico que inclui o embasamento da Bacia do Parnaíba, além de sucessões cenozóicas relacionadas ao Grupo Barreiras e as aluviões do rio Tocantins.

A área corresponde a uma zona de transição entre o embasamento cristalino - Complexo Xingu - localizado na margem esquerda do rio, e uma seqüência vulcano-sedimentar, com metamorfismo de baixo grau, composto de depósitos terciários (Formação Tucuruí), além de deposições quaternárias, que constituem o aluvião (MMA a, 2006).

1.3.5 Geomorfologia e Pedologia

Na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia ocorrem as principais unidades geomorfológicas: planícies, depressões, tabuleiros, patamares, chapadas e planaltos. O divisor natural de águas entre as bacias hidrográficas dos rios Araguaia e Tocantins é a Serra Dourada.

Os solos de maior evidência na região são Latossolos Vermelho-Amarelo e Vermelho, com texturas variáveis de média a argilosa, associados comumente a solos Concrecionários, Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Vermelho-Amarelo. Em geral são solos profundos e bem drenados, possuem baixa fertilidade natural e boas características físicas, e estão associados a relevo plano ou suave ondulado (MMA a, 2006).

Como resultado do processamento da avaliação da aptidão agrícola, as terras consideradas agricultáveis sem maiores restrições alcançam 38.231.100 hectares. Desta parcela agricultável, cerca de 50% estão nos estados de Goiás e do Tocantins, e 41% nos estados do Mato Grosso e do Pará (MMA a, 2006).

1.2.2 Demografia

A região hidrográfica apresenta uma população aproximada de 8.000.000 habitantes, com uma densidade demográfica de 8,1 hab/km², inferior à média do país (19,8 hab/km²). A rede urbana é fragmentada, onde há predominância de municípios com até 5.000 habitantes (54,3% do total) que corresponde a apenas 13% da população urbana regional. As principais

idades são Belém / PA (1.280.000 hab.), Imperatriz / MA (230.000 hab.), Marabá / PA (168.000 hab.), Palmas / TO (137.000 hab.) e Araguaína / TO (113.000 hab.). A maior parte da população concentra-se nas unidades hidrográficas do Tocantins e litoral do Pará.

As cidades ribeirinhas mais importantes e acessíveis por meio fluvial são: Abaetetuba (próxima à foz), Cametá (km 60), Mocajuba (km 110), Baião (km 140) e Tucuruí (km 250).

CAPÍTULO 2

HIDROVIAS: POTENCIAL BRASILEIRO

2.1 INTRODUÇÃO

O uso dos rios como vias navegáveis interiores foi uma das formas encontradas para se consolidar a ocupação do território brasileiro desde a colonização. São vários os fatos que ocorreram ao longo dos anos que exibem a importância do transporte hidroviário. Em meados de 1750 o deslocamento do litoral para o interior era praticado por meio dos rios, entre estes o rio Grande, afluente do rio Paraná, e o rio Cuiabá, afluente do rio Paraguai, ambos localizados na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, o que deu início ao processo de desenvolvimento da navegação interior nas regiões Sul e Sudeste. No ano de 1868, foi realizada a implantação da navegação a vapor nos rios Araguaia e Tocantins, iniciando-se, assim, as primeiras explorações nestes rios (ANA, 2005).

Ainda segundo a ANA (2005), outro marco do crescimento da atividade hidroviária foi a publicação em 1914, no Brasil, do "Álbum Graphico do Estado do Mato Grosso", com ilustrações e mapas que revelavam a histórica navegação pelo rio Paraguai atestando, de forma inexorável, a utilização desta via navegável natural. Em meados de 1930, o Presidente Getúlio Vargas promulgava leis que instituíam a obrigatoriedade de sinalização nos rios brasileiros, visando garantir a segurança da navegação. Na região amazônica, quando os europeus chegaram, no início do século XVI até meados de 1950, o transporte de passageiros, mantimentos e mercadorias ocorriam totalmente pelos rios.

A navegação no Brasil foi regulamentada pela Lei nº. 9 432, de 8 de janeiro de 1997, que aprovava o regulamento para o Tráfego Marítimo. Por este Regulamento, a navegação mercante brasileira ficou sendo classificada em:

- Longo Curso: a realizada entre portos brasileiros e estrangeiros;
- Cabotagem: a realizada entre portos ou pontos do território brasileiro, utilizando a via marítima ou esta e as vias navegáveis interiores;
- Interior: a realizada em hidrovias interiores, em percurso nacional ou internacional;

- Apoio Portuário: a realizada exclusivamente nos portos e terminais aquaviários, para atendimento a embarcações e instalações portuárias;
- Apoio Marítimo: a realizada para o apoio logístico a embarcações e instalações em águas territoriais nacionais e na Zona Econômica, que atuem nas atividades de pesquisa e lavra de minerais e hidrocarbonetos.

Apesar de não ser objeto desse estudo avaliar os impactos econômicos, sociais e ambientais para a implantação da hidrovia, se faz necessário apresentar algumas constatações sobre os impactos positivos e negativos na área de influência do projeto.

Sobre os impactos negativos BUCHER & HUSZAR (1995) apontam:

- O aumento de risco de erosão e assoreamento de canais e rios, provocam a perda da qualidade da água e da biodiversidade;
- A poluição por defensivos, resíduos urbanos, industriais ou extração mineral, bem como óleo combustível oriundo das próprias embarcações;
- Fortes mudanças no cenário, provocadas pelas obras de dragagem, canalização e estreitamento de canais além do desflorestamento; e
- Introdução de novas doenças na região, devido o aumento da migração induzida e favorecida pela hidrovia.

Por outro lado, para BUCHER & HUSZAR (1995), devem ser considerados, como impactos positivos, a geração de empregos e o aumento da produção.

É possível avaliar os principais impactos ambientais para cada modal de transporte em termos de custo social, conforme apresentado na **Tabela 1** abaixo:

Tabela 1 – Impacto Ambiental dos Modais de Transporte

CUSTOS AMBIENTAIS	AÉREO	FERROVIÁRIO	HIDROVIÁRIO	RODOVIÁRIO	TOTAL (%)
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	2	4	3	91	100
POLUIÇÃO SONORA	26	10	0	64	100
OCUPAÇÃO DO SOLO	1	7	1	91	100
CONSTRUÇÃO/MANUTENÇÃO	2	37	5	56	100
ACIDENTES	1	1	0	98	100
TOTAL (%)	6,4	11,8	1,8	80,0	100

Fonte: AHRANA, 2007

Analisando-se o custo ambiental, percebe-se que o transporte aquaviário, comparativamente com os outros modais de transporte, leva uma nítida vantagem sobre os demais. No entanto, todo projeto hidroviário deve abarcar uma série de estudos que objetivem avaliar as alterações decorrentes da implantação de barragens com eclusas, dragagens, derrocamentos e na formação de comboios. É preciso analisar a viabilidade econômica à luz dos impactos ambientais e, assim, evitar que ganhos econômicos não resultem em desproporcionais perdas ambientais.

2.2 POTENCIAL DA REDE HIDROGRÁFICA BRASILEIRA

Silva *et al* (2007) revela que a disponibilidade de infra-estrutura hidroviária no país é cerca de 50.000 km, abrangendo a costa litorânea. Desta forma, a rede hidroviária estaria habilitada ao desenvolvimento da navegação por cabotagem e a rede hidroviária interior estaria formada pelos estirões navegáveis dos rios, lagos, lagoas e canais, apresentada na **Tabela 2**. Esta rede é da mesma ordem de grandeza da malha rodoviária pavimentada sob jurisdição federal.

Tabela 2 - Expansão da Rede Hidroviária Brasileira

BACIA	ESTADOS	EXTENSÃO APROXIMADA (KM)			RIOS
		NAVEGÁVEIS	POTENCIAIS	TOTAL	
Amazônica	AM, PA, AC, RO, RR, AP	18.300	723,5	19.023,5	Amazonas, Solimões, Negro, Madeira, Purus, Juruá, Tapajós, Teles Pires.
Nordeste	MA, PI	1.740	2435	4.175	Parnaíba, Balsas, Mearim, Pindaré.
Tocantins / Araguaia	TO, MT, PA, GO, MA	2.200	1.300	3.500	Tocantins, Araguaia, das Mortes
São Francisco	MG, BA, PE, SE	1.400	2.700	4.100	São Francisco, Grande, Corrente
Leste	MG, ES, RJ	-	1.094	1.094	Paraíba do Sul, Doce, Jequitinhonha
Paraná	SP, PR, SC	1.900	2.900	4.800	Paraná, Tietê, Paranaíba, Grande, Ivaí, Ivinhema.
Paraguai	MT, MS, PR	1.280	1.815	3.095	Paraguai, Cuiabá, Miranda, São Lourenço, Taquariejauro.
Sudeste	RS	600	700	1.300	Jacuí, Taquari, Lagoa dos Patos, Lagoa Mirim.
Uruguai	RS, SC	-	1.200	1.200	Uruguai, Ibicuí.
Total		27.420	14867,5	42.287,50	

Fonte: Estudo de Quantificação dos Cenários do PNRH (SRH/MMA - OEA, 2006)

Para que seja possível aproveitar todo o potencial de extensão navegável dos rios brasileiros, tornam-se necessárias obras de intervenção entre os estirões já navegáveis. Para a ADA (2006), a intervenção localizada de obras de dragagem e derrocamento e as sinalizações e balizamentos, seriam suficientes para tornar possível a utilização perene dos rios Tocantins e Araguaia (**Figura 2** e **Tabela 3**). Desta forma, atenderia às cargas agrícolas provenientes das safras de grãos das regiões Norte e Centro-Oeste.



Figura 2 - Divisão Hidrográfica Nacional

Tabela 3 - Comparativo entre a largura do rio e a largura média do canal

RELAÇÃO LARGURA DO RIO X LARGURA DO CANAL		
HIDROVIA	LARGURA MÉDIA DO RIO (m)	LARGURA MÉDIA DO CANAL (m)
Madeira	1.000	35,2
Solimões	1.210	35,2
Amazonas	2.000	35,2
Guamá - Capim	1.100 – 300	35,2
São Francisco	600	35,2
Araguaia	700	35,2
Tocantins	600	52,8
Paraguai	700	52,8
Tietê-Paraná	120	48,8
Jacuí – Taguari – Lagoa dos Patos	-	52,8

Fonte: MMA, 2005

Em 1969 a hidrovia Tietê-Paraná foi uma das primeiras contempladas com a instalação de eclusas para transposição da barragem de Bariri. Porém, nos últimos 20 anos, os

investimentos no setor hidroviário foram rareados. De forma previsível, houve concentração do transporte de cargas no modal rodoviário e, conseqüentemente, a sobrecarga deste modal em detrimento da utilização do sistema hidroviário. Atualmente, os baixos custos de implantação e manutenção das hidrovias têm mostrado sua viabilidade econômica para o transporte de grandes volumes e de baixos custos unitários, fato comprovado pelo crescimento de índices representativos na distribuição entre os modais para transporte de cargas (ANA, 2007).

As hidrovias no Brasil geridas pelo Departamento Nacional Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), através de sua Diretoria de Infra-Estrutura Aquaviária (DAQ), na Gerência de Hidrovias e Portos Interiores (GEHPAQ), atualmente conta com nove unidades hidroviárias abaixo relacionadas e representadas na **Figura 3**:

- AHIMOC - Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental;
- AHIMOR - Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental;
- MINOR - Administração das Hidrovias do Nordeste;
- AHIPAB - Administração das Hidrovias do Parnaíba;
- AHITAR - Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia;
- AHIPAR - Administração da Hidrovia do Paraguai;
- AHSFRA - Administração da Hidrovia do São Francisco;
- AHRANA - Administração da Hidrovia Paraná;
- AHSUL - Administração das Hidrovias do Sul.



Figura 3 - Jurisdições das Unidades Hidroviárias

Os pontos abordados neste trabalho levam em consideração as condições de navegabilidade, segurança e tráfego, de forma que a hidrovia seja viável o ano inteiro (na época das cheias e da seca). A via navegável é uma faixa imaginária sobre o rio, que não existe fisicamente, mas consta nas cartas e mapas náuticos, obedecidas com precisão pelas embarcações, por meio de bóias e placas de sinalização (ALMEIDA, 2004).

2.3 COMBOIO-TIPO UTILIZADA NA NAVEGAÇÃO DAS HIDROVIAS BRASILEIRAS

Segundo o DHN (2000) “as embarcações fluviais devem ter características adequadas às possibilidades de navegação da hidrovia a que se destinam. Assim sendo, são necessários estudos individuais visando o estabelecimento de embarcações-tipo para cada hidrovia em particular”.

Portanto as embarcações devem ser compatíveis com as possibilidades da via navegável. O comboio-tipo é composto por um empurrador e de uma ou mais barcaças, como apresentado na **Figura 4**.

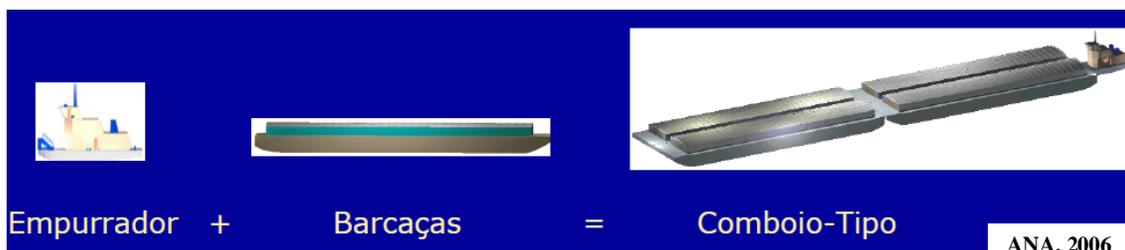


Figura 4 - Formação do Comboio-Tipo

Ainda segundo o DHN (2000), é possível definir algumas características gerais para as embarcações fluviais, como:

- Pequeno calado, compatível com a mínima lâmina d'água normalmente encontrada na hidrovia;
- dimensões adequadas aos raios de curvatura das curvas da hidrovia;
- proteção para os apêndices do casco (lemes, hélices, pés-de-galinha, etc.);
- boas características de manobra;
- estabilidade dinâmica para guinadas bruscas;
- ampla visibilidade do passadiço;
- comando das máquinas no passadiço;
- recursos para desencilhe por meios próprios;
- capacidade adequada de armazenagem de combustível e recurso para tratamento da água do rio;
- disponibilidade de radar com grande poder de discriminação em distância (ótimo recurso para evitar bocas falsas, sacados, etc.);

– disponibilidade de holofote com foco de luz direcional, concentrado, sem formação de halo; e

– disponibilidade de ecobatímetro capaz de determinar profundidades muito pequenas e indicar continuamente o perfil do fundo.

Nas duas últimas décadas muitas mudanças ocorreram para tornar a navegação interior mais segura e eficiente, resumidamente o DHN (2000) destaca as seguintes:

- utilização, cada vez mais intensa, de comboios de empurra, na maior dimensão compatível com a via;

- utilização de automotores em canais e alguns rios menores, para transporte rápido, entre pontos fixos, especialmente de cargas de rápido manuseio nos portos (granéis);

- especialização das embarcações, visando a determinados tipos de carga;

- utilização dos modernos meios eletrônicos para facilitar e aumentar a segurança da navegação (radar, ecobatímetro, radiotelefonia, cartas eletrônicas, etc.);

- navegação ininterrupta (diurna e noturna), graças a balizamento apropriado e emprego de tripulantes em número que permita o necessário rodízio;

- aumento da potência dos motores, melhoria dos sistemas propulsivos e de manobras, e emprego dos modernos métodos de construção naval;

- busca de padronização das dimensões; e

- procura de unificação das cargas diversas, com o uso de contêineres e outros equipamentos similares.

Segundo avaliação da AHITAR (2009) a embarcação tipo para a qual a Hidrovia Araguaia-Tocantins vem sendo preparada para comboio de empurra composto de quatro chatas e um empurrador, como ilustra a **Figura 5**.



Figura 5 - Embarcação adotada na navegação do Rio Tocantins, empurrador: 18,3m x 8,0m e chata: 45,0m x 8,0m

A dimensão total do comboio (**Figura 6**) deve ter 108,00m de comprimento, 16m de largura (boca) e calado (fundo) máximo de 1,5m em águas mínimas. Também foi considerada 35m para a largura da rota de navegação.

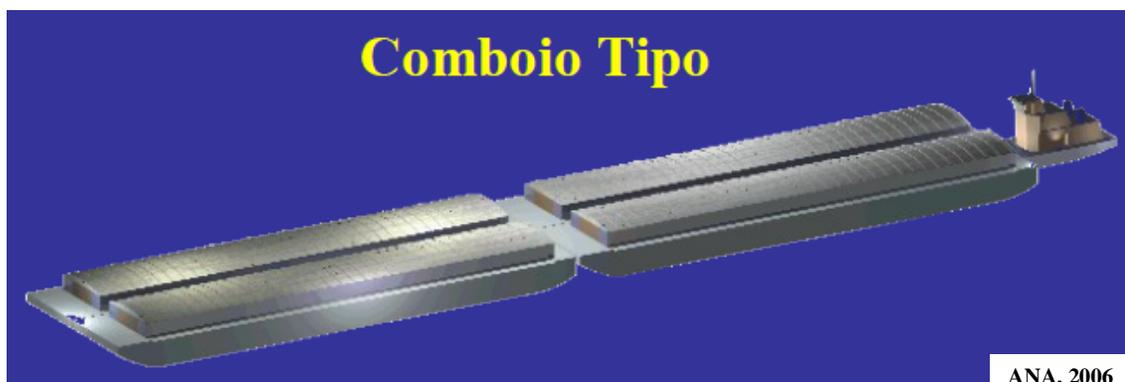


Figura 6 - Comboio completo: 108,3 x 16 x 1,5m

CAPÍTULO 3

CARTOGRAFIA NÁUTICA: ELABORAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DA CARTA NÁUTICA ELETRÔNICA

3.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

A execução e o controle dos levantamentos hidrográficos, bem como a produção e edição das cartas náuticas brasileiras, são atribuições da Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN, da Marinha do Brasil. Os serviços hidrográficos executados pela DHN são reconhecidos pela Organização Hidrográfica Internacional – IHO, devido à sua qualidade e precisão.

Existem, ainda, algumas empresas privadas que realizam seus próprios levantamentos ou fazem a conversão das cartas já existentes para formatos específicos, mesmo porque a DHN tem dificuldades para realizar o mapeamento de toda a plataforma continental e das águas sob jurisdição brasileira, como consta da Portaria 121/MB/2003.

PAIS (2000) afirma que a coleta de informação hidrográfica representa um custo muito elevado e exige grande esforço em meios humanos e materiais. A necessidade premente de troca de dados entre os produtores oficiais de informação náutica foi o ponto de partida para a junção de esforços entre a IHO, a *International Maritime Organization* (IMO) e as empresas de *softwares de navegação*, tendo como único objetivo compilar e editar as normas para a existência de um formato único na transferência de dados.

Em 1996, após anos de debates e evolução, finalmente foram publicadas as normas da IHO para "transferência de dados digitais para a informação hidrográfica" ou, simplesmente, S-57/3. Estas normas buscavam garantir que os produtores da informação cartográfica oficial estruturassem seus dados, envolvendo um grande esforço na formação de recursos humanos altamente qualificados, especialmente no que diz respeito ao extenso e completo controle da qualidade dos dados.

Apesar dos acidentes marítimos não serem tão frequentes quanto os acidentes da viação, os seus danos são substancialmente maiores, incluindo perdas de vidas e carga, danificando irreversivelmente o meio ambiente, provocando o encerramento de portos e

motivando o aumento dos seguros. De fato, cerca de 80% dos acidentes marítimos são causados por falha humana (PAIS, 2000). Assim, por decisão governamental dos Estados Unidos foi criada uma comissão de trabalho EUA-Canadá, cujo objetivo foi o de estudar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema de navegação mais eficiente na determinação da posição do navio.

3.2 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS E O DHN

A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) dispõe do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), cuja missão é contribuir para o apoio à aplicação do poder naval, por meio da realização de serviços de Hidrografia, Oceanografia, Cartografia e Meteorologia, voltados para a garantia das atividades de segurança da navegação na área marítima de interesse do Brasil e para projetos nacionais de pesquisa em águas brasileiras, além daqueles resultantes de compromissos internacionais (DHN, 2008).

A DHN na categoria de Serviço Hidrográfico Brasileiro tem como papel manter, todas as Cartas Náuticas em Águas Jurisdicionais Brasileiras atualizadas. As Normas Técnicas para construção das cartas náuticas obedecem às Especificações de Cartas Internacionais da IHO e funcionam como padrão básico para a construção de todas as cartas náuticas, pelos países membros da IHO. Além das cartas convencionais (em papel), o CHM produz, também, cartas digitais no formato *raster* e vetoriais (DHN, 2008).

A DHN (2000) conceitua as cartas náuticas eletrônicas, como sendo a representação dos acidentes terrestres e submarinos. Elas fornecem informações sobre profundidades, perigos à navegação (bancos de areia, pedras submersas, ou qualquer outro obstáculo à navegação); natureza do fundo; auxílios à navegação (faróis, faroletes, bóias, balizas, luzes de alinhamento, radiofaróis, etc.); altitudes e pontos notáveis; linha de costa e de contorno das ilhas; elementos de marés; correntes e, magnetismo.

A DHN (1999) caracteriza as vias navegáveis a partir de informações como:

- Calado máximo

- Largura da rota de navegação
- Raio das Curvas
- Declividade / Velocidade da água

Assim, as vias navegáveis, conforme o gabarito, podem ser classificadas como demonstra a **Tabela 4** abaixo:

Tabela 4– Classificação das Vias Navegáveis

Gabarito	Características	Profundidade (m)	
		75% do tempo	25% do tempo
I	“Especial” Para os rios onde a navegação marítima tenha acesso	*	*
II	Para rios de grande potencial de navegação	> 2,50	2,00 – 1,50
III	Para rios de potencial médio de transporte	> 2,00	1,50 – 1,20
IV	Para rio de menor potencial	> 1,50	1,20 – 0,80
V	“Reduzido” Para rios interrompidos ou onde a navegação tem possibilidade remota	*	*

Fonte: Plano Nacional das Vias Navegáveis Interiores, 1989 In: ANA, 2007.

Como apresentado na Port. 121/MB/2003, a edição de cartas náuticas, atlas ou croquis, em papel ou em meio digital, destinados à navegação interior ou a atividades de esporte e recreio, poderão ser efetuadas por entidades nacionais públicas ou privadas, sob licença do CHM. Caberá à DHN, mediante convênios ou contratos, nos termos da legislação em vigor, efetuar a homologação final dos produtos.

Para a geração de mapas de navegabilidade devem-se avaliar quais dados serão mais adequados à interpretação das feições de interesse. Os parâmetros mais importantes serão a disponibilidade, confiabilidade e a aplicabilidade dos dados (ARAÚJO *et al*, 1996).

A evolução tecnológica ocorrida nas duas últimas décadas, como o surgimento do GPS (*Global Positioning System*), trouxe novas possibilidades para aumentar a segurança da navegação. Uma dessas possibilidades é a carta náutica eletrônica (ENC). Existem,

basicamente, dois formatos de cartas digitais: *raster* (digitalizada como imagem e dividida em *pixels*) e vetorial (relaciona as características espaciais – pontos, linhas e áreas – dos objetos) (SEBASTIÃO, 2008).

Na elaboração da ENC também são vislumbrados os limites da carta (célula), o formato dos dados e dos metadados¹, tamanho do arquivo e a metodologia de atualização. O grande desafio para o Brasil é ter sua área marítima navegável coberta com ENC, até 2010, seguindo as normas estabelecidas pelo IHO (SEBASTIÃO, 2008).

Como aporte à ENC surge o Sistema de Informação Marítima, de que o Sistema de Informação para Navegação (ECDIS) é um exemplo. O ECDIS automatiza algumas das tarefas humanas, reduzindo o tempo e o esforço de marcar a posição do navio. O posicionamento é integrado pelo uso de um sistema de grande exatidão. A disponibilidade 24h/dia da constelação de satélites de GPS, apenas permitia um rigor de 100 m na posição, insuficiente para algumas das funcionalidades de um ECDIS. O desenvolvimento da tecnologia associada ao GPS, nomeadamente o sistema diferencial (DGPS) oferece agora uma exatidão na ordem do metro e até mesmo de centímetros, o que disponibiliza ao navegador a possibilidade de este efetuar, em segurança, operações de atracação sem visibilidade ou navegar em cartas de grande escala.

Os ECDIS são sistemas de alta tecnologia capazes não só de visualizar a ENC como de integrar todo um conjunto de informações fornecidas por diversos equipamentos, que contribui para a condução segura da navegação. Sua tecnologia permite que o navegador tenha, num só monitor, informações de diversas fontes, distâncias e azimutes do radar, posicionamento absoluto GPS, velocidade dada pelo odômetro, informação meteorológica, plano de navegação, velocidade e direção do vento entre outros.

¹ Metadados são definidos como "dados sobre os dados". São modelos de representação ou abstração dos dados, com o objetivo de descrição da coleção e identificação das características de cada componente da coleção (MOURA, 2008).

3.3 IHO S 44 - STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS

A IHO S 44, 5ª edição, de “Padrões para Pesquisas Hidrográficas”, faz parte de uma série de publicações da IHO, cuja finalidade é de garantir a segurança da navegação. Essa publicação prevê apenas os padrões mínimos ficando os órgãos responsáveis pelo levantamento de ajustar as normas as suas necessidades. Para a compreensão dos padrões mínimos de levantamento é preciso entender as principais definições do S 44:

Detecção das feições (*Feature detection*): A habilidade de um sistema em detectar feições de um tamanho definido. Estas normas especificam o tamanho das feições que, para a segurança da navegação, deveriam ser detectadas durante o levantamento.

Varredura do fundo do mar (*Full sea floor search*): um método sistemático de exploração do fundo do mar encarregado de detectar certas feições, usando sistemas de detecção adequados, procedimentos e pessoal treinado. Na prática, é impossível alcançar 100% cobertura batimétrica.

Profundidades reduzidas (*Reduced depths*): observar as profundidades inclusive todas as correções relacionadas para processo de levantamento e redução para o uso datum vertical.

Total propagated uncertainty (TPU): é o resultado da propagação da incerteza, quando as medidas das incertezas contribuidoras (a randômica e a sistemática) forem incluídas na propagação. A propagação da incerteza combina os efeitos das medidas de incertezas de diversas fontes sobre as incertezas dos parâmetros calculados ou derivados.

Total horizontal uncertainty (THU): é o componente do total de incerteza propagada (TPU) calculado no plano horizontal. O THU é quantificado no plano bidimensional. Considera-se que a incerteza é isotrópica (i.e. há correlação desprezível entre erros na latitude e longitude).

Total vertical uncertainty (TVU): é o componente do total de incerteza propagada (TPU) calculado na dimensão vertical. TVU é quantificado a uma dimensão.

As exigências para o levantamento variam de acordo com profundidade e a quantidade de dados processados, para satisfazer uma gama de necessidades os levantamentos foram classificados em quatro ordens:

Ordem Especial – é o mais rigoroso, planejado para atender áreas mais críticas onde há a presença de baixios. Neste levantamento são consideradas as áreas muito rasas, com profundidades inferiores a 40 metros. Exemplos: áreas de fundeadouro, portos e áreas críticas de canais navegáveis.

Ordem 1a – nestas áreas o mar é raso o suficiente para permitir o levantamento de feições naturais ou artificiais, no fundo oceânico, onde presença de baixios se torna menos crítica. A profundidade para esta ordem varia entre 40 metros a 100metros.

Ordem 1b – apropriada para áreas com 100 metros de profundidade, não são consideradas a presença de baixios. Não requer uma varredura no fundo do mar, onde algumas feições podem ser perdidas, embora com máximo espaçamento de linha permitido limitando o tamanho das feições. Em geral atende levantamentos em áreas de pouca navegação.

Ordem 2 – o levantamento é mais geral, realizado em áreas muito profundas acima de 100 metros, também não requer uma varredura no fundo do mar. Apenas as grandes feições são representadas.

Em relação ao posicionamento, a incerteza de uma posição é a incerteza à localização da sondagem ou feição, dentro de um sistema de referência geodésica. As posições devem ter como base o *Terrestrial Reference System* (ITRS) como, por exemplo, o WGS84. E quando, excepcionalmente, for atribuído ao *datum* horizontal local, este *datum* deveria ser amarrado a uma referência geocêntrica baseado em ITRF.

No momento do levantamento deve ser considerado a densidade e o espaçamento da sondagem. Ao mesmo tempo deve atender a detecção das feições existentes no solo oceânico e as exigências para a segurança da navegação.

Para Ordem Especial e Ordem 1a, nenhum espaçamento de linha parece ser indicado. Agora no caso da Ordem 1b e 2 os espaçamentos entre linhas poderão atingir o máximo. Mas

é preciso conhecimento prévio da natureza do solo oceânico para se decidir o melhor tamanho para o espaçamento.

No caso de áreas portuárias o S 44 destaca a importância de se conhecer a natureza do solo oceânico, e os levantamentos feitos por sonar de varredura lateral atualmente são os mais indicados.

Outro destaque importante do S 44 está na elaboração do metadado do levantamento, que deverá conter a finalidade, a data, a área, os equipamentos envolvidos, a plataforma do levantamento - o sistema de referência geodésico datum horizontal e vertical, o método de correção de velocidade e, o cálculo das incertezas. O metadado é uma parte imprescindível do registro de pesquisa digital e deverá conformar com a “IHO S-100 *Discovery Metadata Standard*”, quando este é adotado.

Apesar de a IHO definir esses padrões mínimos para cada uma das Ordens de Levantamento descrito na S-44, é indispensável que os Serviços Hidrográficos especifiquem as áreas geográficas onde cada uma dessas Ordens se aplica. No estabelecimento desses limites devem ser considerados, além dos critérios especificados pelo IHO, outros como a relevância militar, estratégica e econômica. Por sua subjetividade e importância, esta análise deve ser fonte de constante preocupação e reavaliação pelas autoridades dos serviços hidrográficos.

Os indicadores poderão advir, ainda, de outros estudos e aspectos considerados importantes por sua relevância política, econômica ou ambiental. Portanto dados considerados importantes deverão ser, sempre que possíveis coletados e seus limites geográficos especificados.

3.4 IHO S 57 - TRANSFER STANDARD FOR DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA

A norma IHO S-57 ed. 3.1 tem como objetivo a descrição de padrões mínimos para a transferência de dados hidrográficos digitais entre órgãos oficiais de hidrografia, e para a distribuição entre usuários desse tipo de informação. O padrão provê informações para o registro e compilação dos dados das ECDIS. Portanto, o grande desafio que se coloca é

permitir que a transferência e a distribuição aconteçam sem que haja perda de dados significativos.

O manual do S-57 está organizado da seguinte forma:

- Introdução geral com lista de referências e definições;
- Modelo teórico de dados no qual o padrão é baseado;
- A estrutura de dados e formato que são usados para implementar o modelo de dados;
- Regras gerais para codificar e armazenar dados no ISO8211².

Conta também com dois Apêndices A e B, o primeiro relacionado ao Catálogo de Objeto (descrição das entidades do mundo real) e o segundo contém as Especificações de Produtos (PS).

Carta Eletrônica de Navegação (ENC): tem por base Sistemas de Informação Geográfica. A norma internacional S57, que inclui um padrão para a produção de cartografia por meio de catálogo de objetos; padrões para a troca de dados hidrográficos em formato digital entre os institutos hidrográficos de vários países e sua disponibilização aos usuários finais.

A função primária do S-57 é providenciar formas de descrever as entidades existentes no mundo real relacionadas com a hidrografia.

Baseado no modelo teórico descrito pela IHO S57, assume que as entidades do mundo real podem ser subdivididas num número finito de categorias - *feature object class*, cada instância de uma classe - *feature object* - é caracterizada por atributos com valores. Entidade do mundo real: *feature object class*, atributos e valores dos atributos. Exemplo: bóia lateral - *feature object class*: bóia lateral; atributo: cor; valor do atributo: vermelho.

² O ISO 8211 tem como objetivo especificar os dados que um arquivo deve ter para que seja realizada a transferência de informações.

Tipos de *feature object* - individualizados por um acrônimo e um código específico (Figura 7):

1. Geo - contém as características descritivas da entidade do mundo real.
2. Meta - contém informação sobre outros objetos (ex. datum vertical, escala).
3. Collection - contém informação sobre as relações entre outros objetos.
4. Cartographic - contém informação sobre representação cartográfica das entidades do mundo real.

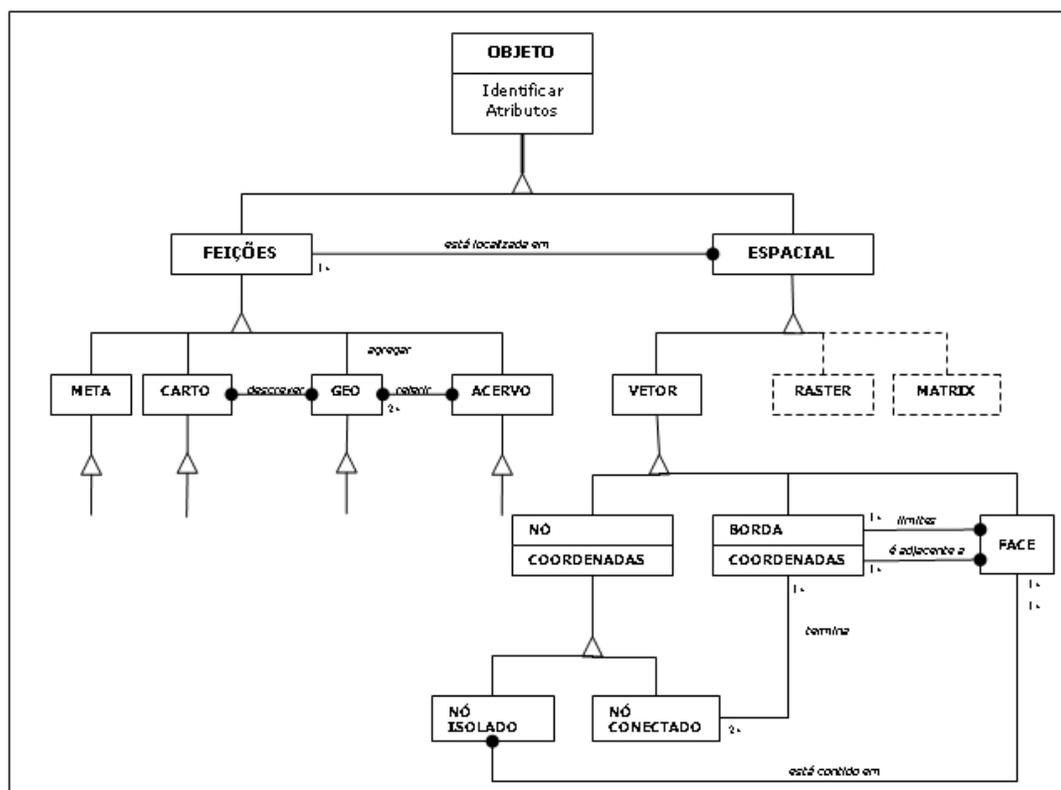


Figura 7 - Modelo Teórico de Dados da S-57

O padrão se preocupa em transformar as entidades do mundo real que são de relevância a hidrografia em registros, por meio da representação de suas feições (nó, arco e polígono) e das características espaciais (coordenadas x,y). Para tanto, o regime hidrográfico é considerado geoespacial.

O S 57 utiliza a norma internacional ISO/IEC 8211 (“*Specification for a data descriptive file for information interchange*”) como padrão para armazenar os dados. O ISO/IEC 8211 possibilita que arquivos possam ser transferidos de um sistema para outro independente de quem o fez, além de permitir a descrição de como os dados foram organizados.

Atualmente, a única especificação de produto em uso é para a Carta Náutica Eletrônica (ENC), que assegura a decodificação de forma mais rápida e eficiente, porque ao mesmo tempo pode definir perfis de aplicação, como por exemplo, provisão dos dados iniciais e atualizações de registros de maneira precisa e consistente.

O S-57 tem sido bastante empregado na codificação de cartas náuticas eletrônicas, no entanto era pretendido que o mesmo fosse amplamente utilizado para apoiar a transferência de todo tipo de dados hidrográficos, mas isso não aconteceu porque o S-57 não foi aceito como padrão na maioria dos softwares de *GIS (Geographic Information System)*.

Na tentativa de aprimorar o S-57 e atender o ISO19100³, cujo objetivo é desenvolver séries de padrão de informação geográfica e tornar atraente uma gama extensiva de produtos digitais e padrões de transferência de dados hidrográficos é que em março de 2008 o IHO lança uma nova proposta, o S-100. O S-100 é uma “filosofia”, que segundo prognósticos de fontes mais otimistas deve entrar em vigor ainda em 2011, mesmo que isso ocorra, teremos pela frente pelo menos cinco anos de transição para a completa adoção.

Para o trabalho proposto a questão que se coloca é a falta de informações para aplicação em áreas águas interiores, já que as especificações propostas só contemplam cartas náuticas eletrônicas para ambientes marinhos. Outra questão importante é que a manutenção das informações é inflexível, os padrões durante períodos prolongados se tornam ineficientes. A estrutura em que foi montado não pode servir de suporte as exigências futuras, por exemplo, para mapeamentos batimétricos feitos no formato *grid* ou em variação temporal da informação.

³ ISO19100 tem como objetivo a padronização de dados referente à Informação Geográfica e a Geomática (*Geographic Information and Geomatics*).

As normas elaboradas pelo IHO, apesar de não atenderem especificamente os levantamentos executados em águas internas, contribuem para nortear os trabalhos que estão sendo desenvolvidos pelo Inland ENC Harmonization Group, grupo que hoje conta com mais de 38 países membros e que buscam a padronização dos levantamentos executados em águas interiores.

3.5 PADRONIZAÇÃO DE CARTA NÁUTICA ELETRÔNICA (ENC) E DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA NAVEGAÇÃO (ECDIS)

O Inland ENC Harmonization Group (IEHG) tem como objetivo tornar compatível o padrão de exibição de ECN para águas interiores com o padrão ECN marítimo já desenvolvido pelo IHO por meio da S-52, S-57 e seus sucessores S-100 e S-101. Essa preocupação nasceu da necessidade de ser navegar com segurança em as áreas de contato, por meio de estuários, existentes entre rios e mares.

Segundo esse documento o banco de dados para as cartas eletrônicas trabalham com conteúdos unificados, formatadas numa lógica estrutural para que possam servi de base para as ECDIS interior. Além de todas as informações essenciais de uma carta, ela pode conter informações adicionais que a autoridade competente considerar como útil para navegação.

A visualização das cartas náuticas eletrônicas interiores por meio de um ECDIS deve conter diferentes densidades de informações para exibição. A primeira chamada de base de exibição, isto é, apresenta informações mínimas requeridas em qualquer área geográfica. A segunda é a exibição padrão, significa um plano de fundo para qualquer área mesmo não possua nenhuma informação. E por fim somados a exibição padrão são representadas todas as demais camadas de informação, individualmente, dependendo da demanda do operador.

Para o IEHG (2006), as cartas náuticas eletrônicas interiores devem conter: a) informações atualizadas; b) não permitir pelo usuário a alteração dos conteúdos na edição original; c) além de incluir as seguintes informações específicas para águas interiores: nível médio da água, contorno da costa, contorno das represas, limites do canal navegável (tanto

imersos quanto submersos), localização de sinalização oficial (balizas, bóias, luzes, marcas) e extensão do canal navegável (em quilômetros e milhas náuticas).

É importante destacar que o IEHG mantém para as ENC's interiores, o mesmo modelo de dados teórico e a mesma estrutura de dados, proposto pela IHO S-57.

CAPÍTULO 4

GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E AS IMPLICAÇÕES NA NAVEGABILIDADE

A Geomorfologia Fluvial abrange o estudo tanto dos cursos de água como os das bacias hidrográficas (CUNHA, 2007). As características do canal fluvial, a tipologia das barras e a morfologia da planície definem o padrão em que elas ocorrem (MIALL 1978, 1985; SELLEY 1978; FRIEDMAN E SANDERS, 1978; WALKER E CANT 1979; COLLINSON 1986). O presente trabalho aborda os processos fluviais e as formas resultantes do escoamento das águas interiores ao longo de um trecho a jusante de uma barragem.

4.1 MORFOLOGIA DA REDE DE DRENAGEM

Os arranjos espaciais que o leito apresenta ao longo do rio refletem o padrão que se observa na dimensão plana (CHRISTOFOLETTI, 1981). Os tipos de canais representam mecanismos de ajuste entre as variáveis aplicadas nesse sistema geomorfológico.

A geometria do rio é resultante do ajuste do canal à sua seção transversal e reflete o inter-relacionamento entre as variáveis: descarga líquida, carga sedimentar, declive, largura do canal, profundidade do canal, velocidade do fluxo e rugosidade do leito⁴ (CUNHA, 2007).

Cada tipo de canal afeta a resistência do fluxo de diferentes maneiras. Ao longo do perfil longitudinal⁵ a fisionomia do rio pode ser descrita como retilíneo, anastomosado e meandrante, constituindo o padrão dos canais, como serão visto a seguir. O conhecimento das características morfológicas e dos processos envolvidos em cada categoria é de suma importância para os planejamentos sobre a utilização das áreas ribeirinhas e do leito do canal (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Portanto, o padrão de canal sintetiza as características da calha fluvial, e permite estabelecer inferências sobre a dinâmica dos processos de erosão e sedimentação, uma vez

4 A rugosidade do leito representa a variabilidade topográfica verificada na superfície do leito, pela disposição e ajustamento do material detrítico e pelas formas topográficas do leito (CHRISTOFOLETTI, 1981).

5 O perfil longitudinal representa a relação entre a altimetria e o comprimento do curso de água, para diversas localidades situadas entre a nascente e a foz (CHRISTOFOLETTI, 1981).

que as mencionadas características são resultados desses processos, conforme advogado por Kellerhald *et al* (1976) e Dietrich (1985).

Os cursos d'água naturais retilíneos são pouco frequentes, em geral representam trechos ou segmentos de canais curtos com exceção dos canais controlados por estruturas tectônicas, em vertentes íngremes, algumas planícies deltaicas e nos canais localizados em restingas, controlados por cordões arenosos. Em geral o canal reto possui margens retilíneas e a seção transversal é estreita e profunda (CHRISTOFOLETTI, 1981).

No entanto, segundo Cunha (2007) embora o canal seja considerado reto o fluxo do talvegue⁶ não é. A divagação do talvegue de uma margem para outra nos canais retos com leitos inconsolidados apresenta lineamento sinuoso, que gera perfis transversais com pontos de maior profundidade e locais mais rasos, de agradação⁷. Essa zona de acumulação é o que dá origem a alternância de bancos ou barras de sedimentos de um lado a outro do canal, como representado na **Figura 8**.



Fonte: Tipos de padrões de canais. (Cunha, 2007)

Figura 8 - Padrão de Canal Retilíneo

⁶ O talvegue é a linha que une os pontos de maior profundidade ao longo do canal.

⁷ A agradação assim com a degradação são fenômenos relacionados ao entalhamento e a deposição da carga sedimentar sob longos períodos de tempo.

Os canais anastomosados caracterizam-se por uma multiplicidade de canais, pequenos e rasos, que se subdividem e se reúnem aleatoriamente separados por bancos e ilhotas. Portanto em geral o perfil transversal é largo, raso e grosseiramente simétrico, com pontos altos (topos das ilhas e dos bancos) e baixos (talvegue dos canais), conforme **Figura 9**. Devido às flutuações das descargas e do rápido transporte dos sedimentos atacadas pela erosão apresenta contínuas migrações laterais (margens frágeis) (CUNHA, 2007).



Fonte: Tipos de padrões de canais. (Cunha, 2007)

Figura 9 - Padrão de Canal Anastomosado

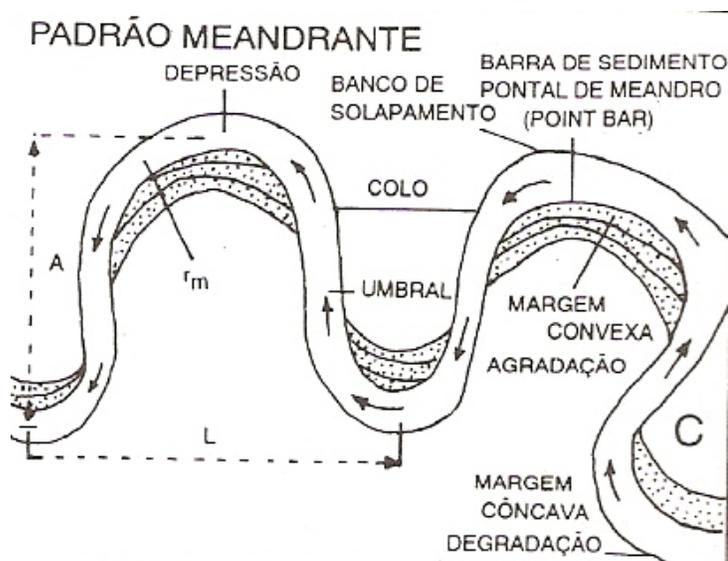
Segundo CHRISTOFOLETTI (1981), na época das cheias, muitos bancos e ilhotas são submersos, embora o entalhamento fluvial, a fixação da vegetação e a maior retenção de sedimentos possam criar condições para que muitas permaneçam acima do nível das águas.

Cunha (2007) conclui que a formação do padrão anastomosado se estabelece por meio das seguintes condicionantes: a disponibilidade da carga do leito, a variabilidade do regime fluvial e a existência de contraste topográfico acentuado. Esse padrão é o que melhor expressa a relação entre débito, carga detrítica e os mecanismos de transporte.

Estudos realizados por Schumm (1972) analisaram a influência da declividade e da carga sedimentar sobre os padrões dos canais. Descobriram que controlando a variações de declividade e mantendo constantes os débitos de água, era possível que um canal reto contendo material aluvial e com baixas declividades, permaneceria reto. No entanto em declividade maiores ocorreria meandramentos. A medida que aumentava a declividade da superfície aluvial, também aumentava a velocidade do fluxos e a força de cisalhamento atuando sobre o leito e sobre as margens. Aumentando a declividade do canal chegava-se a atingir um valor limiar acima do qual o curso sinuoso se tornava um canal reto anastomosado.

A declividade e a descarga em relação aos canais fluviais são importantes critérios na reconstrução de paisagens aluviais a partir de perfis de terraços e de depósitos aluviais.

O mecanismo de formação do meandro compreende a capacidade em erodir, transportar e depositar material do meio fluvial, especialmente em curvas onde o gradiente de velocidade, aliado à conformação física e geológica do leito, causa correntes secundárias com movimento rotacional contra as margens, originando processos erosivos e de deposição, onde o material é erodido da parte côncava, externa, transportado para jusante e depositado na parte convexa, interna, como mostra a **Figura 10** (CHRISTOFOLETTI, 1981).



Fonte: Tipos de padrões de canais. (Cunha, 2007)

Figura 10 - Padrão de Canal Meandrante

Em áreas localizadas à jusante de reservatórios, como no caso deste trabalho, o regime do rio sofre significativas modificações, devido ao controle artificial das descargas líquidas e de sedimentos. As mudanças ocorridas no regime das águas, neste setor do rio, acarretam significativos efeitos nos processos do canal, tais como entalhe do leito, erosão das margens e deposição à jusante, atingindo longas distâncias (SCHUMM, 1985).

4.2 SEDIMENTOLOGIA

O estudo do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas exercidas pelo homem. Para a navegação, a deposição de sedimentos nos canais, a formação de deltas e o

movimento de bancos de areia no fundo dos rios são os maiores problemas. Todas as atividades que dependem de bombeamento de água sofrem prejuízos quando da presença de sedimentos na fonte de captação, seja por entupimento ou por desgaste desses sistemas. Além disso, os sedimentos têm ampla influência sobre a qualidade dos recursos hídricos, o que pode causar impactos diretos na saúde humana.

O conhecimento do comportamento hidrossedimentológico de um rio pode contribuir, por exemplo, para a manutenção e operação de hidrovias. Com o conhecimento prévio das zonas de deposição e produção de sedimentos, os trabalhos relativos a essa atividade podem ser mais facilmente viabilizados.

Os sedimentos presentes no curso d'água são partículas sólidas originadas da erosão dos solos e das rochas da bacia contribuinte ou do próprio leito do rio. Além dos minerais que compõem os sedimentos, eles ainda são catalisadores, carreadores e agentes fixadores de outros agentes químicos e de matéria orgânica.

A produção e a deposição de sedimentos de um rio dependem fundamentalmente de suas características naturais: chuvas, tipos de solo, topografia, densidade de drenagem, cobertura vegetal e área de drenagem; e de influências antrópicas como: o uso e a ocupação dos solos, o uso da água, as alterações no curso d'água e outras.

As formas topográficas produzidas no leito de um canal aluvial são elementos morfológicos individuais, distintos, maiores que as partículas de areia ou cascalho presentes em leito arenosos ou cascalhento (CHRISTOFOLETTI, 1981). É importante salientar que nos canais fluviais, a rugosidade do material detrítico componente do leito e das margens oferece resistência ao fluxo.

A topografia do leito se apresenta com rápida mutabilidade. Isso porque, o material detrítico é bastante inconsistente, tornando mais fácil a movimentação dos sedimentos e a esculturação das formas topográficas. A dinâmica do fluxo, os mecanismos de transporte e os processos morfogenéticos atuantes no curso de água só agem quando houver força suficiente para ultrapassar a resistência (SCHUMM 1972, CHRISTOFOLETTI 1981, CUNHA, 2007)

Métodos de prospecção acústicos e eletromagnéticos têm sido amplamente utilizados nos estudos de fácies morfológicas (processo-forma) e estruturação interna de barras e dunas de areia nos ambientes fluvial e marinho, para descrever as seqüências deposicionais antigas e modernas, bem como suprir dados para modelos sedimentológicos (SAMBROOK SMITH *et al*, 2006; HUGENHOLTZ *et al*, 2007).

A partir do conhecimento geomorfológico do rio e da carga de sedimento que erodi e se deposita no leito é possível subsidiar as obras de intervenção que serão necessárias para garantir a passagem dos comboios. As principais obras são:

a) dragagem consiste em aprofundar periodicamente os pontos altos do canal navegável. O perfil batimétrico do canal navegável em um rio de fundo móvel (**Figura 11**) toma o aspecto de uma sucessão de longos trechos com boas profundidades, separados por curtos trechos de baixa profundidade, que dificultam a navegação e limitam os calados das embarcações.



Figura 11 - Área de dunas a ser dragada (Fonte:DHN, 2000)

As hachuras representam os cortes que seriam abertos por dragagem (**Figura 11**). Esses baixios se recompõem durante cada enchente, de modo que a dragagem tem que ser permanente. Segundo o DHN (2000) foi descoberto um processo para aprofundamento dos baixios que dispensa dragagens. Isto porque dispositivos fixos ou flutuantes são colocados no fundo, a montante do baixio a desbastar, em posição estudada, de modo a reproduzir artificialmente o movimento helicoidal das águas, que se verifica naturalmente nas curvas dos rios.

b) derrocamento garante o aprofundamento na massa rochosa de um canal de profundidade e largura suficientes.

c) sinalização e balizamento, para orientação aos navegantes sobre a posição do eixo de navegação na hidrovia, feito pela colocação de bóias com reflexivo luminoso. O balizamento deve indicar continuamente ao navegante a ação a empreender para manter-se navegando corretamente no canal

4.3 O EMPREGO DE SENSORES REMOTOS NO ESTUDO DA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL

Os sensores remotos segundo o INPE (2008), podem ser definidos como “sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos capazes de detectar e registrar, sob a forma de imagens ou não, o fluxo de energia radiante refletido ou emitido por objetos distantes”.

Os sensores remotos têm se mostrado cada vez mais úteis na caracterização de determinadas grandezas físicas dos mais diversos ambientes, objetos de investigação científica nos últimos anos. Sendo possível obter uma visão do conjunto de grandes áreas na superfície terrestre, assim como observar sua dinâmica. Dentre os diversos elementos identificados (água, vegetação, solo, áreas urbanas) os sistemas fluviais possuem destaque em imagens de diferentes resoluções espaciais (FLORENZANO, 2002).

As técnicas de sensoriamento remoto fornecem um meio alternativo e complementar para se obter periodicamente e, relativamente a baixo custo, informações sinóticas das condições superficiais da qualidade da água (NOVO, 1988), além disso, trouxe novas possibilidades ao ampliar a representatividade das amostragens convencionais. O sensoriamento remoto tem sido empregado em diversos trabalhos de análise da dinâmica fluvial. Na estimativa das profundidades (PERRY, 1986; NOVO & TUNDISI, 1988; SILVA *et al*, 2008; MARINHO & MELO, 2009) no estudo dos sistemas aquáticos (SILVA, 1996), e na avaliação da turbidez (SILVA *et al*, 1996; CORRÊA *et al*, 1996).

A obtenção de batimetria em áreas rasas a partir de imagens obtidas por sensores remotos, apesar de não possuir a acurácia das cartas náuticas é de grande utilidade tanto para o planejamento de estudos e modelagem ambiental, quanto para a navegação de embarcações de pequeno porte. Esse procedimento tem se mostrado eficaz, especialmente quando se utiliza

imagens de satélites multiespectrais (PHILPOT, 1989; NORDMAN *et al*, 1990; MENESES *et al*, 1994; KRUG & NOERNBERG, 2005, 2007).

A partir do momento que se opta por utilizar dados obtidos de sensores remotos é necessário avaliar as vantagens e desvantagens na hora de escolher o melhor sensor. A eficiência de um sensor depende antes de tudo do objeto que se quer estudar e os objetivos propostos, daí avaliar a frequência na obtenção de dados, o ângulo de visada, as resoluções (espacial, espectral e radiométrica) e os custos .

Neste presente trabalho optou-se pelos sensores multiespectrais *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo do satélite Landsat 7, disponíveis gratuitamente no *site* do INPE. Hoje já estão disponíveis imagens de maior resolução espacial chegando a menos de 1 metro de resolução (IKONOS), mas de custo ainda muito alto. No entanto já existe no mercado imagens gratuitas com 2,5 metros de resolução, dos satélites CBERS-2B e ASLO, o problema é que até o momento não estão disponíveis para o trecho estudado.

As imagens dos satélites Landsat fornecem cobertura bidimensional contínua melhor que as séries de pontos de profundidade que geralmente são obtidas por medições feitas a bordo de barcos. A repetição da cobertura pode ser feita a cada 16 dias, permitindo a separação de feições permanentes de outras não permanentes, tais quais qualidade da água e variações atmosféricas. A repetitividade da cobertura também permite atualizações de profundidades em regiões arenosas, as quais podem mudar por processos de erosão e deposição ao longo do tempo ou depois de seguidas tempestades (NORDMAN *et al.*, 1990).

Um dos métodos desenvolvidos para delinear feições na água e realçá-las em uma imagem de satélite multiespectral é o Índice de Diferença Normalizada da Água (Normalized Difference Water Index – NDWI). O NDWI faz uso do sinal refletido nas regiões do infravermelho próximo e do verde visível para realçar a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (MCFEETERS, 1996). O índice é calculado por:

$$(DN2 - DN4) / (DN2 + DN4),$$

onde DN2 é o valor digital do pixel na banda 2, correspondente da faixa verde do espectro visível e DN4, valor digital na banda 4, região do infra-vermelho próximo.

De acordo com McFeeters (1996), a seleção destas bandas tem a intenção de: (a) maximizar a reflectância típica de feições na água nos comprimentos de onda relativos ao canal verde; (b) minimizar a baixa reflectância no infra-vermelho próximo de feições na água; e (c) utilizar a alta reflectância no infra-vermelho próximo por feições de vegetação terrestre e solo.

Outra técnica se baseia em um método estatístico com o objetivo de reduzir a dimensão preservando ao máximo a representação de padrões e/ou a discriminação entre as classes caracterizadas pelos atributos. Neste caso são utilizados os critérios do Erro Médio Quadrático (Componentes Principais).

Essa transformação é derivada da matriz de covariância entre as bandas e gera um novo conjunto de imagens onde cada valor de *pixel* da imagem componente é uma combinação linear da soma dos valores dos *pixels* das imagens originais. O número de principais componentes é igual ao número de bandas espectrais utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo da variância das componentes (OLIVEIRA, 2006).

De forma resumida a primeira componente tem a maior variância (maior contraste) e a última a menor variância (pouca informação útil).

Além dos sensores remotos a bordo de satélites também foi possível o uso de outros sistemas de mapeamento a bordo do barco, como o ecobatímetro multifeixe. Os ecobatímetros são equipamentos utilizados para a obtenção de profundidades. Seu princípio de funcionamento baseia-se na medida acurada do tempo necessário para um pulso acústico ser transmitido, refletido pelo fundo (eco) e retornar ao receptor.

O princípio operativo de um ecobatímetro multifeixe (*Multi-Beam Echo Sounder*) é baseado na transmissão de um pulso acústico em forma de leque que, após a reflexão no fundo, é detectado por feixes múltiplos formados eletronicamente pelo transdutor.

Os ecobatímetros são constituídos basicamente de (FELIX, 1996):

- gerador de pulso: dispositivo automático que provoca a emissão de vibrações;
- gerador de alta tensão: gera uma voltagem elevada para excitação do emissor;

- emissor: converte a energia elétrica fornecida pelo gerador de alta tensão em vibrações sonoras, e as transmite para a água;

- receptor: recebe as vibrações sonoras refletidas pelo fundo do mar e as transforma em vibrações elétricas;

- amplificador: amplifica as oscilações elétricas geradas no receptor e transmite-as para o registrador; e

- registrador: transforma o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do impulso sonoro e a recepção do seu eco em registros de profundidades, em função da velocidade de propagação do som na água.

A medição do tempo necessário para o sinal atingir o fundo e voltar, junto com a aplicação de algoritmo para compensar o efeito da refração, determina a profundidade de um ponto no fundo, como ilustra a **Figura 12**. Os sensores auxiliares, sensor de movimento e sonda de velocidade do som, permitem compensar as oscilações do barco e as variações de velocidade de propagação do som na água, respectivamente, para garantir a elevada precisão do sistema de medição.

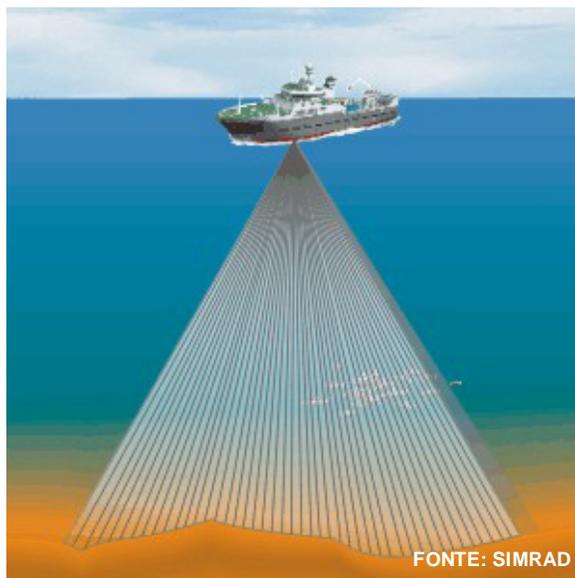


Figura 12 - Simulação do Ecobatímetro. Fonte: SIMRAD, 2008

Antes de cada levantamento, faz-se necessária a calibração do ecobatímetro visando a obtenção de medidas acuradas de profundidades. Para tal, utiliza-se um disco de calibração,

que pode ser um disco de 30 a 40cm de diâmetro, suspenso por um cabo/corda graduado. Deve-se abaixar o disco em linha reta, alinhado com o centro do transdutor, em várias profundidades, observando a profundidade no cabo graduado e a profundidade detectada pelo aparelho. A calibração deve ser realizada, no mínimo, até 70% da profundidade máxima. Através desta pode-se então ajustar os parâmetros de velocidade do som e sensibilidade do fundo.

Segundo KRUEGER (2005), o levantamento por ecobatímetros tem por objetivo realizar as medições de profundidades associadas a uma posição na superfície d'água, necessárias em áreas marítimas, fluviais, canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, visando a representação destas áreas em uma carta. As profundidades são de extrema importância para a representação das linhas isobáticas, permitindo a visualização da topografia submersa.

Os ecobatímetros multifeixe se diferenciam principalmente pela frequência dos pulsos acústicos: sistemas de baixa frequência (12 kHz) permitem varrer seções de até 5 vezes a profundidade, com alcance máximo de 11.000 m; sistemas de alta frequência (450 kHz) são utilizados em águas rasas, de até 100 m, e permitem varrer seções de até 180°.

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 INTRODUÇÃO

O estudo foi realizado em etapas de campo e de laboratório. Inicialmente, foram pesquisadas as imagens de satélite disponíveis e os dados vetoriais existentes da área de estudo. Na etapa de campo foi realizado o levantamento hidrográfico, onde foram coletados dados para a caracterização do fundo do rio por meio de um ecobatímetro multifeixe e de um perfilador acústico, com o auxílio do software HYPACK e do sistema de posicionamento DGPS acoplados.

Para o processamento dos dados vetoriais coletados em campo e das imagens de satélites foram utilizados os softwares, HYPACK, SURFER, ArcGis 9.3 / ESRI e ENVI 4.4 / RSI com o objetivo de gerar os mapas resultados. Todas as licenças estão disponíveis no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial e no Laboratório de Geofísica do Instituto de Geociências da UnB.

Outros elementos cartográficos (sede de municípios, barragem, bacias hidrográfica, etc) existentes foram adquiridos por órgãos governamentais (MMA, SRH e ANA) para compor as informações dos mapas. Também foi definido o sistema de projeção (*Mercator*) e o *datum* (WGS84) para referenciar a base de dados cartográficos.

5.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT

Na fase de processamento, efetuado em ambiente digital, foram utilizadas imagens de satélites ópticos para delimitação dos contornos do rio, dos bancos de areia e das ilhas, gerando arquivos vetoriais. Foram utilizadas duas cenas (órbita-ponto: 224-62 e 224-63) ortorretificadas do sensor ETM+ do satélite Landsat, ambas de 08 de agosto 2001 (**Tabela 5**).

Tabela 5 - Características espectrais e espaciais do sensor ETM+ (LANDSAT 7)

BANDA	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m x m)
	nm	μm		
1	450 - 520	0,45 - 0,52	AZUL	30
2	530 - 610	0,53 - 0,61	VERDE	30
3	630 - 690	0,63 - 0,69	VERMELHO	30
4	780 - 900	0,78 - 0,90	INFRAVERMELHO PRÓXIMO	30
5	1550 - 1750	1,55 - 1,75	INFRAVERMELHO ONDAS CURTAS	30
6	10400 - 12500	10,4 - 12,5	INFRAVERMELHO TERMAL	120
7	2090 - 2350	2,09 - 2,35	INFRAVERMELHO ONDAS CURTAS	30
8 (PAN)	520 - 900	0,52 - 0,90	VISÍVEL INFRAVERMELHO PRÓXIMO	15

Na fase de pre-processamento aplicou-se o método aplicado desenvolvido por Chávez (1988), Dark Object Subtraction (DOS), no intuito de reduzir os efeitos de dispersão atmosférica. Esse método tem como principal característica a baixa exigência de informações retiradas da imagem para procedimentos de ajuste digital de dados de sensores eletro ópticos.

No passo seguinte as cenas foram unidas (mosaicagem) em um único arquivo. A partir daí foi possível realizar o recorte da área de estudo.

Na fase de processamento foram realizados métodos de realce digital. O primeiro método teve como a finalidade de delimitar o contorno do rio e separá-lo, aplicou-se o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) como ilustra a **Figura 13** – esquerda.

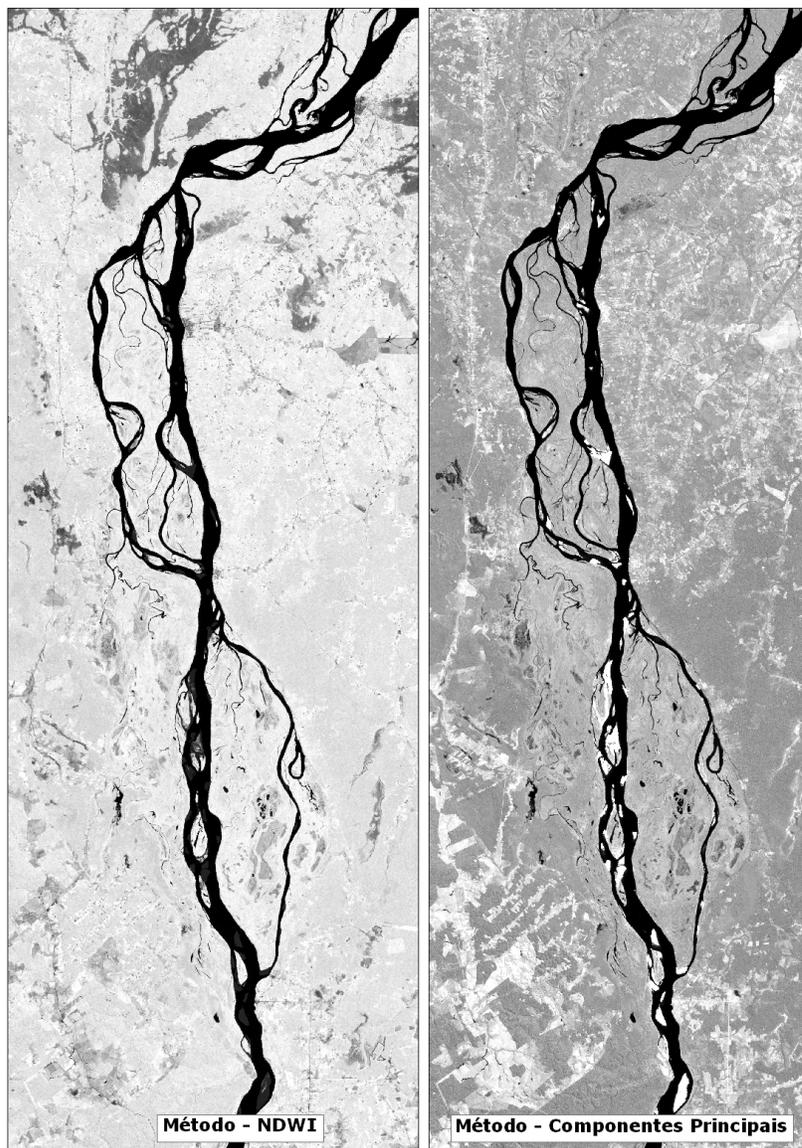


Figura 13 - Resultados dos Métodos NDWI e PC

Se por um lado a imagem NDWI trouxe bons resultados na delimitação dos corpos d'água, por outro foi limitante da delimitação das ilhas e dos bancos de areia. Nesse último caso optou-se então pela transformação das imagens por Principais Componentes (PCT).

Para fins de delimitar os bancos de areia e as ilhas foi selecionada a primeira componente principal (**Figura 13** – direita) que contém a maior parte da variância total dos dados, concentrando as informações antes diluídas.

5.3 LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO

O trabalho de campo para o levantamento dos dados hidrográfico e estratigráfico teve a duração de 12 dias, tendo sido realizado entre 20 de agosto a 02 de setembro de 2008. O trecho escolhido para a coleta de dados foi à jusante da represa de Tucuruí, entre a cidade de Tucuruí (PA) e a vila de Nazaré dos Patos (PA), percorrendo um trecho de 40 km de comprimento, e cerca de 400 m de largura. Alguns traçados realizados no sentido transversal ao rio tiveram como objetivo assegurar a calibragem do levantamento, como indica as setas na **Figura 14**.

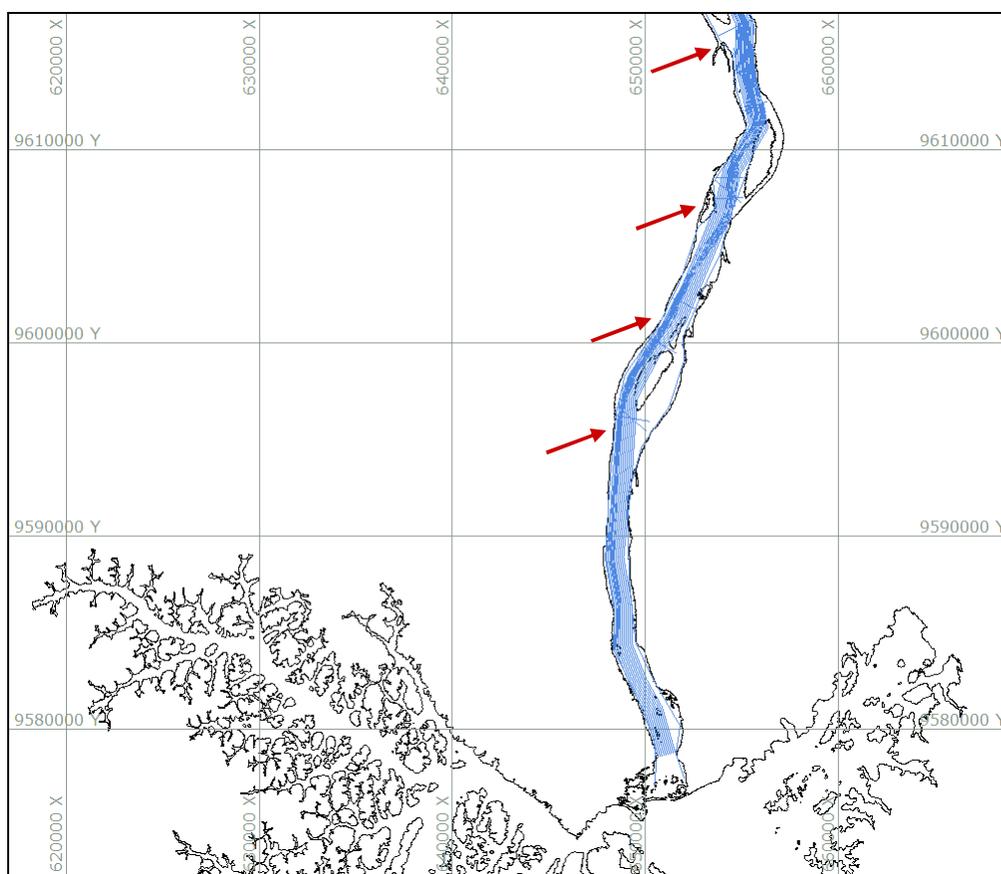


Figura 14 - Rotas utilizadas para orientar a navegação

O embarque da equipe e dos instrumentos foi realizado no porto de Belém (PA). Após a instalação dos equipamentos a bordo do barco, foi iniciada a navegação do rio Tocantins. No primeiro momento, os testes foram executados apenas com o sonar de varredura lateral, visto que não era possível operar com o perfilador de subfundo em uma região repleta de

obstáculos submersos. Uma vez testado o funcionamento dos sistemas e das interfaces com o DGPS, foi iniciado o traslado para dar início aos testes nas proximidades de Baião (PA).

O método utilizado para o levantamento é baseado no uso de um sistema integrado de sensores acústicos para a caracterização do fundo e subfundo do leito do rio, conectados com um sistema de posicionamento por satélites GPS, via interface serial (**Figura 15**). O sistema DGPS fornece, em tempo real, as coordenadas para todos os sensores instalados a bordo com precisão estimada de cerca de 20 cm.



Figura 15 - Equipamentos integrados para a aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados para navegação utiliza as coordenadas fornecidas pelo DGPS, que são corrigidas pelas distâncias entre a antena GPS e os sensores, para atrelar os dados levantados à própria posição geográfica e orientar a navegação.

O levantamento foi realizado de acordo com o seguinte cronograma:

⇒ 08/08: teste do ecobatímetro multifeixe Reson Seabat 8101 e da suíte de navegação e aquisição de dados Hypack / Hysweep no Lago Paranoá.

- ⇒ 15/08: envio dos equipamentos para Belém (PA).
- ⇒ 20/08: viagem da equipe para Belém e início da instalação dos equipamentos a bordo do barco “Ilha Encantada” (**Figura 16**).



Figura 16 - Barco Ilha Encantada

- ⇒ 21/08: finalização da instalação dos equipamentos e viagem de Belém para Cametá.
- ⇒ 22/08: teste das interfaces e configuração dos equipamentos e do sistema de aquisição e navegação. Transferência de Cametá para Baião.
- ⇒ 23/08: calibração do ecobatímetro multifeixe e início da aquisição de dados no trecho Baião – Tucuruí.
- ⇒ 24/08 - 30/08: levantamento hidrográfico e estratigráfico no trecho Tucuruí – Nazaré dos Patos.
- ⇒ 31/08: desmobilização dos equipamentos e início da viagem de volta Nazaré dos Patos – Cametá.
- ⇒ 01/09: início do processamento dos dados hidrográficos e estratigráficos. Transferência Cametá – Belém.

⇒ 02/09: coleta dos equipamentos e viagem de volta da equipe para Brasília.

⇒ 03/09: devolução dos equipamentos para a UnB.

⇒ 04/09: início da correção dos dados de campo no laboratório.

Os equipamentos envolvidos nessa etapa do levantamento foram:

1) GPS: receptor DGPS Trimble DMS 232, L1/L2 com 12 canais paralelos, saída serial NMEA; a metodologia adotada é a WADGPS (*Wide Area Diferencial GPS*) que, recebe correções diferenciais via serviço Omnistar HP oferecido pela Fugro, com acurácia < 20cm.

2) Ecobatímetro Multifeixe: RESON 8101 portátil com transdutor de abertura angular de 210°, frequência de 240 kHz, 141 feixes de 1,5 x 1,5°. Sensor de movimento e giroscópio integrado TSS MAHRS.

Para levantamentos em áreas sensíveis, como portos e canais navegáveis, é preciso seguir uma metodologia que garanta a correta detecção e localização de alvos e, por isso, existem normas específicas.

Os dados adquiridos precisam passar por um controle de qualidade acurado, baseado em análise estatística que aproveita a redundância dos dados para eliminar medições incorretas, tanto na profundidade quanto na navegação. A compensação da maré das cotas batimétricas para redução ao “nível médio do mar” (datum vertical escolhido para a representação das profundidades) é aplicada para referir todas as medições a uma cota padrão.

O resultado final, após o processamento, foi representado com cartas batimétricas e modelos 3D-dimensionais do fundo. O sistema multifeixe permitiu, também, a caracterização do fundo através da análise da intensidade do eco (*backscattering*).

5.3.2 Redução das Cotas ao Datum Vertical

Na área de estudo havia limitação de réguas linimétricas, somente uma está ativa. Portanto para a redução das cotas batimétricas, como datum vertical foi adotado o nível de referência 3,5 m, localizada na cidade de Tucuruí (PA). A variação do nível de referência ao

longo do curso do rio se deve à declividade, cuja estimativa foi baseada no perfil longitudinal do rio, que indica no trecho Tucuruí - Belém uma declividade média de 3 cm/km (AHIMOR, 2009). A declividade foi também conferida mediante regressão dos dados altimétricos medidos pelo GPS, obtendo um valor de 2,5 cm/km.

O sistema DGPS utilizado para o levantamento recebe as correções diferenciais pelo serviço Omnistar HP da Fugro, via satélite AMSAT. A precisão declarada do sistema foi, ao longo do período, constante na faixa de 5 cm para o posicionamento horizontal, tendo que considerar um fator 3 para obter a precisão vertical declarada.

Devido à dificuldade de acesso à margem do rio e às dificuldades de utilizar um DGPS com transmissão via ponte rádio ou rede celular, optou-se para o uso das medidas altimétricas providenciadas pelo sistema DGPS.

Para que as altitudes elipsoidais ou geométricas (h) (referidas ao elipsóide), oriundas de levantamentos com DGPS, possam ser utilizadas nestas áreas, é necessário que elas sejam convertidas em altitudes "ortométricas" (H), referidas ao geóide (**Figura 17**). Para isso, precisa-se conhecer a altura ou ondulação geoidal (N), ou seja, a separação entre as duas superfícies de referência, o geóide e o elipsóide (IBGE, 2008).

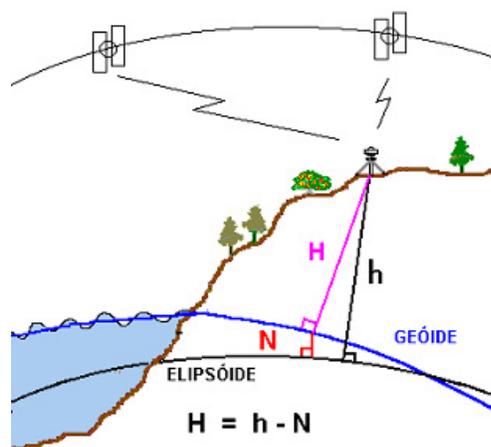


Figura 17 - Modelo de ondulação geoidal Fonte: IBGE, 2008

Para converter a altitude elipsoidal (h), obtida através de GPS, em altitude ortométrica (H), utiliza-se a equação:

$$\mathbf{H = h - N}$$

Onde N é a altura (ou ondulação) geoidal fornecida pelo programa, dentro da convenção que considera o geóide acima do elipsóide se a altura geoidal tiver valor positivo e abaixo em caso contrário.

O IBGE e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- EPUSP, geraram um Modelo de Ondulação Geoidal com uma resolução de 10' de arco e desenvolveram o Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal - MAPGEO2004. Através desse sistema, os usuários podem obter a ondulação geoidal (N) em um ponto, e/ou conjunto de pontos, referida aos sistemas SIRGAS2000 (**Figura 18**) e SAD69.

MODELO GEOIDAL (SIRGAS2000)

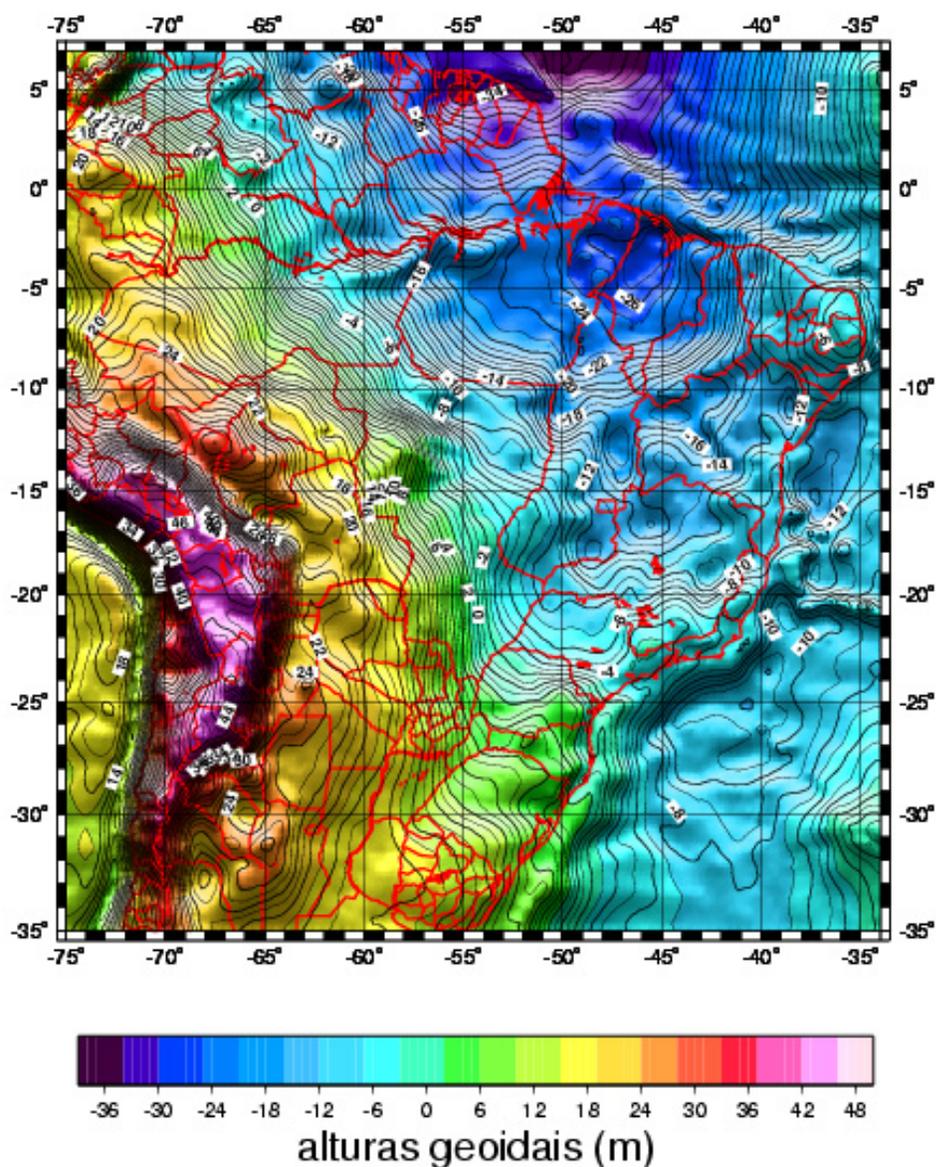


Figura 18 - Modelo de ondulação geoidal referida ao datum WGS84 (Fonte: IBGE)

O DGPS Trimble DSM utiliza um modelo geoidal global para a redução das altitudes ao nível médio do mar (NMM), calculando a correção ortométrica a ser aplicada às altitudes referidas ao elipsóide WGS84. Algumas leituras das altitudes reduzidas ao NMM foram tomadas para conferência com o modelo geoidal SIRGAS 2000 publicado pelo IBGE. No trecho do rio Tocantins em exame, o valor da correção ortométrica foi determinada entre 24,1m (Tucuruí) e 24,36m (Vila de Nazaré dos Patos), o que confere com o dado do IBGE.

Uma vez realizada a amarração entre o datum vertical WGS84 e o NMM, foi possível reduzir todas as medições ao citado nível de referência.

As leituras das cotas altimétricas WGS84 foram realizadas de hora em hora durante o levantamento, para se determinar as correções verticais a serem aplicadas aos dados, para redução ao nível de referência. Vale ressaltar que o intervalo de medição de uma hora foi estimado não se conhecendo, em detalhe, o regime diurno de vazão da UHE de Tucuruí.

5.3.3 Etapa do processamento dados batimétricos

As três etapas principais de processamento dos dados batimétricos, realizadas com o software HYPACK/HYSWEEP foram:

- Correção da navegação;
- Filtragem dos dados (automática e manual)
- Filtragem estatística

FASE 1 – Edição da navegação, aplicação de perfil de velocidade do som e redução das profundidades

- Correção da navegação (saltos de posição e guinadas bruscas);
- Aplicação do perfil de velocidade do som;
- Conferência dos dados do sensor inercial e do giroscópio;

FASE 2 – Filtragem dos dados

- Filtragem automática dos dados, utilizando ângulos máximos de abertura dos feixes e filtros para remoção de *spikes*⁸;
- Inspeção manual e remoção dos *spikes* residuais;

⁸ Neste caso os spikes são os ruídos.

FASE 3 – Edição da área-base

→ Filtragem estatística dos dados, baseada no desvio padrão calculado para cada célula da matriz.

O resultado destas três fases de processamento é um conjunto de dados em formato XYZ (X=coordenada UTM Leste, Y=coordenada UTM Norte, Z= profundidade).

→ Conversão dos dados para elaboração do modelo digital do fundo.

→ Armazenagem e processamentos dos dados em ambiente SIG, optou-se pelo ArcGis 9.3.

5.3.4 Interpolação dos pontos para geração do Modelo Digital de Fundo

Existem vários algoritmos de interpolação para geração de Modelo Digital do Terreno (MDT), eles podem ser construídos através de MATRIZES (grades retangulares regulares) ou TRIANGULAÇÃO (redes triangulares irregulares), hoje disponibilizados em programas computacionais de geoprocessamento, sendo que a escolha do melhor modelo depende diretamente da finalidade de uso, do tipo de terreno que se necessita estimar e da disponibilidade de dados de entrada.

Na interpolação do modelo optou-se pelo *Topo to Raster* disponível no software ArcGis 9.3 Os pontos cotados (XYZ) obtidos no levantamento foram vetorizados para um arquivo *shapefile*, possibilitando a geração do modelo com *pixel* de 5 metros. Não foi possível gerar uma grade menor pela limitação do programa em processar a quantidade de pontos disponíveis.

O método disponível no ArcGis se baseia trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1989) em seu programa ANUDEM. Essa técnica de interpolação foi desenhada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação de terreno exatos. Esse método permite que arquivos, como curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de bacias, possam ser utilizados durante a interpolação, diminuindo os possíveis erros que venha a serem cometidos pelo método. Dessa forma se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a

continuidade superficial dos métodos global de interpolação (NOGUEIRA & AMARAL, 2009).

5.4 LEVANTAMENTO ESTRATIGRÁFICO

5.4.1 Perfilador de Subfundo

O perfilador acústico de subfundo foi utilizado para investigar a estratigrafia do baixo curso do rio. O interesse se deve às possíveis mudanças do regime fluvial decorrente da implantação da barragem da UHE de Tucuruí e a perspectiva que este trecho se torne navegável, assim que for completada a construção da respectiva eclusa.

Na maioria dos casos, a implantação de uma barragem comporta redução da descarga, decorrente das perdas de armazenamento e evaporação, e da relativa capacidade de transporte de sedimentos (BRANDT, 2000). Em termos de descarga de sedimentos, Williams e Wolman (1994, apud BRANDT) avaliaram ser a eficiência de retenção para grandes reservatórios maior que 99% para a carga de leito. Isto resulta em um fluxo, à jusante da barragem, cuja capacidade de transporte é bem maior que a carga efetiva.

O perfilador de subfundo permite a caracterização das camadas sub-superficiais de sedimentos em áreas submersas, quais sejam rios, barragens e áreas marinhas costeiras. A penetração e resolução alcançadas dependem da frequência e da potência do equipamento em uso. O sistema Edgetech 3100P utiliza frequências na faixa de 2 a 16 kHz, que permiti alcançar penetração de até 10 m em camadas de areia, com uma resolução de cerca de 10 cm.

Ao se navegar por águas interiores, os limites batimétricos impostos aos calados dos navios pela morfologia do fundo, aparecem sempre como uma severa restrição de manobra para muitas embarcações. Neste contexto, o simples conhecimento dos contornos batimétricos, não é suficiente para expressar a realidade do fundo, e se torna imprescindível reconhecer e compilar todas as fases que regem o comportamento do fundo, principalmente em canais lamosos de forma a estabelecer os limites de segurança da navegação nessas áreas (SILVA, 2005).

O perfilador de subfundo se baseia na transmissão de um sinal acústico por um transdutor e sua reflexão pelo fundo marinho, retornando ao transdutor, onde é transformado em pulso elétrico e registrado em um papel térmico ou eletro-sensível.

Segundo QUARESMA (2001), os vários tons de cinza que se observam nos registros resultam da intensidade da reflexão do sinal. Essa reflexão se dá em função da textura e morfologia do fundo, da granulometria do sedimento e de características particulares do sedimento como, por exemplo, o grau de compactação.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 DELIMITAÇÃO DAS MARGENS DO RIO

Após o processamento para realçar a feições de água, foi realizada a classificação não-supervisionada utilizando o algoritmo *k-means* para separação das feições e principalmente para a seleção do leito do rio, bancos de areia e ilhas.

O algoritmo permite que os dados sejam divididos em um conjunto de n classes (clusters), baseado em análises e comparações entre os seus valores numéricos. O objetivo é calcular a diferença média dos espectros com relação aos respectivos centróides em iterações consecutivas. Por causa desta característica, o *k-means* é considerado como um algoritmo de mineração de dados (*data mining*) não supervisionado.

O algoritmo *k-means* é utilizado para segmentar a imagem, baseado em seus atributos, em k pedaços. Ele assume que os atributos dos pontos da imagem formam um espaço vetorial. O objetivo do algoritmo é minimizar a variância dos atributos dos pontos que estão dentro de um determinado segmento. Matematicamente, podemos dizer que o *k-means* minimiza a função erro quadrático, onde existem k segmentos S_i , com $i = 1, 2, \dots, k$, e μ_i é o centróide, ou centro de um conjunto de pontos x_j , pertencentes a S_i :

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} |x_j - \mu_i|^2$$

Na prática, tem se observado que o número de interações é tipicamente muito menor que o número de pontos. Contudo, pesquisadores mostraram que existem certos conjuntos de pontos no qual o *k-means* leva um tempo acima do polinomial, $2^{\Omega(\sqrt{n})}$, para convergir.

Conforme visto na **Figura 19**, após a classificação, foi possível separar feições distintas nas duas imagens. Na imagem originária do NDWI, à esquerda, foi possível utilizar

uma máscara e separar os contornos do leito do rio. Enquanto na imagem originária da análise das PCT, à direita, foi possível separar as ilhas e os bancos de areia.

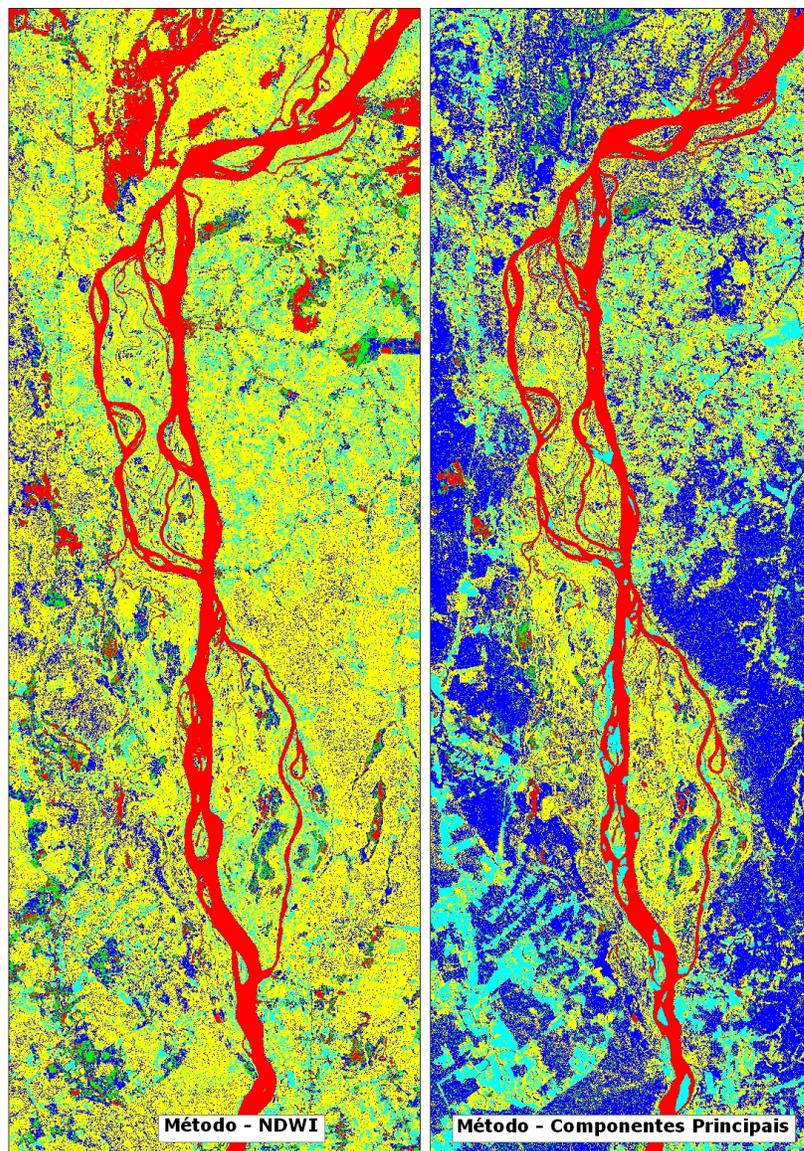


Figura 19 - Comparação da Classificação por K-Means

Após convertidos em vetores esses elementos foram transferidos para o HYPACK e utilizados para definir as linhas de navegação a serem mapeadas.

6.2 ANÁLISE DOS DADOS BATIMÉTRICOS

Na análise dos dados batimétricos foi considerado uma profundidade de 5 m como margem de segurança para a navegação. A maior parte do rio encontra-se em condições de navegabilidade, com esparsos obstáculos em trechos ao norte nas coordenadas 654603E 9617554N, tornando precária a navegação de embarcações com calado superior a 2,5 m.

O baixo curso do rio Tocantins é classificado como do tipo anastomosado, sendo a deposição arenosa predominante no leito e a deposição pelítica mais expressiva apenas nas planícies de inundação.

Em particular, no trecho em análise, observa-se a progressiva evolução do padrão de *planform*, de retilíneo, logo à jusante da barragem, a anastomosado, à jusante da vila de Nazaré dos Patos, como ilustra a **Figura 20** e a **Figura 21**.

Os valores encontrados no levantamento batimétrico abrangem apenas 23 km² da extensão de 40 km percorridos de Tucuruí a Nazaré dos Patos. O levantamento total da área não foi possível visto que o calado da embarcação era de 2,5 m, portanto superior as áreas mais rasas. No caso das áreas mais rasas seria necessário em trabalhos futuros utilizar o meio convencional de levantamento (com régua) visto que o ecobatímetro multifeixe é muito sensível e necessita ficar totalmente submerso durante o levantamento.

Para realizar a análise dos resultados encontrados na área mapeada foram feitas comparações entre os valores batimétricos obtidos no trabalho de campo e os valores adotados pela AHITAR (2006) tanto para o comboio-tipo como para largura do canal navegável.

No caso da largura do canal navegável a AHIMOR e a AHITAR definem como largura mínima 35 m para a rota de navegação. Mas, é necessário considerar que o canal é uma via de mão dupla, portanto deve-se avaliar o efeito dessa duplicidade.

Sendo assim, o canal deve possuir uma largura total média de 75 m. No entanto para garantir que os valores de referência possam ser seguros e seja possível manter a perenidade da navegação durante todo o ano foram adotados, como valores de referência profundidades superiores a 5 metros e largura para o canal acima de 90 metros.

As setas amarelas representadas nas figuras **20** e **21** indicam as áreas mais vulneráveis. O primeiro ponto crítico está localizado próximo a saída da eclusa (**Figura 20**) e possui cerca de 70 m de largura. Para embarcações de calado superior a 2m apenas um ponto foi considerado muito crítico, e está localizado próximo a Vila de Nazaré dos Patos (**Figura 21**).

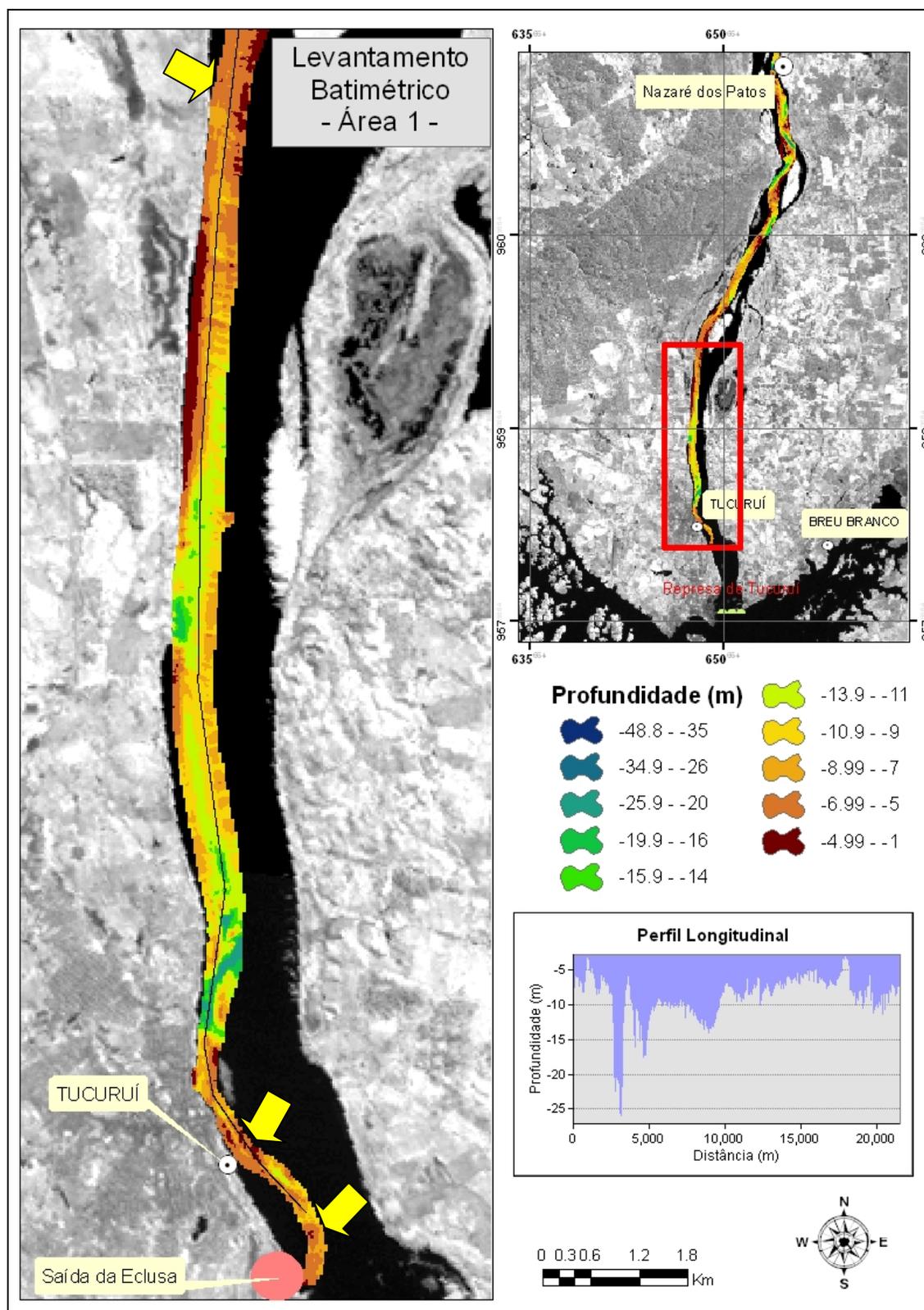


Figura 20 - Área 1 do Levantamento Batimétrico

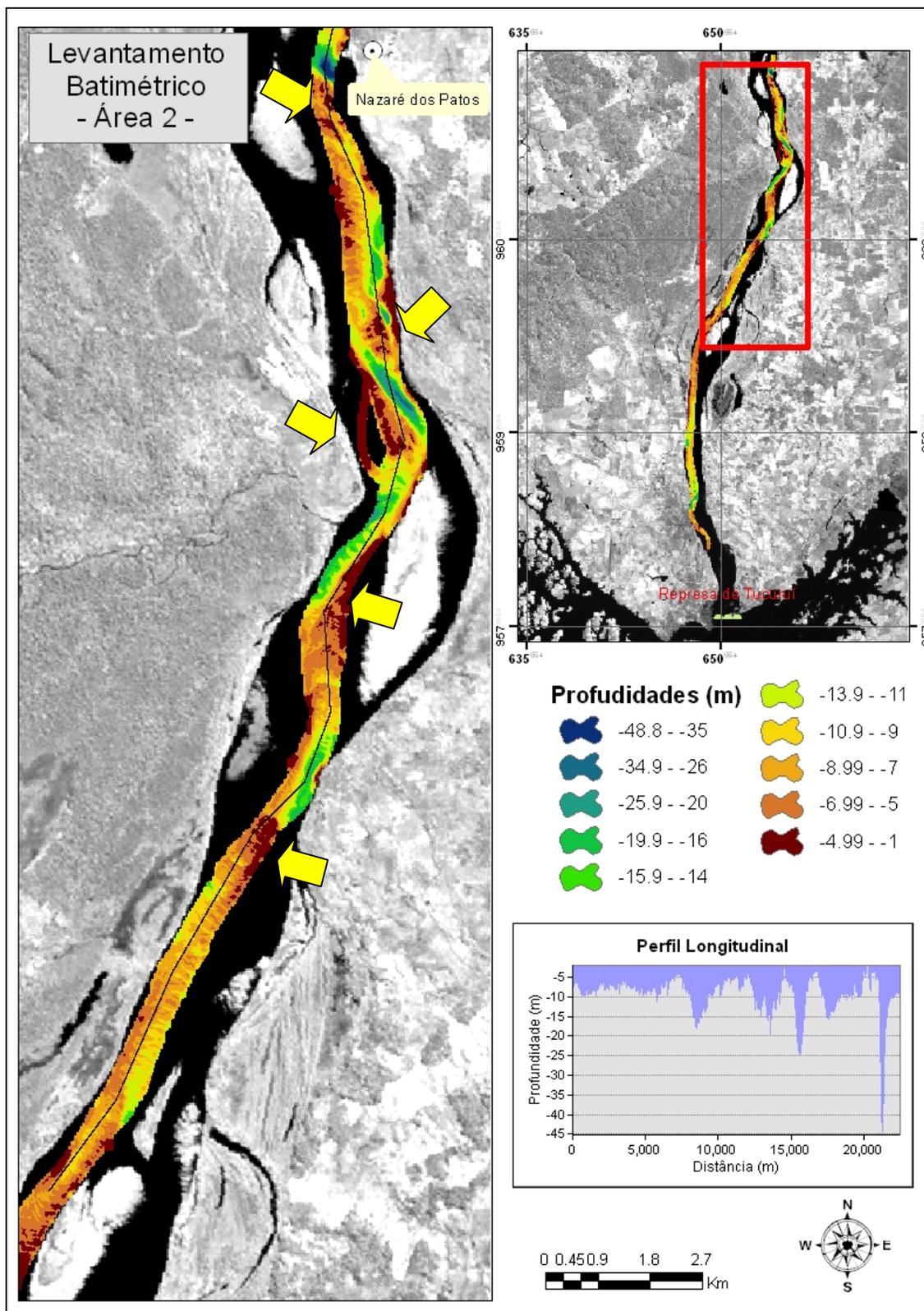


Figura 21 - Área 2 do Levantamento Batimétrico

Da área mapeada 13 % estão abaixo de 5 m de profundidade. Deste total cerca de 1% da área está em profundidades inferiores a 2,5 m. Estes valores só não são maiores pelas restrições a navegação em profundidades inferiores a 2 metros da embarcação.

As áreas de maior dificuldade de navegabilidades coincidem com as áreas próximas aos bancos de areia. As partes submersas dos bancos variam de 1 m a 2,5 m de profundidade, caso os mesmo não sejam atualizados nas cartas náuticas e a sinalização à noite não seja realizada podem ser um perigo as embarcações (**Figura 22**).

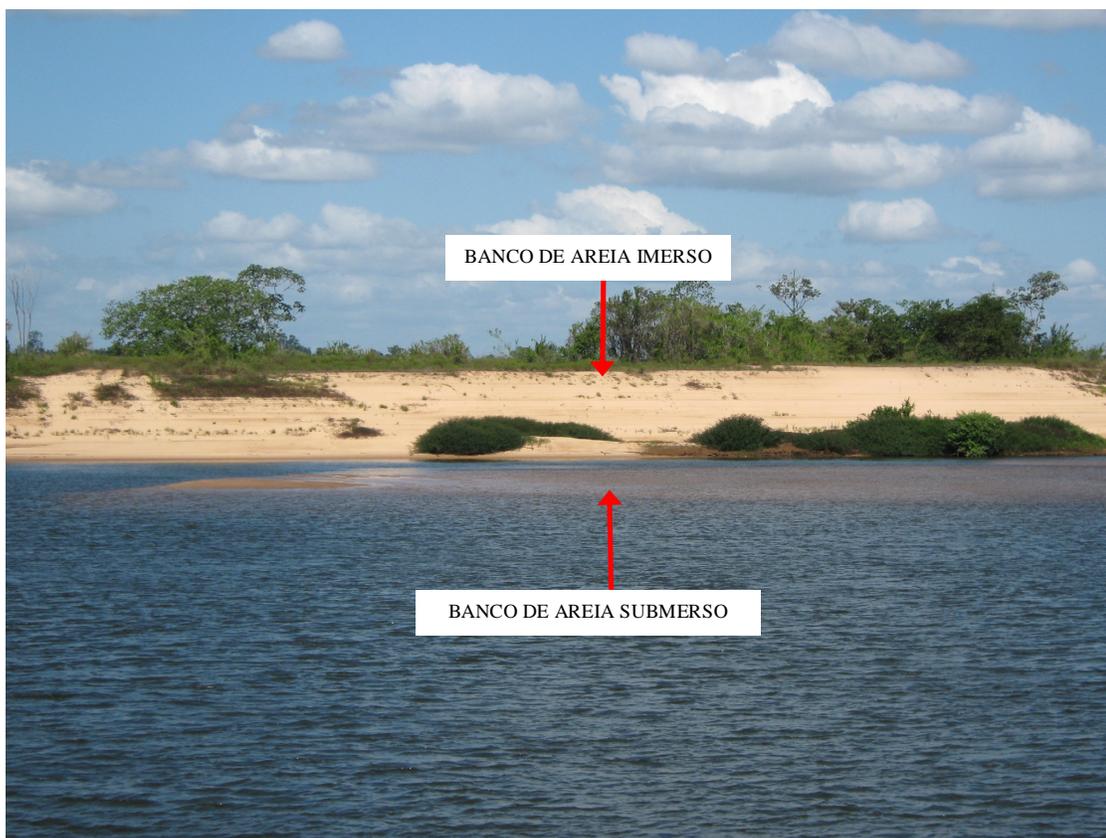


Figura 22 – Interseção entre banco de areia imerso e submerso.

Também foi possível verificar os afloramentos (**Figura 23**) nas áreas de corredeiras, localizados entre as coordenadas 9606000N e 654000E.

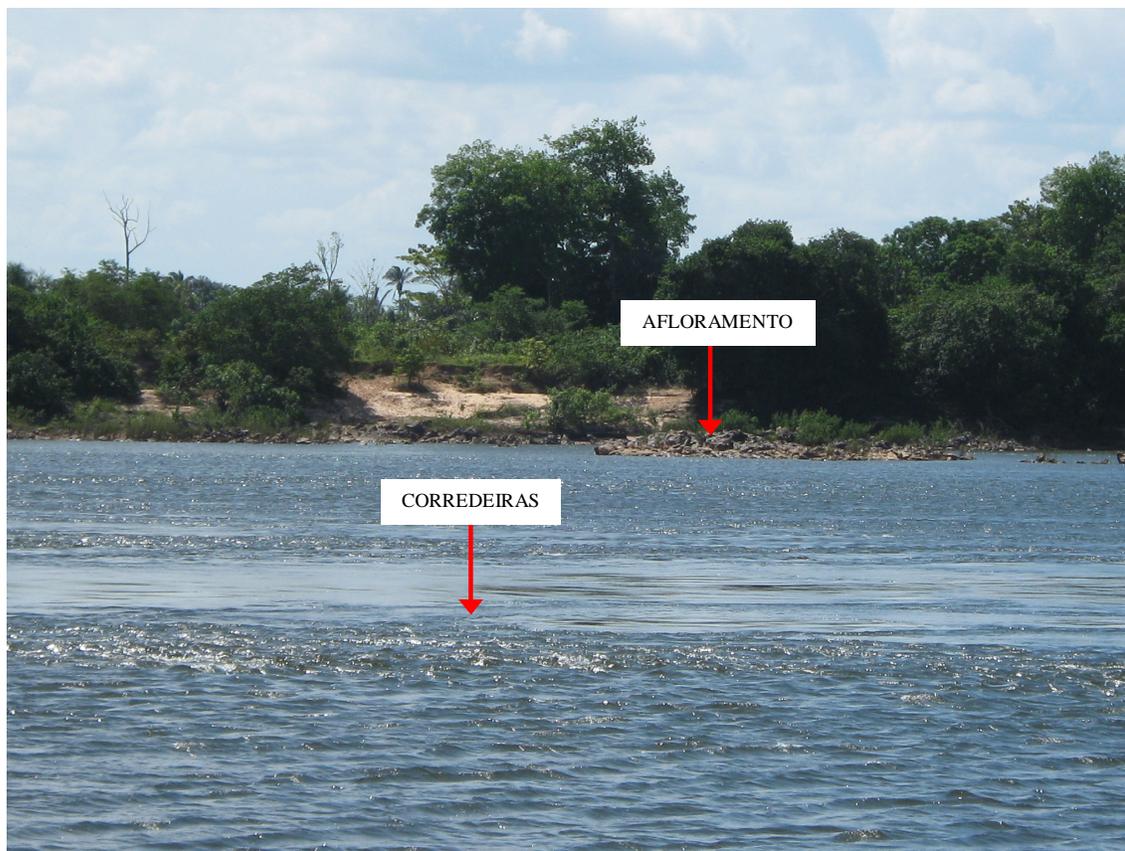


Figura 23 – Afloramento em área de corredeiras

A primeira aproximação do fundo do rio foi obtida a partir da interpolação do levantamento batimétrico e, portanto, da elaboração do modelo digital do fundo. A partir daí também foi possível extrair a declividade. Na **Figura 24** é possível identificar as rupturas do leito provocadas pela predominância de fundo rochoso.

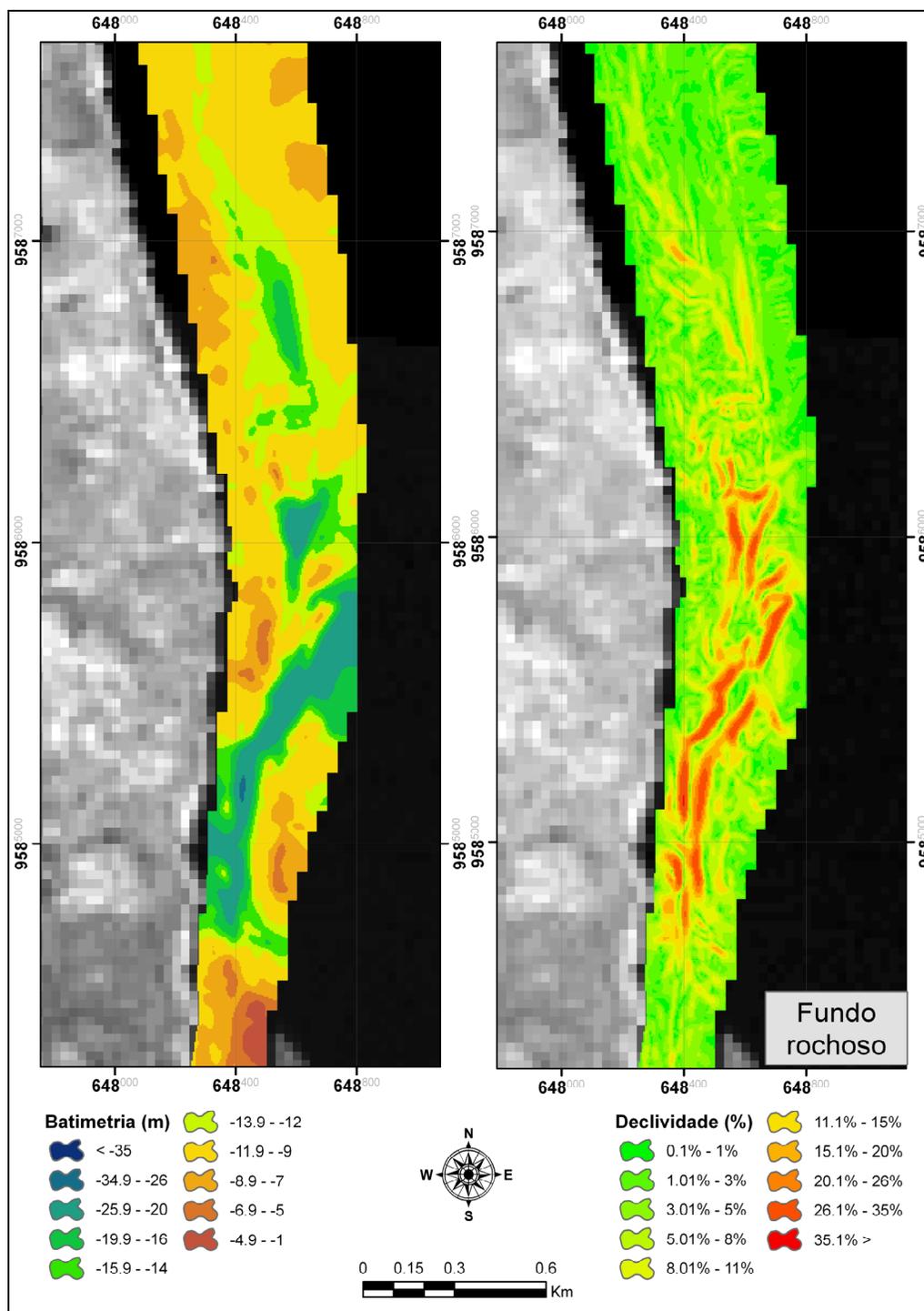


Figura 24 – Comparação do MDT e da declividade em áreas de fundo rochoso

Na **Figura 25**, a imagem do lado esquerdo representa as ondulações típicas de áreas de barras de areia, enquanto na imagem à direita é possível identificar a face frontal (*slife face*) das barras de areia.

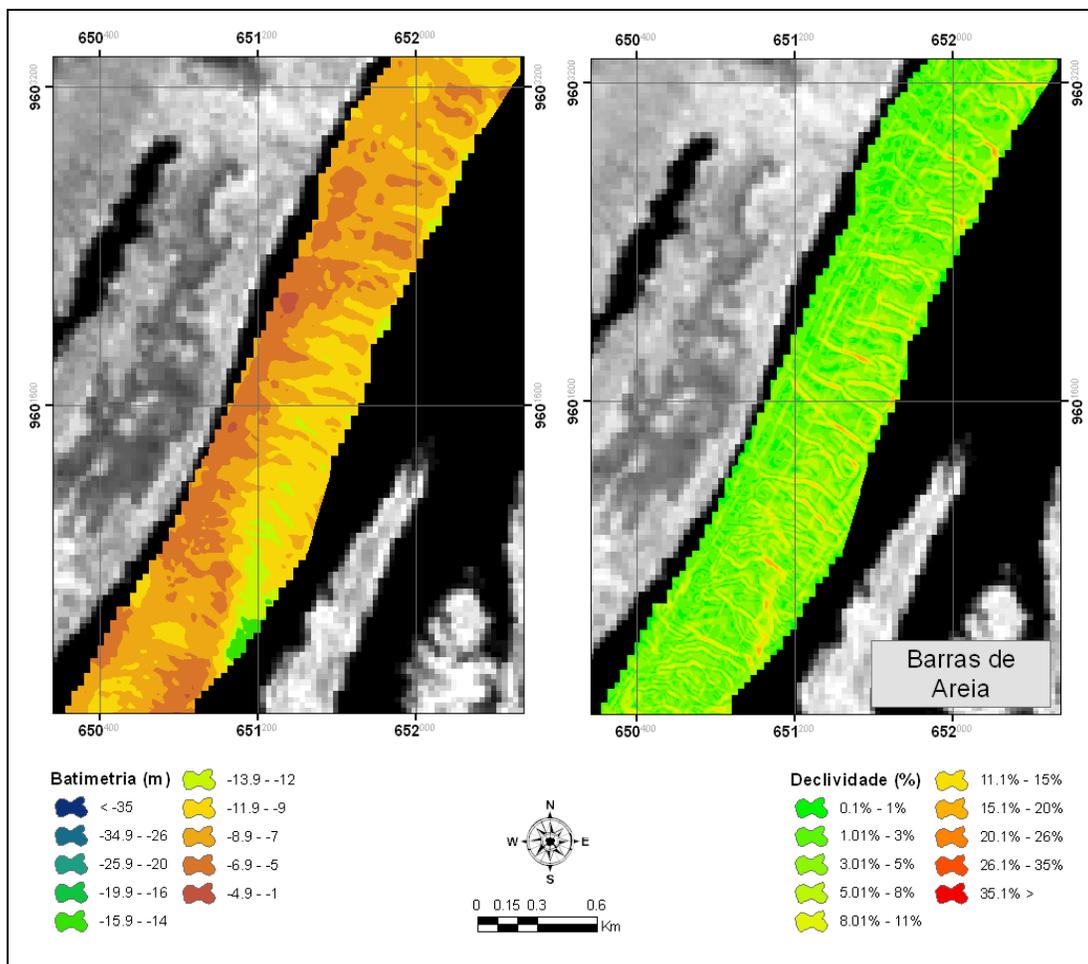


Figura 25 - Comparação do MDT e da declividade em áreas de barras de areia

Na **Figura 26**, abaixo corresponde aos limites de um canal, no modelo digital fica evidente a forma do canal, enquanto na imagem da declividade é possível identificar os trechos de maior declive e, portanto, os limites do canal.

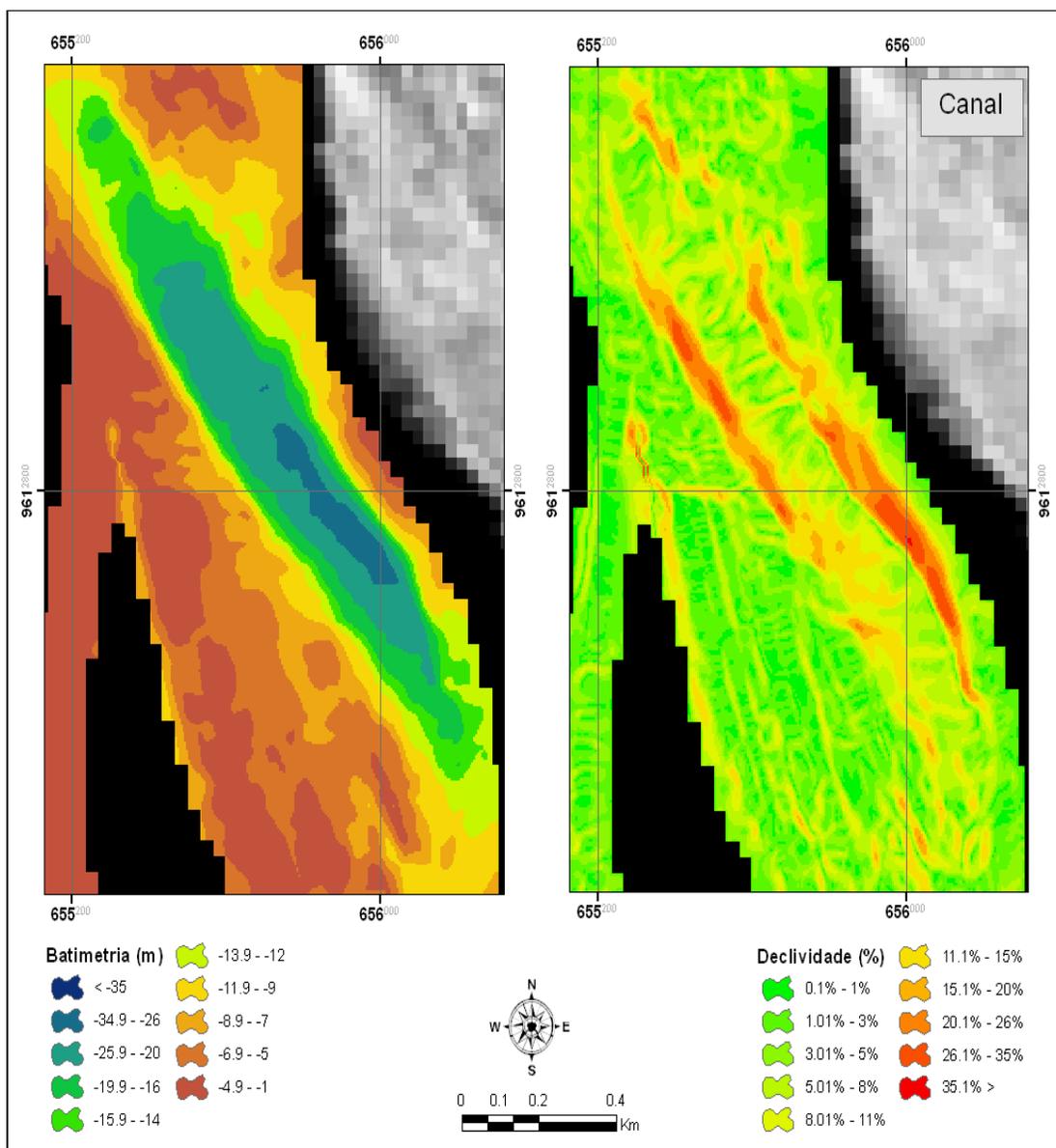


Figura 26 - Comparação do MDT e da declividade em um canal

6.2.1. Escala

O levantamento com ecobatímetro multifeixe visa a cobertura completa do fundo, por este motivo o conceito de escala perde um pouco sentido, pois a densidade espacial de dados é muito elevada e fica na escolha do usuário definir a escala mais apropriada.

Todavia, é necessário definir a menor escala de representação, que está ligada a resolução geométrica dos feixes, a qual depende do ângulo de apontamento dos feixes e da

profundidade. A **Tabela 6** mostra no primeiro quadro os parâmetros do ecobatímetros multifeixe Reson Seabat 8102, e a **Tabela 7** mostra a resolução espacial dos feixes em função do ângulo de apontamento (em graus e radianos) e profundidade do fundo.

Tabela 6 - Características do Ecobatímetro multifeixe Reson Seabat 8102

Frequência (kHz)	240	Abertura do feixe (°)	1.5
Velocidade do som (m/s)	1500	Numero de feixes	141
Comprimento de onda (m)	0.006	Abertura angular efetiva (°)	-75° / + 75°

Tabela 7 - Relação ângulo de visada e resolução

ÂNGULO DE APONTAMENTO		RESOLUÇÃO ESPACIAL (M)		
theta (deg)	theta (rad)	a 5 m	a 10 m	a 20m
0.00	0.000	0.131	0.262	0.524
7.50	0.131	0.132	0.264	0.528
15.00	0.262	0.136	0.271	0.542
22.50	0.393	0.142	0.283	0.567
30.00	0.524	0.151	0.302	0.605
37.50	0.654	0.165	0.330	0.660
45.00	0.785	0.185	0.370	0.741
52.50	0.916	0.215	0.430	0.860
60.00	1.047	0.262	0.524	1.047
67.50	1.178	0.342	0.684	1.369
75.00	1.309	0.506	1.012	2.023

Portanto, no caso do Rio Tocantins, com uma profundidade máxima de cerca de 20m, desconsiderando alguns pontos extremos, podemos utilizar como resolução media do levantamento 0,75m. Este valor pode ser condizente com uma escala gráfica mínima de 1:5.000.

A escala e os obstáculos a navegação - Perigos para navegação:

Novamente temos que considerar a resolução do ecobatímetro, mas desta vez temos que pensar que os perigos para navegação são encontrados em profundidades menores que 5m, e portanto utilizar a resolução media de 0,2m. Neste caso, podemos afirmar que no levantamento realizado foram mapeadas feições do fundo de tamanho da ordem de 1m, a profundidades de < 5m (cerca de 5 vezes a resolução a 5 m de profundidade).

6.3 MACROESTRUTURAS

As seções geofísicas possibilitam definir sítios erosivos, deposicionais e transicionais, que se intercalam longitudinal e transversalmente com relação ao canal do rio atual. A presença destes ambientes, além de ser controlada pela profundidade do canal e tipo de fluxo, parece relacionada à distância da barragem, pois os primeiros 18 km à jusante da barragem mostram uma prevalência de ambientes de *by pass*⁹, que poderiam ser relacionados aos efeitos erosivos da descarga de sedimentos. Mais à jusante, o equilíbrio na carga sedimentar poderia ser restabelecida pela erosão do fundo e das margens do rio. Os registros acústicos mostram a presença contínua de barras transversais de areia.

Estes ambientes são mais comumente observados ao longo dos canais principais e mais raramente ocorrem em posições marginais do rio. Os canais principais podem ocorrer na porção central do eixo fluvial atual, mas em outros casos pode resultar em fortes assimetrias, com maiores profundidades deslocadas em direção a uma das margens.

A faixa mapeada por meio do perfilador foi de 35 km. Na **Figura 27** em destaque, representa uma área próxima ao porto da cidade de Tucuruí, onde estão os primeiros registros da área de canal é retilíneo e de fundo predominantemente rochoso, somados aos outros registros encontrados de mesma morfologia, a área total é de aproximadamente 2 km².

⁹ *By pass* (desvio), no caso de ambientes fluviais seria um caminho alternativo por onde se pode fazer fluir a descarga líquida alternativamente a um caminho principal.

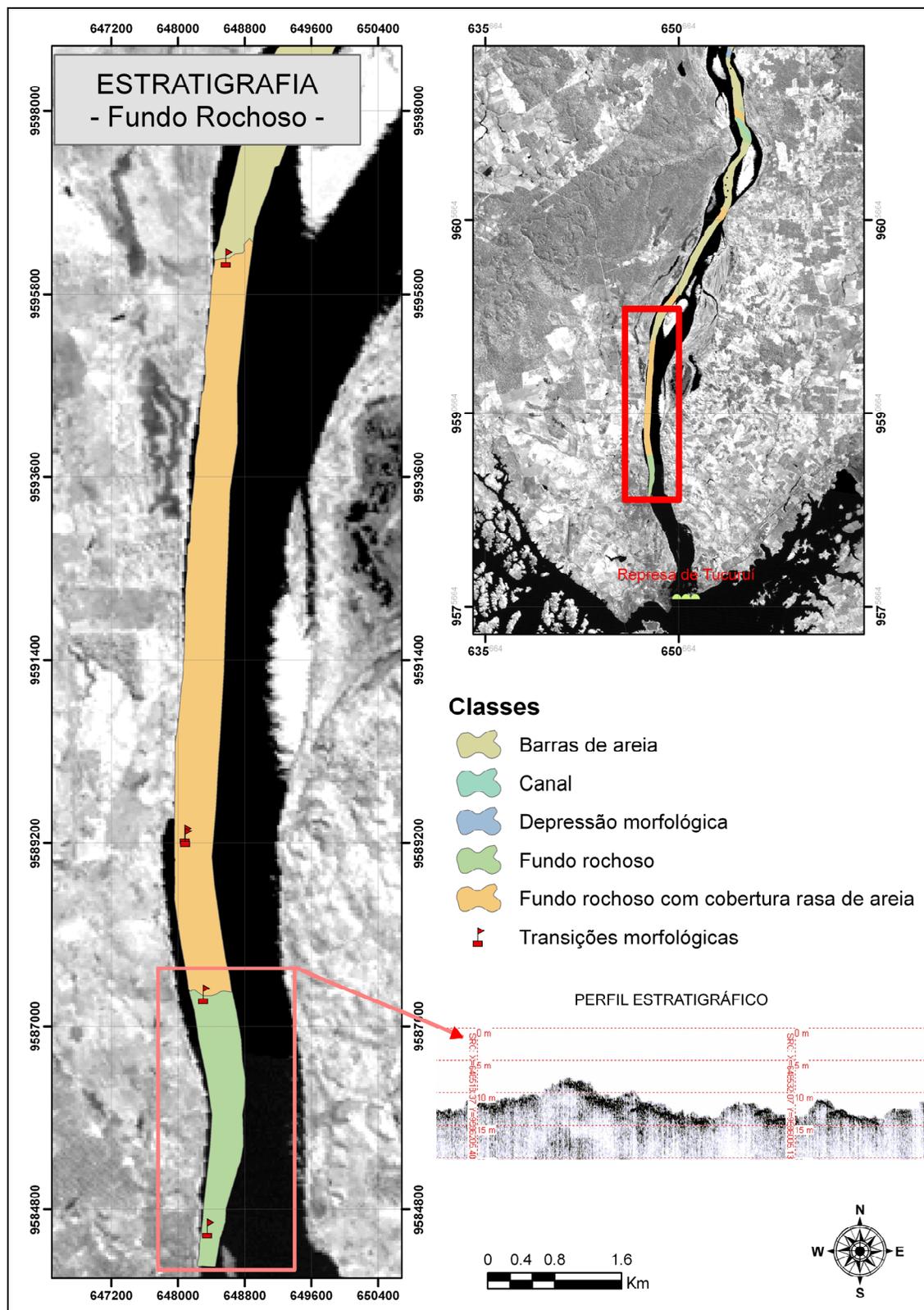


Figura 27 - Classificação do fundo rochoso a partir do perfil estratigráfico

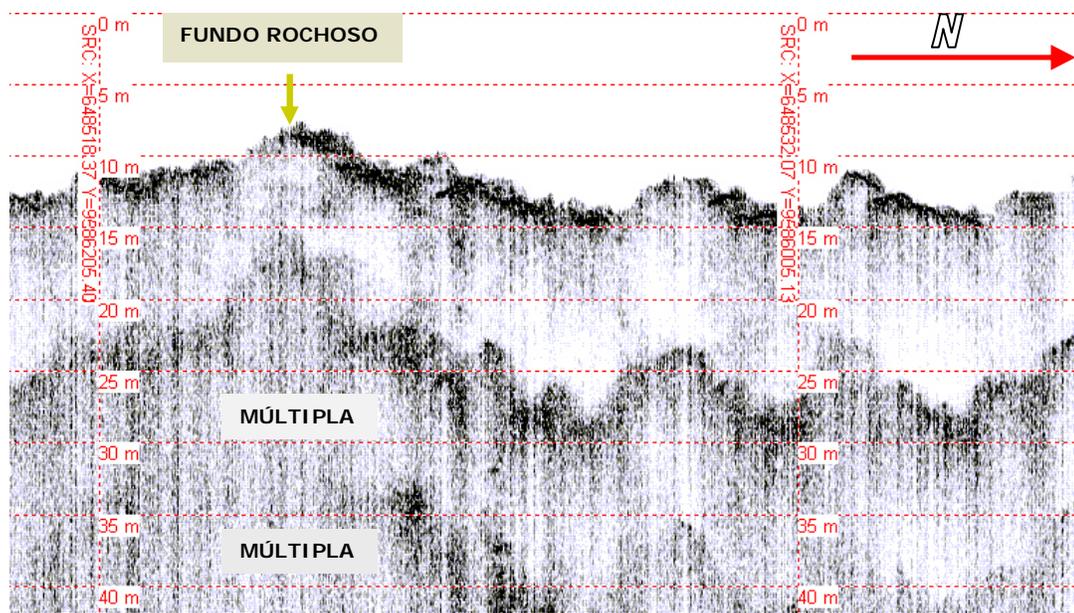


Figura 28 – Fundo rochoso com elevada rugosidade, característica de ambiente erosivo

O registro acima, **Figura 28**, tem cerca de 200 m de comprimento e representa típico de ambiente com fundo rochoso de relevo ondulado e não há refletores indicando acumulação de sedimentos. As áreas de maior corredeira coincidem com as áreas onde estão presentes os embasamentos.

Além de fundo rochoso, também foi possível identificar áreas de fundo rochoso com cobertura rasa de areia entre ambientes de barras de areia (**Figura 29**) e entre canais. Somados todos os registros de embasamento com cobertura rasa de areia tem-se um área total de 6 km².

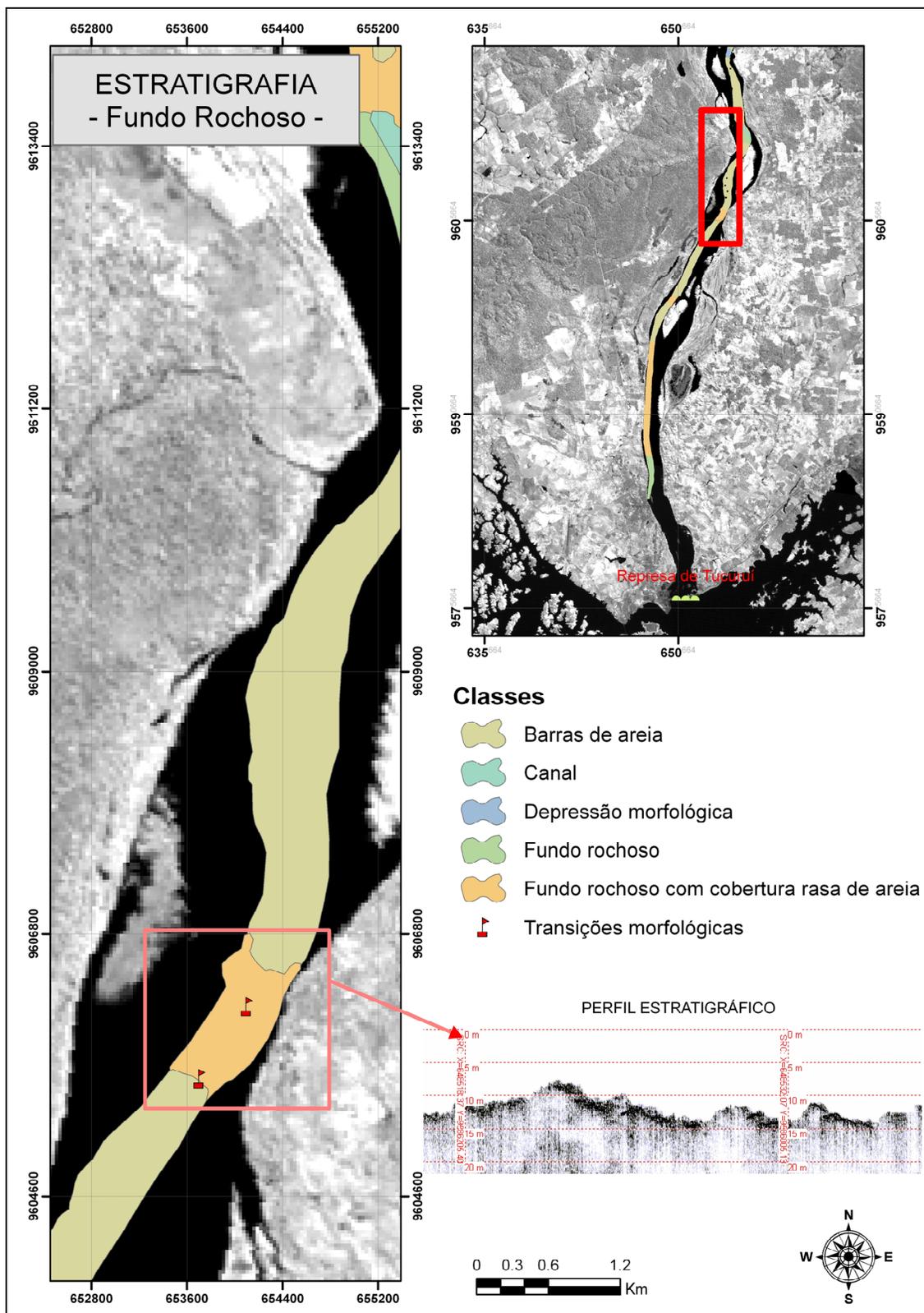


Figura 29 - Classificação do fundo rochoso com cobertura rasa de areia a partir do perfil estratigráfico

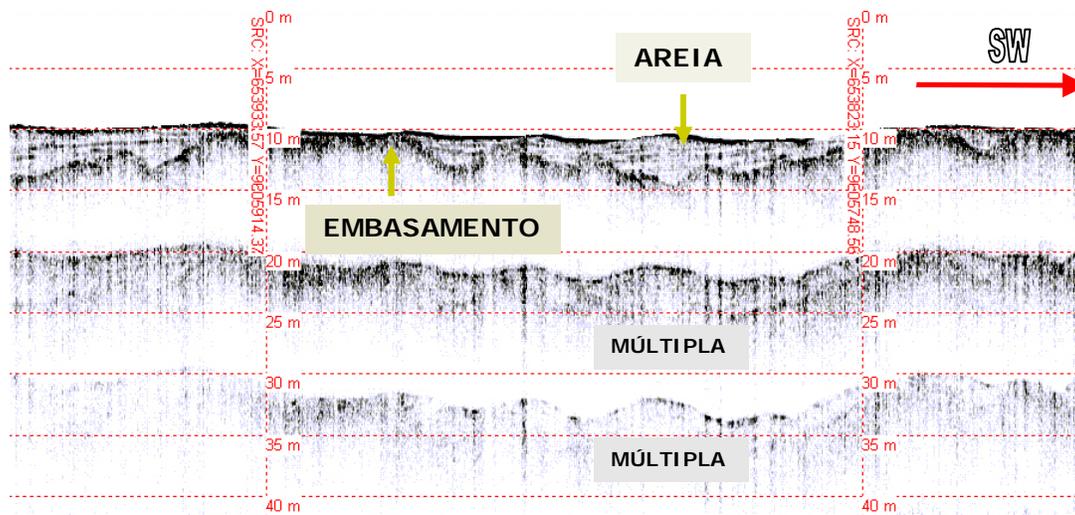


Figura 30 - Fundo sub-aflorante com cobertura rasa de areia

A **Figura 30** representa um recorte do registro de aproximadamente 200 m, mostra um sítio de deposição pouco espesso diretamente sobre o fundo rochoso caracterizado por irregularidades de fundo.

Os registros geofísicos mostraram nitidamente a estrutura interna das barras fluviais, onde a variação de impedância acústica que gera as reflexões se deve a variação da sedimentação ligada a eventos cíclicos. As barras de areia representam cerca de 60% de toda a área mapeada o que mostra o quanto é móvel o fundo do leito. Boa parte das barras está entrecortada ora por embasamento ora por canais, como ilustra a **Figura 31**.

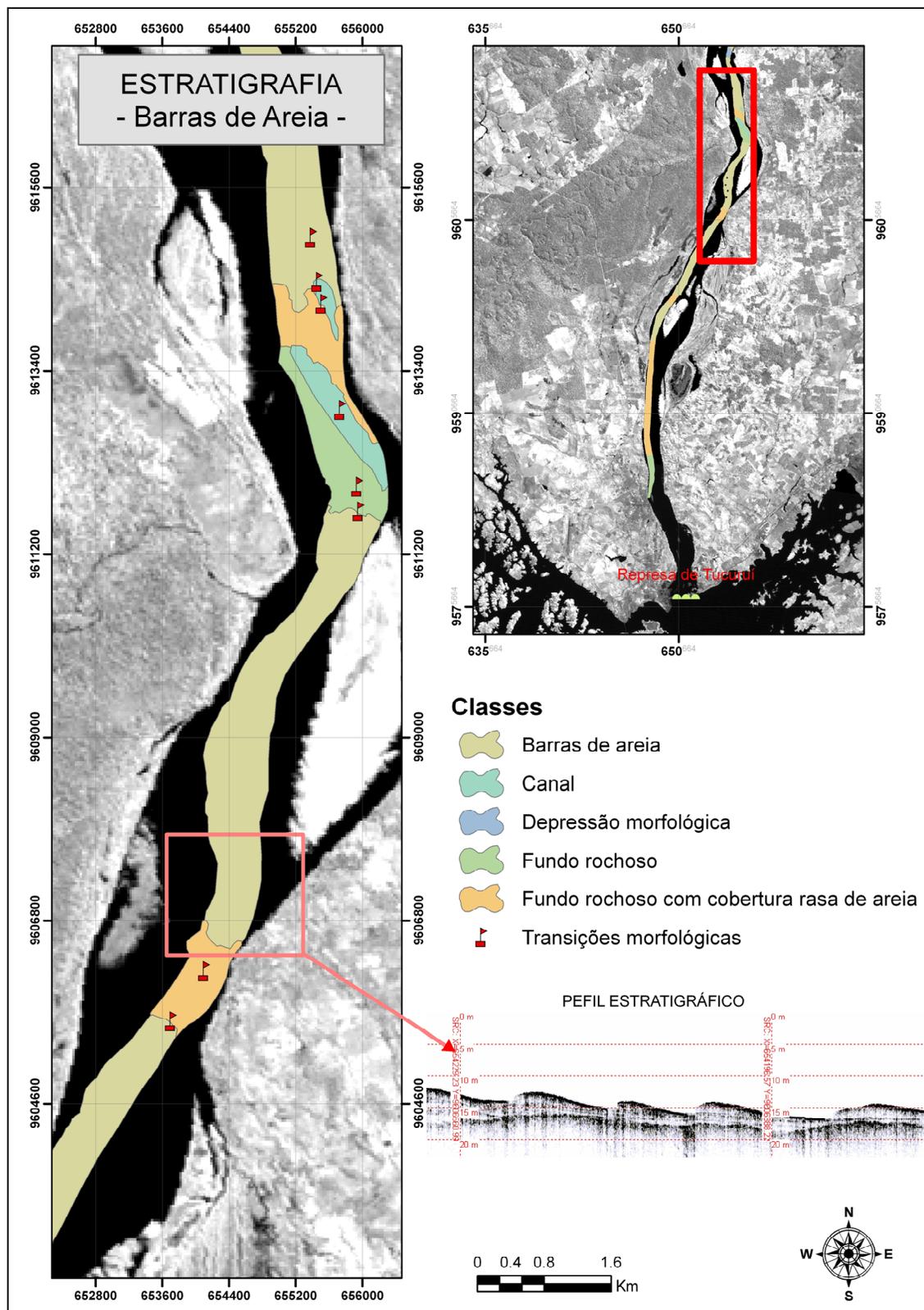


Figura 31 - Classificação das barras de areia a partir do perfil estratigráfico

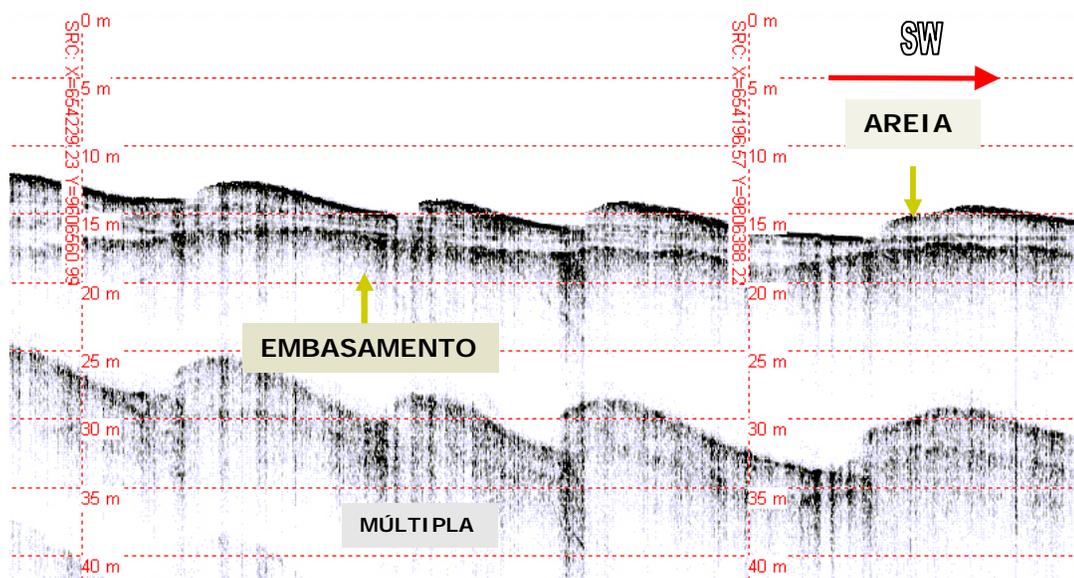


Figura 32 - Área de barras de areia sobre embasamento rochoso

Na porção frontal das barras de areia, o conjunto apresenta inclinação em direção ao sentido do fluxo, o que mostra a tendência de migração destas macro-formas. Estas feições mostram sítios deposicionais e resultam em elementos arquitetônicos do tipo acresção longitudinal (DA). O processo sedimentar que domina na formação deste conjunto é do tipo transporte por tração e saltação e deposição pela gradual diminuição da energia.

O registro apresentado na **Figura 32**, de aproximadamente 145 m mostra um sítio deposicional pouco espesso diretamente sobre o embasamento caracterizado por irregularidades de fundo. Neste caso as estruturas internas às barras são predominantemente estratificações plano-paralelas. A macro-forma ondulada é interpretada como o topo e corpo de barras transversais ao sentido de migração principal do fluxo. O conjunto representa uma seqüência de elementos arquiteturais de acresção lateral com migração de fácies arenosas por fluxo trativo.

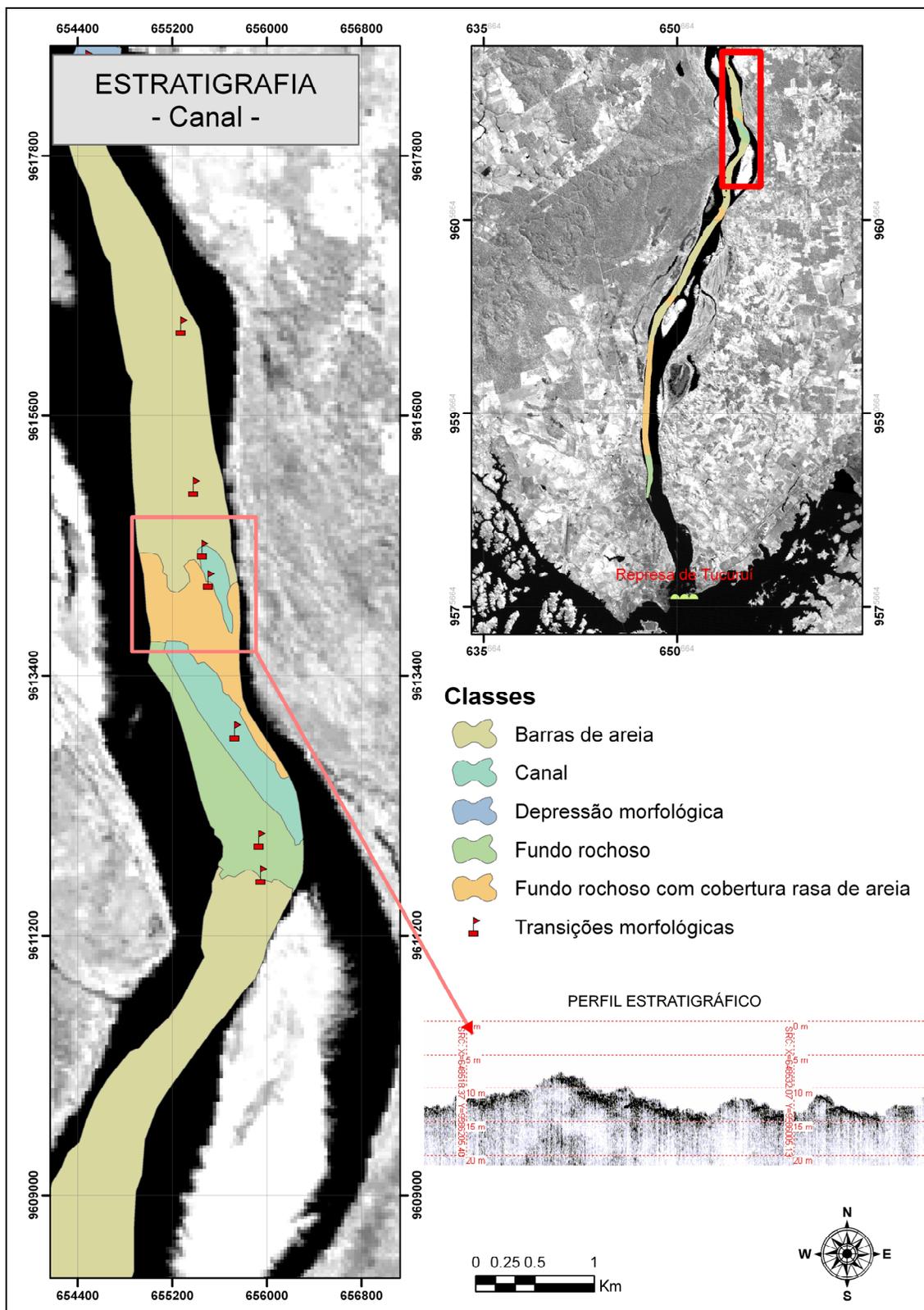


Figura 33 - Classificação do canal a partir do perfil estratigráfico

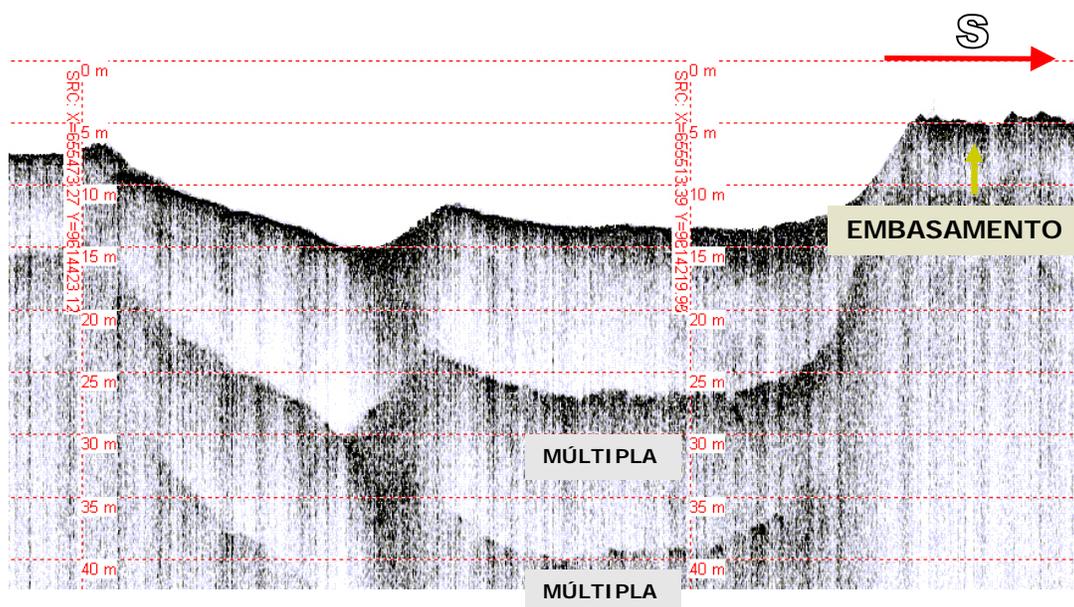


Figura 34 - Seção longitudinal de um canal em área de embasamento rochoso sem cobertura sedimentar

O leito do rio é diretamente desenvolvido em rocha. Este tipo de estrutura é interpretado como vinculado a zona de fraqueza do embasamento, ou melhor, zona de falha ou contato de rochas com contraste de resistência, como ilustra as **Figuras 33 e 34**. O registro tem cerca de 240m. Nas regiões onde o embasamento atinge profundidade inferior a 5 metros é preciso avaliar se isso é um impedimento para a navegação e, portanto, se haverá a necessidade de realizar derrocamentos.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Com a perspectiva de crescimento da demanda de transporte, impulsionada pelo crescimento econômico, será necessário desenvolver modais alternativos ao rodoviário, e com impacto ambiental menor. Neste sentido, o modal hidroviário se apresenta como uma boa alternativa para o Brasil.

As hidrovias constituem uma alternativa significativa em relação a outros modais de transporte, porém dependem dos investimentos previstos pelo governo federal, que ainda tem reservado uma parcela mínima para este setor.

O principal problema encontrado no desenvolvimento do modal hidroviário encontra-se no licenciamento ambiental e na elaboração de metodologias para monitoramento do fundo dos rios. Neste sentido, o caso da hidrovia Tocantins – Araguaia é emblemático pelos aspectos sócio-ambientais envolvidos, com a presença de aldeias indígenas e áreas de grande interesse ambiental, como a Ilha do Bananal.

O emprego do perfilador acústico de subfundo para medição das profundidades e do ecobatímetro multifeixe para avaliação estratigráfica do fundo, permitiu identificar as áreas de maior mobilidade do fundo do rio. Sendo assim, o trecho retilíneo apresenta pouco acúmulo de sedimentos, com a presença, apenas, de fundo rochoso. Já o trecho anastomosado é o de maior presença de atividades erosivas e sedimentação, e contém um maior número de macroestruturas (barras de areia, canais naturais, embasamento com cobertura rasa de areia e depressão morfológica). Por outro lado, a aplicação NDWI e o cálculo da PCT contribuíram na delimitação das margens e dos bancos de areia.

As análises mostraram que é viável o uso desta ferramenta na análise da geomorfologia fluvial e no monitoramento das condições de navegabilidade. Apesar do trecho estudado não apresentar nenhum grande empecilho para a navegação do comboio-tipo

adotado pela AHIMOR, ainda assim, se faz necessário monitorar constantemente o rio Tocantins, visto que o trecho anastomosado se apresenta em constante mutação.

Além disso, é preciso manter atualizadas as cartas náuticas para garantir a segurança na navegação, uma vez que a abertura da eclusa da barragem de Tucuruí prevista para este ano irá trazer um aumento substancial de embarcações transitando no rio.

A pesquisa verificou a possibilidade de aplicação da metodologia para estudar a arquitetura interna das barras de areia que, em combinação com técnicas de amostragem e datação, poderia fornecer um modelo da evolução temporal do processo de sedimentação, antes de depois da formação do reservatório.

Durante todo o levantamento foram levadas em consideração as proposições relacionadas às normas de padronização das pesquisas hidrográficas e para a confecção de cartas náuticas, de responsabilidade do IHO, mesmo sabendo-se que essas normas foram desenvolvidas para serem aplicadas em ambiente marinho. Isto porque, em muitos pontos, são úteis a qualquer levantamento, como por exemplo, as definições para detecção de feições, varredura do fundo e o modelo teórico de dados.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nas pesquisas futuras será importante aplicar as técnicas para o realce digital em outras imagens de maior resolução (dos satélites ALOS, ASTER, CBERS 2B) na banda do visível, para a obtenção de uma maior acurácia para os limites das margens e dos bancos de areia.

Também será necessário realizar novos levantamentos no período das cheias, para que seja possível mapear todo o rio de uma margem a outra e, assim, definir, com maior precisão, todos os obstáculos à navegação. Isto porque o trabalho foi realizado no período mais seco do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADA (2006). **Plano de Desenvolvimento Sustentável da Amazônia legal**: estudos diagnósticos setoriais Agência de Desenvolvimento da Amazônia (ADA). – PDSA 2005-2008. / Agência de Desenvolvimento da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Organização dos Estados Americanos. – Belém: ADA, 2006.

ALMEIDA, Alivinio de (2004). **Hidrovia Tocantins-Araguaia**: importância e impactos sociais e ambientais segundo a percepção dos agentes econômicos locais. Piracicaba, 2004. 155p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

ANA (2005). **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Cadernos de Recursos Hídricos. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas (ANA). Brasília (DF), 2005.

_____ (2006). **Usos Múltiplos Dos Recursos Hídricos na Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**. Agência Nacional de Águas (ANA). Superintendência de Usos Múltiplos da ANA. Palestra apresentada em 30 de novembro de 2006.

AHITAR (2009). **Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia**. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/modal/hidroviario/HTocantinsAraguaia.htm> > Acesso em 12 Ago. de 2009

ARAÚJO, Albano H.; GUIMARÃES, Renato F.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio e MENESES, Paulo Roberto (1996). **Metodologia para Geração de Cartas de Navegabilidade Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto, Sig's e Cad's** - Estudo de Caso no Estabelecimento de Referências de Navegabilidade para a Hidrovia do Rio Tocantins. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador: INPE, 14-19 abril 1996, p. 447-452.

BRANDT, S. A (2000). **Classification of geomorphological effects downstream of dams**. Institute of Geography, University of Copenhagen, Øster Voldgade 10, DK-1350 Copenhagen, Denmark, 2000.

BRASIL. DECRETO N° 96.000, de 02 de Maio de 1988.

BUCHER, Enrique H.; HUSZAR, Paul C (1995). **Critical environmental costs of the Paraguay-Paraná waterway project in South America**. *Ecological Economics*, v. 15, n. 1, p. 3-9, 1995.

CHRISTOFOLETTI, Antônio (1981). **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 313 p.

CNT (2002). **Pesquisa Aquaviária**. Relatório Analítico. Brasília (DF): Confederação Nacional de Transporte. 2002. Disponível em: <http://sistemacnt.cnt.org.br/arquivos/cnt/downloads/cnt2002/rel_aquaviaria2002.pdf> Acesso em 20 Jun. de 2007.

COLLINSON, J.D. (1986). Alluvial sediments. In: Reading H.G. (ed.) **Sedimentary Environment and Facies**. Oxford, Blackwell Scientific, 1986.

CORRÊA, Aderbal C.; SILVA, Geraldo Pereira da; CORRÊA, Agesandro C (1996). **A aplicação do LANDSAT-TM no balizamento de parte da hidrovía do rio Tapajós, Estado do Pará**. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996. Salvador, BA. Anais.

CRÓSTA, A. P (1999). **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: Ed. Rev. Campinas, UNICAMP. 1999. 3ª Reimpressão.

CUNHA (2007), Sandra Baptista da. Geomorfologia Fluvial. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Antonio Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha (org.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

DHN (1999). **Especificações para Levantamentos Hidrográficos**. Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2ª edição. Brasil - Rio de Janeiro, 1999.

_____ (2000). **Transporte Aquaviário: Conceitos de Hidrovias**. Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Departamento de Hidrovias Interiores. Rio de Janeiro, 2000.

_____ (2008). **Cartas Náuticas**. Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br>>. Acesso em 12 Jun. de 2008.

DIETRICH, W.E. (1985). Mechanics of flow and sediment transport in river bends. In: Petts G. (ed.) **Rivers a Landscape**. Blackwell, Oxford, Edward Arnold, 1985. p. 158-174.

ESRI (2006) - Enviromental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop help**. Redlands, 2006.

FELIX, L. A. **Algumas considerações sobre levantamento hidrográfico em grande escala**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

FLORENZANO, T. G (2002). **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

HUGENHOLTZ, C. H., MOORMAN, B. J., WOLFE, S. A., (2007). Ground penetrating radar (GPR) imaging of the internal structure of an active parabolic sand dune. In: **Stratigraphic Analyses Using Gpr**. (Eds) Gregory S. Baker, Harry M. Jol, Geological Society of America, Special paper 432, 2007. pp. 35-45.

HYPACK for WINDOWS (2007). **User's Manual**. Coastal Oceanographics, Inc. Durham, U.S.A. 2007.

IBGE (2008). **Modelo de Ondulação Geoidal**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>. Acesso em: 13 de abril de 2008.

IEHG (2007). **Inland Electronic Navigational Chart Encoding Guide**. IEHG (Inland ENC, Harmonization Group. Edition 1, Version 2.2, November 2007.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html>. Acesso em: 20 de ago de 2008.

KELLERHALD, R.; CHURCH, M.; BRAY, D. (1976). **Classification and analysis of river processes. American society of Civil Engineers Proceeding.** Journal of the Hydraulics Division, 1976, 102:813-829.

KRUEGER, Claudia Pereira; VEIGA, Luís Augusto Koenig & FAGGION, Pedro Luis (2005). **Levantamento Batimétrico no Rio Uruguai.** XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. 2005.

KRUG, Lilian Anne & NOERNBERG, Mauricio Almeida (2005). **Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3077-3084

_____ (2007). **O Sensoriamento Remoto com Ferramenta para Determinação de Batimetria de Baixios na Baía das Laranjeiras.** 25 (Supl.1): 101-105. Paranaguá – PR: Revista Brasileira de Geofísica, 2007.

MCFEETERS, S. K (1996). **The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.** Int. Journal of Remote Sensing, 17 (7). 1996. p.1425-1432.

MARINHO, Rogério Ribeiro; MELO, Edileuza (2009). **Análise multitemporal da geomorfologia fluvial do rio Solimões entre dois períodos hidrológicos** (cheia de 1999 e a vazante 2005). Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 4765-4772. DVD.

MENESES, P.R.; FERREIRA JR., L.G.; SOUZA, N.M.; ZERBINI, N.; RIEHL JR., W.; BROD, J.A. e LUCATELLI, G (1994). **Assessing Araguaia River navegability conditions through Landsat-TM image processing and Geographical Information Systems.** Anais do ISPRS Commission VII Symposium, Rio de Janeiro 26-30 Set. 1994, Vol. 30, Parte 7b, 1994, pp.253-257.

MENESES, P. R.; ARAÚJO, A.H.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JR., O. A.; MOTA, I. S. A., FERREIRA, A. P. M (1995). **Mapeamento Temático do Rio Tocantins por Sensoriamento Remoto para Implantação da Hidrovia no Trecho entre Palmas (TO) e a**

Hidrelétrica de Tucuruí (PA). IV Simpósio Brasileiro de Geografia Física, Anais, Goiânia, GO. 1995. 208 -215p.

MENESES, Paulo Roberto (2001). Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais.** Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MIALL A.D. (1978). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In: Miall A.D. (ed.) **Fluvial Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists**, 1978. 597-604 (memoirs).

_____. 1985. Architectural element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, 22:261-308.

MMA (a) 2006. **Caderno Regional da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia.** Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Programa de Estruturação Institucional para a Consolidação da Política Nacional de Recursos Hídricos - BRA/OEA/01/002. Relatório Final. Brasília, 2006.

_____. (b) 2006. **Caderno setorial de recursos hídricos: transporte hidroviário.** Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 2006. 120 p.

_____. (c) 2006. **Plano Nacional de Recursos Hídricos. Águas para o futuro: cenários para 2020: Volume 2 / Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Volume: 4.** Brasília: MMA, 2006.

NOGUEIRA, Jordão Douglas de Lima & AMARAL, Ricardo Farias do. **Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN.** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4117-4123.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes (2001). Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, Paulo Roberto e NETTO, José da Silva Madeira (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais.** Brasília (DF): UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

NOVO, E. M. L. M.; TUNDISI, J. G (1988). **Sensoriamento remoto de águas interiores: perspectivas**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 11 out. 1988. Anais. São José dos Campos, INPE 1988. v.1, p.13-21.

NORDMAN, M. E.; WOOD, L.; MICHALEK.; J. L.; CHRISTY, J. J. (1990). **Water depth extraction from Landsat-5 imagery**. Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1990, p.1129-1139.

OLIVEIRA, Ivan Carlos Soares de (2006). **O Uso da Análise Espacial no Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas e Inimigo (PITICI) do Exército Brasileiro**. Universidade de Brasília. Brasília, 2006. Dissertação de Mestrado.

PAIS, Varela (2000). **Novas tecnologias em navegação: Carta Eletrônica de Navegação Oficial**. Divisão de Hidrografia do IH. Marinha Portuguesa. 2000. Disponível em: <http://www.marinha.pt/extra/revista/ra_ago2000/pag12.html> Acesso em 20 de Jun de 2007.

PERRY, M. J. (1986). **Assessing marine primary productivity from space**. Biosc, 36 (71): 461-467. 1986.

QUARESMA, V. S.; DIAS, G. T. M; BAPTISTA NETO, J. A. (2001). **Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara - RJ**. Received October 12, 1999 / Accepted April 21, 2001. Rev. Bras. Geof. 2001, vol.18, n.2, pp. 201-214.

SAMBROOK SMITH, G. H.; ASHWORTH, P. J.; BEST, J. L.; WOODWARD, J.; SIMPSON, C. J. (2006). **The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada**. Sedimentology, vol. 53, n. 2, pp. 413-434, 2006

SHUMM, S. A (1985). **Patterns of alluvial Rivers**. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1985. 13: 5-27.

SEBASTIÃO, Simões de Oliveira (2008). **Cartas Náuticas Eletrônicas: Cobertura das Águas Jurisdicionais Brasileiras até 2010**. Revista Marinha Brasileira. Serviço de

Documentação Geral da Marinha – Rio de Janeiro: Ministério da Marinha. v.128, n.04/06, jul./set. 2008

SELLEY, R.C. (1978). **Ancient sedimentary environments**. New York, Cornell Univ. Press, 1978. p. 39.

SILVA, Agenor Cunha da (2005). **Contornos Batimétricos e Lamas Fluídicas**. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005. CD-ROM.

SILVA, Maria Lucia Santos (1996). **Aplicações de Sensoriamento Remoto na Distinção de Espécies Vegetais Aquáticas no Reservatório de Tucuruí**. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996. Salvador, BA. Anais. CD-ROM.

SILVA, José Leopoldo Cunha; SOUZA, Wanda Fritsch; NETO, Eliziário Chaves (2007). **Cabotagem e navegação interior**: Instrumentos de minimização do ‘Custo Brasil’ gerado nos Transportes. Disponível em: <[http://www.transportes.gov.br/bit/estudos/custos hidroviarios/cabotagem.htm](http://www.transportes.gov.br/bit/estudos/custos_hidroviarios/cabotagem.htm)>. Acesso: em 15 Set. 2007.

SILVA, Osman F.; NOVO, Evlyn; KRUG, Thelma (1996). **Distribuição espaço-temporal dos totais sólidos em suspensão do reservatório Tucuruí/PA através de dados in situ e TM-Landsat**. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996. Salvador, BA. Anais. CD-ROM.

SILVA, Aguinaldo; Filho, EDVARD Elias de Souza; CUNHA, Sandra Baptista da (2008). **Padrões de canal do rio Paraguai na região de Cáceres (MT)**. Revista Brasileira de Geociências Aguinaldo Silva et al. 38 (1): 167-177, março de 2008. Disponível em: www.sbgeo.org.br

SIMRAD (2008). **Technology for sustainable fisheries**. Disponível em: <<http://www.simrad.com/www/01/nokbg0240.nsf/AllWeb/F734B4EE698CD355C12574AA004C7DAC?OpenDocument>>. Acesso em 08 de Nov. de 2008.

Special Publication No. 57 (2000). **Transfer Standard for Digital Hydrographic Data**. International Hydrographic Organization - IHO. Monaco: International Hydrographic Bureau,

November 2000. 3.1th Edition. Disponível em: <<http://www.iho.shom.fr/publicat/free/files/31Main.pdf>>. Acesso em 20 de Maio de 2008.

Special Publication No. 44 (2008). **Standards for Hydrographic Surveys**. International Hydrographic Organization - IHO. Monaco: International Hydrographic Bureau, February 2008. 5th Edition. Disponível em: <http://www.iho.shom.fr/publicat/free/files/S-44_5E.pdf>. Acesso em 20 de Maio de 2008.

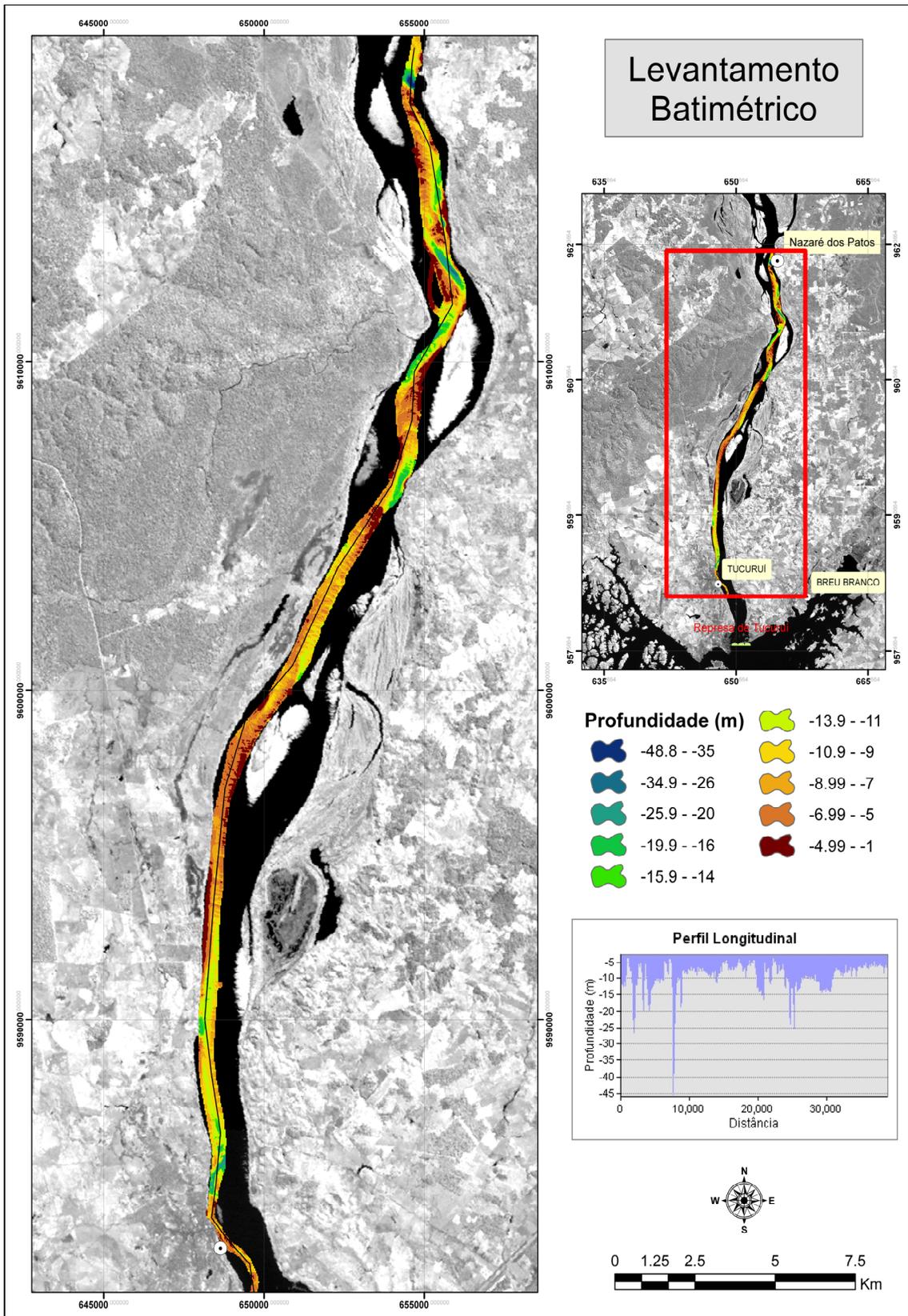
S-100 (2008): **The New IHO Geospatial Standard for Marine Data and Information**. International Hydrographic Organization - IHO. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference, March 2008. Disponível em:<http://pac.chs.gc.ca/files/session_1A/1A-3_Ward_et_al.pdf> Acesso em 20 de Dez. de 2008

TABOSA, Werner Farkatt; AMARO, Venerando Eustáquio & VITAL, Helenice (2007). **Análise do Ambiente Costeiro e Marinho, a partir de Produtos de Sensoriamento Remoto na Região de São Bento do Norte, NE Brasil**. 25 (Suplemento 1): 37 – 48. Revista Brasileira de Geofísica, 2007.

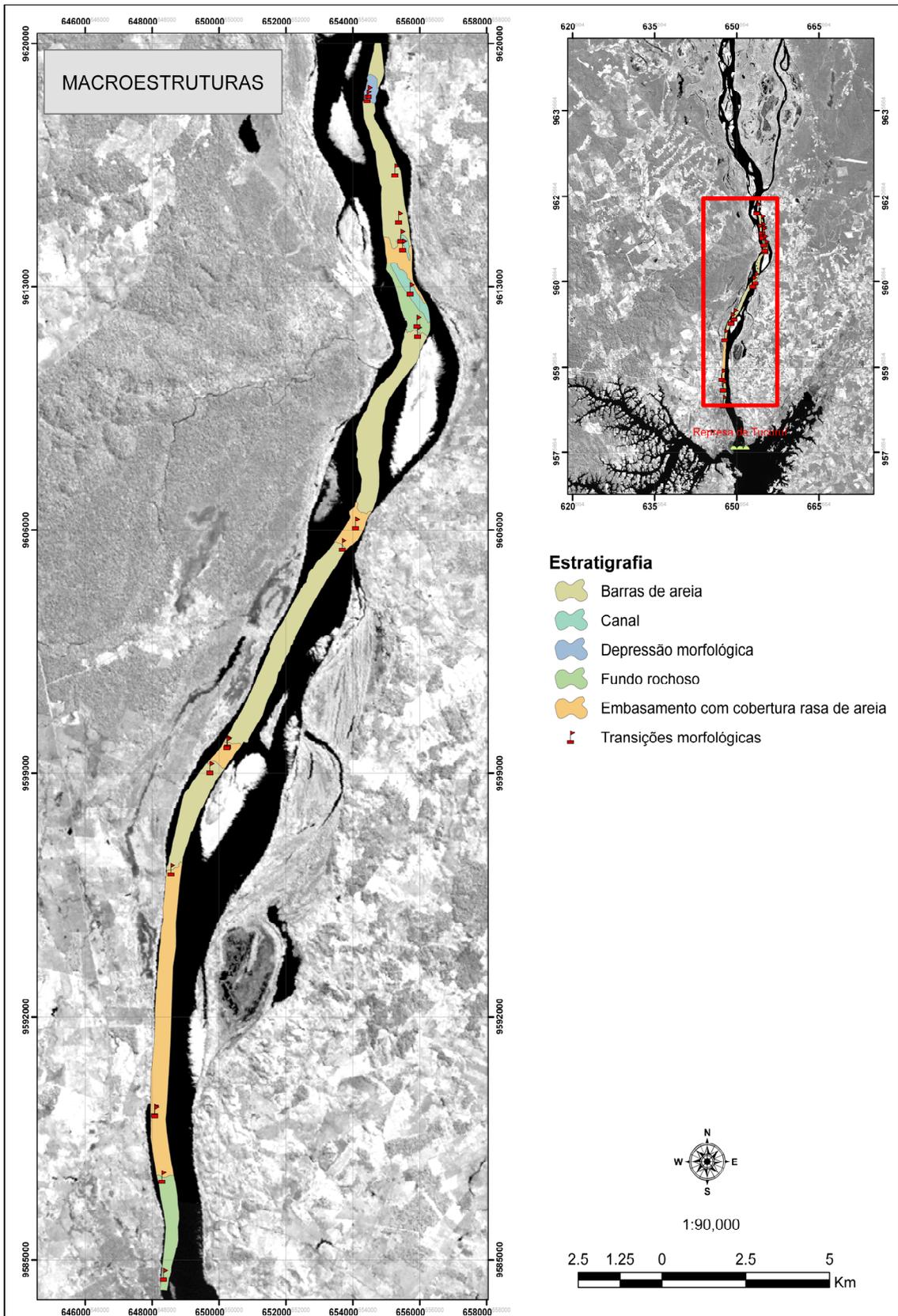
TORRES, Ronaldo José (2000). **Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto de Rio Grande, RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2000.

TORRES, L.C., VILLENA, H.H., BARREIRA, L.M., SANTOS, D.I., RANGEL, A.A (2003). **Base de Dados Batimétricos do Atlântico Sul**. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. Anais do Congresso. Belo Horizonte, MG. 2003

ANEXO 1 – MAPA BATIMÉTRICO DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS



ANEXO 2 – ESTRATIGRAFIA DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS



**ANEXO 3 – REGIÕES VULNERÁVEIS DE MENOR PROFUNDIDADE DO BAIXO
CURSO DO RIO TOCANTINS**

