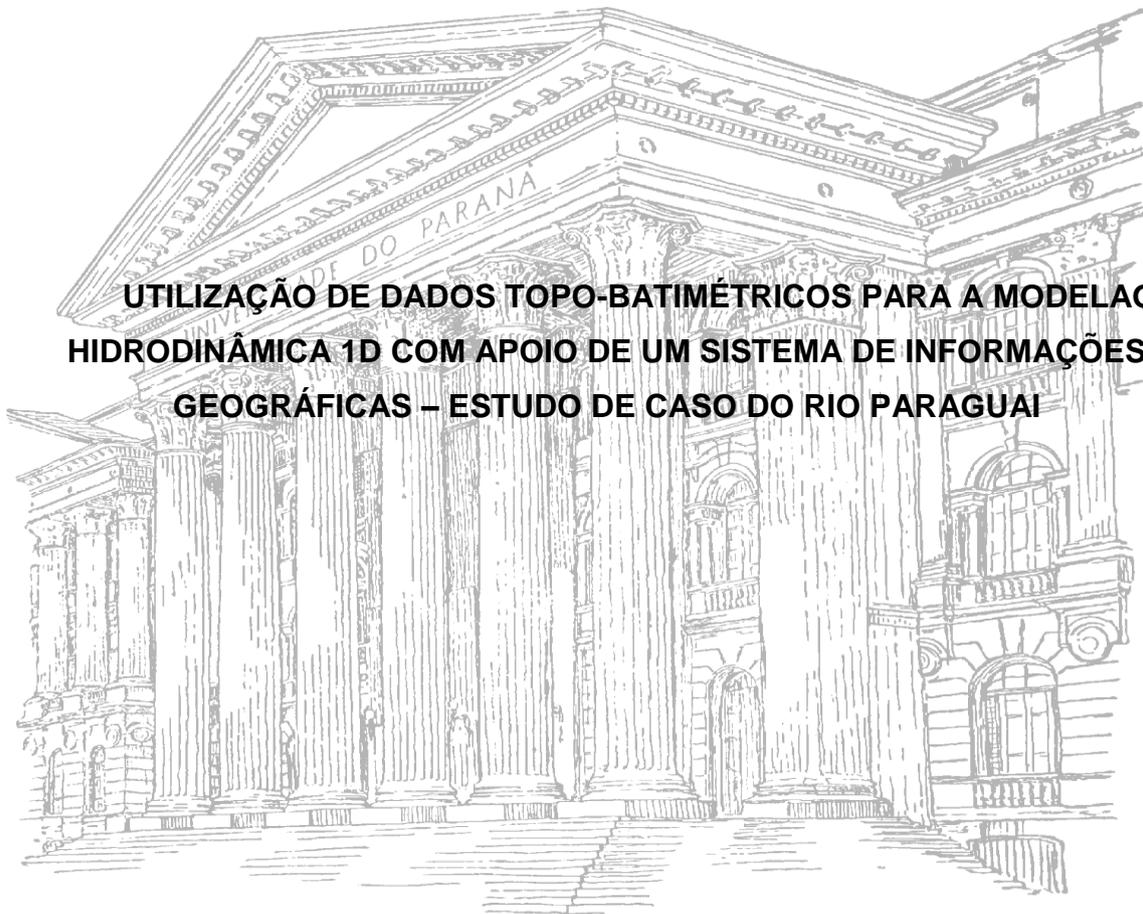


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENATA CORREIA



**UTILIZAÇÃO DE DADOS TOPO-BATIMÉTRICOS PARA A MODELAGEM
HIDRODINÂMICA 1D COM APOIO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS – ESTUDO DE CASO DO RIO PARAGUAI**

CURITIBA

2016

RENATA CORREIA

**UTILIZAÇÃO DE DADOS TOPO-BATIMÉTRICOS PARA A MODELAGEM
HIDRODINÂMICA 1D COM APOIO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS – ESTUDO DE CASO DO RIO PARAGUAI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger

CURITIBA

2016

*À minha mãe Deize, pelo amor incondicional e por sempre me mostrar que é possível ultrapassar as barreiras inicialmente intransponíveis.
Aos meus avós Djanira e Milton, pelo exemplo de cumplicidade, simplicidade e evolução. Estaremos juntos sempre.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, em especial à minha mãe, minha principal motivadora, exemplo de amor, carinho, dedicação e educação. À minha avó materna, que sempre se mostra uma fortaleza e é o meu refúgio.

Aos meus amigos do PPGERHA e do ITTI, pelos momentos de ajuda, de socorro, de idéias, de descontração e pela convivência. Aos demais amigos, obrigada pela paciência e pela parceria sempre.

Ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI), que proporcionou a participação na teoria e na prática do Projeto EVTEA, fonte de inspiração e de oportunidade para este trabalho, e concedeu a bolsa para que pudesse desenvolver minhas atividades em paralelo ao projeto.

Ao meu orientador, professor Tobias Bleninger, pela confiança, pela paciência, pelos ensinamentos e principalmente pelo incentivo neste trabalho.

Agradeço também ao Henrique Guarneri e à Flávia Waydzik, pelo companheirismo, pelas sugestões, ideias, auxílios nas horas mais difíceis e pelo carinho sempre.

Aos professores do PPGERHA e demais professores da Universidade Federal do Paraná, obrigada pela dedicação, pelos ensinamentos e por despertarem em mim admiração e anseio em seguir no meio acadêmico.

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela oportunidade na participação e no desenvolvimento dos estudos sobre o modal hidroviário nacional.

RESUMO

O fomento em ampliar a participação e a eficiência da Hidrovia do rio Paraguai na malha hidroviária nacional depende fortemente da análise do regime de escoamento do rio em condições de estiagem. Os estudos envolvendo modelos hidrodinâmicos surgem como aliados essenciais na obtenção de informações detalhadas sobre características hidráulicas e hidrológicas, auxiliando na avaliação das condições de navegabilidade em hidrovias interiores situadas em sistemas com características físicas complexas. Como base de um modelo hidrodinâmico, um Modelo Digital de Altitude (MDA) capaz de representar de forma eficiente a superfície do fundo do rio, garante um bom conjunto de dados para os cálculos efetuados no modelo, e um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite a integração, manipulação, armazenamento, transformação, coleta e análise de dados espaciais por meio de um banco de dados e uma estrutura organizacional, apoiando a modelagem hidrodinâmica no que diz respeito à preparação e a combinação dos dados. Portanto, o foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método para a combinação e aplicação de um modelo hidrodinâmico 1D com o apoio de um SIG, incluindo a avaliação de um MDA e de uma condição de estiagem na bacia do alto Paraguai, em um trecho que compreende 126 km de extensão, iniciando no município de Ladário - MS até o distrito de Porto Esperança - MS. A estrutura deste trabalho contemplou a avaliação do modelo digital de altitude para a região de estudo com a análise estatística de técnicas de geração de superfícies, fornecendo a base cartográfica para o modelo hidrodinâmico. Em um ambiente SIG, foram inseridas as demais informações como talvegue, margens e uma grande densidade de seções transversais, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados do modelo hidrodinâmico 1D. Condições de contorno e pontos de controle a partir dos dados de campo foram utilizados para calibração e verificação. Os cálculos foram efetuados para uma condição de estiagem e um regime permanente de escoamento no software HEC-RAS. Os principais resultados incluem avaliações do erro médio quadrático do MDA, sendo que o interpolador IDW apresentou os melhores resultados, e os cálculos do modelo hidrodinâmico 1D, apresentados em um SIG forneceram a elaboração de um cenário de estiagem, contendo uma superfície de níveis de água e de velocidades capaz de identificar trechos críticos à navegação, o perfil longitudinal da lâmina d'água, a declividade do rio para este trecho e diversas informações para investigações futuras associadas ao escoamento e à navegabilidade de hidrovias.

Palavras-chave: Condições de estiagem; Modelo digital de altitude; Modelo hidrodinâmico 1D; Navegabilidade em hidrovias; Sistema de informações geográficas.

ABSTRACT

The advancement of growing the effectiveness of the Paraguay River Waterway in the national waterway network depends heavily on the analysis of the river flow regime in low water level conditions. The studies involving hydrodynamic models appear as essential allies in obtaining detailed information on hydraulic and hydrological characteristics, assisting in the evaluation of navigability conditions in interior waterways located in systems with complex physical characteristics. As a basis for a hydrodynamic model, an Digital Altitude Model (DAM) capable of representing the bottom surface of the river ensures a good set of data for the calculations, and a Geographic Information System (GIS) allows the integration, manipulation, storage, transformation, collection and analysis of spatial data through a database and an organizational structure, supporting the hydrodynamic modeling. Therefore, the main focus of this work is the application of a method for the combination of a 1D hydrodynamic model with the support of a GIS, including the evaluation of an MDA in low water level conditions in the upper Paraguay basin, stretching from 126 km in length, starting in the municipality of Ladário-MS to the district of Porto Esperança-MS. The structure of this work considered the evaluation of the DAM with the statistical analysis of surface generation techniques, providing the cartographic base for the hydrodynamic model. In a GIS environment, other information such as talweg, margins and a high density of cross sections were introduced in order to ensure the reliability of the results of the 1D hydrodynamic model. Contour conditions and control points from the field data were used for calibration and verification. Calculations were made for a low water level condition and a permanent flow regime in the HEC-RAS software. The main results include the choosing of best fit DAM (IDW interpolator) through statistical analysis, and the calculations of the 1D hydrodynamic model presented in a GIS provided the elaboration of a low water level scenario with a surface of water levels and velocities capable of identifying critical sections of navigation, the longitudinal profile of the water table, the slope of the river and several information for future research associated with the flow and navigability of waterways.

Keywords: Low water level conditions; Digital altitude model; 1D hydrodynamic model; Navigability on waterways; Geographic information system.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - MATRIZ DE TRANSPORTES DE CARGAS BRASILEIRA EM 2015..... | 21 |
| FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO. | 30 |
| FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL..... | 33 |
| FIGURA 4 - DEPÓSITOS SEDIMENTARES EM RIOS DE MEANDRO. FORMAÇÃO DE MEANDRO E PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO NO RIO GUAPORÉ (RO). | 34 |
| FIGURA 5 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DAS EQUAÇÕES DA CONTINUIDADE, QUANTIDADE DE MOVIMENTO E ENERGIA ENTRE SEÇÕES TRANSVERSAIS..... | 40 |
| FIGURA 6 - RESULTADOS DO MODELO 1D E MODELO RASTER. SIMULAÇÕES ENTRE AQUIDAUANA E PORTO CIRÍACO (PONTOS VERMELHOS) EM DIFERENTES INTERVALOS DE TEMPO..... | 42 |
| FIGURA 7 - VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DO RIO PARAGUAI. | 43 |
| FIGURA 8 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D. (A) IMAGEM AÉREA DA REGIÃO DE ESTUDO. (B) RESULTADO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA EVENTO DE CHEIA. | 46 |
| FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS PARA REPRESENTAÇÃO DE BATIMETRIA EM RIOS. | 47 |
| FIGURA 10 - SUPERFÍCIES INTERPOLADAS: (A) TOPOGRID; (B) IDW EM (X, Y) (C) SPLINE EM (X, Y); (D) TOPOGRID EM (X, Y); (E) KRIGAGEM ANISOTRÓPICA EM (S, N); F) EIDW EM (S,N). | 48 |
| FIGURA 11 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY E O DIAGRAMA DE VORONOI..... | 54 |
| FIGURA 12 - AMOSTRAGEM EM DUAS DIMENSÕES NO SEMIVARIOGRAMA. | 58 |
| FIGURA 13 - CONVENÇÕES DIRECIONAIS UTILIZADAS NA ANISOTROPIA..... | 59 |
| FIGURA 14 - BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARAGUAI E SUAS SUBDIVISÕES..... | 62 |
| FIGURA 15 - HIDROVIA DO RIO PARAGUAI. DESTAQUE PARA A ÁREA DE ESTUDO.. | 64 |
| FIGURA 16 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS. | 68 |
| FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS INFORMAÇÕES OBTIDAS PARA A REGIÃO DE ESTUDO..... | 69 |
| FIGURA 18 - TRANSFORMAÇÃO DE ONDULAÇÃO GEOIDAL EM ORTOMÉTRICA. | 72 |
| FIGURA 19 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA IMPLANTAÇÃO DAS RRNN. (A) CONJUNTO NÍVEL TOPOGRÁFICO E EQUIPAMENTOS GNSS; (B) RECEPTOR GNSS; (C) RÉGUA ESTADIMÉTRICA E (D) RECEPTOR GNSS. | 73 |
| FIGURA 20 - CARTA NÁUTICA 3423. DA ILHA CARAGUATÁ À ILHA CAMBARÁ FERRADO. | 75 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 21 - SISTEMA DE BALIZAMENTO MARÍTIMO DE ACORDO COM A IALA. SISTEMA DE BALIZAMENTO MARÍTIMO DIVIDIDO POR REGIÕES DE ACORDO COM A IALA. | 76 |
| FIGURA 22 - ÁBACO DE CORREÇÕES DE SONDAGENS. EXEMPLO DA RÉGUA DE LADÁRIO E FORTE COIMBRA NO RIO PARAGUAI. | 78 |
| FIGURA 23 - COTAS A) MÁXIMAS, B) MÉDIAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO PARA O PERÍODO DE 1900 A 2015. | 82 |
| FIGURA 24 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSASIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO PARA O PERÍODO DE 1900 A 2015. | 83 |
| FIGURA 25 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO. | 83 |
| FIGURA 26 - COTAS A) MÉDIAS, B) MÁXIMAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA PARA O PERÍODO DE 1969 A 2015. | 84 |
| FIGURA 27 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSASIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA PARA O PERÍODO DE 1969 A 2015. | 85 |
| FIGURA 28 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA. | 85 |
| FIGURA 29 - COTAS A) MÉDIAS, B) MÁXIMAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA PARA O PERÍODO DE 1963 A 2015. | 86 |
| FIGURA 30 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSASIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA PARA O PERÍODO DE 1963 A 2015. | 87 |
| FIGURA 31 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA. | 87 |
| FIGURA 32 - EQUIPAMENTO ADCP SONTEK M9. A) TRANSDUTOR; B) SONDA, PCM E GPS; C) ADCP EM FUNCIONAMENTO ACOPLADO EM BÓIA DURANTE MEDIÇÃO NO RIO CUIABÁ. | 89 |
| FIGURA 33 - ÂNGULO DO TRANSDUTOR DO ADCP. | 90 |
| FIGURA 34 - ÁREA MEDIDA E NÃO MEDIDA PELO ADCP. | 90 |
| FIGURA 35 - DIAGRAMA DE UMA EMBARCAÇÃO REALIZANDO MEDIÇÕES DE ADCP EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CANAL. | 91 |
| FIGURA 36 - EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM ADCP. A) LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL. B) PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES (SAÍDA DO RIVER SUERVEYOR LIVE). | 92 |
| FIGURA 37 - DIAGRAMA DA METODOLOGIA DA PESQUISA. | 95 |
| FIGURA 38 - VALIDAÇÃO CRUZADA. EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO. | 97 |
| FIGURA 39 - DETALHE DA BASE CARTOGRÁFICA PARA A REGIÃO DA ILHA DE CARAGUATÁ. | 102 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 40 - EXEMPLO DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTOURO PARA UM TRECHO DA REGIÃO DE ESTUDO – DE PORTO DE LADÁRIO A PORTO DA MANGA. | 104 |
| FIGURA 41 - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS MARGENS DO RIO PARAGUAI. AUXÍLIO NA CALIBRAÇÃO..... | 105 |
| FIGURA 42 - EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DAS MARGENS DO RIO PARAGUAI..... | 107 |
| FIGURA 43 - MDA COM GERADORES DE SUPERFÍCIE. A) REDE TRIANGULAR IRREGULAR. B) INVERSO DA DISTÂNCIA PONDERADA (IDW); C) KRIGAGEM ORDINÁRIA; D) VIZINHOS NATURAIS (NN). | 110 |
| FIGURA 44 - HISTOGRAMA DO ERRO PARA OS MODELOS GERADORES DE SUPERFÍCIE..... | 112 |
| FIGURA 45 - COEFICIENTES DE RUGOSIDADE N DE MANNING PARA O TRECHO MODELADO..... | 115 |
| FIGURA 46 - PERFIL LONGITUDINAL DA LÂMINA D'ÁGUA DURANTE A ETAPA DE CALIBRAÇÃO DO MODELO..... | 116 |
| FIGURA 47 - VELOCIDADES CALIBRADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM CAMPO. | 118 |
| FIGURA 48 - VAZÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE LADÁRIO, PORTO DA MANGA E PORTO ESPERANÇA PARA O CENÁRIO DE ESTIAGEM (NÍVEL DE REDUÇÃO). | 119 |
| FIGURA 49 - RESULTADOS PARA A SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ESTIAGEM. | 121 |
| FIGURA 50 - SEÇÃO TRANSVERSAL OBTIDA POR MEIO DA MEDIÇÃO DE ADCP PARA A ILHA DE SANTANA/JATOBÁ..... | 123 |
| FIGURA 51 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO HIDRODINÂMICO PARA DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE NA LOCALIDADE DE SANTANA/JATOBÁ..... | 124 |
| FIGURA 52 - SOBREPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO PARA A ILHA DE SANTANA/JATOBÁ..... | 125 |
| FIGURA 53 - MAPA DE PROFUNDIDADES. RESULTADO DA INTERAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D E O AMBIENTE SIG. LOCAIS EM AZUL MAIS ESCURSO APRESENTAM PROFUNDIDADES SUPERIORES A 3,0 M. | 127 |
| FIGURA 54 - PROFUNDIDADES DA REGIÃO DA ILHA DE CARAGUATÁ. CONDIÇÃO DE ESTIAGEM..... | 128 |
| FIGURA 55 - DETALHAMENTO EM COMPARAÇÃO ÀS CARTAS NÁUTICAS PARA A ILHA DE CARAGUATÁ. | 129 |
| FIGURA 56 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D..... | 130 |
| FIGURA 57 - VELOCIDADES NAS SEÇÕES TRANSVERSAIS..... | 130 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RMSE PARA DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO NO SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS..... | 48 |
| TABELA 2 - DIMENSÕES DO CANAL DE NAVEGAÇÃO. | 66 |
| TABELA 3 - PASSAGENS CRÍTICAS À NAVEGAÇÃO HOMOLOGADAS PELA MARINHA DO BRASIL. | 66 |
| TABELA 4 - DADOS DISPONÍVEIS..... | 68 |
| TABELA 5 - ALTITUDES ORTOMÉTRICAS DA LÂMINA D'ÁGUA PARA AS RRNN IMPLANTADAS NO TRECHO DE ESTUDO..... | 73 |
| TABELA 6 - NÍVEIS DE REDUÇÃO DAS RÉGUAS LINIMÉTRICAS DO RIO PARAGUAI. . | 78 |
| TABELA 7 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NESTE ESTUDO. | 80 |
| TABELA 8 - IDENTIFICAÇÃO DE MEDIÇÕES DE ADCP REALIZADAS NO TRAMO SUL DA HIDROVIA DO RIO PARAGUAI. | 92 |
| TABELA 9 - VALORES DE COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING PARA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO E CANAL. | 106 |
| TABELA 10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS INTERPOLADORES ESPACIAIS PARA O TRECHO MODELADO. | 111 |
| TABELA 11 - CONDIÇÕES DE CONTORNO E PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO. | 114 |
| TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES CALIBRADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM LEVANTAMENTOS DE CAMPO. | 117 |
| TABELA 13 - INFORMAÇÕES RELEVANTES PARA A SIMULAÇÃO DE ESTIAGEM. | 120 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 1 - MODELOS COMPUTACIONAIS PARA A SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CONSERVAÇÃO..... | 36 |
| QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ADCP SONTEK M9..... | 88 |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| IHO | <i>International Hydrographic Organization</i> |
| ADCP | <i>Acoustic Doppler Velocimeter Profiler</i> |
| AHIPAR | Administração da Hidrovia do Paraguai |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ANTAQ | Agência Nacional de Transportes Aquaviários |
| CHM | Centro de Hidrografia da Marinha |
| CPRM | Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais |
| DHN | Diretoria de Hidrografia da Marinha |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DOI | <i>United States Department of the Interior</i> |
| EVTEA | Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| IALA | <i>International Association of Lighthouse Authorities</i> |
| IDW | <i>Inverse Distance Weighting</i> |
| IHO | <i>International Hydrographic Organization</i> |
| MDA | Modelo Digital de Altitude |
| NN | <i>Natural Neighbors</i> |
| NS | Coeficiente de <i>Nash-Sutcliffe</i> |
| PHE | Plano Hidroviário Estratégico |
| PNIH | Plano Nacional de Integração Hidroviária |
| PNLT | Plano Nacional de Logística de Transportes |
| RMSE | Erro médio quadrático |
| RRNN | Referências de Nível |
| SIG | Sistemas de Informações Geográficas |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| SSN-6 | Serviço de Sinalização Náutica do Oeste – Marinha do Brasil |
| TIN | <i>Triangular Irregular Network</i> |
| TKU | Tonelada por Quilômetro Útil |
| USGS | <i>United States Geological Survey</i> |
| UTM | Projeção Universal Transversa de Mercator |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| | ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES..... | 11 |
| | ÍNDICE DE TABELAS | 15 |
| | ÍNDICE DE ABREVIATURAS..... | 16 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 20 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA | 23 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 24 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO PROJETO | 25 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 27 |
| 2.1 | PRINCÍPIOS DE ESCOAMENTO DE SUPERFÍCIE LIVRE | 27 |
| 2.1.1 | Classificação dos escoamentos de superfície livre..... | 29 |
| 2.1.2 | Morfologia de sistemas fluviais | 32 |
| 2.2 | MODELAGEM HIDRODINÂMICA EM SISTEMAS FLUVIAIS | 35 |
| 2.2.1 | Modelos hidrodinâmicos unidimensionais..... | 37 |
| 2.2.2 | Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos no rio Paraguai | 41 |
| 2.3 | A IMPORTÂNCIA DA REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS SISTEMAS FLUVIAIS NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA..... | 44 |
| 2.3.1 | Sistema de Informações Geográficas (SIG) na modelagem hidrodinâmica | 49 |
| 2.3.2 | Modelo Digital de Altitude (MDA) | 50 |
| 2.3.3 | Análise espacial de dados e geração de superfícies | 51 |
| 2.3.4 | Rede Triangular Irregular (TIN)..... | 53 |
| 2.3.5 | Inverso da Distância Ponderada - <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW) | 55 |
| 2.3.6 | Vizinhos Naturais – <i>Natural Neighbors</i> (NN)..... | 55 |
| 2.3.7 | Krigagem - <i>Kriging</i> | 56 |
| 3 | ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS..... | 61 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO..... | 61 |
| 3.1.1 | A Hidrovia do rio Paraguai | 63 |
| 3.2 | DADOS DISPONÍVEIS..... | 67 |
| 3.2.1 | Altimetria do rio Paraguai por meio de implantação de Referências de Nível (RRNN) 70 | |
| 3.2.1 | Dados cartográficos | 74 |
| 3.2.2 | Nível de redução | 77 |
| 3.2.3 | Atribuição de altimetria a pontos batimétricos das cartas náuticas..... | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2.4 | Dados hidrológicos..... | 79 |
| 3.2.4.1 | <i>Estação Fluviométrica de Ladário</i> | 81 |
| 3.2.4.2 | <i>Estação Fluviométrica de Porto da Manga</i> | 84 |
| 3.2.4.3 | <i>Estação Fluviométrica de Porto Esperança</i> | 86 |
| 3.2.5 | Medições de vazão e velocidade | 88 |
| 4 | MÉTODOS | 94 |
| 4.1 | MODELO DIGITAL DE ALTITUDE (MDA)..... | 96 |
| 4.1.1 | Análise da qualidade..... | 96 |
| 4.1 | MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL | 97 |
| 4.1.1 | HEC-RAS..... | 98 |
| 4.1.2 | HEC-GeoRAS | 99 |
| 4.2 | PROCESSAMENTO DE DADOS PARA O MODELO HIDRODINÂMICO . | 100 |
| 4.2.1 | Base Cartográfica | 100 |
| 4.3 | CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO | 102 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 108 |
| 5.1 | GERAÇÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE (MDA) | 108 |
| 5.1.1 | Controle de qualidade dos diferentes produtos cartográficos | 111 |
| 5.2 | AVALIAÇÃO DO RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D..... | 113 |
| 5.2.1 | Verificações hidrodinâmicas – Etapa de calibração | 114 |
| 5.2.2 | Verificações hidrodinâmicas – Etapa de simulação | 118 |
| 5.2.3 | Comparações das medições de ADCP para diferentes geradores de superfície..... | 122 |
| 5.3 | PROCESSAMENTO DOS DADOS RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D | 126 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 131 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 134 |
| | ANEXO I – REDE DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL (RRNN) IMPLANTADAS NO TRAMO SUL DA HIDROVIA DO RIO PARAGUAI | 143 |
| | ANEXO II – MEDIÇÕES DE VAZÃO E VELOCIDADE NO TRAMO SUL DA HIDROVIA DO RIO PARAGUAI | 145 |

1 INTRODUÇÃO

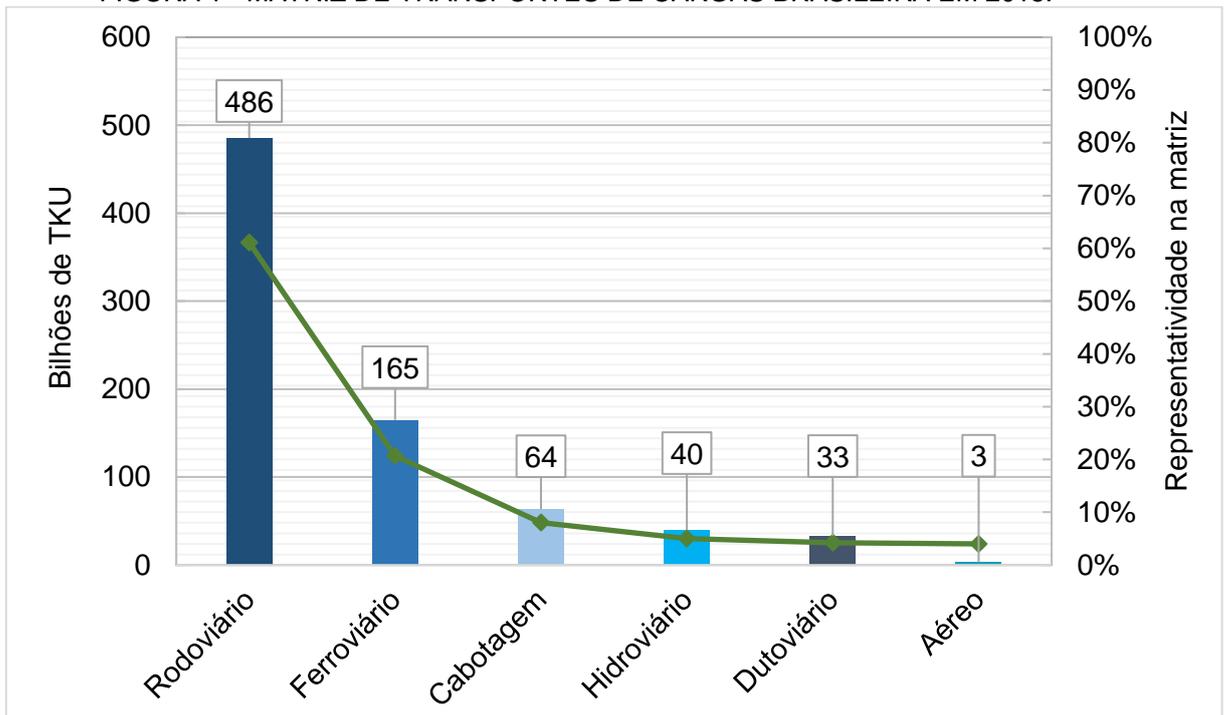
Embora o Brasil possua uma vasta rede hidrográfica contabilizando seis grandes bacias, a sua utilização como meio de transporte ainda não é priorizada se comparada aos outros setores da malha viária nacional. As ações governamentais direcionadas ao aproveitamento do transporte hidroviário tem um histórico de recente de investimentos, tendo ocorrido em virtude dos grandes incentivos rodoviários advindos principalmente a partir da década de 50.

Em sua grande maioria, as hidrovias brasileiras são naturalmente navegáveis e estão localizadas em regiões estratégicas, e representam uma alternativa eficiente de integração econômica, política e social, além de representarem uma boa possibilidade para a diversificação da matriz de transportes.

A sua representação na malha viária nacional é equivalente a aproximadamente 22 mil quilômetros de vias navegáveis economicamente ativas. Tais números podem atingir cerca de 41 mil quilômetros, e, a partir de investimentos em infraestrutura e manutenção, esse potencial das vias interiores brasileiras pode alcançar cerca de 63 mil quilômetros de vias navegáveis (CNT, 2015).

De acordo com o Boletim Estatístico anual apresentado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2015), a malha de transporte de cargas brasileira apresenta predominância no modal rodoviário, com participação de cerca de 61% na matriz, contra 21% do transporte ferroviário, 8% representando o transporte por cabotagem, 5% representando o transporte hidroviário, 4% com transporte dutoviário e 0,4% com participação do transporte aéreo, como mostra a Figura 1.

FIGURA 1 - MATRIZ DE TRANSPORTES DE CARGAS BRASILEIRA EM 2015.



Fonte: CNT (2015).

O termo hidrovia designa as vias navegáveis interiores que foram balizadas e sinalizadas para uma determinada embarcação tipo, isto é, aquelas que oferecem boas condições de segurança às embarcações, suas cargas e passageiros/tripulantes, e que dispõem de cartas de navegação (ANA, 2005). A sua utilização requer uma série de cuidados e medidas que venham a contribuir para a utilização adequada dos recursos naturais do ecossistema como um todo, de forma a abranger os aspectos físicos, econômicos, ambientais e sociais.

Em meio a diversos obstáculos no cenário nacional, é evidente o incentivo por parte das entidades públicas para a diversificação da matriz de transportes nos últimos anos, principalmente em relação ao setor hidroviário. Em 2013, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) divulgou o Plano Nacional de Integração Hidroviária (PNIH), que teve como objetivo o desenvolvimento de estudos detalhados sobre as hidrovias brasileiras, e conseqüentemente o fomento em ampliar a participação dessa modalidade na matriz de transportes.

Estas participações apresentam-se por meio da divulgação de relatórios técnicos e executivos das seis bacias hidrográficas brasileiras, a saber: Amazônica, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Alto Paraguai, Paraná-Tietê e Parnaíba (ANTAQ, 2013). A elaboração destes estudos busca estudar a viabilidade técnica, econômica e

ambiental das hidrovias nacionais, a partir de trechos hidroviários já navegados ou potencialmente navegáveis, fato este que exige medidas de renovação, adaptação nos sistemas de navegação e estudos detalhados sobre os sistemas fluviais.

Dentre as hidrovias de relevante importância nacional, destaca-se a Hidrovia Paraguai-Paraná, um dos mais extensos e importantes eixos de integração política, social e econômica da América do Sul, a qual se estende por cinco países: Brasil, Bolívia, Argentina, Paraguai e Uruguai.

Historicamente, o litoral sul americano sempre recebeu um maior fluxo de desenvolvimento do que o interior. No entanto, o atual momento de integração do Mercosul, intensificou o desenvolvimento da área de influência da Hidrovia Paraguai-Paraná, envolvendo direitos de propriedade supranacional (ANTAQ, 2010).

O rio Paraguai é um dos componentes da parte brasileira da Hidrovia Paraguai-Paraná, e recebe a denominação de Hidrovia do rio Paraguai quando em território brasileiro, contemplando os estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. De acordo com a Administração da Hidrovia do Paraguai (AHIPAR, 2015), este rio é um importante eixo de integração e um modal de escoamento da produção de abrangência regional, nacional e internacional, além de contemplar um dos ecossistemas de maior diversidade do mundo, o Pantanal.

Anualmente, são transportados pela hidrovia cerca de 5,9 milhões de toneladas de carga, valor associado a um incremento de cerca de 31% em relação ao ano de 2013 (BRASIL. Ministério dos Transportes, 2014). O principal produto escoado é o minério de ferro, que possui origem no estado do Mato Grosso do Sul e percorre a Hidrovia Paraguai-Paraná até Nova Palmira, no Uruguai.

Miguens (2000) aponta que, ao longo de toda a extensão do rio existem desafios em relação à navegação, e estão associados à pouca profundidade em alguns trechos do canal navegável, principalmente durante o período de estiagem. As alterações na profundidade do canal resultam no elevado risco de colisões e possíveis encalhamentos dos comboios que trafegam pela hidrovia.

O sistema fluvial do rio Paraguai é bastante característico. Além de estar situado no ecossistema de planície de inundação, ele apresenta a morfologia de rios de meandros, caracterizados por baixas profundidades, conta com a presença de dunas móveis e de períodos bem marcados entre inundações e estiagens.

Sendo assim, o regime hidrológico é um dos principais fatores reguladores da navegação. As cheias e as estiagens caracterizam-se como mediadores da hidrovia,

permitindo ou restringindo a passagem de comboios, e conseqüentemente, o tráfego de cargas. De acordo com Rattón (2015), o conhecimento do regime hidrológico e do comportamento do rio Paraguai, principalmente nas condições de estiagem, são necessários para a previsão de níveis nos trechos onde há locais críticos para a navegação.

1.1 JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Em se tratando do rio Paraguai, cuja extensão chega a aproximadamente 1.270 quilômetros em território brasileiro, existem parâmetros de alta sensibilidade que devem ser considerados para todo e qualquer estudo do sistema, como a proximidade física do rio com as reservas de proteção ambiental, a própria característica do sistema fluvial de planície de inundação, a conseqüente amplitude sazonal em relação ao nível de água, e principalmente a escassa quantidade de dados hidrológicos observados na região - apenas 11 estações fluviométricas ao longo de toda a extensão (1270 quilômetros).

Frigo e Bleninger (2015) apontam a existência de diversas abordagens de estudos em sistemas fluviais que podem servir de embasamento para a análise de navegabilidade em rios, como os estudos que analisam a influência da hidrologia em canais (Henderson, 1966; Nilson *et al.*, 2012), do transporte de sedimentos (Violeau *et al.*, 2002; Rijn, 2007), de modelos hidrodinâmicos 1D e 2D em rios (Horrit e Battes, 2002) e de relatórios técnicos de padronização de embarcações e de hidrovias interiores, a exemplo da *Permanent International Association of Navigational Congress* (PIANC, 1996), dentre outros. Além disso, existem estudos hidrológicos envolvendo a influência das cheias em sistemas de grande escala com planícies de inundação, como o próprio rio Paraguai (Collischonn, 2001; Tucci, 2004; Paz *et al.*, 2006; Paz, 2010).

Diante de todas essas composições, os estudos envolvendo modelos hidrodinâmicos surgem como aliados essenciais na obtenção de informações detalhadas sobre o regime de escoamento e o regime hidrológico, a fim de fornecer embasamento para o desenvolvimento de estudos relacionados às condições de navegabilidade em hidrovias interiores alocadas em sistemas com características físicas complexas.

Em estudos de modelos hidrodinâmicos de sistemas fluviais de grande escala, a representação geométrica do canal e da superfície do entorno são elementos de entrada de grande criticidade. Da mesma forma, os parâmetros hidrológicos e hidráulicos que alimentam esses estudos também são críticos e devem ser inseridos de forma eficaz. A reprodução incorreta dessas características pode gerar resultados imprecisos e dúbios.

Embora existam diversas ferramentas para as análises das etapas que compõem um estudo hidrodinâmico, incluindo a modelagem, ainda são encontradas algumas dificuldades em relação às suas aplicações e a um método direcionado às condições de navegação e na complementação de informações para grandes sistemas e com a morfologia fluvial complexa, como é o caso do rio Paraguai.

Desta forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de um estudo hidrodinâmico em um sistema fluvial de grande escala, a partir da combinação de um modelo hidrodinâmico unidimensional (1D) e de ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), avaliando os métodos e técnicas que compõem as etapas de elaboração da modelagem. Com isso, espera-se complementar a escassez de dados e demais informações referentes ao sistema de uma forma direcionada e integrada, avaliando métodos distintos e auxiliando os futuros estudos relacionados às hidrovias em geral, de forma a promover resultados que acarretem em benefícios para as esferas acadêmica, econômica, ambiental e social.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é utilizar um método capaz de integrar e aplicar um modelo hidrodinâmico em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) em um sistema fluvial de navegação, a fim de identificar as passagens críticas de navegação.

Em decorrência do objetivo principal, podem-se dividir os objetivos específicos em quatro categorias:

- Gerar, analisar e avaliar um Modelo Digital de Altitude (MDA), que serve de base para o modelo hidrodinâmico, em termos de representação de características físicas de um sistema fluvial de grande escala;

- Avaliar os diferentes métodos de interpolação e a resolução de dados topobatimétricos para o Modelo Digital de Altitude (MDA) a respeito da modelagem hidrodinâmica 1D;
- Elaborar um modelo hidrodinâmico 1D sob uma condição hidrológica condizente com os níveis mínimos de água no rio, que sejam capazes de identificar trechos críticos de navegação em condições de estiagem;
- Avaliar os resultados do modelo hidrodinâmico em termos da capacidade de reprodução de medições em campo e da complementação de informações relacionadas ao sistema rio e hidrovia;
- Processar os dados finais na forma de visualização de profundidades e de velocidades afim de subsidiar futuros estudos de navegação em rios e hidrovias.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO

O Capítulo 1 apresenta uma descrição sobre o tema do estudo e sua importância no cenário acadêmico e econômico atual, definindo a situação em que se encontra, justificando a necessidade deste trabalho e indicando os objetivos que nortearam o seu desenvolvimento.

A revisão bibliográfica que forneceu suporte para a elaboração deste estudo, é apresentada no Capítulo 2. Ela aborda os princípios da mecânica dos fluidos, conseqüentemente da hidráulica fluvial, a caracterização de um sistema fluvial de meandros e apresenta os principais conceitos e parâmetros relacionados à modelagem hidrodinâmica. A combinação da modelagem com um Sistema de Informações Geográficas (SIG) também é contemplada neste capítulo, destacando a importância da representação espacial dos sistemas fluviais, e por fim, apresentando-se os estudos anteriores já desenvolvidos nesta área e aqueles relacionados à região hidrográfica do rio Paraguai.

O Capítulo 3 descreve e caracteriza a área de estudo e os dados disponíveis, apresentando as informações e as medições em campo realizadas, a sua disponibilização e a sua utilização no desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 4 são discutidos os métodos que demarcaram este estudo, incluindo os programas, as técnicas e o processamento de dados utilizados.

No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os principais resultados e informações encontrados.

Por fim, no Capítulo 6 discorrem-se sobre as principais considerações atendidas durante o desenvolvimento e a análise dos métodos e resultados, além de estabelecer as principais considerações e recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi organizada em 3 seções. A seção 2.1 apresenta os principais equações e conceitos relacionados aos sistemas fluviais, incluindo a classificação dos escoamentos e apresentando uma breve descrição da morfologia fluvial de rios com características de meandros. A seção 2.2 discorre sobre a modelagem hidrodinâmica, seus principais conceitos aplicados aos sistemas fluviais, contemplando modelos 1D e alguns estudos anteriores realizados na região de estudo. A seção 2.3 descreve a importância da representação espacial dos sistemas fluviais, abordando a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) na modelagem, seguida da apresentação de estudos relacionados ao tema.

2.1 PRINCÍPIOS DE ESCOAMENTO DE SUPERFÍCIE LIVRE

Os princípios básicos que regem os sistemas fluviais são em essência os mesmos de um escoamento de superfície livre. Segundo Chaudhry (2008), para descrever esses sistemas, são considerados os três princípios básicos da conservação baseados no teorema fundamental de Transporte de Reynolds para um volume de controle sob uma abordagem Euleriana: a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia, brevemente descritos a seguir.

A equação diferencial da continuidade, representando a conservação da massa para fluidos pode ser expressa por Chaudhry (2008) por meio da Equação (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

onde $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ representa a variação temporal de unidade de massa em um volume de controle $\frac{\partial \rho v_x}{\partial x}$, $\frac{\partial \rho v_y}{\partial y}$ e $\frac{\partial \rho v_z}{\partial z}$ são as variações espaciais do fluxo de massa que cruz a superfície de controle em um escoamento.

A conservação da quantidade de movimento pode ser expressa em sua forma diferencial pelas equações de Navier-Stokes, as quais representam os movimentos e forças atuantes nos fluidos newtonianos, onde a tensão viscosa é proporcional à taxa de deformação por cisalhamento, e podem ser expressas nas direções x , y e z pela Equação (2):

$$\begin{aligned} \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \\ \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \\ \rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

onde u , v e w são as componentes de velocidade nas direções x , y e z do escoamento (m/s), ρ representa a densidade (kg/m³) e μ a viscosidade do fluido (N.s/m²), P é a pressão hidrostática (N/m²) e g a aceleração gravitacional (m/s²) (CHAUDHRY, 2008). O lado direito da Equação 2 representa a componente de aceleração, a componente da gravidade e as tensões cisalhantes em um dado volume de controle, respectivamente, ao passo que o lado esquerdo da Equação 2 representa as taxas de variação da quantidade de movimento que cruzam a superfície de controle.

De acordo com Chaudhry (2008), a equação da energia de Bernoulli expressa a conservação da energia do fluido e pode ser traduzida pelo Teorema da Conservação de Energia Mecânica, onde a variação da energia pode ser associada ao trabalho mecânico realizado pelo fluido em movimento, expressa pela Equação (3):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{dW}{dt} = \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta W \quad (3)$$

onde ΔE_c é a energia cinética associada, ΔE_p é a energia potencial gravitacional associada e ΔW representam o trabalho realizado pelas forças atuantes no escoamento.

A complexidade dos fluidos reais torna impossível a solução das equações governantes sem a execução de algumas aproximações simplificadoras (TOOMBES e CHANSON, 2011), as quais incluem:

- a) Simplificação nas propriedades espaciais e geométricas;
- b) Regime permanente ou quase-permanente de escoamento;
- c) Assumir incompressibilidade, com ρ , μ , e/ou temperatura constantes;
- d) Utilização de fórmulas empíricas e aproximações (equação de Manning, modelo K- ϵ).

2.1.1 Classificação dos escoamentos de superfície livre

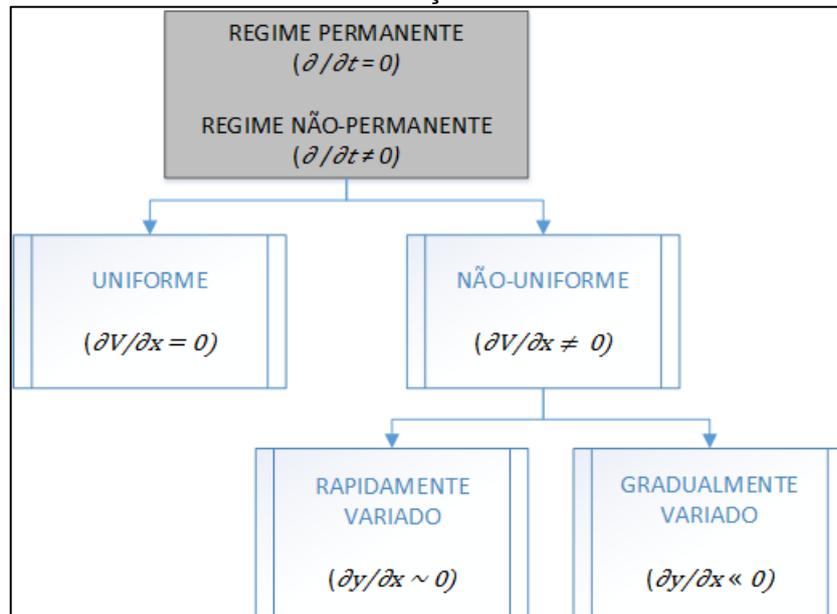
O problema central dos escoamentos em canais abertos em hidráulica fluvial concentra-se em identificar as relações das características geométricas, hidrológicas, hidráulicas e morfológicas disponíveis em um sistema fluvial (DINGMAN, 2009).

De acordo com Paz (2010), estabelecer estas relações são tarefas essenciais capazes de resolver importantes problemas práticos na engenharia, tais como: o dimensionamento de canais; a determinação de uma área inundada em um sistema de planície de inundação dado um determinado evento; a distribuição da onda de cheia ao longo de uma rede de canais, além da dimensão e da quantidade de sedimentos transportados ao longo de um ou de diversos canais.

I. Escoamento Uniforme e Não-uniforme

Baseados em diferentes critérios, os escoamentos de superfície livre podem ser classificados de diversas formas, como mostra a Figura 2.

FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO.



Fonte: Adaptado de CHAUDHRY, 2008.

De acordo com Gribbin (2009), um escoamento pode ser considerado permanente e uniforme quando as variações nos valores de vazão, área da seção transversal e declividade são mínimas e tendem a ser desprezíveis. Além disso, o escoamento pode ser dito permanente se ele varia lentamente em função do tempo, o que ocorre comumente em alguns trechos de rios e canais naturais.

Se a velocidade do escoamento em um determinado instante não varia ao longo do canal, temos um escoamento **uniforme**. No entanto, se a velocidade do escoamento varia com a distância, o escoamento é **não uniforme** (CHAUDHRY, 2008).

Quando o escoamento é **não-uniforme**, ele pode ser ainda classificado em relação à taxa de variação da profundidade em relação à distância, sendo **gradualmente variado** quando essa taxa varia lentamente, e **rapidamente variado** quando ocorrem alterações bruscas de profundidade ou velocidade.

Em canais abertos, a velocidade do escoamento é nula nas superfícies laterais e no fundo, devido à condição de não deslizamento, e normalmente máxima no plano médio (superfícies simétricas), logo abaixo da superfície livre (GRIBBIN, 2009). A condição de não deslizamento nas paredes do canal permite gradientes de velocidade, e a tensão de cisalhamento de parede (T_w) desenvolve-se ao longo das superfícies molhadas. A tensão de cisalhamento da parede varia ao longo da seção

transversal e ocasiona resistência ao escoamento. A magnitude dessa resistência depende da viscosidade do fluido e dos gradientes de velocidade que estão relacionados com a rugosidade da parede (CARDOSO, 1998).

II. Escoamentos laminares e turbulentos

A magnitude da relação entre as forças viscosas e inerciais em um escoamento determinam se o escoamento será **laminar** ou **turbulento**.

Uma das grandezas adimensionais que expressa a razão entre as forças de inércia (devido a velocidade do fluido) e a intensidade dos efeitos viscosos em um escoamento é o número de Reynolds (R_e). A sua representação para escoamentos de superfície livre pode ser escrita por Chaudhry (2008) por meio da Equação (4):

$$R_e = \frac{RV}{\nu} \quad (4)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s), R é o raio hidráulico, definido como a razão entre a área da seção transversal (A) (m^2) e o perímetro molhado (P) (m), e V é a velocidade média do escoamento (m/s). A profundidade hidráulica também pode ser utilizada por meio da substituição pelo raio hidráulico (R), nos casos de rios com grandes larguras e baixas profundidades.

Os escoamentos de superfície livre, dependendo das várias condições envolvidas, podem ser laminares, de transição ou turbulentos. Se o número de Reynolds (R_e) < 500 , porém, na prática, todos os rios são considerados turbulentos.

III. Escoamento subcrítico, supercrítico e crítico

Outra grandeza adimensional que permite a classificação do escoamento é o número de Froude (Fr), que representa a razão entre as forças inerciais e gravitacionais, e pode ser representado pela Equação (5):

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy_m}} \quad (5)$$

onde g é a aceleração gravitacional (m/s^2) e y_m é a profundidade média (m) , definida como a razão entre a área da seção transversal e a largura da superfície do escoamento (CHAUDHRY, 2008).

O escoamento é denominado crítico se a sua velocidade for igual à velocidade da onda gravitacional de pequena amplitude, que pode ser gerada a partir de uma variação na profundidade do escoamento ($F_r = 1$).

Se $F_r < 1$, o escoamento é denominado subcrítico ou fluvial. Quando $F_r > 1$, ele é supercrítico ou torrencial. Na maioria dos rios e sistemas fluviais de planície as forças gravitacionais são predominantes, sendo o escoamento subcrítico.

2.1.2 Morfologia de sistemas fluviais

A morfologia fluvial está centrada no estudo dos processos e das formas relacionadas com o escoamento dos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980). A compreensão dos processos morfológicos fluviais é capaz de fornecer subsídios de previsão de respostas às mudanças no uso do solo em uma bacia hidrográfica, às ações no próprio leito fluvial e, principalmente, possibilitar a classificação de diferentes tipos de canais fluviais.

Diversas classificações geomorfológicas de sistemas fluviais têm sido desenvolvidas ao longo dos anos, com abordagens enfatizadas na estrutura genética e na evolução das características dos rios, influenciadas pela estrutura geológica (BUFFINGTON e MONTGOMERY, 2013).

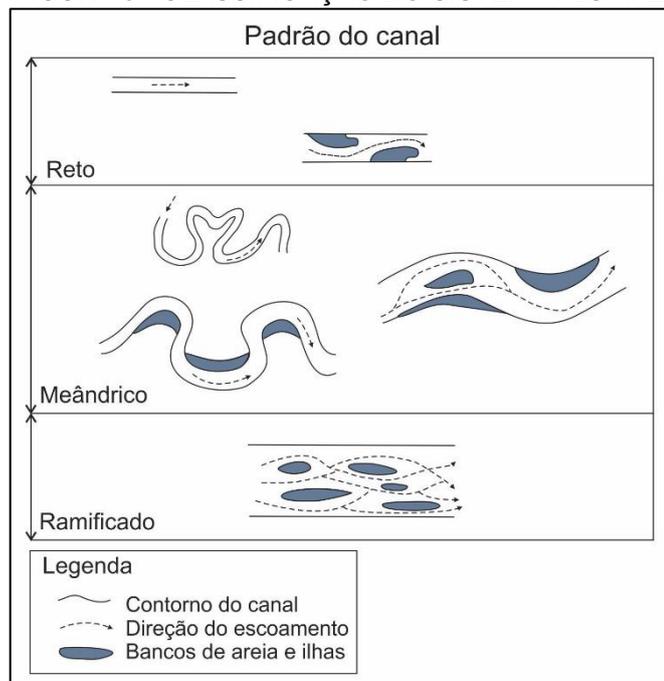
Os diferentes tipos de canais são o resultado do ajuste do canal à seção transversal e refletem as relações entre vazão, característica do transporte de sedimentos, largura e declividade do canal, velocidade do escoamento e rugosidade do leito.

Segundo Burmester (2005), isso ocorre porque os sistemas fluviais naturais não são regulares. As seções transversais que compõem um canal natural (independentemente da sua classificação) não são prismáticas, como aquelas encontradas em canais artificiais. Do mesmo modo, o material de composição do leito

também é variável, assim como a rugosidade, relacionada com o tempo e com o espaço.

Schumm (1981) enfatiza que os padrões de um sistema fluvial, bem como a sua estabilidade, são fortemente influenciados pela carga de sedimentos imposta ao rio (dimensão e transporte) se comparados com a influência da descarga fluvial. Baseado em estudos realizados nas planícies ocidentais dos Estados Unidos, o autor propôs um sistema conceitual de classificação de rios que relaciona o padrão do canal e a sua estabilidade. Sendo assim, os canais de rios podem ser basicamente classificados em três tipos: retilíneos, meândricos e ramificados e/ou entrelaçados, como mostra a Figura 3.

FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL.



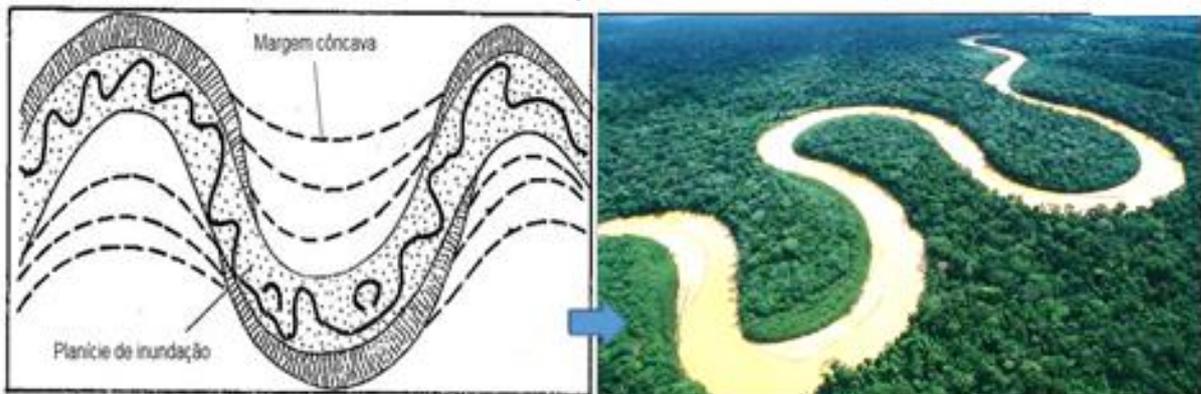
Fonte: Adaptado de SCHUMM, 1981.

Sistemas fluviais naturais retilíneos são muito raros no meio natural, existindo principalmente quando o rio está controlado por linhas tectônicas. Um dos poucos exemplos ocorre no caso em que o curso d'água acompanha as linhas de falha (CHRISTOFOLETTI, 1980). Onde o declive é gradual, os canais fluviais desenvolvem a forma sinuosa de meandro. De acordo com Howard (1992), o caráter dinâmico da evolução morfológica dos rios é evidenciado com a possibilidade de mudança de um tipo de canal para outro, sendo a presença de meandros indicativa de estágios de

maturidade da evolução morfológica e do equilíbrio do perfil longitudinal, correspondente ao ajuste das variáveis topográficas, hidrológicas e sedimentológicas

Segundo Christopherson (2012), os rios de meandro apresentam processos de erosão na margem côncava - maior velocidade - e deposição de sedimentos na margem convexa - menor velocidade -, o que origina seu processo de formação, e se constitui no principal mecanismo de formação da planície de inundação (ver Figura 4).

FIGURA 4 - DEPÓSITOS SEDIMENTARES EM RIOS DE MEANDRO. FORMAÇÃO DE MEANDRO E PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO NO RIO GUAPORÉ (RO).



Fonte: Adaptado de CHRISTOFOLETTI, 1980; GEOMORFOLOGIA (2015).

Christofoletti (1980) afirma que a planície de inundação é a área do vale fluvial composta por sedimentos, que margeiam o canal do rio, periodicamente inundada pelos eventos de cheia que ocorrem em uma região hidrográfica.

Outro conceito relevante nesta seção é o fenômeno de avulsão, que, de acordo com Assine (2005), é o processo de deposição de sedimentos na planície de inundação, acarretando no desvio do escoamento da calha principal do rio para a planície, com a criação de novos canais e o preenchimento de canais abandonados.

Em rios com extensas planícies de inundação, o regime hidrológico-hidrodinâmico se constitui como um dos principais fatores governantes do funcionamento de todo o ecossistema, influenciando os processos ecológicos, biológicos, químicos e físicos. O transporte de sedimentos, a deposição de nutrientes nas planícies após a passagem da cheia, a criação de áreas alagadas na planície onde algumas espécies de peixes depositam seus ovos e o transporte de sementes de espécies da flora são apenas alguns exemplos de como o comportamento hidrológico pode afetar o ecossistema (POSTEL e RICHTER, 2003).

Em relação aos processos hidrológicos, em muitos casos, o armazenamento nas planícies de inundação contribui para o amortecimento e o atraso dos hidrogramas de cheia (TUCCI, 1998). O canal principal e a planície de inundação drenam o escoamento superficial gerado na bacia hidrográfica. Durante a maior parte do tempo, predominam as estiagens e cheias moderadas, em que o escoamento fica limitado ao canal principal. Para as vazões baixas, o perímetro molhado é definido pelas margens do canal principal e por pequenas alterações no nível da água conduzem a pequenas mudanças na área molhada (RATTON, 2015). Enquanto confinado ao canal principal, o escoamento é predominantemente unidimensional na direção do curso d'água. A partir do extravasamento para a planície, a complexidade do escoamento aumenta significativamente (CUNGE et al., 1980).

2.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA EM SISTEMAS FLUVIAIS

Para a compreensão de um modelo hidrodinâmico capaz de representar os padrões de escoamento de um sistema fluvial, alguns conceitos podem ser relevantes:

- Modelo: É a representação do comportamento do sistema fluvial (TUCCI, 1998). Em termos hidrológicos e hidráulicos, o modelo do sistema converterá um dado de entrada, como geometria, condições de contorno e forças atuantes em uma saída, como níveis de água, velocidades e regime de vazões;
- Modelo matemático: O modelo matemático representa a natureza do sistema por meio de equações matemáticas (TUCCI, 1998). De acordo com Julien (2002), o termo refere-se a um conjunto de equações algébricas e diferenciais que representam a interação entre o escoamento, os processos governantes e as suas variações no tempo e no espaço. Ele deve descrever adequadamente os processos físicos e fornecer uma solução numérica por meio de um sistema de equações diferenciais, que serão resolvidas em conjunto com condições de contorno adequadas e relações empíricas que descrevam o escoamento;
- Modelo numérico: Um modelo numérico é uma aproximação de um modelo matemático (NOVAK *et al.*, 2010). Muitos modelos numéricos podem ser

formulados a partir de um modelo matemático, acrescido do emprego de métodos numéricos alternativos e manipulações matemáticas. Seu desempenho será determinado pelas propriedades dos métodos numéricos utilizados (NOVAK *et al.*, 2010);

- Modelo computacional: Um modelo computacional é uma implementação do modelo numérico em um sistema de computação. Os resultados de um modelo computacional dependem de uma variedade de fatores, incluindo a qualidade dos dados, os detalhes do processamento dos dados, a capacidade de organização dos procedimentos de cálculo e a plataforma computacional utilizada (NOVAK *et al.*, 2010). É importante que os resultados de um modelo computacional não sejam aceitos como definitivos. A conferência com informações levantadas em campo, ainda que escassas, deve ser utilizada para que se adquira uma melhor compreensão do que acontece fisicamente, ter a habilidade de interferir nos resultados encontrados, ou seja, calibrando o modelo.

Em sistemas fluviais, existem diversos modelos computacionais que apresentam a solução das equações que caracterizam o escoamento, como mostra o Quadro 1.

QUADRO 1 - MODELOS COMPUTACIONAIS PARA A SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CONSERVAÇÃO.

| MODELO | ÓRGÃO | ANO |
|------------------------|------------------------------|-----------|
| HEC-1/HEC-HMS | US ARMY CORPS OF ENGINEERS | 1968-2000 |
| TR-20 | US SOIL CONSERVATION SERVICE | 1983 |
| DR3M | US GEOLOGICAL SURVEY | 1991 |
| PRMS | US GEOLOGICAL SURVEY | 1983 |
| HEC-2 | US ARMY CORPS OF ENGINEERS | 1974 |
| HEC-RAS/HEC-RAS 2D | US ARMY CORPS OF ENGINEERS | 1997-2014 |
| MIKE11, MIKE21, MIKE31 | DANISH HYDRAULIC INSTITUTE | 1997 |

FONTE: Adaptado de PAZ, 2010.

Além dos conceitos apresentados anteriormente, algumas definições são importantes para a melhor compreensão do sistema e do modelo que o representa. De acordo com Tucci (1998), eles são apresentados como:

- Fenômeno: Processo físico que produz alteração de estado no sistema;
- Variável: Valor que descreve quantitativamente um fenômeno, variando no tempo e no espaço, por exemplo, vazão;
- Parâmetro: Valor que caracteriza o sistema, também podendo variar no tempo e no espaço, por exemplo, rugosidade de uma seção transversal, área de uma bacia hidrográfica;
- Simulação: Processo de utilização do modelo, podendo ser subdividido em estimativa, verificação e previsão.

Os modelos hidrodinâmicos podem ser classificados por simplificações espaciais e temporais. Cada classificação está associada às propriedades do fluido e às premissas relacionadas ao escoamento, podendo variar de modelo para modelo.

2.2.1 Modelos hidrodinâmicos unidimensionais

De acordo com Chaudhry (2008), a modelagem hidrodinâmica 1D assume que o escoamento ocorre em apenas uma direção (longitudinal). As propriedades do escoamento podem ser calculadas baseando-se nas características das seções transversais.

Paz *et al.* (2011) expõem que a larga utilização da modelagem hidrodinâmica unidimensional reside não somente no fato de que modelos 1D, quando comparados a modelos 2D e 3D, são mais simples e requerem uma quantidade menor de dados de entrada e tempo computacional, mas também que os conceitos básicos e algoritmos de programação utilizados já estão consolidados.

Além disso, apesar de normalmente serem considerados “simplificados” por padrões numéricos atuais, a modelagem hidrodinâmica 1D permanece como ferramenta útil e válida para a representação do escoamento.

Os modelos hidrodinâmicos 1D podem ser associados com o regime permanente ou não-permanente de escoamento. Apesar de superficialmente apresentarem limitações de cálculo similares, os princípios hidráulicos para a solução numérica das duas situações são bastante diferentes (TOOMBES e CHANSON (2011)).

De acordo com Henderson (1966), a solução numérica para o regime permanente de escoamento apresenta, na maioria dos casos, o seu embasamento na derivada da equação da conservação da energia, ao passo que para um regime não-permanente de escoamento, a solução numérica aproximada deriva das equações de Saint Venant.

As equações de Saint Venant, ou também denominadas equações dinâmicas de movimento, são um caso particular das equações das águas rasas, onde o comprimento do corpo d'água é muito maior que a profundidade. Elas descrevem propriedades de escoamentos 2D a partir da integração vertical das equações 3D (ANJOS *et al.*, 2006), e podem auxiliar na definição das variáveis, como a velocidade média, a profundidade e a vazão, as quais podem definir as condições do escoamento.

As equações que descrevem a continuidade e a quantidade de movimento do fluido para um regime não-permanente de escoamento podem ser expressas, respectivamente pelas Equações (6) e (7):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (7)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), t é o intervalo de tempo (s), x é a distância longitudinal (m), Q é a vazão (m^3/s), q é a contribuição lateral por unidade de comprimento ($m^3/m.s$), V é a velocidade do escoamento (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_0 (m/m) é a inclinação do fundo, S_f (m/m) é a declividade da linha de energia (CHAUDHRY, 2008).

Para o regime permanente de escoamento, a solução numérica é apresentada pela equação da conservação da energia, apresentada pela derivação da equação da energia ao longo de uma linha de escoamento, expressa por:

$$\left(\frac{P}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} \right) + S_f = 0 \quad (8)$$

onde $\frac{P}{\rho g}$ representa a componente relacionada à pressão hidrostática, z é a altitude relacionada ao datum horizontal (m), $\frac{V^2}{2g}$ é o componente responsável pela energia cinética e S_f representa as perdas de energia por atrito (m/m).

As perdas de carga (h_L) são estimadas para cada caso em particular, por meio da energia cinética do escoamento, multiplicadas por uma constante. Neste sistema, a perda de carga por atrito é representada pela declividade da linha de energia (S_f), como representação das forças de atrito nas paredes laterais e no fundo do canal (CHAUDHRY, 2008).

Segundo Paz (2010), a declividade da linha de energia é parametrizada pela equação de Manning para escoamento uniforme, considerando que a resistência ao escoamento pode ser representada pelo coeficiente de rugosidade de Manning. O termo que representa a declividade S_f pode ser expresso por (9)

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} \quad (9)$$

onde n é o coeficiente de Manning e R é o raio hidráulico (m), representado pela razão entre a área A (m²) e o perímetro molhado P (m) da seção transversal.

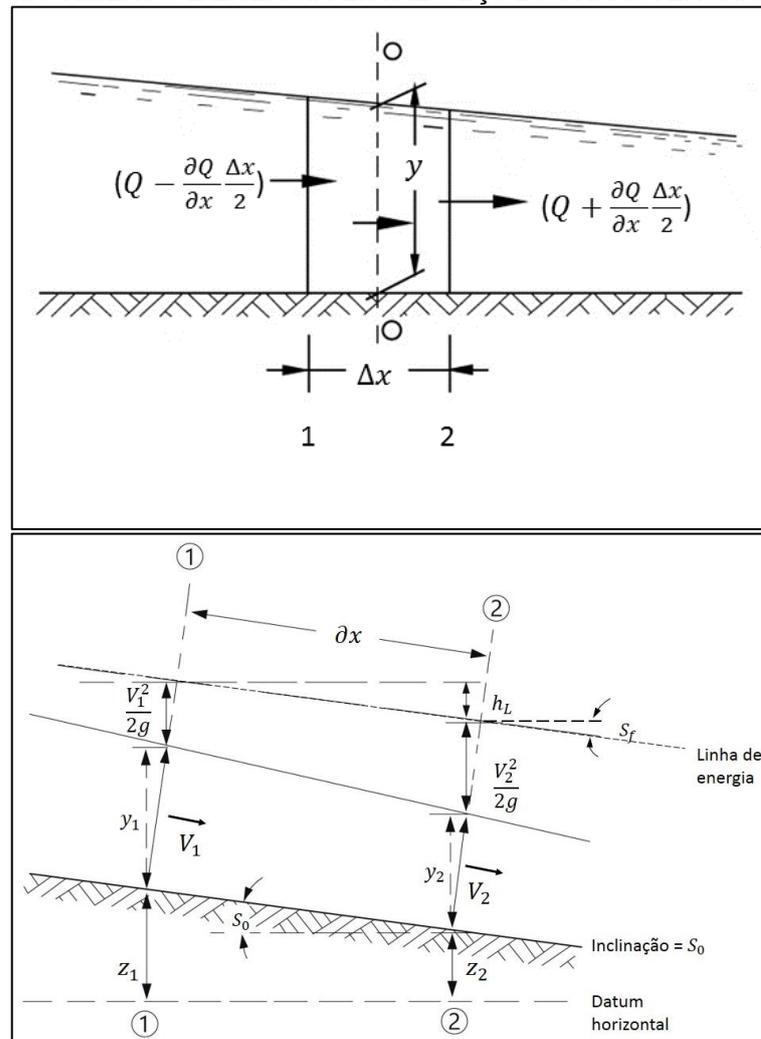
Cardoso (1998) e Paiva (2009) descrevem as hipóteses que devem ser consideradas no desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos 1D:

- A dimensão longitudinal do canal deve ser muito maior que a transversal e vertical. Consequentemente, as variáveis do escoamento podem assumir dependência somente das coordenadas longitudinais e serem homogêneas em uma dada seção transversal do canal;
- A aceleração vertical é desprezível, ou seja, as componentes verticais e transversais do vetor de aceleração são nulas;
- A variação da pressão na vertical é hidrostática;

- O sistema possui baixa declividade;
- O escoamento é subcrítico;
- O fluido é incompressível: o valor da densidade da água é constante;
- As forças atuantes são as de inércia, de gravidade, pressão e viscosidade, consideradas por meio das equações de Saint Venant. e/ou Bernoulli (dependendo do regime estudado).

A Figura 5 apresenta um esquema da representação das Equações (6), (7), (8) e (9) entre as seções 1 e 2 em um canal (montante e jusante, respectivamente).

FIGURA 5 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DAS EQUAÇÕES DA CONTINUIDADE, QUANTIDADE DE MOVIMENTO E ENERGIA ENTRE SEÇÕES TRANSVERSAIS.



Fonte: Adaptado de CARDOSO, 1998.

Não existe uma solução direta para as equações de Saint Venant. Sua solução deve ser efetuada por meio de métodos numéricos. Diversas técnicas de solução podem ser encontradas em Chow (1959), Cunge *et al.* (1980) e Chaudhry (2008).

Chow (1959), Henderson (1966) e Chaudhry (2008) apresentam alguns pressupostos essenciais para a solução das equações de Saint Venant e/ou de Bernoulli:

- O escoamento é unidimensional, a profundidade e a velocidade variam apenas na direção longitudinal;
- O escoamento varia gradualmente ao longo do canal, podendo-se desprezar as acelerações verticais e considerar a distribuição de pressões sendo hidrostática;
- Os coeficientes de rugosidade para o regime permanente e uniforme são aplicáveis (perdas por atrito);
- O fluido é incompressível e com densidade constante.

2.2.2 Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos no rio Paraguai

Estudos descritos em Tucci *et al.* (2004), Allasia *et al.* (2007), Paz *et al.* (2006) e Paz (2010) contemplam simulações de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos relacionados ao sistema fluvial do rio Paraguai.

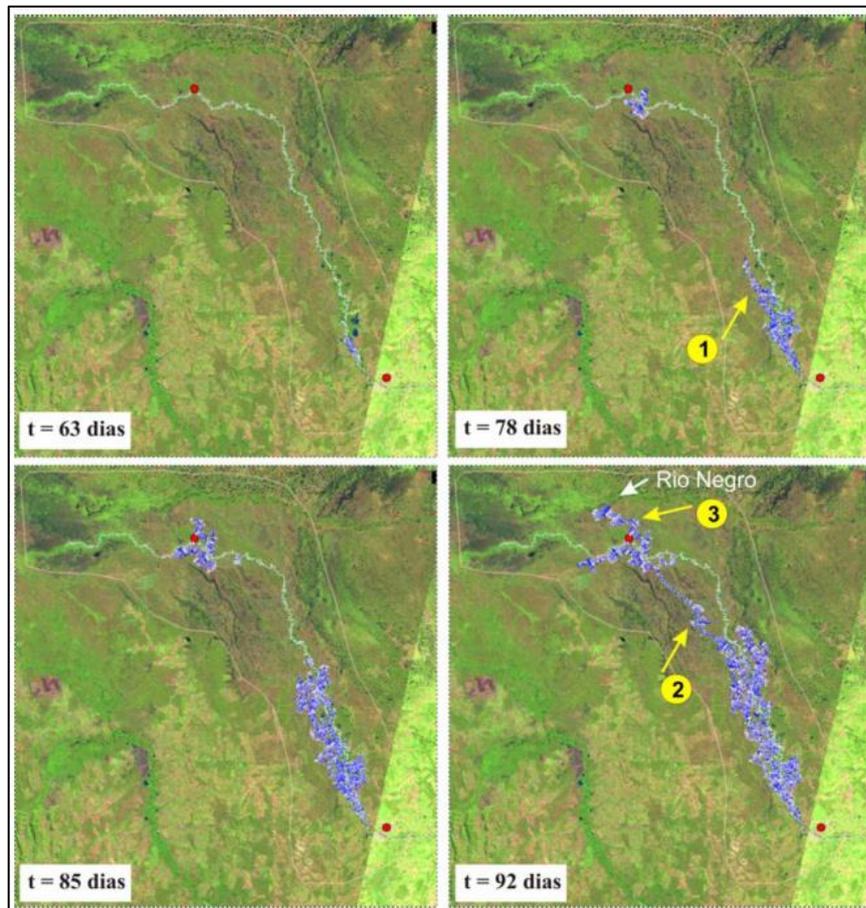
Paz *et al.* (2006) apresentam uma metodologia de modelagem integrada rio-planície constituída pela combinação de um modelo hidrodinâmico 1D (IPH4), aplicado à calha principal do rio Aquidauana (afluente da margem esquerda do rio Paraguai), e um modelo tipo *raster* aplicado à planície de inundação.

A metodologia foi desenvolvida entre os postos fluviométricos de Aquidauana - MS e Porto Ciríaco - MS. Foi simulado o período de dezembro de 1999 a maio de 2000. Os resultados obtidos incluem a análise do abatimento do hidrograma de montante para jusante. A propagação da área de inundação ao longo da planície, representando fluxos secundários ao escoamento principal, foi simulada com o modelo *raster* (PAZ *et al.*, 2006).

De acordo com os autores, a metodologia proposta mostrou-se constituir uma interessante forma de modelagem integrada rio-planície, simulando a propagação do

escoamento na planície de inundação de forma independente do escoamento principal na calha do rio. A Figura 6 apresenta alguns resultados das simulações da planície de inundação.

FIGURA 6 - RESULTADOS DO MODELO 1D E MODELO RASTER. SIMULAÇÕES ENTRE AQUIDAUANA E PORTO CIRÍACO (PONTOS VERMELHOS) EM DIFERENTES INTERVALOS DE TEMPO.



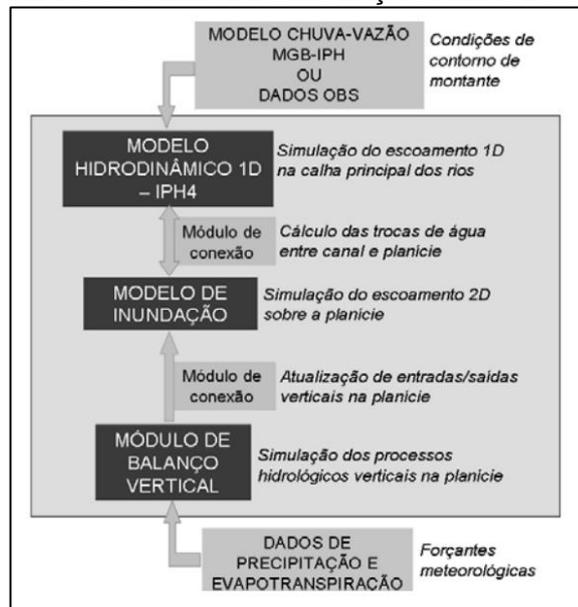
Fonte: PAZ et al. (2006).

Paz (2010) desenvolveu um estudo que objetivou adaptar uma metodologia de simulação de rios e planícies para a situação de sistemas de drenagem complexos, de grande escala e com escassez de dados, como é o caso do rio Paraguai.

Para este estudo, foi utilizado um sistema de simulação denominado SIRIPLAN, que consiste na combinação de um modelo de escoamento 1D (IPH-4) para o canal principal, e um modelo tipo *raster* (2D) na simulação da planície de inundação e um módulo específico para a representação do balanço hídrico vertical na planície, incluindo precipitação, evapotranspiração e infiltração. Dois módulos adicionais são utilizados para representar o balanço hídrico vertical na planície e para fazer as trocas de vazão entre canal e planície. A contribuição de bacias a montante

da região simulada é considerada como condição de contorno no modelo 1D, como mostra a Figura 7.

FIGURA 7 - VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DO RIO PARAGUAI.



Fonte: PAZ et al. (2010).

Para exemplificar o uso do sistema computacional proposto, foi simulada a Bacia do alto Paraguai, por um período de mais de 11 anos (de setembro de 1995 a dezembro de 2006).

De acordo com Paz (2010), os resultados obtidos nas simulações se apresentaram satisfatórios em relação à caracterização física dos canais principais e da planície de inundação, bem como em relação ao regime de vazões nas calhas do rio Paraguai e seus principais afluentes.

Outro resultado que cabe destacar refere-se aos níveis de água observados e calculados. Os valores expressos em termos de variável reduzida de média zero apresentaram um coeficiente *Nash-Sutcliffe* (NS) entre 0,50 e 0,98, e coeficiente de correlação acima de 0,80.

A ênfase do autor foi a modelagem do sistema fluvial em época de cheias e com a inclusão da planície de inundação na análise. Para a planície de inundação foram utilizados dados altimétricos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90m, e não foi efetuado nenhum geoprocessamento para esses dados, uma vez que poderia limitar a escala de avaliação dos resultados,

podendo ocasionar equívocos em relação ao direcionamento do escoamento na modelagem, por exemplo.

Paz (2010) recomenda para futuros trabalhos a escolha de uma área piloto no Pantanal e a elaboração de uma análise com maior detalhamento da caracterização física, além da utilização de ferramentas para a identificação de caminhos preferenciais do escoamento.

Os resultados obtidos por Paz (2010) são de extrema relevância para a compreensão do sistema fluvial do Pantanal. Com isso, este trabalho busca complementar as análises anteriores, abrangendo a modelagem em uma área piloto do rio Paraguai, avaliando uma condição hidrológica diferente da simulada, analisando estatisticamente os métodos de entrada que compõem a modelagem, como a representação espacial da superfície do leito do rio e a importância da representação dos meandros em condições hidrológicas de estiagem, adicionando resultados como que podem servir de embasamento para estudos com abordagens diferenciadas, a exemplo da otimização da navegação em rios.

2.3 A IMPORTÂNCIA DA REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS SISTEMAS FLUVIAIS NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Em modelos hidrodinâmicos 1D, as informações que compõem as seções transversais, como geometria e dados de altimetria formam a base para o cálculo das simulações. Por isso, a definição da superfície do fundo do canal utilizada para o desenvolvimento da modelagem desempenha um papel importante na precisão dos resultados das simulações (CROWDER e DIPLAS, 2000).

Existem diversas formas de se representar as características espaciais dos canais, como: dados de batimetria, dados cartográficos, imagens aéreas de satélite, levantamentos GPS, dentre outros. Neste trabalho, enfatizaram-se os dados de batimetria e dados cartográficos na elaboração dessas superfícies.

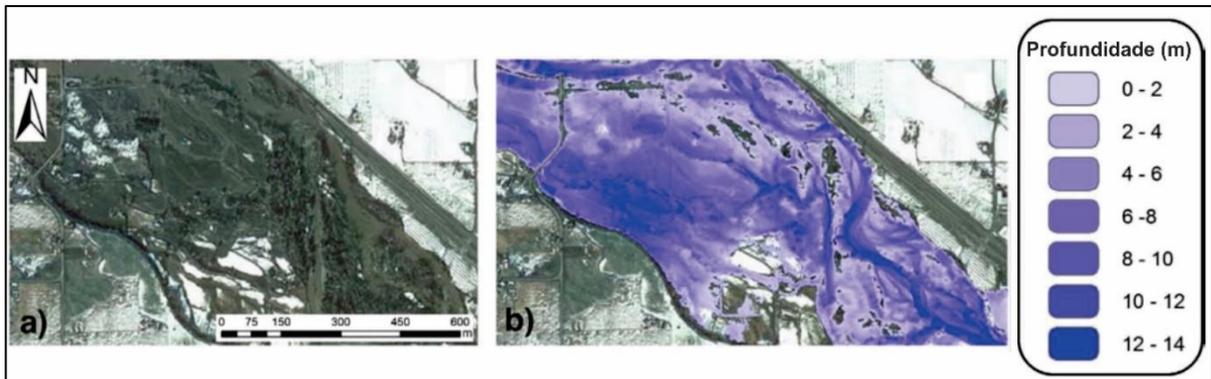
De acordo com Horritt e Bates (2001), um dos principais dados de entrada na elaboração de modelos hidrodinâmicos é o modelo digital de altitude (MDA), que deve possuir resolução e precisão suficientes para captar elementos topográficos da planície que sejam relevantes nos processos de seu desenvolvimento, a fim de encaminhar a informação batimétrica, detalhando a inclinação longitudinal.

Em geral, em modelos hidrodinâmicos, o domínio espacial é definido por uma malha computacional sob a forma de uma grade de diferença finita ou uma malha de elementos finitos. Normalmente, após a geração dessa malha, a altitude para cada nó da malha é calculada por meio da interpolação espacial de medições de batimetria (MERWADE *et al.*, 2006). Os procedimentos pelos quais são feitas as medições de batimetria do canal, e como essas informações são posteriormente interpoladas para a formação da malha computacional influenciam diretamente nos resultados da modelagem. Ainda de acordo com os autores, a interpolação de dados de batimetria que tenha a capacidade de representar geométrica e fisicamente a superfície do canal, pode otimizar a modelagem e a sua precisão, auxiliando na compreensão da interação entre os processos hidrológicos, hidráulicos e geomorfológicos.

Aggett e Wilson (2009) exploraram o desenvolvimento e assimilação de uma superfície topográfica com um modelo hidráulico 1D com o intuito de investigar um possível risco de avulsão ao longo do leito de um rio de 22,5km nos EUA.

Os autores elaboraram um modelo digital de altitude detalhado da área de estudo para a definição dos parâmetros geométricos exigidos como dados de entrada no programa HEC-RAS. O modelo digital de altitude foi elaborado com dados LiDAR (*Light Detection And Ranging*), e com resolução espacial vertical de $\pm 0,5\text{m}$. As condições de contorno foram impostas como condições de jusante e eram compostas dos níveis de água e vazão inicial. As seções transversais foram densamente espaçadas, com o objetivo de fornecer a largura do canal e as elevações da planície de inundação. Posteriormente, o modelo foi exportado para o programa de geoprocessamento ArcView da ArcGIS Desktop®. A Figura 8 apresenta alguns resultados obtidos nas simulações hidrodinâmicas 1D.

FIGURA 8 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D. (A) IMAGEM AÉREA DA REGIÃO DE ESTUDO. (B) RESULTADO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA EVENTO DE CHEIA.



Fonte: Adaptado de AGGETT e WILSON, 2009.

Aggett e Wilson (2009) os autores informaram que os resultados apresentaram correspondência com a planície de inundação delineada por meio de imagens aéreas realizadas após um evento de inundação no local, como mostra a Figura 8. Além disso, esses resultados comprovaram que o modelo se ajustou bem a realidade nos locais onde há uma densa rede de seções transversais, e onde a inclinação do canal variava gradualmente. No entanto, em regiões menos homogêneas, os resultados não se apresentaram satisfatórios, e o refinamento da geometria poderia otimizá-los nessas regiões.

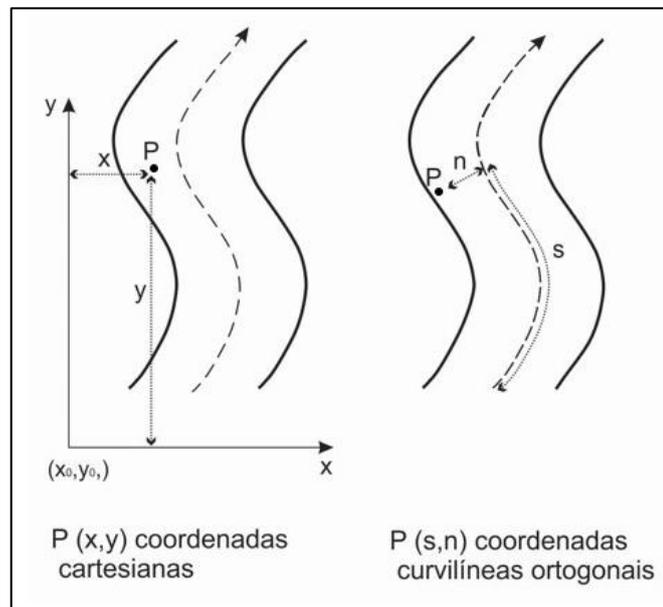
Merwade *et al.* (2006) avaliaram diversas técnicas de interpolação espacial para dados de batimetria ao longo de 7,5 km de um rio de meandro nos EUA. Os dados foram coletados por meio de um Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler (ADCP) com uma resolução espacial de aproximadamente 1 cm (função da resolução temporal) conectado a um Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para cada ponto de batimetria, as coordenadas de longitude e latitude (λ , φ) foram obtidas por meio do GPS e a altimetria do fundo obtida por meio da subtração da profundidade da água da altimetria da lâmina d'água. Os seguintes interpoladores espaciais foram utilizados: Inverso da Distância Ponderada (*Inverse Distance Weighting - IDW*), *Spline*, Vizinhos Naturais (*Natural Neighbors - NN*), TOPOGRID, e Krigagem ordinária (isotrópica e anisotrópica).

Merwade *et al.* (2005) apresentam o sistema de coordenadas orientado ao escoamento. Isso justifica-se pois, em um sistema de coordenadas cartesianas (x, y), qualquer ponto P é identificado por sua localização a leste e norte de uma origem (x_0, y_0). Para qualquer ponto, a coordenada x (leste/longitude) é a distância

perpendicular ao ponto do eixo y , e a coordenada y (norte/latitude) é a distância perpendicular a partir do ponto do eixo x . No denominado sistema curvilíneo ortogonal, s é a distância ao longo do eixo e n é a distância perpendicular a partir da linha central, como mostra a Figura 9.

Este sistema de coordenadas é apresentado também em estudos realizados por Holley e Jirka (1986), Nelson e Smith (1989) e Johannesson e Parker (1989) (MERWADE *et al.*, 2005).

FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS PARA REPRESENTAÇÃO DE BATIMETRIA EM RIOS.

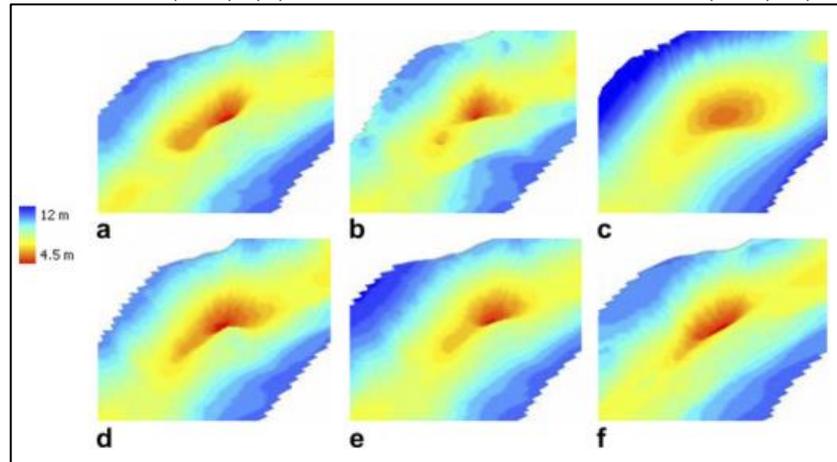


Fonte: Adaptado de MERWADE *et al.*, 2005.

Merwade *et al.* (2005) abordam o termo anisotropia, que, de acordo com Berveglieri *et al.* (2011), a existência de condições anisotrópicas significa haver direções privilegiadas que condicionam a gênese do fenômeno, ao passo que a isotropia implica que as variáveis apresentam o mesmo comportamento em qualquer direção. Para interpolações de superfícies batimétricas, significa levar ou não em consideração a direção do escoamento.

A Figura 10 apresenta as superfícies interpoladas por meio de diversas técnicas e nos dois sistemas de coordenadas descrito acima: cartesiano (x, y) e sistema curvilíneo ortogonal (s, n) .

FIGURA 10 - SUPERFÍCIES INTERPOLADAS: (A) TOPOGRID; (B) IDW EM (X, Y) (C) SPLINE EM (X, Y); (D) TOPOGRID EM (X, Y); (E) KRIGAGEM ANISOTRÓPICA EM (S, N); (F) EIDW EM (S,N).



Fonte: MERWADE et al. (2006).

Por meio da construção de um “conjunto-teste”, extraiu-se o equivalente a 20% da amostra de pontos, realizou os testes de interpolação neste conjunto e avaliou estatisticamente os resultados gerados em comparação com os pontos originais da amostra.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos pelo autor. O ambiente de desenvolvimento foi o sistema ArcGIS Desktop®, e um dos métodos estatísticos de avaliação foi o Erro Médio Quadrático (RMSE) utilizando os parâmetros das variáveis de interpolação, como número de pontos na amostra e potência, dentre outros parâmetros específicos para cada interpolador.

TABELA 1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RMSE PARA DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO NO SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS.

| MÉTODO | PARÂMETROS PARA RMSE | ESTATÍSTICAS DO RMSE | | | |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------|
| | | ERRO MÍNIMO (M) | ERRO MÁXIMO (M) | ERRO MÉDIO (M) | DESVIO PADRÃO |
| IDW | *N= 8 **p= 2 | 0,5234 | 0,5540 | 0,5348 | 0,0092 |
| Spline tensionada | N= 8 *** σ = 500 | 0,4435 | 0,9822 | 0,5177 | 0,1291 |
| Spline regionalizada | N= 8 **** τ = 50 | 0,4566 | 17,989 | 0,7487 | 0,3955 |
| Krigagem ordinária | N= 50 | 0,4087 | 0,4376 | 0,4190 | 0,0115 |
| Krigagem anisotrópica | N= 50 | 0,4610 | 0,5054 | 0,4787 | 0,0168 |
| TopoGrid | - | 0,3940 | - | - | - |
| Vizinhos Naturais | - | 0,4218 | - | - | - |

*N = número de pontos; **p = potência; *** σ = ponderação pelo interpolador spline tensionado; τ = ponderação pelo interpolador spline regionalizada

Fonte: Adaptado de MERWADE et al., 2006.

Dentre os resultados, o que apresentou a melhor representação foi o interpolador IDW, com o menor desvio padrão. Devido a importância da anisotropia na região, o autor propõe um método de interpolação adaptada ao IDW, denominada IDW Elipsoidal, onde a direção do escoamento é orientada de acordo com o semi-eixos maior de uma elipse. A metodologia na íntegra pode ser verificada em Merwade *et al.* (2006).

2.3.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG) na modelagem hidrodinâmica

De acordo com Burrough e McDonnell (1998), um Sistema de Informações Geográficas (SIG) reside na definição de um ambiente cujas ferramentas, banco de dados e estrutura organizacional permitem a integração, manipulação, armazenamento, transformação, coleta e análise de dados espaciais. Silveira (2010) argumenta que o SIG possibilita a integração de informações geográficas advindas de diversas fontes em uma única base de dados, podendo adicionalmente ser destinada a outras aplicações.

Segundo Paz (2010), uma das dificuldades encontradas na modelagem hidrodinâmica é a preparação e a combinação dos dados, os quais normalmente provêm de diversas fontes e podem estar apresentados em diversos formatos. Neste contexto, o SIG surge como a ferramenta geotecnológica capaz de auxiliar na preparação, processamento e automatização. São apresentadas algumas ferramentas computacionais que têm sido desenvolvidas para facilitar a entrada de dados em modelos hidrológicos/hidráulicos/hidrodinâmicos, principalmente visando à preparação das informações relativas às características geométricas de canais e rios, ao estabelecimento de redes de drenagem e à conexão topológica entre elementos da discretização numérica, a saber:

- CRWR-PREPRO para modelo hidrodinâmico HEC-RAS;
- HEC-GeoRAS para modelo hidrodinâmico HEC-RAS;
- ArcGis-SWAT para modelo hidrológico SWAT;
- Rotinas computacionais desenvolvidas para modelo hidrológico MGB-IPH;
- NRCS *GeoHydro* para extração de características físicas de bacias;

- SOBEK, MIKE FLOOD para sistemas de modelagem da *Delft Hydraulics* e do *Danish Hydraulic Institute*.

2.3.2 Modelo Digital de Altitude (MDA)

Os modelos digitais de representação espacial reproduzem a superfície de um sistema e são elementos fundamentais que auxiliam na modelagem, na análise e na visualização de uma determinada superfície. De acordo com Li; Zhu e Gold (2005), são uma representação estatística da superfície contínua do terreno por meio da aquisição de pontos com coordenadas de latitude, longitude e altitude (x, y, z) conhecidas em algum sistema de representação.

De uma forma geral, ao longo do tempo diversos termos surgiram e possibilitaram uma especificação para os modelos digitais, como por exemplo: modelo digital do terreno (MDT), modelo digital de altitude (MDA), modelo de superfície de terreno (MST) (LI; ZHU e GOLD, 2005). Na prática, os termos mencionados são normalmente caracterizados como sinônimos, porém, algumas vezes realmente referem-se a diferentes produtos.

Burrough e McDonnell (1998) e Li; Zhu e Gold (2005) apresentam algumas diferenças para as denominações dos termos referentes aos modelos digitais:

- Modelo Digital do Terreno (MDT): "relativo à representação das características naturais"; "extensão de terreno, região, território". Representam a superfície real do terreno, sob qualquer relação de coordenadas espaciais em qualquer sistema de representação;
- Modelo Digital de Altitude (MDA): "medida da base ao topo", "altitude acima do nível do solo ou outro conhecido", "distância acima de um determinado nível". Representa a superfície real do terreno, porém expressa em termos de altitude, relacionada a algum valor de referência;
- Modelo de Superfície do Terreno (MST): "superfície sólida da Terra"; "base sólida ou fundação"; "superfície da Terra". Representam a superfície do terreno além de objetos e estruturas existentes sobre ela, como árvores e edifícios.

A partir dessas definições, algumas diferenças entre as nomenclaturas manifestam-se por si só e enfatizam alguns aspectos do que se pretende representar em termos de características físicas de um sistema.

Os termos Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Altitude (MDA) possuem uma definição de certa forma análoga. Egg (2012) apresenta o MDA como uma particularização do MDT, uma vez que aquele trabalha apenas com dados de altitude.

Seguindo esta linha de raciocínio, neste trabalho será utilizado o termo Modelo Digital de Altitude (MDA) para a representação espacial de sistemas fluviais.

Em sistemas fluviais, a representação da superfície do rio envolve alguns requisitos. Para que a superfície seja bem representada, devem-se analisar a densidade e a distribuição dos pontos cotados. Assim, de acordo com Horritt e Bates (2002), o MDA poderá apresentar resolução e precisão suficientes para captar os elementos topográficos da superfície para o desenvolvimento na escala de interesse, a fim de encaminhar a informação batimétrica detalhando a inclinação longitudinal.

Segundo Guarneri *et al.* (2015), um MDA capaz de representar a superfície do terreno o mais próximo possível da realidade condiciona uma base de dados mais sólida e coerente para a elaboração de modelos hidrodinâmicos e hidrológicos, onde parâmetros como a declividade estão diretamente ligados ao comportamento do escoamento e permitem a análise de trechos com restrições à navegação.

2.3.3 Análise espacial de dados e geração de superfícies

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar a resposta de diferentes técnicas de interpolação espacial de superfícies batimétricas nos modelos hidrodinâmicos 1D.

Para gerar superfícies que aproximem o fenômeno estudado de forma realista, é necessário modelar a sua variabilidade espacial. De acordo com Burrough e McDonnell (1998), a análise espacial é uma das diversas ferramentas que estão disponíveis em um SIG que supre essa necessidade, sendo capaz de efetuar transformações e manipulações de dados, que podem ser aplicados para adição de valores a dados, para o auxílio na tomada de decisões e também para a identificação de possíveis erros não perceptíveis após uma simples checagem. Os autores apresentam que se pode classificar a análise espacial em três categorias, a saber:

padrões pontuais, superfícies e áreas. Neste trabalho, foi abordada a análise espacial envolvendo superfícies.

Basicamente, pode-se explicar o procedimento de criação de superfícies como a conversão de dados em formato de coordenadas x, y e z em algum sistema de representação, que, por meio de um interpolador, resultará em uma superfície representativa do fenômeno em questão.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), podem ser tomadas três abordagens para classificar modelos interpoladores:

- Modelos determinísticos de efeitos locais: cada ponto da superfície é estimado por meio da interpolação de amostras próximas. Neste caso, não é feita qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial (CAMARGO *et al.*, 2004). O interpolador Inverso da Distância Ponderada (*Inverse Distance Weighting* - IDW) é um dos exemplos;
- Modelos determinísticos de efeitos globais: consideram todos os pontos da área amostrada, permitindo interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais, já que determinam apenas uma função que é mapeada através de toda a região (MAZZINI e SCHETTINI, 2009);
- Modelos estatísticos de efeitos locais e globais: cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, por meio de um estimador estatístico (CAMARGO *et al.*, 2004). A Krigagem é um exemplo desse modelo interpolador.

A importância do método de interpolação na qualidade do MDA depende diretamente da escala na qual se pretende trabalhar e do tipo de terreno. Especificamente para simulações hidrodinâmicas, alguns estudos documentam a importância da interpolação batimétrica nos resultados obtidos, como em Carter e Shankar (1997), Burroughes; George e Abbott (2001) e Goff e Nordfjord (2004) (MERWADE *et al.*, 2006).

As estruturas para o armazenamento de dados do MDA podem ser representadas de forma matricial ou vetorial. De acordo com Delazari (2012), as estruturas vetoriais representam as entidades ou objetos definidos pelas coordenadas dos nós e vértices, a exemplo de uma rede triangular irregular (TIN), ao passo que as

estruturas matriciais representam localizações onde está atribuído o valor médio da variável para uma unidade de superfície, ou uma célula.

A seguir serão apresentados algumas técnicas de construção e alguns métodos de interpolação utilizados para a elaboração e avaliação do MDA. A seleção dos interpoladores baseou-se em estudos realizados por Delazari (1996), Merwade *et al.* (2006), Mazzini e Schettini (2009), Cook e Merwade (2009), Silveira (2010) e Berveglieri, Junior e Piteri (2011). É importante ressaltar que o presente trabalho não objetiva discutir matematicamente os interpoladores, e sim a interferência dos mesmos em resultados de simulações hidrodinâmicas.

2.3.4 Rede Triangular Irregular (TIN)

Nesta estrutura de armazenamento de dados de forma vetorial, denominada de Rede Triangular Irregular (TIN), a superfície do terreno é modelada por meio de uma malha de triângulos, adjacentes e não sobrepostos, de diferentes tamanhos e orientação (OLIVEIRA, 2014). De acordo com Li; Zhu e Gold (2005), existem três requisitos básicos para o desenvolvimento de um TIN:

- Utilização de um único algoritmo, para que a interpolação sempre inicie pelo mesmo local (centro geométrico, vértice superior ou inferior);
- Cada triângulo é formado pelos pontos mais próximos, ou seja, a soma dos vértices dos triângulos é mínima;
- A forma dos triângulos resultantes deve ser ótima, ou seja, eles devem ser equiláteros o máximo possível.

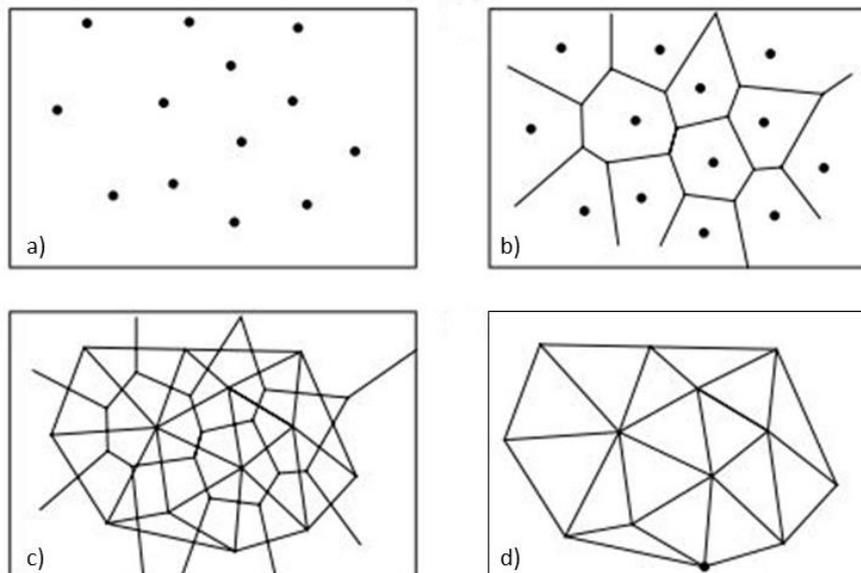
Uma das técnicas de triangulação que alcança os três requisitos citados acima é a Triangulação de Delaunay. Dentre todas as possíveis formas de se gerar uma rede de triângulos a partir de pontos irregularmente espaçados, a técnica de Delaunay é a mais utilizada (LI; ZHU e GOLD, 2005).

Hjelle e Dahlen (2006) apresentam três definições diferentes para uma triangulação de Delaunay: o critério *MaxMin*, o Diagrama de Voronoi e o critério da Circunferência Circunscrita Vazia. Neste trabalho, foi considerada apenas a definição do diagrama de Voronoi, devido à sua ampla utilização em SIG e análises espaciais e à compatibilidade com o *software* empregado neste trabalho.

O Diagrama de Voronoi no plano é uma estrutura geométrica, topológica e combinatória que representa informações de proximidade de um conjunto de pontos (OLIVEIRA, 2014). Também pode ser conhecido como Polígonos de Thiessen ou Dirichlet, onde os atributos dos pontos não amostrados são determinados pela ligação dos pontos mais próximos (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

A triangulação de Delaunay a partir do diagrama de Voronoi pode ser visualizada na Figura 11. Dado um conjunto de pontos (a), o diagrama é construído pela poligonação de pontos mais próximos (b), os pontos circunscritos pelo diagrama unem-se de maneira a formar os triângulos (c). A formação destes triângulos unidos pelos pontos circunscritos origina a triangulação de Delaunay (d).

FIGURA 11 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY E O DIAGRAMA DE VORONOI.



Fonte: Adaptado de BURROUGH e MCDONNELL, 1998.

Segundo Piteri *et al.* (2007), a triangulação de Delaunay está relacionada com o Diagrama de Voronoi de tal forma que:

- Um ponto do diagrama de Voronoi corresponde a um triângulo da triangulação de Delaunay;
- Um segmento do diagrama de Voronoi corresponde a uma aresta da triangulação de Delaunay;
- Uma região do diagrama de Voronoi corresponde a um vértice da triangulação de Delaunay;
- Um círculo circunscrito à triangulação de Delaunay é um círculo vazio.

Durante a geração de um TIN, existe ainda a possibilidade da inserção de linhas de quebra no modelo, as quais são capazes de modelar as informações morfológicas de descontinuidade, a fim de se obter uma representação mais fidedigna da superfície formada. Podem ser exemplos de linha de quebra as margens de um rio, a rede hidrográfica e as curvas de nível.

2.3.5 Inverso da Distância Ponderada - *Inverse Distance Weighting* (IDW)

O interpolador IDW é um interpolador com uma estrutura matricial de dados, do tipo modelo determinístico local, e baseia-se no ajuste de uma função bidimensional, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à distribuição de amostras locais (CAMARGO *et al.*, 2004).

Na interpolação IDW, o valor de cota de cada elemento da grade é definido pela média ponderada dos valores de cota das amostras vizinhas. A ponderação mais usada na prática é o inverso da distância euclidiana do ponto da grade à amostra considerada, e pode ser expressa pela Equação (10)

$$Z = f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (10)$$

onde Z é o valor estimado, Z_i são os valores dos pontos amostrais vizinhos de Z , d_i é a distância de cada ponto amostral i ao ponto desconhecido, n é o número de vizinhos estabelecidos e P é a potência escolhida (CAMARGO *et al.*, 2004). Além disso, o modelo permite a manipulação dos parâmetros de dimensões de raio de busca e o número de vizinhos a serem processados no cálculo.

2.3.6 Vizinhos Naturais – *Natural Neighbors* (NN)

Da mesma forma que o IDW, o interpolador Vizinho Naturais (NN) é um do tipo modelo determinístico local, e também compõe uma superfície no qual o valor será determinado pela intensidade das amostras locais.

A interpolação por vizinho natural é definida pela escolha de apenas uma amostra vizinha para cada ponto da grade. Este interpolador deve ser usado quando se deseja manter os valores de cotas das amostras, sem gerar valores intermediários (CAMARGO *et al.*, 2004).

De acordo com Merwade *et al.* (2006), os pesos atribuídos às amostras são calculados em sua maioria com valores de áreas do que de distâncias, ao contrário do que acontece na interpolação IDW.

2.3.7 Krigagem - *Kriging*

Dentre os modelos de interpolação, a krigagem pertence aos estatísticos de efeitos locais e globais. Sua abordagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial (CAMARGO *et al.*, 2004). De acordo com os autores, a diferenciação da krigagem para os demais métodos de interpolação é a estimativa de uma matriz de covariância espacial, que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado.

Segundo Bailey e Gatrell (1995), este interpolador tem por objetivo identificar a correlação espacial existente entre os valores de um conjunto de amostras com seus valores interpolados, definindo os pesos atribuídos às diversas amostras pela vizinhança a ser considerada, e pelo erro associado ao valor estimado.

A estrutura teórica da krigagem está baseada no conceito de variável regionalizada (CAMARGO *et al.*, 2004). De acordo com os autores, trata-se de uma variável distribuída no espaço (ou tempo), e cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória. Esta teoria permite incluir hipóteses estatísticas em processos espaciais locais.

A variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; um ruído aleatório ou erro residual, as quais podem ser expressas por uma função aleatória Z relacionada a uma posição x , expressa pela Equação (11)

$$Z(x) = \mu(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (11)$$

onde $\mu(x)$ é uma função determinística que descreve a componente estrutural Z em uma posição x , $\varepsilon'(x)$ é um termo estocástico relacionado a variação local, e ε'' é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal com média zero e variância σ^2 (CAMARGO *et al.* 2004).

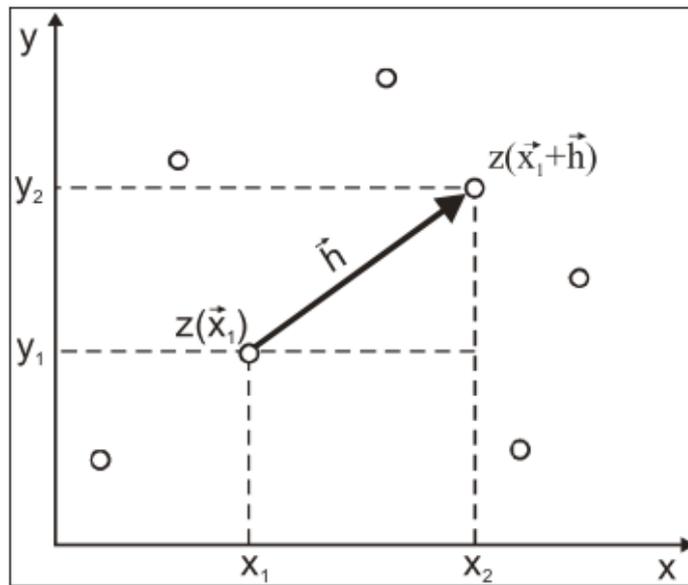
A componente $\mu(x)$ representa basicamente a média do fenômeno e a função $\varepsilon'(x)$ pode caracterizar a variável regionalizada. Para tal, faz-se uso de uma ferramenta denominada semivariograma.

O semivariograma permite a representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço (CAMARGO *et al.* 2004), ou seja, ele representa a variabilidade espacial dos dados. Ele pode ser calculado experimentalmente, considerando o esquema de amostragem em duas dimensões, onde $z(x)$ denota o valor de uma posição cujos componentes são (x_1, y_1) e $z(x+h)$ o valor da amostra numa posição cujos componentes são (x_2, y_2) , sendo h um vetor distância (módulo e direção) que separa os pontos, como mostra a Figura 12.

Para cada valor de h apresentado na Figura 12 são considerados todos os pares de amostras $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor distância h , a partir da Equação (12)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (12)$$

FIGURA 12 - AMOSTRAGEM EM DUAS DIMENSÕES NO SEMIVARIOGRAMA.



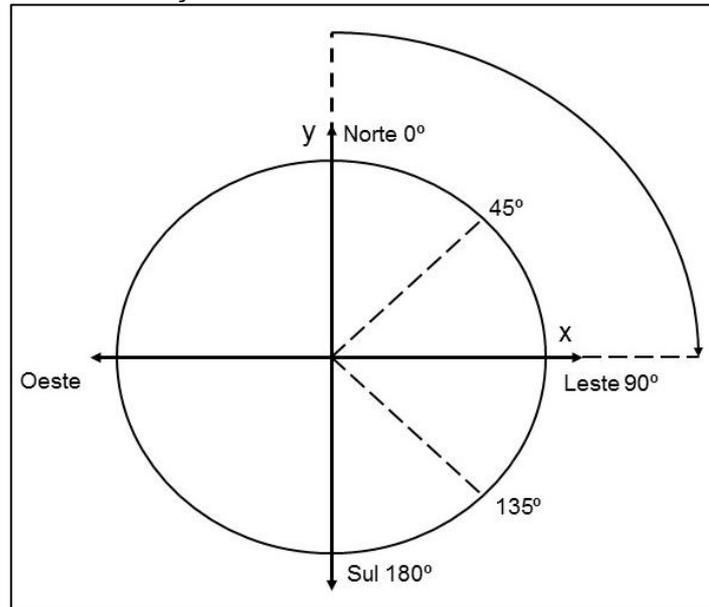
Fonte: CAMARGO et al. (2004).

Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , ele é chamado isotrópico, ao passo que quando os semivariogramas apresentam uma tendência na direção espacial dos dados, ele é caracterizado por anisotrópico.

A forma mais eficiente e direta de detectar a anisotropia é através do mapa de semivariograma, conhecido também como semivariograma de superfície. Neste gráfico, obtém-se uma visão geral da variabilidade espacial da variável em estudo. Além disso, sobre o gráfico de semivariograma é possível detectar rapidamente os eixos de anisotropia, isto é, as direções de maior e menor variabilidade espacial da variável em análise (CAMARGO *et al.*, 2004). Ainda segundo os autores, a anisotropia é uma característica muito frequente na representação de fenômenos naturais.

Vieira (1995) alega que, em geral, a precisão da interpolação ou o tipo de hipótese satisfeita não são afetados se, ao invés de se preocupar com a escolha de método de transformação de anisotropia, apenas for limitada a faixa de distância na qual se utiliza o semivariograma. As principais direções de h que são examinadas são: 0° , 45° , 90° , 135° e 180° , como apresentado na Figura 13.

FIGURA 13 - CONVENÇÕES DIRECIONAIS UTILIZADAS NA ANISOTROPIA.



Fonte: Adaptado de CAMARGO et al., 2004.

O uso do semivariograma na krigagem possibilita a construção de mapas de contornos (isolinhas ou curvas de nível) oferecendo os limites de confiança para o mapa, através da variância da estimativa. Adicionalmente, a krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação, incluindo procedimentos denominados estacionários (krigagem simples e ordinária), não estacionários (krigagem universal, funções intrínsecas de ordem k), univariados e multivariados (co-krigagem etc). O foco deste trabalho será a abordagem na krigagem ordinária (CAMARGO *et al.*, 2004).

A krigagem ordinária possui a capacidade de avaliar o grau de incerteza dos parâmetros ajustados aos modelos teóricos de semivariogramas. Tal incerteza é o erro da estimativa, que pode ser obtido mediante o procedimento chamado validação do modelo, que envolve a reamostragem dos valores conhecidos por meio dos parâmetros ajustados ao modelo do semivariograma (CAMARGO, 1997). Dessa forma, o peso reflete a distância entre as amostras e o ponto a estimar, de forma que quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será o seu peso no estimador.

Barros Filho (2007) afirma que a Krigagem ordinária minimiza a variância dos erros, especializando-os e permitindo a geração de uma superfície composta por esses erros.

De acordo com Burrough e McDonnell (1998), a superfície gerada pela krigagem ordinária corresponde a uma grade, cujos pontos são calculados em função da variação local da amostra, conforme a Equação (13):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (13)$$

onde Z^* é o valor estimado, $Z(x_i)$ é o valor da amostra e λ_i é o peso determinado pelo semivariograma, com $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Os conceitos apresentados nesta revisão bibliográfica são de extrema relevância para a compreensão de um sistema fluvial, e em particular, do ecossistema Pantanal. Sendo assim, com este trabalho poderão ser feitas adaptações e complementações dos estudos já realizados nesta região, para abranger a modelagem hidrodinâmica em uma área piloto do rio Paraguai, e avaliar uma condição hidrológica distinta daquelas já estudadas anteriormente, e a partir de metodologias complementares, analisar estatisticamente os métodos que compõem a modelagem hidrodinâmica 1D e seus resultados.

Adicionalmente, a obtenção de novos produtos direcionados a estudos de navegabilidade podem servir de embasamento em uma ampla abordagem, auxiliando por exemplo em tomadas de decisão referentes ao gerenciamento da via navegável, na identificação de locais que apresentem restrições à navegação devido às baixas profundidades, na execução de obras de engenharia como dragagens de manutenção, obras de derrocamento, retificação de curvas e até mesmo análises de impactos ambientais.

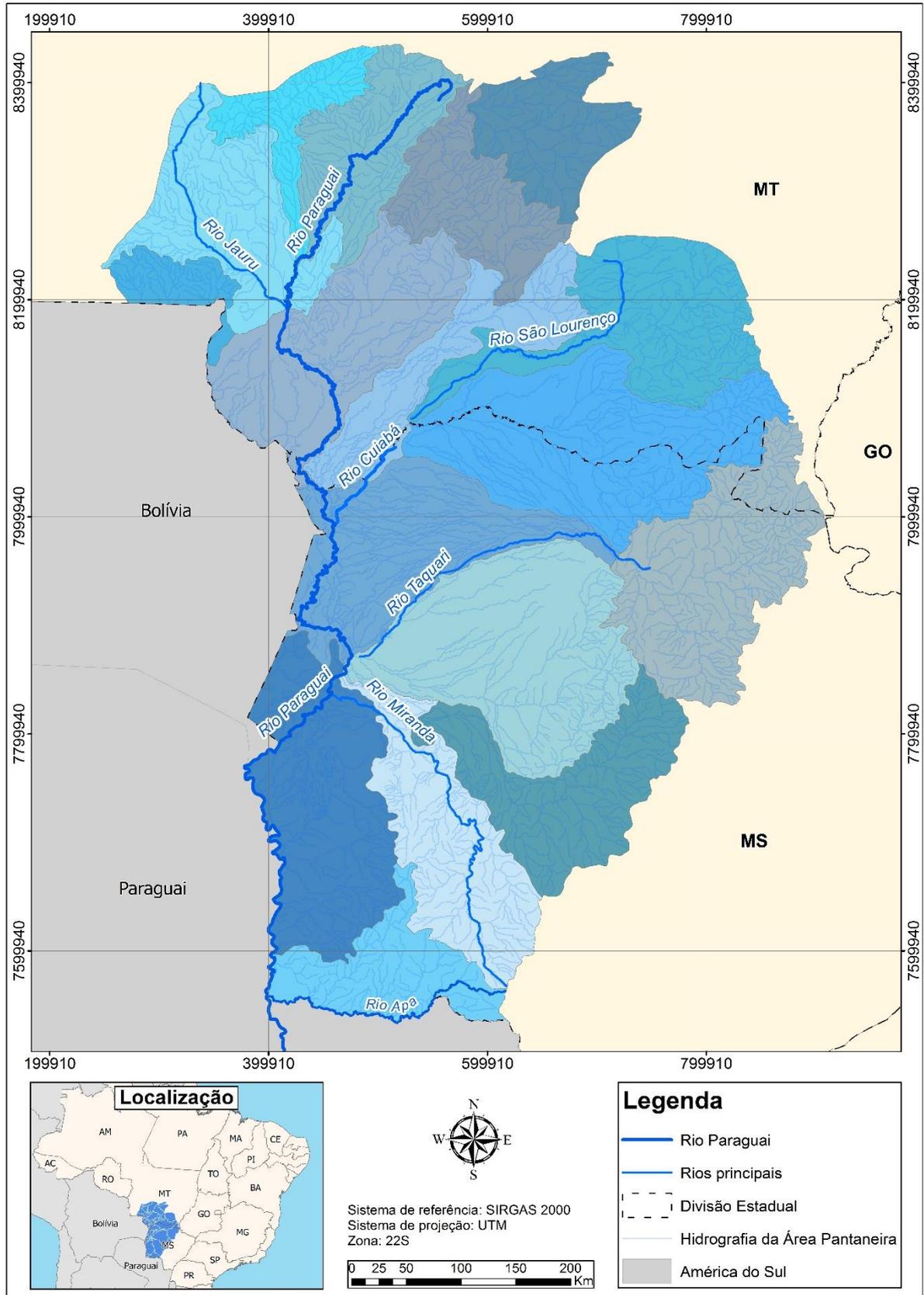
3 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), a região hidrográfica do alto Paraguai dispõe de uma das maiores extensões úmidas contínuas do mundo: o Pantanal. Nesta região, destacam-se os biomas do Cerrado e do Pantanal, além de algumas zonas de transição. A vegetação predominante é a Savana Arborizada (campo – cerrado, com predomínio de vegetação herbácea, principalmente gramíneas, e pequenas árvores e arbustos bastante espaçados) e a Savana Florestada (cerradão, mais fechada e densa).

A bacia hidrográfica do alto Paraguai abrange uma área de 362.249km², dos quais 188.375km² estão situados no estado do Mato Grosso (52%) e 173.874km² no Mato Grosso do Sul (48%), subdividida em 17 sub-bacias (ANTAQ, 2013). A Figura 14 ilustra a porção brasileira da bacia do alto Paraguai, com destaque para suas subdivisões e rede hidrográficas.

FIGURA 14 - BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARAGUAI E SUAS SUBDIVISÕES.



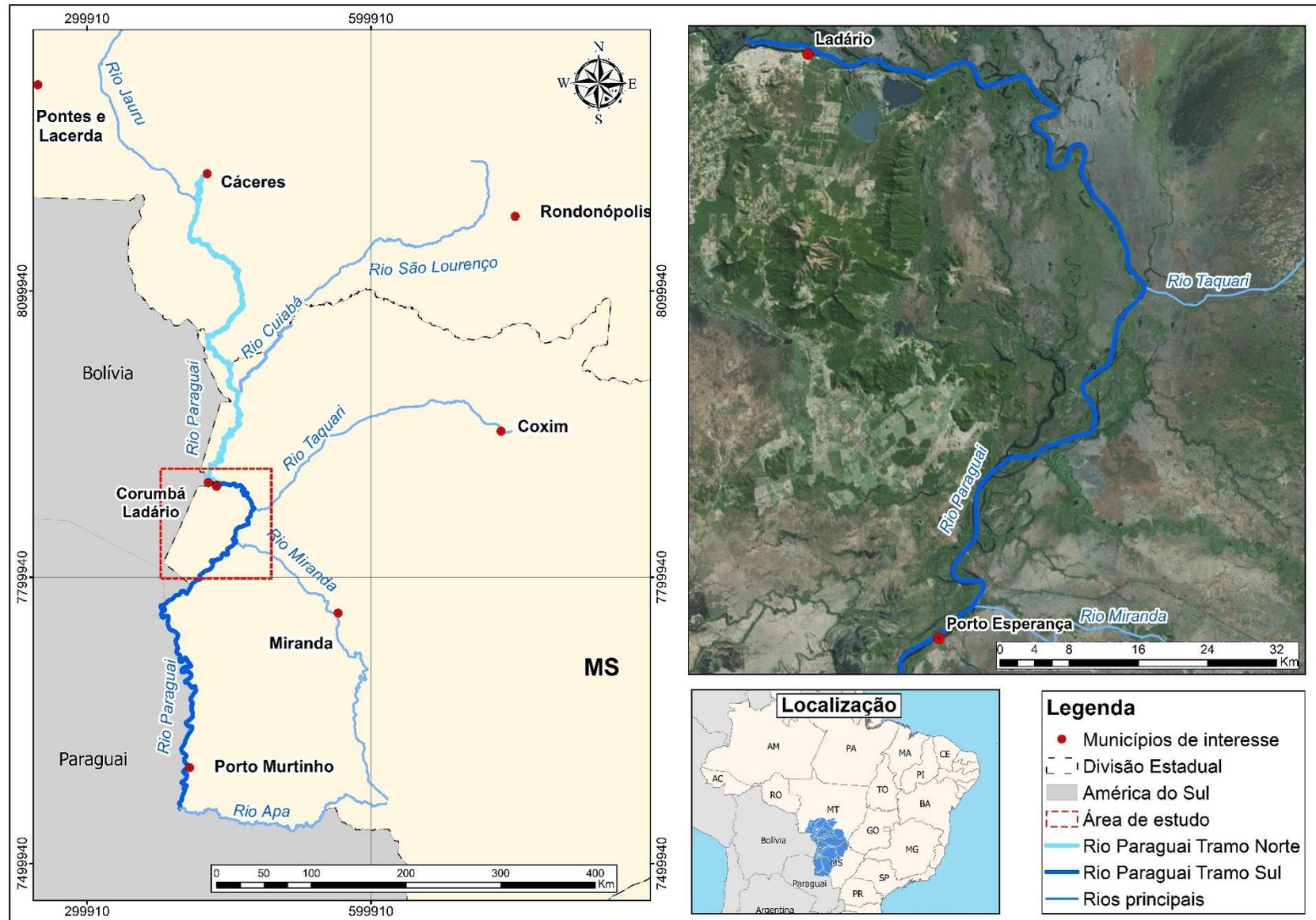
3.1.1 A Hidrovia do rio Paraguai

Inserido quase que totalmente na bacia do alto Paraguai, em termos de hidrovia, o rio Paraguai é navegável desde a cidade de Cáceres, no Brasil, unindo-se ao rio Paraná na fronteira entre Argentina e Paraguai, prevalecendo daí em diante o nome de rio Paraná, que por sua vez torna-se rio da Prata, na fronteira entre o Uruguai e a Argentina, desaguando no oceano Atlântico. Depois da bacia Amazônica, a bacia do Prata é a maior com potencial hidroviário da América do Sul, com alta possibilidade de desenvolvimento, principalmente para o escoamento das safras de grãos do Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS) pela Hidrovia do rio Paraguai.

Em território brasileiro, a Hidrovia percorre aproximadamente 1.270km, compreendendo os estados do Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS), dividindo-se em dois trechos: tramo norte e tramo sul. O primeiro inicia-se na cidade de Cáceres (MT) e segue até Corumbá (MS), percorrendo 680km, ao passo que o segundo inicia-se em Corumbá (MS) e segue até a foz do rio Apa, com aproximadamente 590km.

A região de interesse neste estudo compreende o rio Paraguai, na porção brasileira de sua bacia hidrográfica (alto Paraguai), especificamente no trecho localizado nas proximidades do Porto de Ladário até o distrito de Porto Esperança, ambos no estado do Mato Grosso do Sul, compreendendo uma extensão de aproximadamente 128 quilômetros. A Figura 15 ilustra os dois tramos da Hidrovia do rio Paraguai, com destaque para a área de estudo deste trabalho.

FIGURA 15 - HIDROVIA DO RIO PARAGUAI. DESTAQUE PARA A ÁREA DE ESTUDO.



De acordo com Silva *et al.* (2008), Tucci (2004), Allasia *et al.* (2007) e Paz (2010), o aporte de sedimentos no rio é oriundo de suas margens e de seus principais afluentes, como os rios Jauru, Cuiabá, Miranda e Taquari. O transporte de sedimentos é intensificado na época de cheia, gerando alterações no relevo de fundo a cada ciclo hidrológico.

De acordo com UFPR/ITTI (2015), o regime hidrológico do rio Paraguai é bastante característico. Na região de Cáceres, o período de cheias acontece entre os meses de janeiro e junho, com picos mais recorrente nos meses de março e de abril, ao passo que o período de estiagem se estende do mês de julho ao mês de dezembro. Na região de Ladário, entre os meses de junho e setembro ocorrem as cheias, com picos mais recorrentes no mês de julho. Já a estiagem se estende do mês de outubro ao mês de fevereiro, com níveis mais baixos alocados entre os meses de dezembro e de janeiro. Tais características e processos requerem das autoridades responsáveis um processo de manutenção da Hidrovia, com constantes alterações na sinalização e intervenções pontuais.

Clarke, Tucci e Collischonn (2003) justificam que as alterações nas séries de vazão são, pelo menos em parte, causadas por alterações nas séries de chuva na bacia do rio Paraguai. Além disso, ressalta-se que a bacia do rio Paraguai e a região central da África possuem características em comum. Em ambas, as mudanças hidrológicas apresentam uma grande persistência, isto é, a correlação interanual da vazão dos rios é relativamente alta, além disso, estas regiões apresentam fortes gradientes espaciais de precipitação.

Em decorrência dos elementos supracitados, notam-se diversas variações nas características hidráulicas do canal em diversos trechos ao longo da Hidrovia do rio Paraguai, resultando em um dimensionamento de canal com magnitudes distintas. A dimensão média do canal de navegação e as profundidades limites para o tráfego de embarcações são apresentadas na Tabela 2, com base nos valores apresentados por ANTAQ (2013), AHIPAR (2015) e SSN-6 (2015).

TABELA 2 - DIMENSÕES DO CANAL DE NAVEGAÇÃO.

| LOCAL | LARGURA DO CANAL DE NAVEGAÇÃO (EM METROS) | PROFUNDIDADE (EM METROS) |
|---|---|--------------------------|
| Tramo Norte (Cáceres-MT a Corumbá-MS) | 45 | 1,8 |
| Tramo Sul (Corumbá-MS a Foz do rio Apa-MS) | 105 | 3,0 |

FONTE: Adaptado de ANTAQ, 2013; AHIPAR, 2015 e SSN-6, 2015.

De acordo com a Marinha do Brasil e a AHIPAR, o tramo brasileiro da Hidrovia do rio Paraguai apresenta muitos passos críticos conhecidos e históricos. Alguns desses passos críticos são apresentados nas cartas náuticas e por meio do boletim periódico de Aviso aos Navegantes (BRASIL. Marinha do Brasil, 2015). Para a região de estudo, são oficialmente divulgadas as passagens críticas de navegação apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 - PASSAGENS CRÍTICAS À NAVEGAÇÃO HOMOLOGADAS PELA MARINHA DO BRASIL.

| LOCALIZAÇÃO (KM) | PASSAGEM CRÍTICA DE NAVEGAÇÃO |
|------------------|-------------------------------|
| 1.391 a 1.392 | Passo Jacaré |
| 1.419 a 1.421 | Passo Caraguatá |
| 1.436 a 1.438 | Passo Abobral |
| 1.452 a 1.456 | Passo Mucunã |
| 1.472 a 1.475 | Passo Miguel Henrique |
| 1.489 a 1.491 | Passo de Santana e Jatobá |

FONTE: CHM-DHN (2016).

Da Tabela 3, os dois locais que apresentam necessidade de dragagem de manutenção para assegurar a profundidade mínima são o Passo Caraguatá e o Passo do Jacaré. Os demais locais exigem atenção na navegação, sem necessariamente apresentar a obrigação de obras de dragagem.

3.2 DADOS DISPONÍVEIS

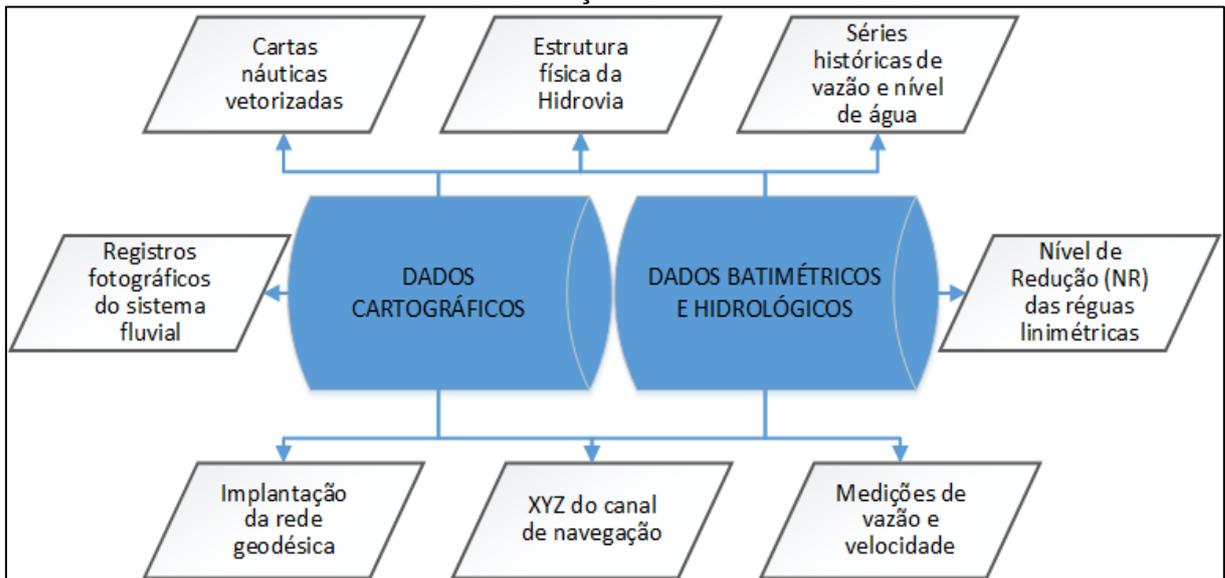
Os dados empregados na elaboração deste trabalho abrangem fontes diferenciadas de informação, a saber: medições de vazão e velocidade, dados de altimetria por meio de Referências de Nível (RRNN), dados hidrométricos e informações batimétricas.

A cooperação feita entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), por meio do Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) e com o auxílio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) possibilitou o desenvolvimento do Projeto EVTEA – Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental da Hidrovia do rio Paraguai, e permitiu o desenvolvimento deste estudo, principalmente no que se refere à disponibilidade de dados, participações de levantamento de campo e compartilhamento de informações da região estudada.

O levantamento de dados possibilitou a obtenção de diversas informações, e pode ser dividido em duas categorias:

- Dados cartográficos: dados cartográficos das cartas náuticas; implantação da rede geodésica; altimetria do rio Paraguai (dados secundários); imageamento da Hidrovia;
- Dados batimétricos e hidrológicos: séries de vazão e nível d'água; medições de vazão e velocidade; nível de redução das réguas linimétricas.

FIGURA 16 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS.



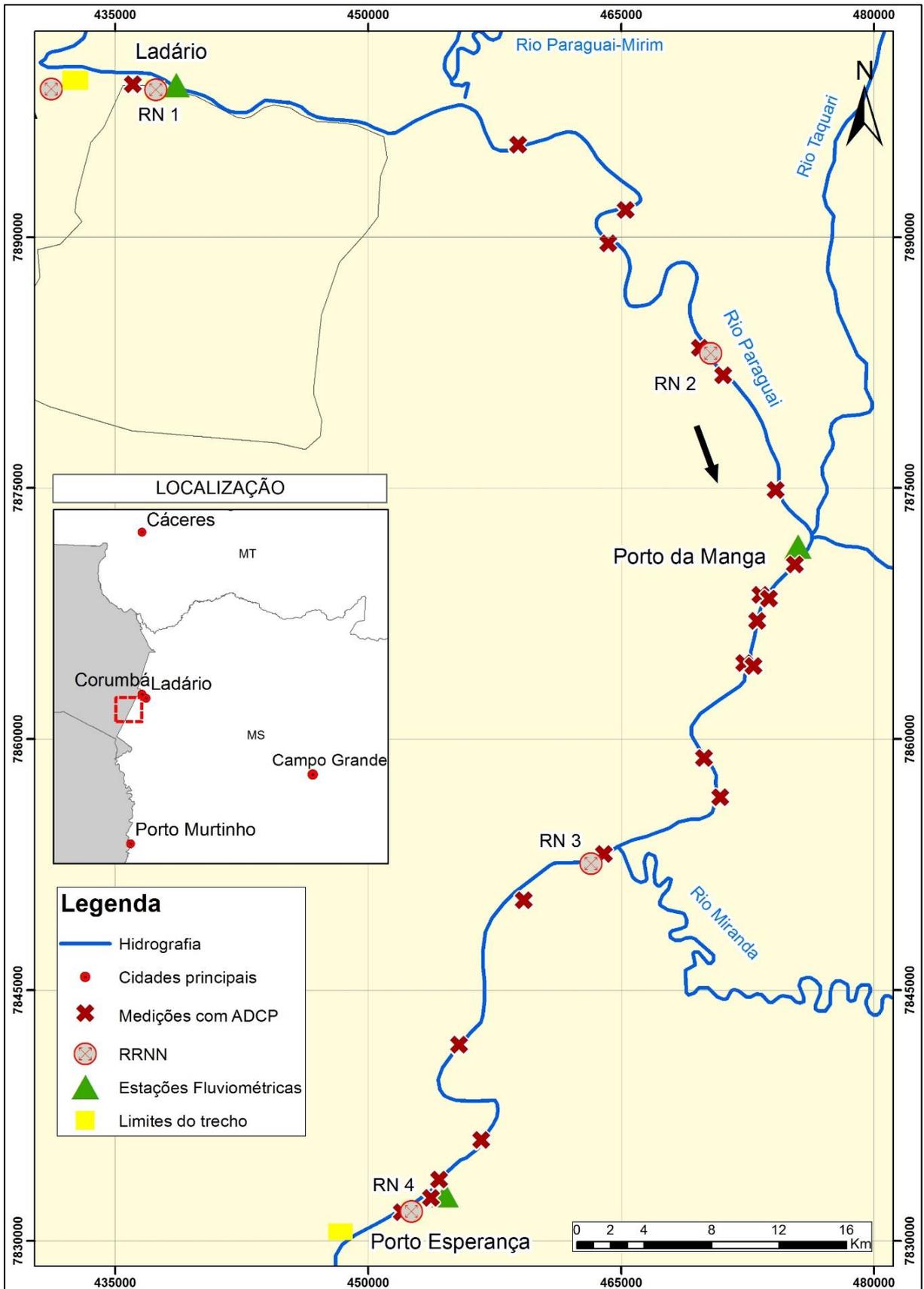
A Figura 17 ilustra essa distribuição. A Tabela 4 apresenta algumas informações relevantes sobre a obtenção desses dados, cuja descrição é feita nas seções seguintes.

TABELA 4 - DADOS DISPONÍVEIS.

| DADO | INFORMAÇÕES (LOCALIZAÇÃO, QUANTIDADE) | FONTE DO DADO | PARTICIPAÇÃO DO AUTOR NA COLETA E PROCESSAMENTO | DADOS |
|--------------------------------|---|-------------------|---|-------|
| Cartas náuticas vetorizadas | Do Km 1.515 a Km 1.387 | Marinha do Brasil | Não | B e P |
| Cartas náuticas em altimetria | Do Km 1.515 a Km 1.387 | Marinha do Brasil | Processamento | B e P |
| Implantação das RRNN | Km 1.515 Km 1.420 Km 1.387 | UFPR/ITTI | Coleta | B e P |
| Medições de vazão e velocidade | 22 medições | UFPR/ITTI | Coleta e processamento | B e P |
| Leitura de régua | 3 réguas | UFPR/ITTI | Coleta e processamento | B e P |
| Dados hidrológicos | 3 estações: Ladário Porto da Manga Porto Esperança | ANA/CPRM | Coleta e processamento | B e P |

OBS: *B e P = Bruto e processado.

FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS INFORMAÇÕES OBTIDAS PARA A REGIÃO DE ESTUDO.



3.2.1 Altimetria do rio Paraguai por meio de implantação de Referências de Nível (RRNN)

Os dados de altimetria utilizados pertencem a uma parcela da rede altimétrica resultante de levantamentos de campo efetuados ao longo do rio Paraguai em janeiro de 2015.

A rede de Referências de Nível (RRNN) implantada com marcos geodésicos no rio Paraguai possui coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude elipsoidal), cartográficas (coordenadas na projeção Universal Transversa de Mercator - UTM) e altitudes ortométricas definidas em relação ao nível médio dos mares, determinadas pelo método de posicionamento espacial. No **Anexo I** deste trabalho é apresentada a rede completa do levantamento efetuado no trecho da Hidrovia do rio Paraguai.

As altitudes ortométricas obtidas para os pontos da rede, para a lâmina d'água e para os zeros das réguas linimétricas são resultados obtidos por meio de *Global Navigation Satellite System* (GNSS), a partir da transformação de altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas com o uso de um modelo geoidal local, capaz de representar o comportamento da ondulação geoidal na região.

De acordo com Nadal *et al.* (2015), o sistema GNSS, empregado nos levantamentos geodésicos, é baseado nas técnicas de posicionamento espacial que, aliadas aos avanços do desenvolvimento científico e tecnológico, associam o sistema global de posicionamento (*Global Positioning System* – GPS) à infraestrutura espacial (*Satellite Based Augmentation System* - SBAS). Esta associação foi denominada de sistema de navegação global por satélites (*Global Navigation Satellite System* - GNSS).

Os métodos de posicionamento GNSS disponíveis são: absoluto (também denominado de autônomo ou por ponto), relativo e diferencial (conhecido pela sigla DGPS).

Para este estudo, o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) foi utilizado por meio do serviço online do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ofertado de forma gratuita (UFPR/ITTI, 2015).

O IBGE-PPP é um serviço on-line para o pós-processamento de dados GPS (*Global Positioning System*). Ele permite aos usuários de GPS obterem coordenadas

de alta precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS 2000 - e no *International Terrestrial Reference Frame* - ITRF.

No posicionamento com GPS, o termo Posicionamento por Ponto Preciso normalmente refere-se à obtenção da posição de uma estação utilizando as observáveis de fase da onda portadora, coletadas por receptores de duas frequências e em conjunto com os produtos do IGS (*International GNSS Service*) (IBGE, 2013).

As altitudes obtidas pelo GNSS são elipsoidais (distância contada sobre a normal, do ponto na superfície do terreno ao elipsóide de revolução). De acordo com UFPR/ITTI (2015), para a transformação de altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas, foram adotados os procedimentos recomendados pelo IBGE, com a adoção do modelo de ondulação geoidal para o Brasil MAPGEO2010. Este modelo é disponibilizado pelo IBGE e permite a transformação das altitudes pela Equação (14)

$$H_A = h_A - N_A \quad (14)$$

onde H_A é a altitude ortométrica objetivo do mapeamento, h_A é a altitude geométrica ou elipsoidal fornecida pela medição com o sistema GNSS e N_A é a ondulação geoidal obtida por interpolação pelo modelo MAPGEO2010.

De acordo com Santos (2006), os levantamentos altimétricos realizados com GPS consistem em determinar a altitude ortométrica do ponto de interesse (i) em relação a, pelo menos, uma estação de referência (A), de coordenadas geodésicas (ϕ_A, λ_A, h_A) e altitude ortométrica (H_A) conhecidas.

A determinação foi feita pela diferença das altitudes geométricas, apresentada em (15)

$$\Delta h = h_i - h_A \quad (15)$$

onde Δh é o desnível entre os pontos; h_i é a altitude elipsoidal do ponto de interesse e h_a é a altitude elipsoidal da estação de referência.

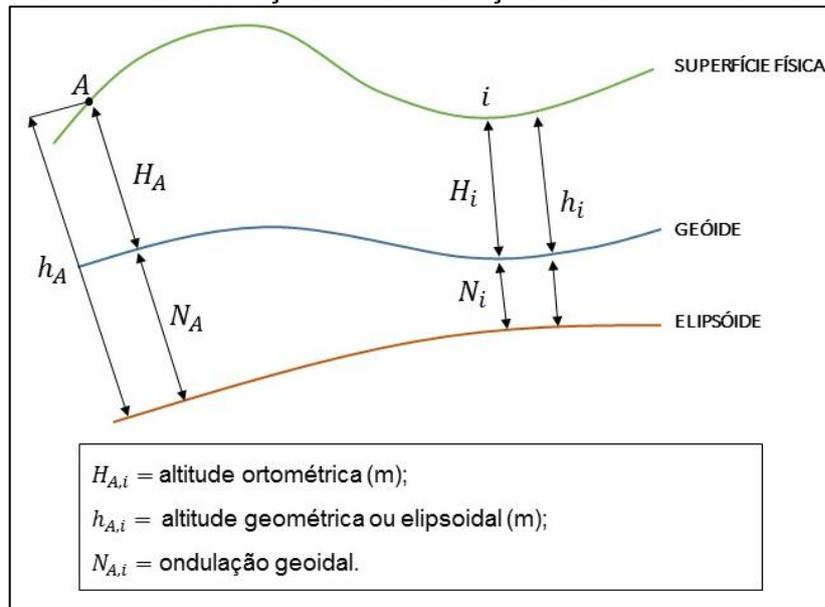
As altitudes geoidais foram determinadas pelo posicionamento relativo por GNSS, e por alturas geoidais, conforme a Equação (16)

$$\Delta N_i = N_i - N_A \quad (16)$$

onde N_i é a ondulação geoidal local e N_A é a ondulação do modelo MAPGEO.

A Figura 18 ilustra a representação das variáveis envolvidas na determinação das altitudes ortométricas por meio das equações (14), (15) e (16), e a Figura 19 apresenta os equipamentos e materiais utilizados nos levantamentos altimétricos.

FIGURA 18 - TRANSFORMAÇÃO DE ONDULAÇÃO GEOIDAL EM ORTOMÉTRICA.



FONTE: Adaptado de SANTOS (2006).

FIGURA 19 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA IMPLANTAÇÃO DAS RRNN. (A) CONJUNTO NÍVEL TOPOGRÁFICO E EQUIPAMENTOS GNSS; (B) RECEPTOR GNSS; (C) RÉGUA ESTADIMÉTRICA E (D) RECEPTOR GNSS.



FONTE: Adaptado de UFPR/ITTI, 2015.

A metodologia completa sobre a implantação das RRNN no rio Paraguai pode ser consultada em Nadal *et al.* (2015).

Para a região de estudo, foram fornecidas altitudes ortométricas da lâmina d'água de 4 (quatro) RRNN (ver Figura 17), os quais estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - ALTITUDES ORTOMÉTRICAS DA LÂMINA D'ÁGUA PARA AS RRNN IMPLANTADAS NO TRECHO DE ESTUDO.

| RRNN | LOCALIZAÇÃO | E (M) | N (M) | ALTITUDE ORTOMÉTRICA DA LÂMINA D'ÁGUA - NA (M) |
|------|----------------------|---------|-----------|--|
| RN 1 | Ladário | 437.401 | 7.898.821 | 84,91 |
| RN 2 | Ilha Tira Catinga | 470.315 | 7.883.059 | 83,53 |
| RN 3 | Ilha Caraguatá | 463.196 | 7.852.557 | 82,40 |
| RN 4 | Porto Gregório Curvo | 452.567 | 7.831.768 | 81,58 |

3.2.1 Dados cartográficos

De acordo com Weibel e Heller (1991), a partir de documentos cartográficos como mapas de curvas de nível e cartas de navegação, é possível representar a superfície do leito do rio. Esta forma de obtenção normalmente está atrelada a grandes projetos, devido aos altos custos envolvidos dos métodos topográficos e batimétricos e à grande quantidade de produtos cartográficos gerados.

No caso do rio Paraguai, as cartas de navegação eletrônicas são os documentos mais utilizados. São fornecidas pela Diretoria de Hidrografia da Marinha (DHN) / Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), seguindo os padrões internacionais de qualidade da *International Hydrographic Organization* (IHO) e estão disponíveis para *download* em seu sítio na internet. Os documentos estão em formato *raster*, e são compostos por batimetrias dos anos de 2007 a 2011, com unidades em metros, numeradas sequencialmente entre dois locais de maior relevância, e apresentadas nas escalas de 1:25.000, 1:15.000, 1:10.000 e 1:5.000, variando trecho a trecho (ver Figura 20).

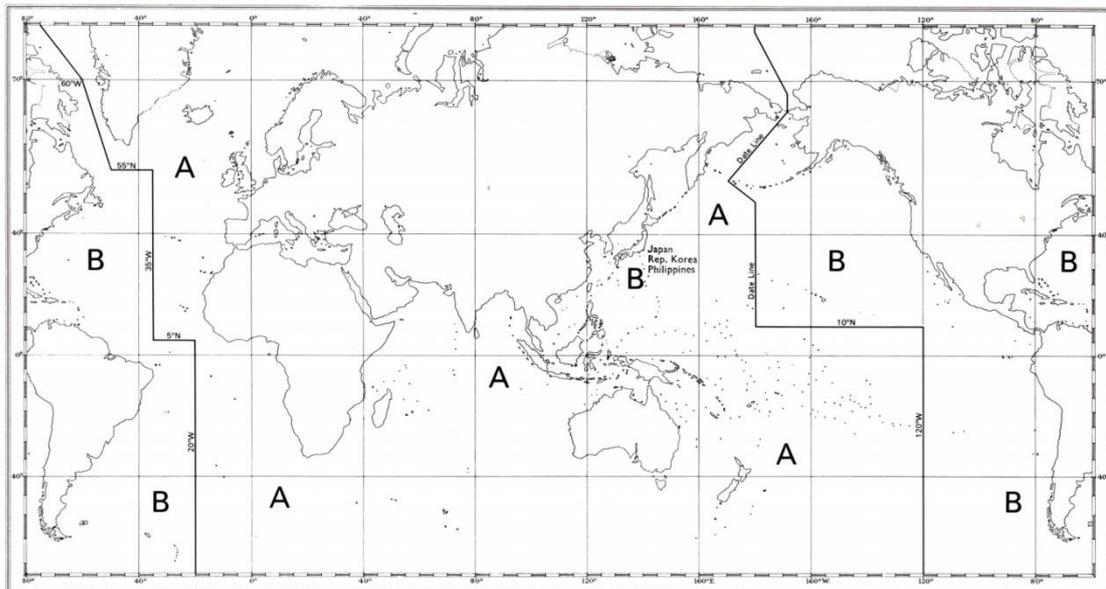
Como apresentado na Tabela 4, as cartas náuticas *raster* foram vetorizadas e organizadas em camadas, o que permitiu a seleção, a análise e a apresentação dos pontos cotados de forma personalizada ou automática.

Suas profundidades estão representadas em metros, reduzidas ao nível acima do qual o rio Paraguai permanece por, aproximadamente, 90% do tempo. Para cada carta existe um ábaco para correção das sondagens, avaliando a leitura das duas réguas linimétricas mais próximas a montante e a jusante da carta, com o nível de redução associado para cada régua (ver Figura 22).

Para a região de estudo dispõe-se de 98.736 pontos cotados, incluindo margens, contornos das ilhas, pontos esparsos de batimetria e curvas de nível.

O sistema de projeção é o sistema de Mercator, com *Datum* horizontal sendo o *World Geodetic System - WGS-84*. A sinalização das cartas náuticas segue o sistema de Balizamento Marítimo da *International Association of Lighthouse Authorities* (IALA, 2010) Região “B” (ver Figura 21).

FIGURA 21 - SISTEMA DE BALIZAMENTO MARÍTIMO DE ACORDO COM A IALA. SISTEMA DE BALIZAMENTO MARÍTIMO DIVIDIDO POR REGIÕES DE ACORDO COM A IALA.



FONTE: Adaptado de IALA, 2010.

3.2.2 Nível de redução

A coleta de dados batimétricos é produzida em termos de profundidade do leito. As profundidades são aferidas em metros, e conceitualmente, ela é o valor real da distância vertical entre um determinado nível de água e o fundo (IHO, 2010).

Em se tratando de cartas náuticas, este nível de água é denominado Nível de Redução (NR), que tem como principal função eliminar as variações verticais, assegurando que o navegante não encontre nenhuma profundidade menor do que aquelas representadas na carta náutica (CHM-DHN, 2008).

O NR deve ser coerente com as características físicas de cada região, tendo como premissa principal garantir a segurança da navegação. Isto significa que as profundidades representadas em uma carta náutica são os valores mínimos encontrados na área, sob condições meteorológicas normais. Desta forma, o Nível de Redução apresenta variações espaciais e temporais em relação a um *datum* vertical (RAMOS e KRUEGER, 2009).

No Brasil, e conseqüentemente para o rio Paraguai, a entidade responsável pelo cálculo e pelo fornecimento do NR oficial das cartas náuticas é a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), por meio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Os valores de Nível de Redução são atualizados a cada 10 ou 20 anos, dependendo dos dados das estações fluviométricas. Calcula-se, com base nesse período, o quantitativo de 10% das cotas mínimas observadas para aquela estação, sendo este valor o correspondente Nível de Redução para aquela determinada estação. Ou seja, durante 90% do tempo, o nível de água do rio encontra-se acima dessa cota mínima.

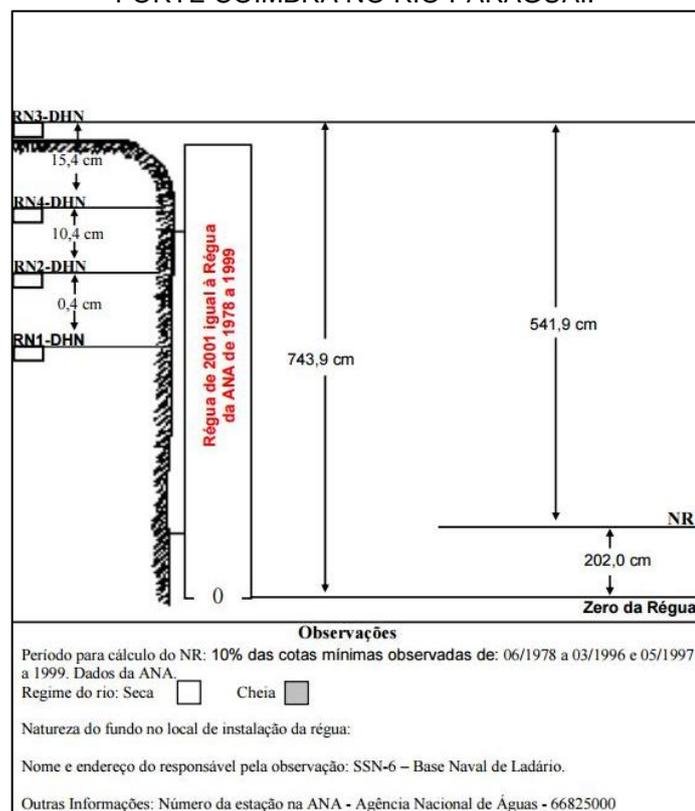
Para cada estação fluviométrica, existe uma ficha descritiva (F-43), que contém as informações do nível de redução da estação, além do período que resultou neste valor, e demais informações cartográficas e de pessoal. A Figura 22 ilustra a correção do NR para a localidade do Passo Caraguatá. A Tabela 6 apresenta os Níveis de Redução para o rio Paraguai.

TABELA 6 - NÍVEIS DE REDUÇÃO DAS RÉGUAS LINIMÉTRICAS DO RIO PARAGUAI.

| NOME | CÓDIGO ANA | E | N | NR (M) |
|---------------------|------------|-------------|--------------|--------|
| Cáceres | 66070004 | 424.883,10 | 8.222.533,47 | 2,01 |
| Descalvados | 66090000 | 4.20.172,01 | 8.149.808,50 | 3,43 |
| Porto Conceição | 66120000 | 461.726,91 | 8.104.551,95 | 3,09 |
| Bela Vista do Norte | 66125000 | 426.683,45 | 8.049.327,38 | 3,38 |
| Ladário | 66825000 | 437.390,80 | 7.898.839,27 | 2,02 |
| Porto da Manga | 66895000 | 475.482,05 | 7.871.493,77 | 4,41 |
| Porto Esperança | 66960008 | 454.560,82 | 7.832.724,06 | 1,77 |
| Forte Coimbra | 66970000 | 421.621,35 | 7.797.135,13 | 1,34 |
| Porto Murtinho | 67100000 | 407.780,37 | 7.599.975,17 | 3,54 |

FONTE: Adaptado de SSN-6, 2015.

FIGURA 22 - ÁBACO DE CORREÇÕES DE SONDAGENS. EXEMPLO DA RÉGUA DE LADÁRIO E FORTE COIMBRA NO RIO PARAGUAI.



FONTE: BRASIL. Marinha do Brasil, 2012.

3.2.3 Atribuição de altimetria a pontos batimétricos das cartas náuticas

A atribuição das altitudes ortométricas aos pontos batimétricos das cartas náuticas vetorizadas e disponibilizadas pela Marinha do Brasil seguiu as premissas da metodologia apresentada em Guarneri *et al.* (2015). Os dados de entrada empregados foram o traçado do canal de navegação percorrido durante o levantamento de campo, das altitudes das RRNN implantadas e referenciadas ao nível médio dos mares, das tomadas da lâmina d'água seguido da interpolação entre elas.

Para a atribuição de altitudes ortométricas, foi utilizada a abordagem de linearização dos dados vetorizados, associando cada ponto a uma altitude a partir da sua relação linear com a quilometragem, e depois foi efetuada a transformação das profundidades em valores de altimetria. Tais valores estão associados ao nível de redução das réguas linimétricas fornecidos pela Marinha do Brasil por meio do Serviço de Sinalização Náutica do Oeste (SSN-6). A metodologia completa referente a estas atribuições pode ser consultada em Guarneri *et al.* (2015).

3.2.4 Dados hidrológicos

A caracterização das estações fluviométricas possibilitou compreender o regime de vazões da região de estudo e identificar alguns padrões de comportamento, além da visualização e análise dos dados hidrológicos e geométricos como as curvas-chave, séries históricas de vazão e nível, e seções transversais. Os dados serviram como parâmetros de entrada e de calibração para o modelo hidrodinâmico.

Para compor o sistema hidrológico deste estudo, têm-se como referência os dados de 3 estações fluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e demais agências reguladoras, a saber: Ladário (66825000), Porto da Manga (66895000) e Porto Esperança (66960008). A Tabela 7 apresenta algumas características básicas dessas estações.

TABELA 7 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NESTE ESTUDO.

| ESTAÇÃO/CÓDIGO | LADÁRIO/ 66825000 | PORTO DA MANGA/ 66895000 | PORTO ESPERANÇA/ 66960008 |
|---|----------------------|--|--|
| E (M) | 438.606,89 | 475.482,05 | 454.560,82 |
| N (M) | 7.899.070,80 | 7.871.493,77 | 7.832.724,06 |
| ÁREA DE DRENAGEM DA ESTAÇÃO (KM ²) | 253.000 | 316.000 | 363.000 |
| DADOS DE COTA | 1900-2015 | 1969-2015 Falta de registros de dados em 1987-1992, 1994-1995, e 2011- 2012. | 1966-2015 Falta de registros de dados em 2010, 2012- 2013 |
| DADOS DE VAZÃO | 1965-1973 | 1969-2007 | 1963-1981 |
| VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA (VEM) (L/S/KM ²) | 3,3 | 6,1 | 5,2 |
| COTAS (CM) | | | |
| MÍNIMA (ANO) | -61 (1964) | 154 (1970) | 0 (1966-1969, 1971- 1973) |
| MÉDIA | 292 | 535 | 294 |
| MÁXIMA (ANO) | 664 (1988) | 911 (1977/2009) | 655 (1988) |
| DESVIO PADRÃO | 147 | 173 | 161 |
| VAZÃO (M³/S) | | | |
| MÍNIMA (ANO) | 600 (1966) | 564 (1971) | 1010 (1966) |
| MÉDIA | 835 | 1926 | 1886 |
| MÁXIMA (ANO) | 1243 (1966) | 4678 (1982) | 5031 (1979) |
| DESVIO PADRÃO | 173 | 799 | 916 |

Fonte: Elaborado a partir de ANA, 2016.

A curva-chave relaciona o nível de um rio com sua vazão. Ela pode ser estimada pela determinação da relação cota-vazão, por meio das alturas linimétricas obtidas dos registros da régua linimétrica e das medições de descarga efetuadas na seção transversal da estação fluviométrica.

Para as três estações apresentadas na Tabela 7, foram estimadas as curvas-chave pelo método de extrapolação logarítmica, baseado na hipótese de que, a partir de um dado nível, a curva de descarga obedece à expressão apresentada por Santos *et al.* (2001) na Equação (17):

$$Q = a(H - h_0)^b \quad (17)$$

onde a , b e h_0 são os parâmetros de ajuste da equação, Q é a magnitude da vazão (m^3/s), H é o nível de água do rio (NA) (m) que corresponde à vazão Q

Os parâmetros das curvas-chave foram determinados utilizando-se o modelo de otimização não linear, cuja função objetivo foi minimizar a diferença quadrada entre as vazões observadas e calculadas, considerando-se as variações dos parâmetros a , b e h_0 , de acordo com a Equação (18):

$$\text{Min } \sum (Q_{cal} - Q_{obs})^2 \quad (18)$$

onde Q_{cal} é a vazão calculada e Q_{obs} é a vazão observada. A variável h_0 está condicionada a um valor menor ou igual ao valor mínimo do nível da água ($h_{\text{mín}}$) da série histórica dos dados utilizados ($h_0 \leq h_{\text{mín}}$).

3.2.4.1 Estação Fluviométrica de Ladário

A estação fluviométrica de Ladário é uma das mais antigas estações do rio Paraguai, com 115 anos de dados de níveis de água, de 1900 a 2015.

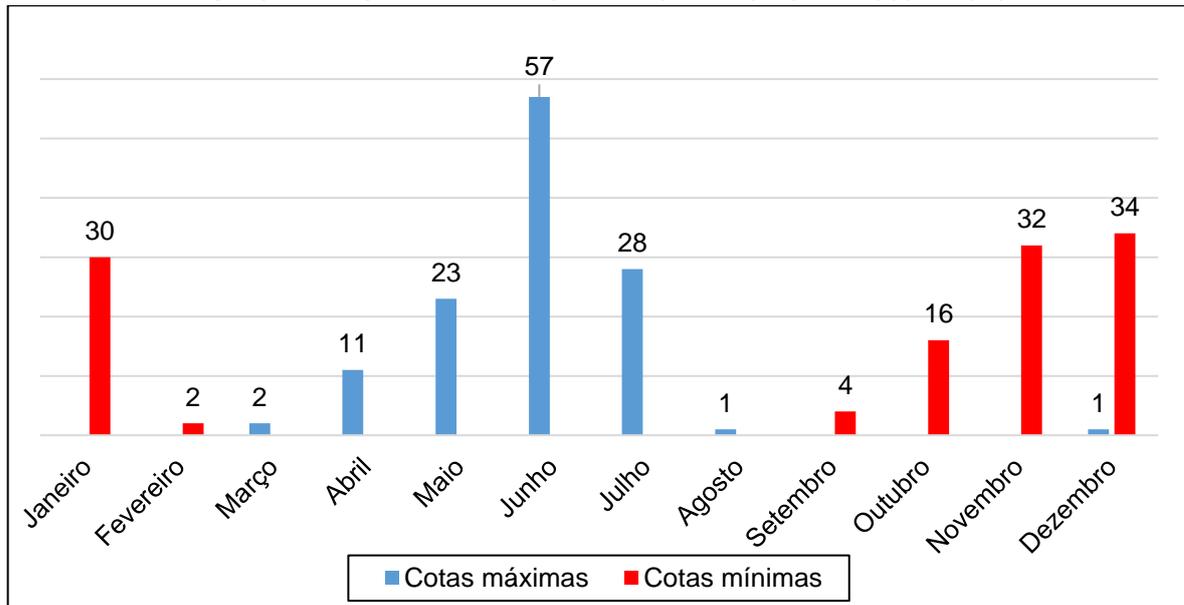
De acordo com Clarke, Tucci e Collischonn (2003), apesar de configurarem uma série muito longa e completa, os dados de cota de Ladário fornecem uma informação um tanto limitada sobre o regime hidrológico da bacia do alto Paraguai, devido à ausência de uma relação confiável entre cota e vazão. A fim de ilustrar informações relevantes para a caracterização hidrológica, a Figura 24 apresenta um histograma de máximas e mínimas mensais para os dados desta estação, e a Figura 25 ilustra a estimativa da curva-chave para a estação de Ladário.

FIGURA 23 - COTAS A) MÁXIMAS, B) MÉDIAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO PARA O PERÍODO DE 1900 A 2015.



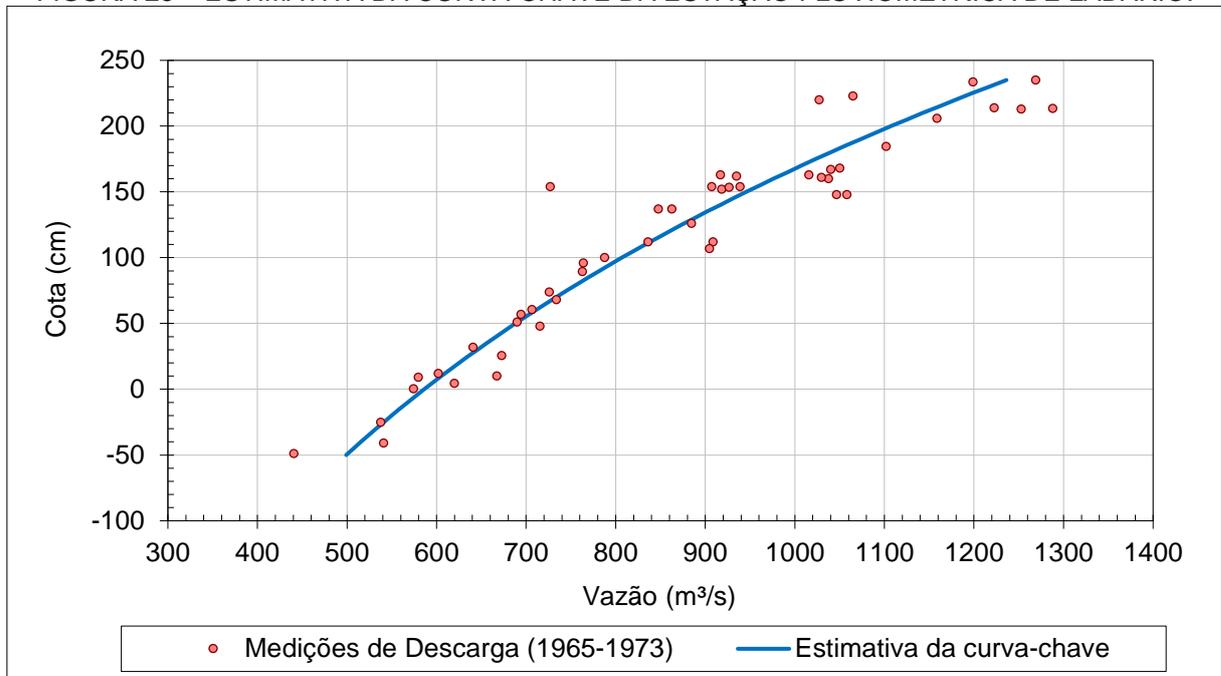
A partir da Figura 23 percebe-se que as cotas são bastante menores no período de 1961 a 1970, Existe, porém, uma clara evidência de mudança na cota mínima média, que passou de 90 ± 9 cm, no período anterior a 1960, para 144 ± 16 cm, no período posterior a 1971.

FIGURA 24 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSAIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO PARA O PERÍODO DE 1900 A 2015.



Da Figura 24, infere-se que os meses de inundação nas proximidades de Ladário ocorrem no trimestre de maio a julho, com pico mais frequente em junho. Já a época de estiagem vai de novembro a janeiro, com pequenas ocorrências já no mês de outubro.

FIGURA 25 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE LADÁRIO.



3.2.4.2 Estação Fluviométrica de Porto da Manga

A estação fluviométrica de Porto da Manga apresenta dados de níveis de 1969-2015, com falta de registros de dados nos anos 1987-1992, 1994-1995, e 2011-2012. A Figura 27 apresenta um histograma da ocorrência de máximas e mínimas mensais para esta estação. O período de inundações para esta localidade ocorre no trimestre de maio a julho, com pico mais recorrente em junho, ao passo que as estiagens são mais recorrentes no trimestre de novembro a janeiro. A Figura 28 ilustra o ajuste para curva-chave da estação de Porto da Manga.

FIGURA 26 - COTAS A) MÉDIAS, B) MÁXIMAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA PARA O PERÍODO DE 1969 A 2015.

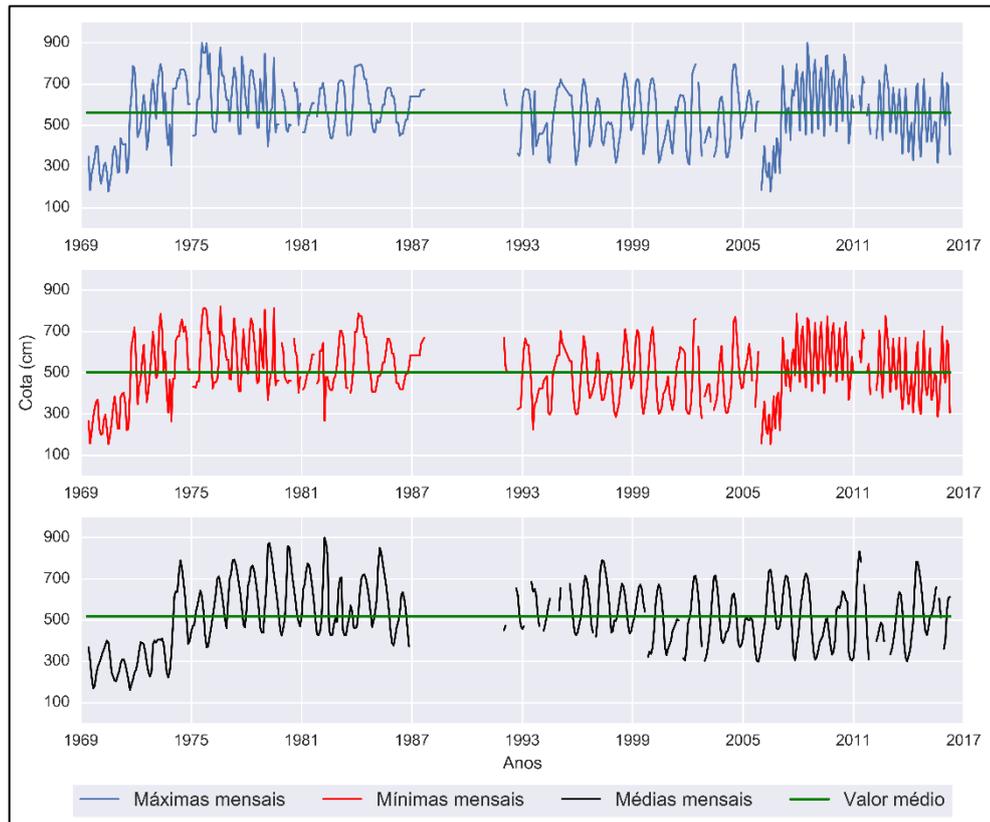


FIGURA 27 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSAIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA PARA O PERÍODO DE 1969 A 2015.

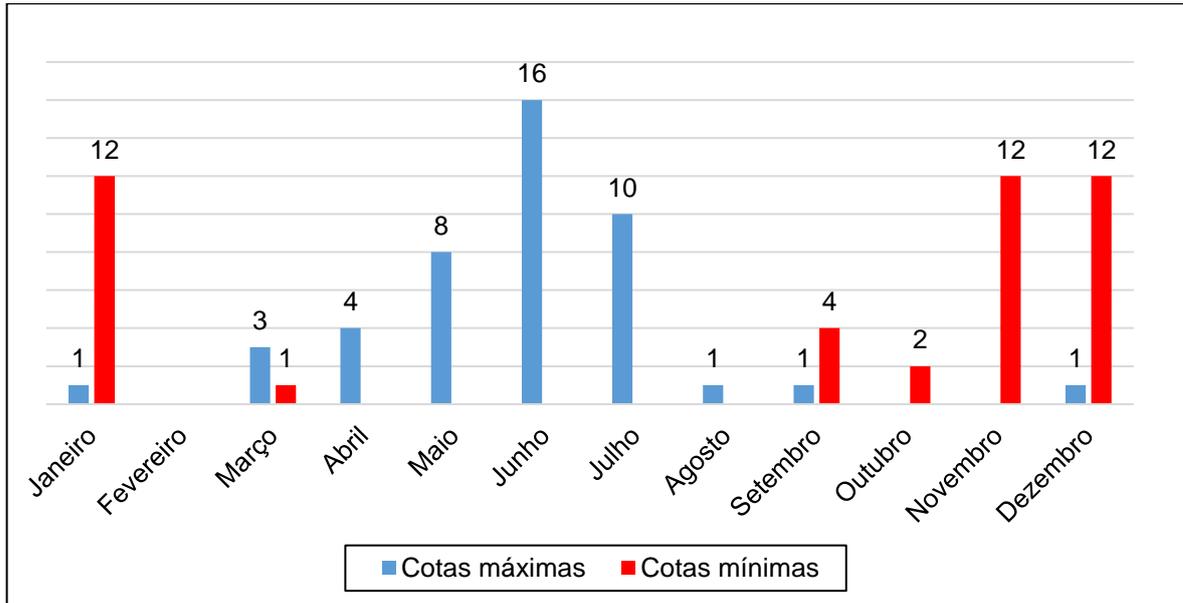
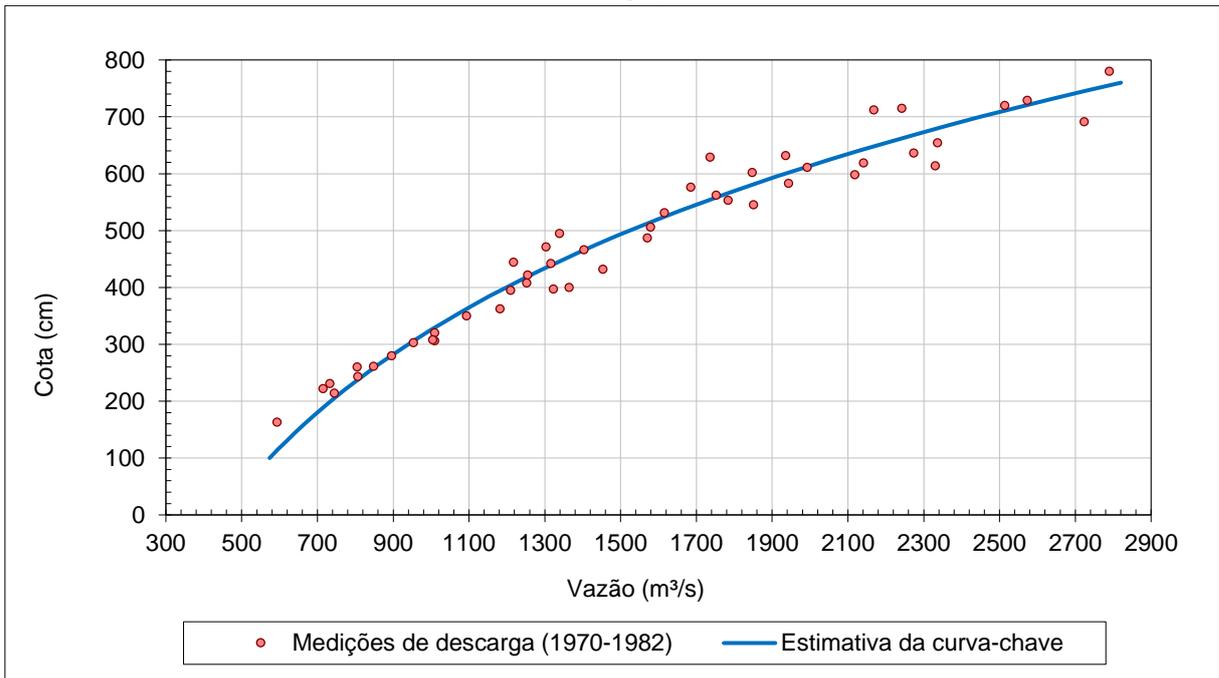


FIGURA 28 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DA MANGA.



3.2.4.3 Estação Fluviométrica de Porto Esperança

Porto Esperança apresenta dados de nível no período de 1964-2015, com falta de registros de dados nos anos 2010, 2012-2013. A Figura 30 apresenta um histograma da ocorrência de máximas e mínimas mensais para esta estação. O período de inundações para esta localidade ocorre no trimestre de maio a julho, com pico mais recorrente em junho, ao passo que as estiagens são mais recorrentes no trimestre de novembro a janeiro, com maior recorrência em novembro e dezembro. A Figura 31 ilustra o ajuste para curva-chave da estação de Porto Esperança.

FIGURA 29 - COTAS A) MÉDIAS, B) MÁXIMAS E C) MÍNIMAS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA PARA O PERÍODO DE 1963 A 2015.

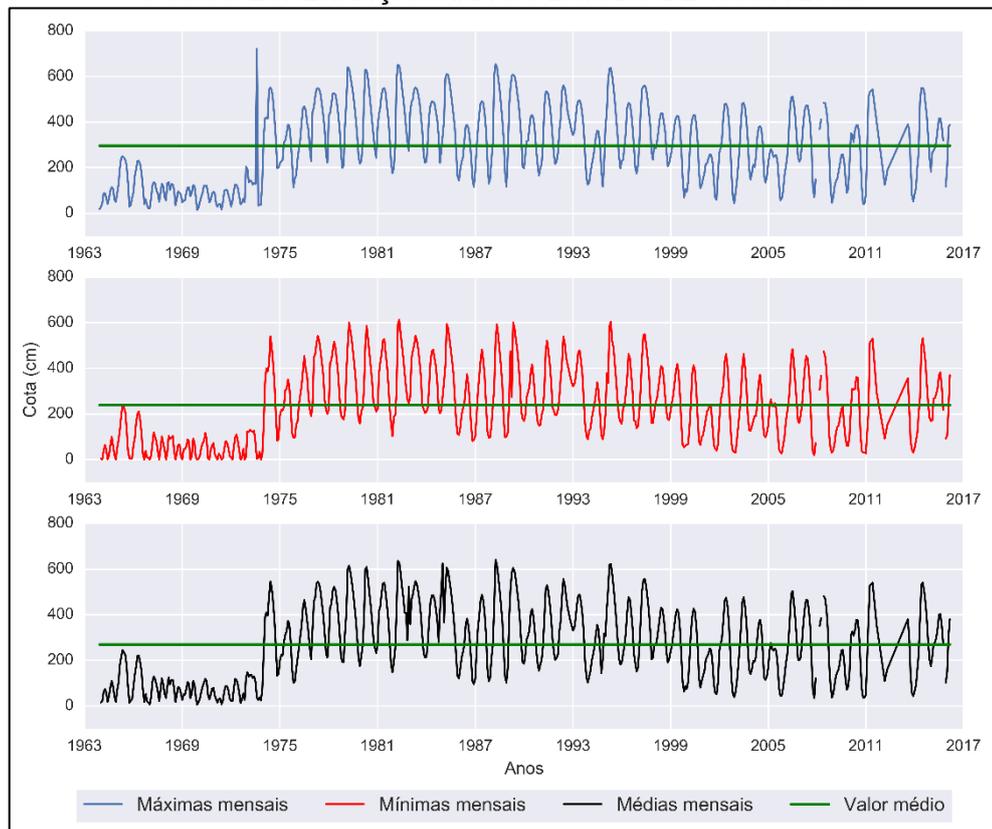


FIGURA 30 - HISTOGRAMA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSAIS PARA A ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA PARA O PERÍODO DE 1963 A 2015.

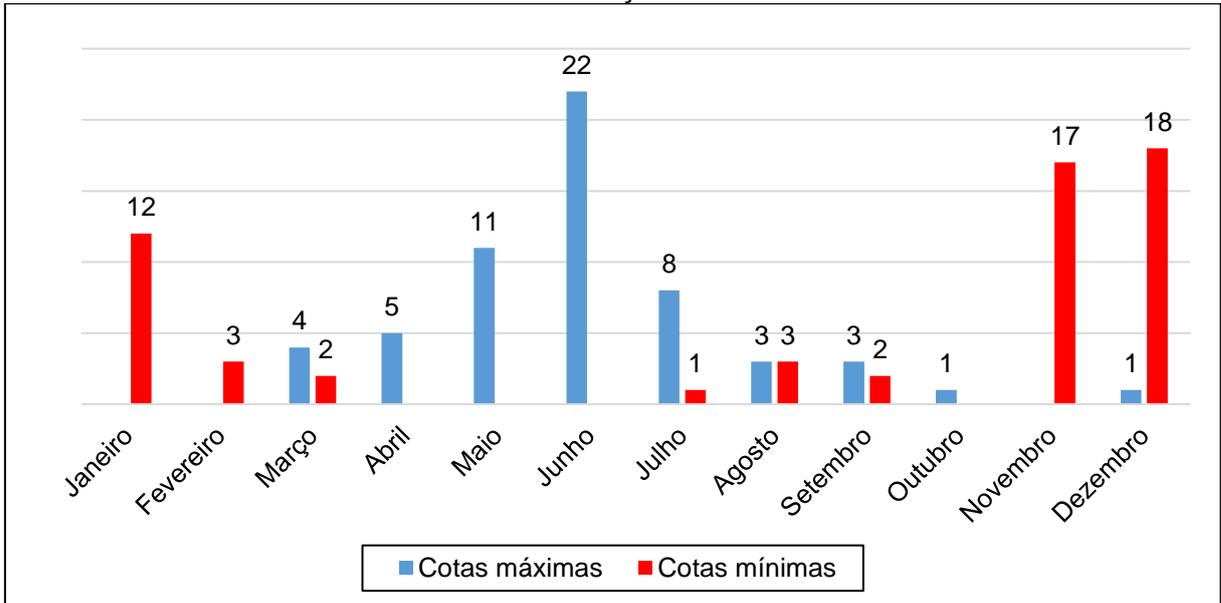
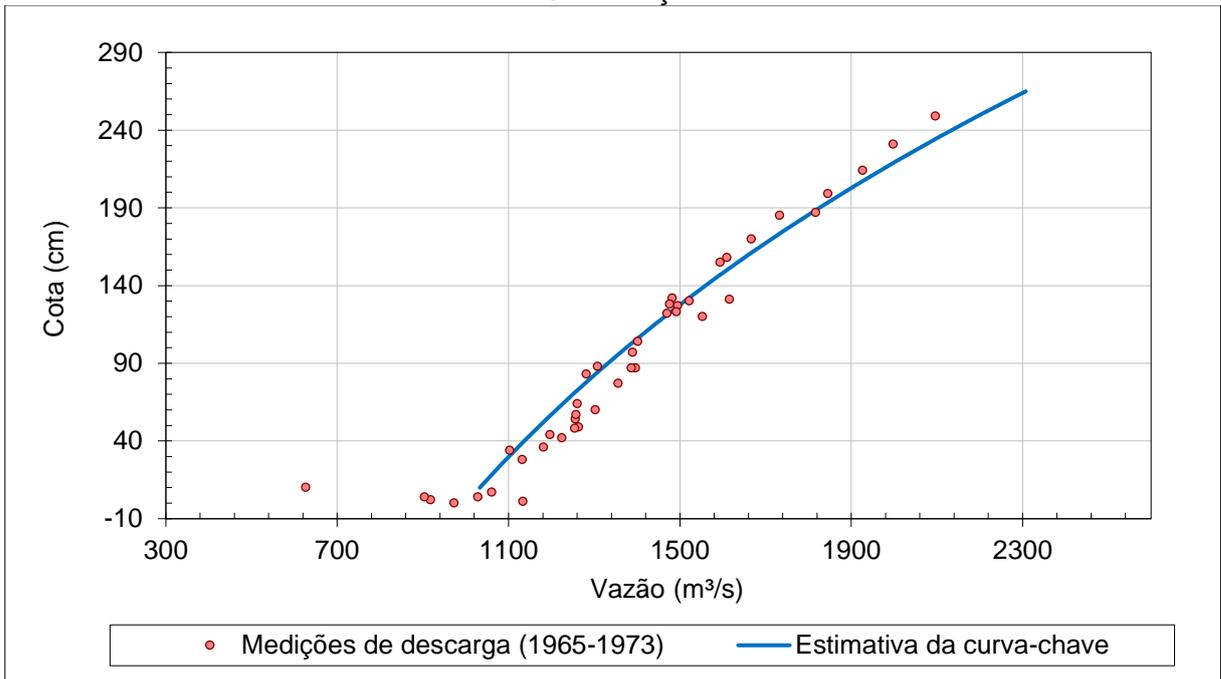


FIGURA 31 – ESTIMATIVA DA CURVA-CHAVE DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO ESPERANÇA.



3.2.5 Medições de vazão e velocidade

Com o intuito de complementar os dados hidrológicos, foram realizadas medições de vazão, velocidade e batimetria em seções transversais ao longo do rio Paraguai. Os dados levantados nesta seção serviram de base para a validação dos resultados obtidos pela modelagem hidrodinâmica, e foram coletados em conjunto entre o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) e o Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em levantamento de campo durante o mês de janeiro de 2015.

O equipamento utilizado durante as medições foi o Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (ADCP), modelo ADP-M9, série SN-3754 da marca Sontek Inc TM, pertencente ao PPGERHA-UFPR, e que contém as especificações técnicas segundo o Quadro 2.

QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ADCP SONTEK M9.

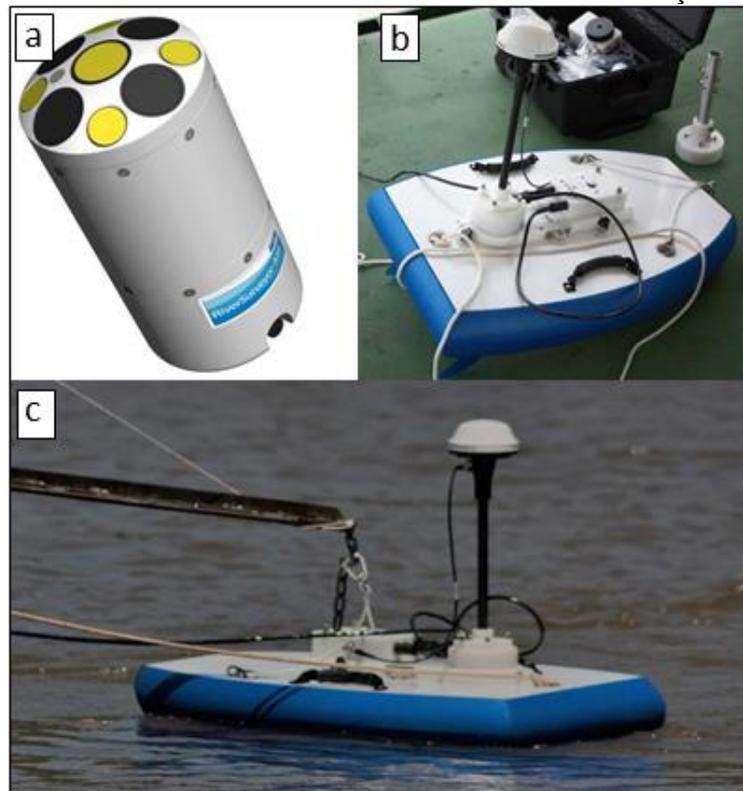
| | |
|---|---------------------------------|
| Alcance do perfilador | 0,06 - 40m |
| Limite de velocidade do perfilador | ±20 m/s |
| Velocidade — precisão | ±0,25% da velocidade medida |
| Velocidade — resolução | 0,001 m/s |
| Número de células | Até 128 |
| Tamanho da célula | 0,02 - 4m |
| Número de transdutores | Nove (9) |
| Configuração do feixe | Dois conjuntos de quatro feixes |
| | 3,0 mhz/1,0 mhz |
| Ângulo do transdutor | 25° em relação a vertical |
| Frequência do feixe vertical | 0,5 mhz |
| Profundidade — alcance | 0,20 - 80m |
| Profundidade — precisão | 0,01 |
| Profundidade — resolução | 0,001 m |
| Alcance da medição de vazão —Bottom Track | 0,3 a 40m |
| Alcance da medição de vazão —RTK;GPS | 0,3 a 80 m |
| Computação da medição de vazão | Interna |

Fonte: SONTEK (2010).

O ADCP (Sontek RiverSurveyor M9) é composto por uma sonda com nove transdutores, sendo dois conjuntos de 4 transdutores (cada conjunto possui sua

própria frequência) e um transdutor “vertical” (para a medição da profundidade). A sonda também possui uma bússola para referenciar as medições e um sistema inercial para corrigir inclinações devido ao movimento de balanço do equipamento. Além da sonda, o equipamento foi conectado a um GPS, PCM (*Power Communications Module* – parte do equipamento que faz a comunicação entre sonda-GPS-computador e alimenta a sonda através de bateria) (SONTEK, 2015). A Figura 32 ilustra a composição do equipamento.

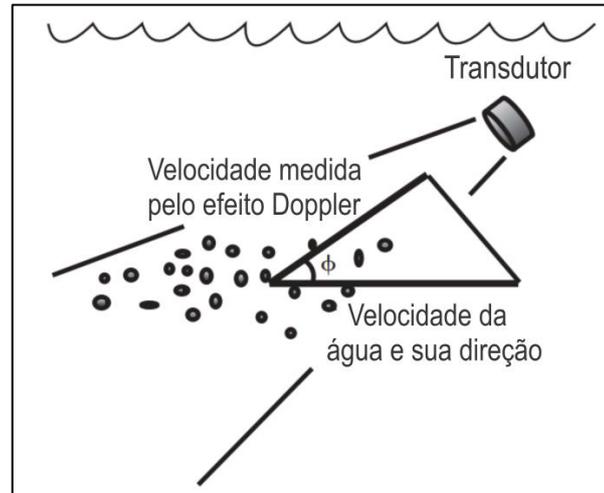
FIGURA 32 - EQUIPAMENTO ADCP SONTEK M9. A) TRANSDUTOR; B) SONDA, PCM E GPS; C) ADCP EM FUNCIONAMENTO ACOPLADO EM BÓIA DURANTE MEDIÇÃO NO RIO CUIABÁ.



Fonte: Adaptado de SONTEK, 2015 e UFPR/ITTI, 2015.

Quando montado em uma embarcação ou suporte, o ADCP é orientado no plano vertical com os transdutores para baixo, que mantém uma determinada angulação em relação à vertical (Sontek M9 utiliza 25 graus) para poder calcular trigonometricamente a velocidade da água, como mostra a Figura 33.

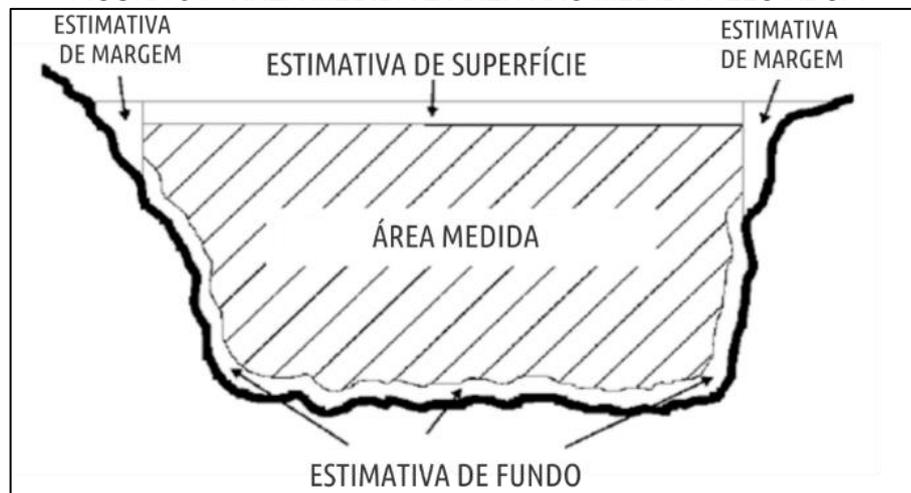
FIGURA 33 - ÂNGULO DO TRANSDUTOR DO ADCP.



Fonte: Adaptado de GAMARO, 2012.

Devido às restrições do aparelho e da seção de medição, algumas áreas não são medidas e são calculadas por meio de extrapolação e interpolação. São as áreas junto à superfície, perto do leito do rio e perto das margens, como mostra a Figura 34.

FIGURA 34 - ÁREA MEDIDA E ÁREA NÃO MEDIDA PELO ADCP.

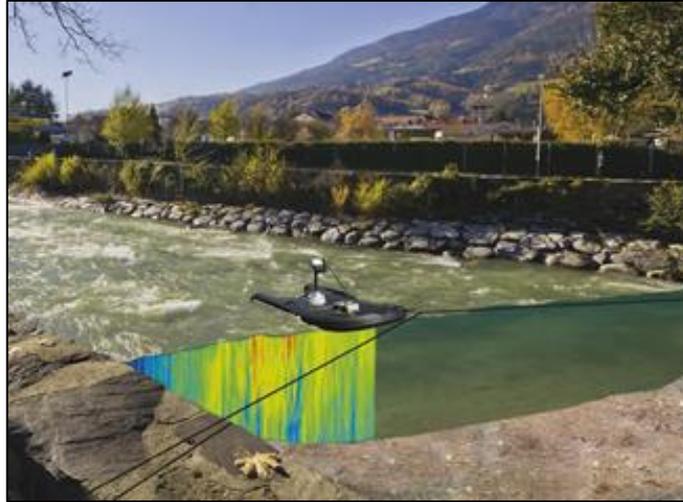


Fonte: Adaptado de GAMARO, 2012.

Conforme é realizada a travessia do rio, o ADCP divide a seção transversal do rio em várias células. As células podem ter comprimento e largura selecionados pelo operador ou definidas automaticamente pelo equipamento. Neste caso as dimensões variam em função da profundidade do fundo e velocidade do equipamento em relação à travessia, como mostra a Figura 35. Para cada célula, o equipamento calcula a velocidade média da água e após realizar a travessia no rio realiza um cálculo de integração para obter sua vazão.

Juntamente a esses componentes, obtêm-se a distância percorrida pelo feixe através da emissão das ondas no transdutor, resultando nos valores de profundidade do canal e velocidade da água (Figura 35).

FIGURA 35 - DIAGRAMA DE UMA EMBARCAÇÃO REALIZANDO MEDIÇÕES DE ADCP EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CANAL.

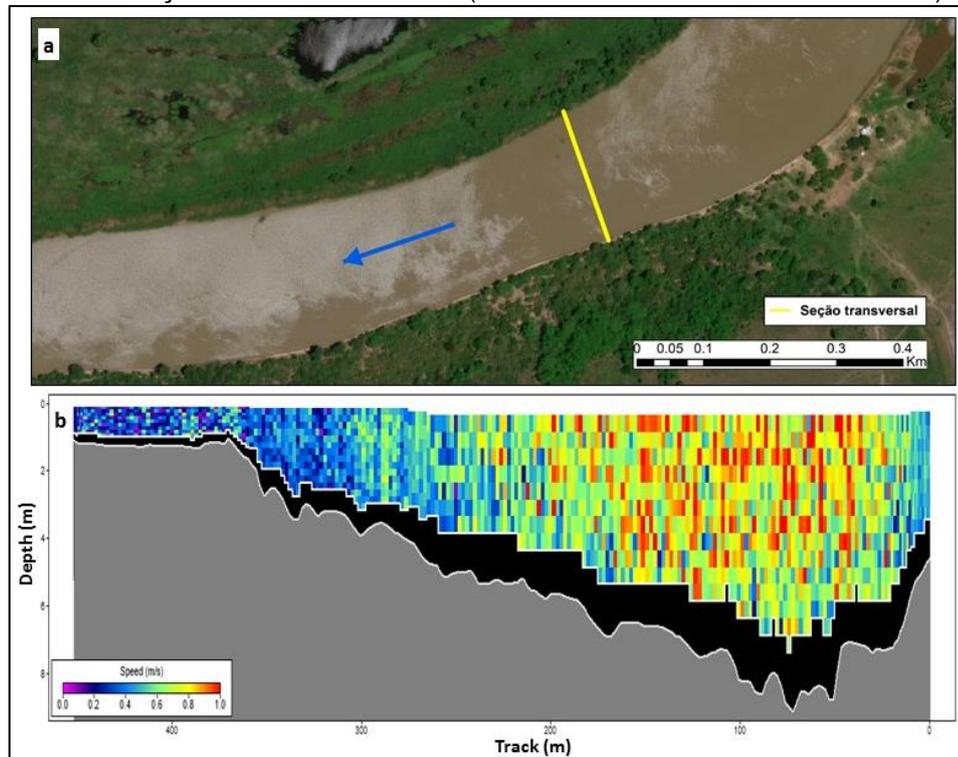


Fonte: EAMHW (2014).

Para a realização das medições, o equipamento foi acoplado a uma embarcação de pequeno porte, realizando travessias de uma margem a outra do rio, como mostra a Figura 36.

A distribuição do levantamento batimétrico das seções transversais teve como premissa coincidir com os locais de variação das características do escoamento, como a montante e a jusante de ilhas, em trechos nos quais se identificavam baixas profundidades, nos locais de implantação das RRNN, e nas régua linimétricas das estações fluviométricas. Os perfis das seções transversais e seus componentes de velocidade e vazão associadas serviram como parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.

FIGURA 36 - EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM ADCP. A) LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL. B) PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES (SAÍDA DO RIVER SUERVEYOR LIVE).



FONTE: SONTEK (2010).

A Tabela 8 apresenta as medições de ADCP efetuadas na região do estudo. Nela constam a identificação de cada seção e demais informações resultantes das sondagens, como: os valores de velocidade média no canal, vazão e área da seção transversal. A localização das medições pode ser encontrada na seção 3.1.1 (Figura 17). O Anexo II apresenta todas as medições feitas durante esta campanha no tramo sul da Hidrovia do rio Paraguai.

TABELA 8 - IDENTIFICAÇÃO DE MEDIÇÕES DE ADCP REALIZADAS NO TRAMO SUL DA HIDROVIÁ DO RIO PARAGUAI.

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VEL. MÉDIA NO CANAL (M/S) | ÁREA MEDIDA (M ²) | VAZÃO MEDIDA (M ³ /S) |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 09/01/2015 | Ladário | 0,69 | 1.767,95 | 1.218 |
| 10/01/2015 | Santana ou Jatobá | 0,65 | 2.101,75 | 1.379 |
| 10/01/2015 | Jusante Ilha do Formigueiro | 0,57 | 2.320,91 | 1.329 |
| 10/01/2015 | Montante Miguel Henrique | 0,63 | 2.100,03 | 1.323 |
| 10/01/2015 | Montante Ilha Tira Catinga | 0,63 | 2.429,72 | 1.531 |
| 10/01/2015 | Meio Ilha Tira Catinga | 0,67 | 1.850,95 | 1.253 |
| 10/01/2015 | KM 1440 | 0,68 | 2.014,03 | 1.373 |

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VEL. MÉDIA NO CANAL (M/S) | ÁREA MEDIDA (M²) | VAZÃO MEDIDA (M³/S) |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------|---------------------|
| 10/01/2015 | Porto da Manga (régua) | 0,62 | 2.186,49 | 1.346 |
| 10/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha da Manga | 0,69 | 1.135,37 | - |
| 10/01/2015 | Braço Direito Ilha da Manga | 0,49 | 1.118,90 | 559 |
| 10/01/2015 | Jusante Ilha da Manga | 0,74 | 1.813,40 | 1.345 |
| 11/01/2015 | Braço Direito Ilha das Laranjeiras | 0,63 | 636,06 | 400 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha das Laranjeiras | 0,57 | 1.599,29 | 923 |
| 11/01/2015 | Estirão do Cambará Ferrado | 0,66 | 2.072,55 | 1.368 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Cambará | 0,74 | 1.346,67 | 995 |
| 11/01/2015 | Montante Ilha Caraguatá | 0,72 | 2.241,94 | 1.616 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Caraguatá | 0,71 | 1.162,85 | 1.162 |
| 11/01/2015 | Jusante Ponte Rodoviária/ | 0,53 | 2.978,51 | 1.586 |
| 11/01/2015 | Ponte Ferroviária Central 2 | 0,55 | 2.813,85 | 1.564 |
| 11/01/2015 | Ponte Ferroviária Central 1 | 0,54 | 2.907,15 | 1.587 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Jacaré | 0,45 | 2.976,47 | 1.349 |
| 11/01/2015 | Porto Gregório Curvo | 0,49 | 3.207,57 | 1.596 |

A Tabela 8 permite verificar que, ao longo de 128 quilômetros de Hidrovia, houve um incremento de cerca de 55% em termos de área de seção transversal, e de aproximadamente 76% em termos de descarga (vazão). Essa dinâmica do regime fluvial possui importantes relações com a erosão, com o transporte de sedimentos, com as características geométricas da seção transversal e com o incremento gradual da vazão na bacia de drenagem – ao longo deste trecho, ocorre a contribuição lateral dos afluentes Paraguai-Mirim, Taquari e Miranda – por exemplo.

No entanto, observou-se também que houve áreas em que o ponto medido a jusante apresentou valores inferiores de vazão a montante. Este fato pode ser explicado devido à dinâmica de transferência de energia canal – planície, por meio da transferência de água para a planície fluvial, formando áreas alagadas e lagos próximos ao canal. Mais a jusante, o rio retorna a estabelecer o seu equilíbrio usual.

4 MÉTODOS

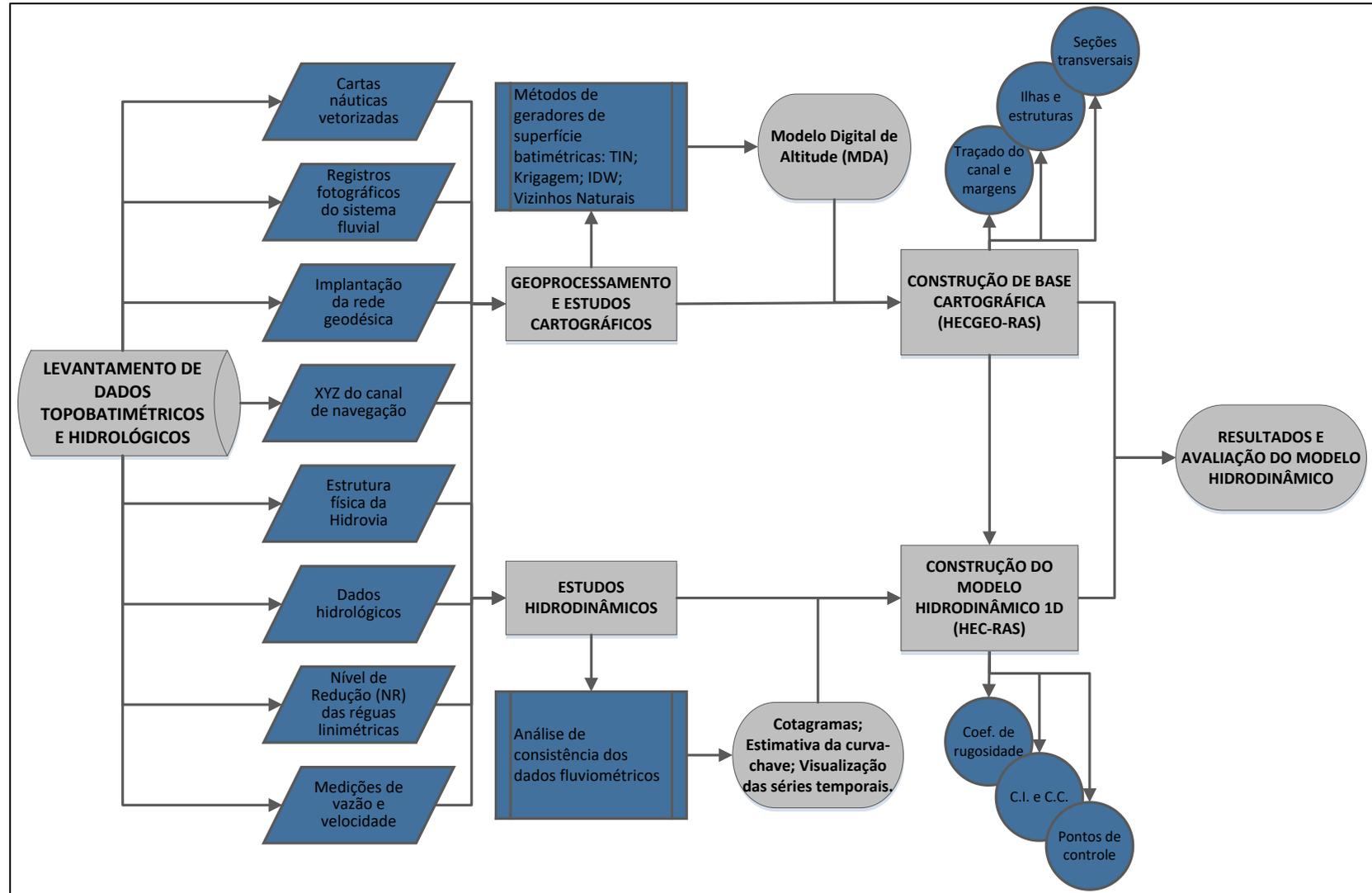
Esta seção apresenta os métodos utilizados ao longo da execução deste trabalho. De acordo com a disponibilidade dos dados, seu desenvolvimento seguiu algumas diretrizes.

A base da pesquisa foi o levantamento dos dados hidrológicos e topobatimétricos, composto pelos itens descritos na seção 3.2. Durante o desenvolvimento dos estudos cartográficos, foi realizado o geoprocessamento das informações coletadas, a construção do Modelo Digital de Altitude (MDA) por meio dos métodos geradores de superfície (interpoladores espaciais), e a construção da base cartográfica para o modelo hidrodinâmico 1D com a utilização da ferramenta HEC-GeoRAS.

Já nos estudos hidrodinâmicos, desenvolveu-se a análise de consistência dos dados fluviométricos, contando com a elaboração dos cotagramas e com a estimativa da curva-chave pelo método de ajuste logarítmico, e conseqüentemente, a construção do modelo hidrodinâmico 1D com o programa HEC-RAS.

A Figura 37 apresenta um fluxograma do direcionamento da pesquisa, detalhados a seguir. Na mesma linha hierárquica consegue-se visualizar a interface entre os estudos cartográficos e os estudos hidrodinâmicos, e a construção da base cartográfica com a construção do próprio modelo.

FIGURA 37 - DIAGRAMA DA METODOLOGIA DA PESQUISA.



4.1 MODELO DIGITAL DE ALTITUDE (MDA)

Durante o processo de geração de superfícies batimétricas foram utilizados limites espaciais para o conjunto de pontos, a fim de garantir a maior precisão durante as técnicas. Para a triangulação, utilizaram-se as denominadas linhas de quebra, com feições como polilinhas e polígonos representando as ilhas e as margens, e mencionadas anteriormente na seção 2.3.4. Para os interpoladores estatísticos, utilizaram-se ferramentas de recorte e extração de informações (*mask*), e um polígono com a delimitação da área.

4.1.1 Análise da qualidade

As técnicas de interpolação utilizadas referem-se aos modelos interpoladores apresentados anteriormente no Capítulo 2. Durante esta fase, foi efetuada a validação cruzada, que consistiu em omitir a posição de uma parcela de pontos amostrais, cerca de 10% do total da amostra (valor utilizado para a análise de qualidade de dados em geoprocessamento) e recalculá-los para esta mesma posição, considerando os pontos interpolados, com o objetivo de verificar a qualidade dos geradores de superfície.

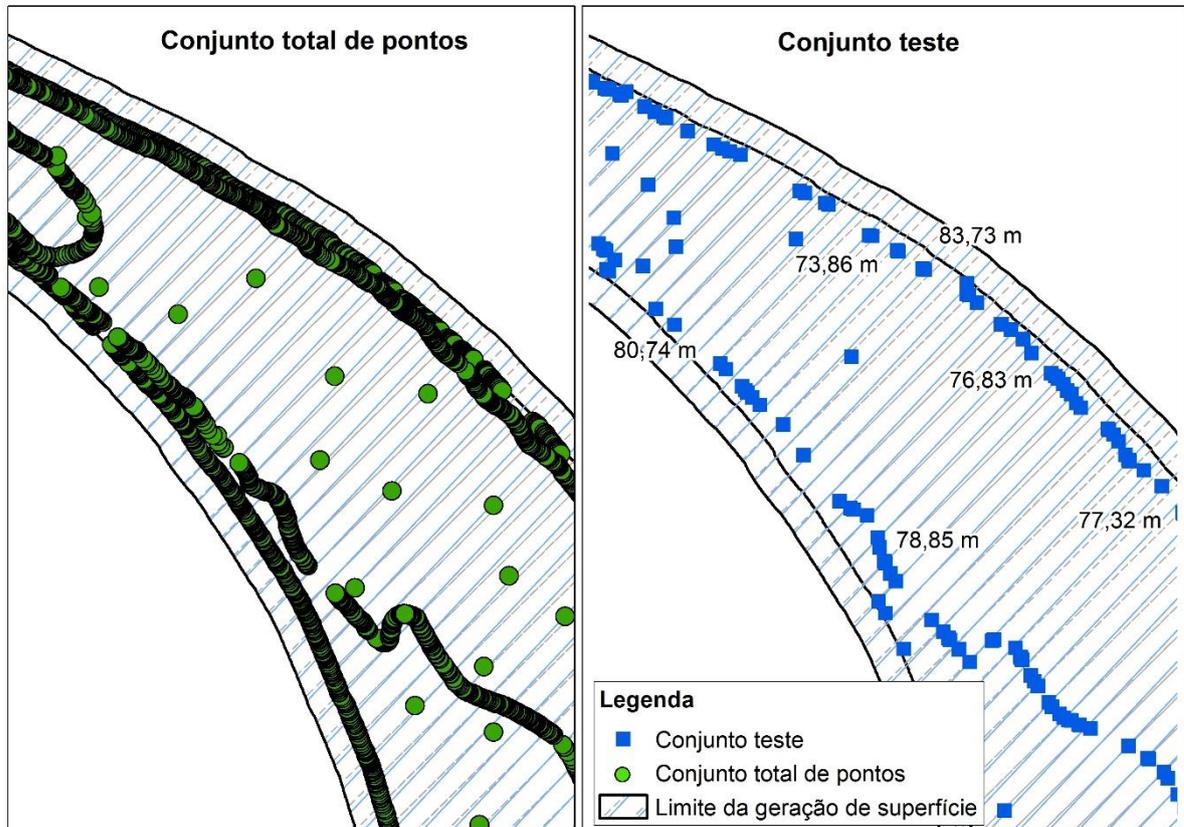
Foram testados diversos conjuntos de dados altimétricos provenientes das cartas de navegação para a análise das técnicas de geração de superfícies. As primeiras tentativas contemplaram a utilização de todos os pontos disponíveis, totalizando 111.721 pontos, com valores de altimetria que variam de 65,0m até 90,0m, distribuídos aleatoriamente por toda área de estudo.

A presença das curvas de nível de 3m e 10m existentes nos dados cartográficos resultaram em valores bastante heterogêneos nos testes dos interpoladores. Uma das possibilidades para esses resultados é que a grande quantidade de pontos presentes nas curvas de nível ocasionou grande influência nos demais pontos da amostra, podendo mascarar os resultados estatísticos.

Sendo assim, foi escolhida uma amostra menor, de um trecho de aproximadamente 7km de extensão composto por 2.228 pontos, onde não houvesse influência das curvas de nível, e mais especificamente, em um trecho com uma disposição mais regular de batimetria, e que contivesse meandros e ilhas. A Figura 38

exemplifica o funcionamento desta relação entre conjunto total de pontos e conjunto teste.

FIGURA 38 - VALIDAÇÃO CRUZADA. EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO.



4.1 MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL

Esta seção apresenta o detalhamento da metodologia utilizada para a modelagem hidrodinâmica 1D deste trabalho.

Faz-se necessária uma representação mais precisa no nível de água para uma condição específica de estiagem, uma vez que o nível d'água inicialmente utilizado foi interpolado linearmente entre as RRNN e as estações fluviométricas.

Considerando a heterogeneidade do sistema fluvial nesta região, com a existência de diversas ilhas, bifurcações de canal, contribuições laterais da bacia hidrográfica e variações batimétricas significativas, além da extensão longitudinal do modelo hidrodinâmico, pode-se dizer que a existência de apenas 3 estações fluviométricas no trecho estudado dificulta a representação espacial por meio de simples interpolações lineares entre cada estação.

Estes problemas de resolução espacial dos dados monitorados são problemas comuns em projetos de hidrovias existentes ou em planejamento, em muitos locais no mundo, onde não existem monitoramentos contínuos de longo período.

A complementação de informações esparsas de nível d'água pode ser realizada através da modelagem matemática. A modelagem hidrodinâmica aplicada neste estudo utiliza abordagens recém estabelecidas nas análises de sistemas fluviais, considerando períodos de estiagem. Vale ressaltar que existe a possibilidade do aprimoramento da modelagem, utilizando uma calibração que inclui, além dos efeitos de rugosidade (representados pelo coeficiente de Manning), as variações longitudinais e transversais, e as contribuições laterais ao regime de escoamento.

4.1.1 HEC-RAS

O modelo escolhido para a realização das simulações foi o HEC-RAS. Trata-se de um software de código autorizado, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE), e que envolve a interação de quatro equações principais, a saber: a equação da continuidade, a equação da energia, a equação da quantidade de movimento e a equação de Manning (USACE, 2010). Para um regime permanente de escoamento, o procedimento de computação do programa baseia-se na solução da equação de energia unidimensional. São avaliadas as perdas de energia por fricção e variações geométricas das seções transversais USACE (2010).

Os níveis de água são obtidos por método iterativo utilizando a equação da energia de Bernoulli, já apresentada no Capítulo 2, por meio da equação da energia (Equação (8) e Equação (9), da seção 2.2.1), e discretizada aqui para duas seções transversais, a montante e a jusante, respectivamente como mostra a Equação (18):

$$y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_L \quad (18)$$

onde y_1 e y_2 são as profundidades da superfície d'água nas seções transversais (m); Z_1 e Z_2 são as altitudes relacionada ao *datum* horizontal (m); α_1 e α_2 são os coeficientes de não uniformidade do perfil da velocidade (adimensional); V_1 e V_2 são

as velocidades médias na seção (m/s); g é a aceleração gravitacional (m/s²); h_L é a declividade da linha de energia, representada pelas perdas por atrito (m/m). O índice 1 indica a seção de montante e o índice 2 indica a seção de jusante (USACE, 2010).

A declividade da linha de energia é calculada entre duas seções transversais, resultante da força de atrito entre o fluido, as paredes do canal e as variações na geometria do canal, sendo definida pela Equação (19):

$$h_L = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (19)$$

onde L é a distância distribuída entre as seções transversais (m), S_f representa as perdas por atrito entre as duas seções transversais (m/m); e C é o coeficiente de expansão ou contração (adimensional).

4.1.2 HEC-GeoRAS

Durante a construção de modelos hidrodinâmicos, a preparação dos dados e a interpretação dos mesmos são tarefas essenciais e onerosas, as quais podem ser simplificadas, quanto ao processamento e a visualização dos dados, se forem desenvolvidas em um ambiente de geoprocessamento.

A extensão HEC-GeoRAS, desenvolvida pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE), foi a ferramenta geotecnológica utilizada para a elaboração da base geométrica para a modelagem do rio Paraguai.

Este conjunto de procedimentos, ferramentas e utilitários permite a criação de um banco de dados geoespaciais contendo todas as informações geométricas que podem ser extraídas do Modelo Digital de Altitude por meio de uma interface gráfica, nesse caso o *ArcGIS Desktop* (USACE, 2009).

Um conjunto de dados é construído em estrutura vetorial, em um sistema de referência geodésico e projeção cartográfica apropriada. Em seguida são acondicionados os dados em banco de dados geográficos (BDG) que descrevem, separadamente, as margens do sistema fluvial, o traçado do canal de navegação e os limites de estruturas que afetam o regime de escoamento.

O modelo hidrodinâmico utiliza os dados espaciais do Banco de Dados Geoespaciais (BDG), em formato licenciado do HEC-RAS, para realizar simulações do escoamento em regime permanente na calha do rio. Para isso é necessária a calibração do modelo com coeficientes de rugosidade entre as seções transversais, o que é feito pela análise de vazões e níveis d'água correspondentes em pontos de controle especificados.

4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS PARA O MODELO HIDRODINÂMICO

4.2.1 Base Cartográfica

Por meio da extensão HEC-GeoRAS e a partir do MDA inserido no ambiente SIG, foi elaborada a base cartográfica para o modelo hidrodinâmico.

A área compreendida no MDA engloba o canal principal do rio na condição do Nível de Redução (NR), representando a condição de estiagem. A importância de se utilizar o NR para a geração do MDA reside no fato de que, nesta condição, temos o escoamento retido na calha principal do rio, excluindo assim a possibilidade de interação com a planície de inundação, o que nos impossibilitaria de efetuar as simulações devido à escassez de dados referentes à planície, além de dificultar as análises de interpolação, uma vez que os dados proveriam de fontes distintas.

Quanto maior a densidade de informações inseridas na base cartográfica, maior será a correspondência com a situação real do sistema fluvial. Para este trabalho, as informações adicionadas no software HEC-GeoRAS foram as seguintes:

- Rio (aproximação do talvegue), afluentes e identificadores;
- Linhas de corte das seções transversais (coordenadas x, y e z que representam cada ponto da seção). O software HEC-RAS transforma estas coordenadas em estações e dados de altitude para articular os cálculos;
- Ilhas, lagoas e estruturas;
- Coeficientes de rugosidade de Manning.

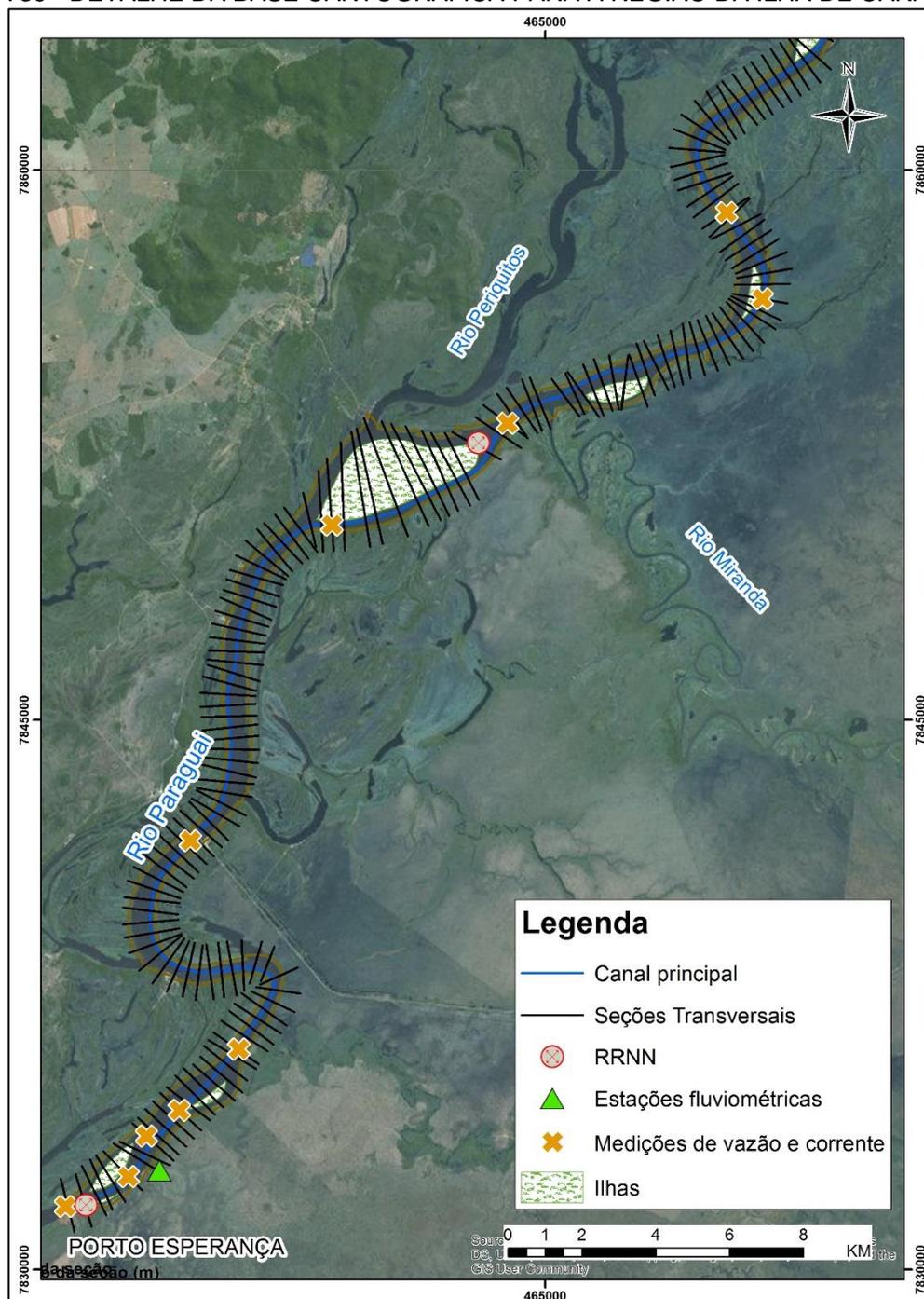
O traçado do talvegue tomou como base o trajeto percorrido durante a expedição de campo em janeiro de 2015, e que percorreu o rio Paraguai por todo o tramo sul da Hidrovia. As margens coincidem com as margens determinadas nas cartas náuticas da Marinha do Brasil, o mesmo ocorrendo com as estruturas presentes ao longo do trecho, como ilhas e lagoas.

As seções transversais representadas pelo HEC-RAS apresentam 1.400 m de largura (em média) e com um espaçamento variado entre 300 e 500 m entre os respectivos perfis, possibilitando uma representação com maior exatidão da característica meândrica do rio Paraguai. A determinação das seções transversais teve como premissa coincidir com os locais de variação das características do escoamento, como a montante e a jusante de ilhas, em trechos nos quais se identificavam as passagens críticas de navegação estabelecidas e homologadas pela Marinha do Brasil, nos locais de implantação das RRNN, nas medições de vazão e velocidade e nas estações fluviométricas, a título de se obterem pontos de controle nas etapas de calibração e de verificação do modelo. Além disso, como apresentado por Merwade *et al.* (2006), onde há uma densa distribuição de seções transversais, o modelo 1D consegue uma melhor aproximação dos valores reais.

Para isso, o HecGeoRAS faz uso de uma ferramenta que, a partir da camada criada para as margens e para o talvegue do rio, o traçado das seções transversais é feito de forma perpendicular a esses valores.

A Figura 39 ilustra as informações responsáveis pela formação da base cartográfica para a região da Ilha Caraguatá (km 1419), um dos trechos da região de estudo.

FIGURA 39 - DETALHE DA BASE CARTOGRÁFICA PARA A REGIÃO DA ILHA DE CARAGUATÁ.



4.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO

As condições de contorno foram necessárias durante a fase de modelagem para estabelecer o nível da superfície da água no contorno do modelo (a montante e a jusante), foram os principais referenciais da calibração e verificação do modelo e

são inseridas na etapa após a exportação do Banco de Dados Geoespaciais (BDG) contendo a base cartográfica elaborada.

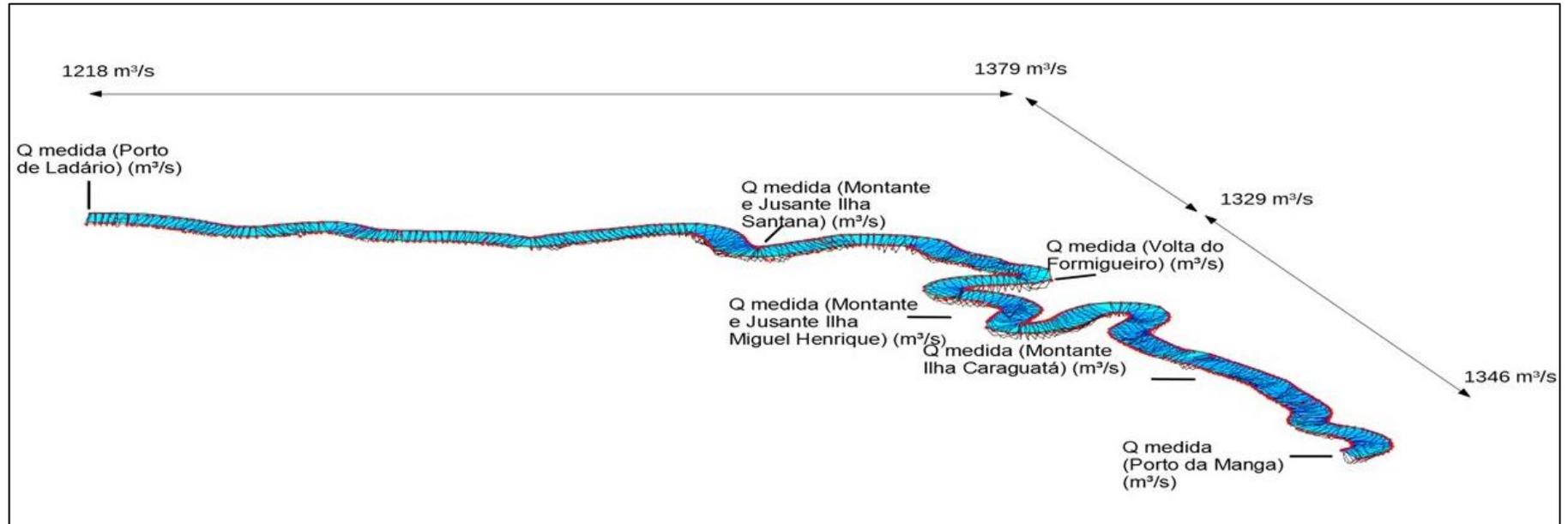
A condição inicial forneceu o valor para que se iniciassem os cálculos hidrodinâmicos (vazão medida a montante). Os valores provenientes das demais medições de vazão, velocidades e áreas nas seções transversais, apresentadas anteriormente na seção 3.2.5 (Tabela 8), assim como as altitudes ortométricas do nível de água obtidas por meio das RRNN implantadas, foram inseridas como pontos de controle e subsidiaram a validação do modelo hidrodinâmico.

Em resumo, as seguintes condições de contorno e pontos de controle foram utilizadas:

- Montante: para a calibração foram utilizadas as vazões de acordo com as medições (ADCP) realizadas ao longo de cada trecho (ver seção 3.2.5). Para a condição de estiagem, foram utilizadas as vazões correspondentes ao Nível de Redução (NR) de cada uma das estações fluviométricas;
- Jusante: altitude ortométrica do nível d'água das RRNN (medido para a calibração e altitude ortométrica do nível d'água no NR para a condição de estiagem).

A distribuição de vazões foi aplicada da seguinte forma: a vazão inicial resultante das medições de ADCP foi inserida a montante do trecho (km 1515), com a sua variação inserida longitudinalmente nos momentos em que houve variação de aproximadamente 20% nas vazões medidas, ou no caso da existência de contribuições laterais (tributários), como mostra a Figura 40 para o trecho entre Ladário (km 1515) (início da região de estudo) até a localidade de Porto da Manga (km 1443).

FIGURA 40 - EXEMPLO DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO PARA UM TRECHO DA REGIÃO DE ESTUDO – DE PORTO DE LADÁRIO A PORTO DA MANGA.



O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é a peça-chave na calibração sistemática, sendo altamente variável e dependente de diversos fatores, como: rugosidade da superfície do leito, presença de vegetação, irregularidades no canal, alinhamento do canal, erosão e deposição de sedimentos, obstruções, tamanho e forma do canal, perfis e vazões, temperatura e material sólido em suspensão (CHOW, 1959).

A distribuição dos coeficientes de rugosidade de Manning foi efetuada de forma longitudinal entre margens e canal. Os coeficientes-base estavam de acordo com a Tabela 9, que apresenta os coeficientes de rugosidade para canais naturais e planícies de inundação expostos por Chow (1959). Para cada uma das seções transversais inseridas no modelo (ver Figura 38) atribuiu-se um dos valores de rugosidade da Tabela 9.

Além disso, os registros fotográficos dos levantamentos de campo auxiliaram na determinação dos coeficientes de rugosidade das seções transversais, principalmente nas seções coincidentes com as medições de vazão e corrente, como mostra a Figura 41.

FIGURA 41 - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS MARGENS DO RIO PARAGUAI. AUXÍLIO NA CALIBRAÇÃO.



TABELA 9 - VALORES DE COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING PARA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO E CANAL.

| CANAIS NATURAIS – CANAL PRINCIPAL | MÍNIMO | NORMAL | MÁXIMO |
|---|--------|--------|--------|
| Limpo, reto, sem depressões e vegetação | 0,025 | 0,03 | 0,033 |
| Limpo, reto, sem depressões, com algumas pedras e vegetação | 0,03 | 0,035 | 0,04 |
| Limpo, com meandros, e algumas depressões | 0,033 | 0,04 | 0,045 |
| Limpo, com meandros e algumas depressões, pedras e vegetação | 0,035 | 0,045 | 0,05 |
| Limpo, com meandros e algumas depressões, áreas não inundáveis | 0,04 | 0,048 | 0,055 |
| Limpo, com meandros e algumas depressões, áreas não inundáveis e alguns obstáculos como pedras e vegetação. | 0,045 | 0,05 | 0,06 |
| Escoamento lento, com bastante vegetação | 0,05 | 0,07 | 0,08 |
| Escoamento lento, com bastante vegetação, lagoas e depressões e áreas alagadas | 0,07 | 0,1 | 0,15 |
| CANAIS NATURAIS - PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO | MÍNIMO | NORMAL | MÁXIMO |
| Gramma curta | 0,025 | 0,03 | 0,035 |
| Gramma alta | 0,03 | 0,035 | 0,05 |
| Áreas cultivadas | | | |
| Sem plantio | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| Plantio em fileiras (novo) | 0,025 | 0,035 | 0,045 |
| Plantio em fileiras (“maduro”) | 0,03 | 0,04 | 0,05 |

Fonte: Adaptado de Chow, 1959.

As seções transversais geradas com o auxílio do MDA e que foram utilizadas para a construção do modelo hidrodinâmico possuíam a altimetria das margens do rio no Nível de Redução (NR). Tal característica foi atribuída durante a transformação de profundidades das cartas de navegação em valores de altimetria (seção 3.2.3), uma vez que, afim de minimizar os erros de estimativa, era necessário o estabelecimento de um nível oficial entre as réguas linimétricas, escolhido como o NR estipulado pela Marinha do Brasil.

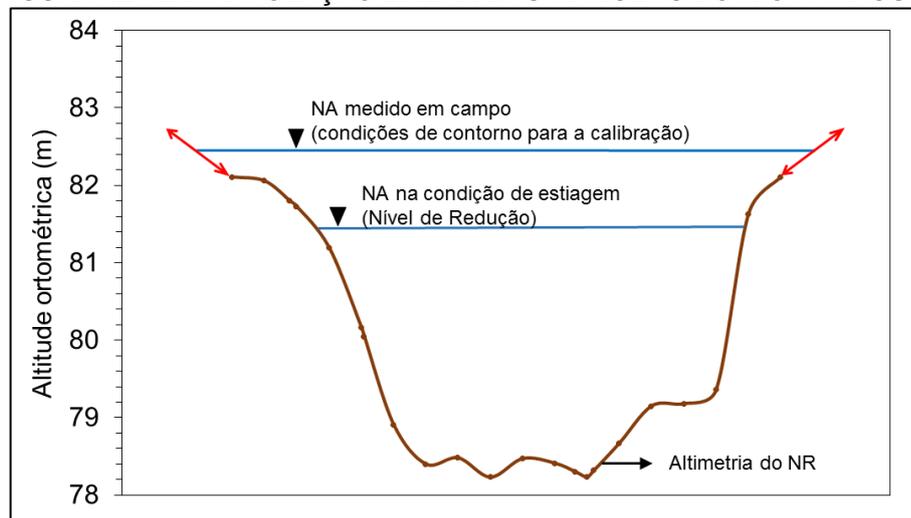
Porém, as condições iniciais e de contorno utilizadas no modelo não necessariamente correspondem às condições do NR, e quando iniciou-se o processo de calibração, notou-se o extravasamento de água pela seção transversal. O controle padrão que o HEC-RAS desempenha nesses casos é atribuir “paredes verticais” nos locais onde ocorreu o extravasamento, o que dificultaria a determinação da rugosidade nas seções transversais.

Com o intuito de adequar a seção transversal, baseado nos valores de altimetria medida, e também considerando o conhecimento da área de estudo, foram gerados pontos de *offset* das margens das cartas náuticas, com 25m de largura para cada margem e incremento de altimetria de 1m, para que fosse possível realizar as simulações.

Tais atribuições são passíveis de execução pois, verificou-se que ao longo do rio Paraguai as margens ultrapassam o limite do canal definido pelas cartas náuticas, ou seja, o canal é maior do que o representado nas cartas náuticas e as margens podem muitas vezes estar encobertas por água sobre a vegetação. Em termos hidráulicos, isso significa um acréscimo na magnitude do coeficiente de rugosidade para a calibração nestas regiões. Essa informação pode ser verificada nos registros fotográficos (ver Figura 41).

Como a altimetria do rio foi determinada levando em consideração a declividade (NR para cada régua), esta distribuição foi proporcional, não interferindo no conjunto de altimetrias como um todo. A Figura 42 ilustra o perfil de uma seção transversal com a extrapolação das margens.

FIGURA 42 - EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DAS MARGENS DO RIO PARAGUAI.



Inseridas as condições iniciais e de contorno, os pontos de controle levantados em campo e os coeficientes de rugosidade de Manning ao longo do trecho estudado, obteve-se um valor de nível de água, velocidade média, valor atribuído a linha de energia, número de *Froude*, área do escoamento, dentre outros parâmetros de saída associados a cada seção transversal.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho. A divisão deste Capítulo está em conformidade com os objetivos apresentados na seção 1.2, do Capítulo 1.

5.1 GERAÇÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE (MDA)

Um dos objetivos deste trabalho foi avaliar a influência das técnicas de interpolação e de geração de superfícies para a elaboração do MDA no modelo hidrodinâmico 1D a partir dos dados batimétricos secundários das cartas de navegação. Nesta seção serão avaliados os resultados para as superfícies geradas.

A amostra escolhida para as análises das técnicas de geração de superfícies foi selecionada de modo que não houvesse intervenção das curvas de níveis já presentes nos dados altimétricos das cartas de navegação, porém que contivesse as principais características físicas do trecho em estudo. Os resultados desta etapa foram subsidiados por inspeção visual do MDA e análise estatística, e estão discutidos a seguir.

– Rede Triangular Irregular (TIN)

Neste modelo, a ferramenta de geração de superfície foi o *3D Analyst*. Os arquivos de pontos cotados foram inseridos como *mass points*, as margens e as curvas de nível existentes foram inseridas na forma de linhas de quebra, a fim de representar mais fielmente a morfologia do terreno. A triangulação de Delaunay, utilizada neste modelo, intensificou as linhas de quebra previamente inseridas, aumentando a qualidade do resultado.

A amplitude máxima entre a altimetria original do conjunto teste e a altimetria resultante da geração da superfície foi de 3,40m para os pontos alocados de forma mais esparsa, e por inspeção visual, nota-se a baixa capacidade do TIN na suavização das linhas do terreno.

– Inverso da Distância Ponderada – Inverse Distance Weighting (IDW)

Nesta técnica de interpolação, a ferramenta utilizada também foi o *3D Analyst*. Os arquivos de pontos cotados foram os dados de entrada para a interpolação. As margens e a ilhas, no formato de polilinhas e polígonos delimitaram os contornos da interpolação, restringindo a operação a estes locais. A magnitude do pixel (célula) foi definida como a metade da distância média entre os pontos esparsos de batimetria, sendo de aproximadamente 25m. A potência escolhida foi a de ordem 2, e o raio de busca se restringiu a no máximo 12 pontos e uma distância máxima de 12m, afim de tornar mais evidentes os efeitos locais de interpolação.

A amplitude máxima entre a altimetria original do conjunto teste e a altimetria resultante da geração da superfície foi de 1,48m para os pontos alocados de forma mais esparsa. Por meio de inspeção visual, o MDA resultante com essa técnica permite uma melhor visualização para o canal de navegação, principalmente nas regiões de meandro.

– Krigagem - *Kriging*

Assim como para o interpolador IDW, para a Krigagem (ordinária) foi definido a magnitude do pixel (célula) com 25m, restringindo o raio de busca para no máximo 12 pontos e uma distância máxima de 12m, com o mesmo objetivo de fornecer maior evidência para os efeitos locais de interpolação.

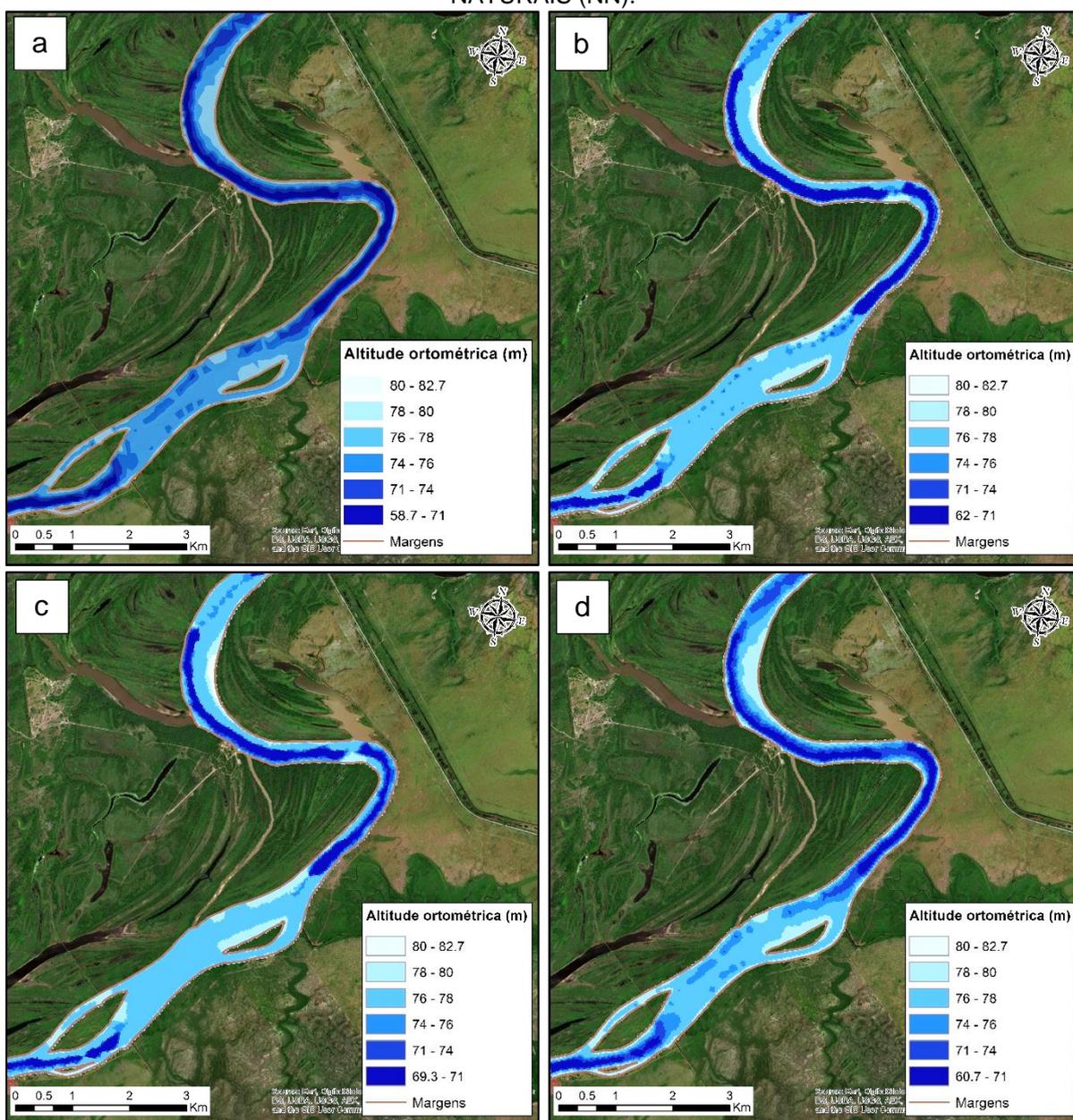
A amplitude máxima entre a altimetria original do conjunto teste e a altimetria resultante da geração da superfície foi de 1,28m para os pontos alocados de forma mais esparsa. Por inspeção visual, a superfície gerada pela Krigagem gerou uma forma de relevo mais uniforme e suave que as anteriores avaliadas.

– Vizinhos Naturais – Natural Neighbors (NN)

A ferramenta utilizada para essa superfície foi o *3D Analyst*. O único parâmetro de entrada é a magnitude da célula (pixel) de saída, estabelecido como 25m.

A amplitude máxima entre a altimetria original do conjunto teste e a altimetria resultante da geração da superfície foi de 1,38m para os pontos alocados de forma mais esparsa.

FIGURA 43 - MDA COM GERADORES DE SUPERFÍCIE. A) REDE TRIANGULAR IRREGULAR. B) INVERSO DA DISTÂNCIA PONDERADA (IDW); C) KRIGAGEM ORDINÁRIA; D) VIZINHOS NATURAIS (NN).



5.1.1 Controle de qualidade dos diferentes produtos cartográficos

A partir das observações apresentadas na seção anterior, foi possível realizar uma análise preliminar baseada em inspeção visual. Essa análise possibilitou a identificação de alguns fatores, como: escassez ou excesso de dados em uma determinada região; a distribuição desses dados ao longo da extensão do rio; a identificação do possível canal de navegação em alguns trechos; o processo de sedimentação e de formação de meandros, a exemplo da erosão na margem côncava e a deposição de sedimentos na margem convexa (ver Figura 43).

Após essa análise preliminar, foram obtidas algumas estatísticas da amostra, apresentadas na Tabela 10, em valores absolutos.

TABELA 10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS INTERPOLADORES ESPACIAIS PARA O TRECHO MODELADO.

| MÉTODO | PARÂMETROS PARA RMSE | ESTATÍSTICAS DO RMSE | | | |
|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| | | ERRO MÍNIMO (M) | ERRO MÁXIMO (M) | ERRO MÉDIO (M) | DESVIO PADRÃO (M) |
| TIN | - | 0,00 | 3,41 | 0,23 | 0,45 |
| IDW | *n= 228 *p=2 | 0,00 | 1,47 | 0,17 | 0,18 |
| Krigagem ordinária | n= 228 *r=12 | 0,00 | 1,28 | 0,22 | 0,22 |
| Vizinhos Naturais (NN) | - | 0,00 | 1,38 | 0,25 | 0,23 |

n= número de pontos da amostra; p = potência do interpolador r = raio de busca

Os quantitativos apresentados pelo erro mínimo inferem que, pelo menos em algum ponto, os valores amostrados coincidiram com os valores observados, representando bons resultados para todos os geradores de superfície, considerando a escala de trabalho. O erro máximo encontrado foi para a técnica de triangulação, enquanto que o erro mínimo estabeleceu-se ao interpolador Krigagem.

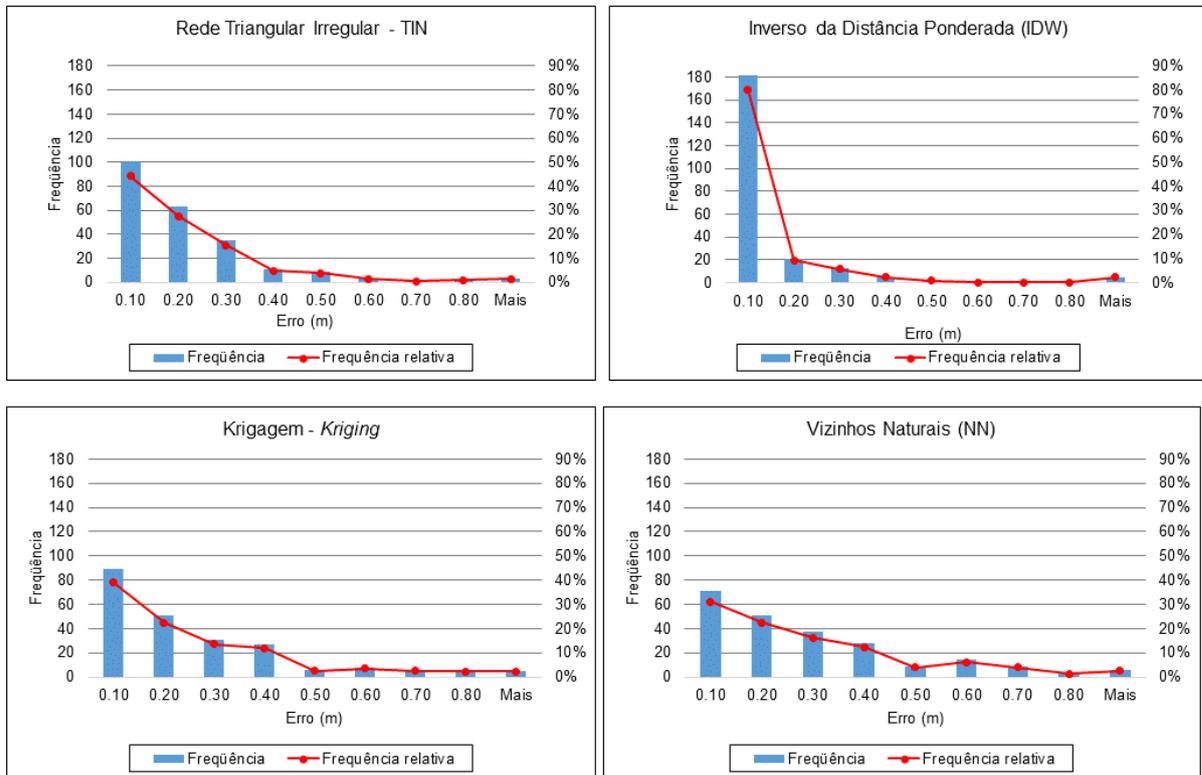
O desvio padrão do erro é um dos componentes estatísticos mais utilizados para a avaliação de interpoladores. Para esta amostra, o interpolador IDW, seguido do interpolador Krigagem, foram os que apresentaram os menores valores de desvio padrão, bem como de erro médio. Sendo assim, podem ser configurados como os que apresentarão melhores superfícies batimétricas.

Além disso, a importância dessa análise reside no fato de que, em se tratando de superfícies batimétricas utilizadas para entradas em modelos hidrodinâmicos, é preferível que a distribuição dos erros apresente um menor desvio padrão e

magnitudes mais baixas possíveis. Na etapa da modelagem, quando há uma variação suave na declividade do relevo, os resultados de níveis de água e de velocidades apresentados pelo modelo são justificáveis se avaliados dentro de uma escala de trabalho adequada, ao passo que quando aparecem variações bruscas, os resultados podem ficar comprometidos.

Segundo Ferreira (2014), a interpretação da forma dos histogramas em linhas contínuas é uma etapa indispensável e importante para o entendimento de como se comporta a distribuição de uma variável em um conjunto de unidades geográficas. Sendo assim, apresentam-se na Figura 44 os histogramas de erro da variável altimetria para os geradores de superfície avaliados neste estudo.

FIGURA 44 - HISTOGRAMA DO ERRO PARA OS MODELOS GERADORES DE SUPERFÍCIE.



De acordo com os histogramas apresentados, o interpolador IDW resultou em valores com o menor erro, sendo que cerca de 80% dos dados concentraram seus valores de erro na faixa entre 0,00m – 0,10m. O interpolador Krigagem também concentrou a maior parte de seus erros nesta mesma faixa, porém em menor frequência, cerca de 57%.

As superfícies geradas pela Triangulação e pelo interpolador Vizinhos Naturais (NN) apresentaram uma maior propagação do erro, apesar de que todos concentraram maior representação na faixa de 0,00m – 0,10m.

Após a análise do MDA, foram testadas as suas variações no modelo hidrodinâmico, e os seus resultados serão apresentados. Todas as superfícies originaram gráficos e tabelas de distribuição de coeficientes de rugosidade, lâmina d'água e velocidades. Em termos de geometria, o modelo hidrodinâmico gerado com MDA da interpolação IDW mostrou estar mais próximo dos valores medidos em campo, seguido do modelo gerado com MDA proveniente da interpolação Krigagem.

Em virtude da grande quantidade de resultados gerados, apresentaremos os gráficos e tabelas referentes a apenas uma das superfícies batimétricas utilizadas, aquela gerada por meio do interpolador IDW.

5.2 AVALIAÇÃO DO RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D

O modelo hidrodinâmico foi avaliado para uma condição mínima de nível de água, representada por meio dos Níveis de Redução (NR's) da régua linimétrica, e os resultados serão descritos nesta seção.

A elaboração do modelo consiste em uma etapa de calibração e uma etapa de simulação, com valores de vazão e de nível de água associados às estações fluviométricas e às medições de campo, a saber:

- Calibração: Nesta etapa foram consideradas as medições de vazão e de corrente efetuadas em campo (ver seção 3.2.5), bem como as altitudes ortométricas da lâmina d'água obtidas por nivelamento geométrico das quatro RRNN implantadas no trecho (ver seção 3.2.1);
- Simulação: Nesta etapa foram consideradas as vazões associadas aos Níveis de Redução (NR's) da Marinha do Brasil para cada uma das estações fluviométricas, bem como a redução das altitudes ortométricas da lâmina d'água das RRNN implantadas para cada régua linimétrica.

5.2.1 Verificações hidrodinâmicas – Etapa de calibração

As condições de contorno e os pontos de controle utilizados estão apresentados na Tabela 11, onde a altimetria da RN 4 corresponde à condição de contorno de jusante, ao passo que o valor de vazão medida em Ladário (1.218 m³/s) é condição inicial estabelecida a montante do trecho. Os demais valores correspondem aos pontos de controle utilizados para estimar os coeficientes de rugosidade de Manning, respeitando as condições de inserção de vazão apresentadas na seção 4.3).

TABELA 11 - CONDIÇÕES DE CONTOURNO E PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.

| NÍVEL DA ÁGUA | |
|------------------------|---|
| LOCAL DA RN IMPLANTADA | ALTITUDE ORTOMÉTRICA DO NÍVEL DA ÁGUA (M) |
| RN 1 | 84,91 |
| RN 2 | 83,53 |
| RN 3 | 82,40 |
| RN 4 | 81,58 |
| VAZÃO | |
| LOCAL DA MEDIÇÃO | VAZÃO MEDIDA (M ³ /S) |
| Ladário | 1.218 |
| Porto da Manga | 1.346 |
| Porto Esperança | 1.596 |

Como mencionado anteriormente (seção 4.3), o coeficiente de rugosidade de Manning é uma das peças-chave na calibração de um modelo hidrodinâmico. Ao longo do trecho de estudo foi efetuada a distribuição longitudinal entre as seções transversais, com valores distintos para canal e margens. Ao longo da campanha de campo, foram efetuados registros fotográficos dos locais das medições de vazão e velocidade (ver Figura 41), os quais permitiram uma maior sensibilidade na estimativa desses coeficientes. A Figura 45 apresenta a distribuição longitudinal dos coeficientes de rugosidade de Manning adotados para a calibração da área de estudo (o eixo das abscissas é contabilizado por meio da quilometragem da Hidrovia do rio Paraguai).

A determinação do perfil instantâneo longitudinal da lâmina d'água também foi um dos resultados possíveis, e em consequência pôde-se determinar a declividade média do rio para este trecho nesta condição hidrológica, atingindo uma magnitude de 2,32m/km. A Figura 46 ilustra o perfil longitudinal da lâmina d'água para a calibração do modelo hidrodinâmico.

FIGURA 45 - COEFICIENTES DE RUGOSIDADE N DE MANNING PARA O TRECHO MODELADO.

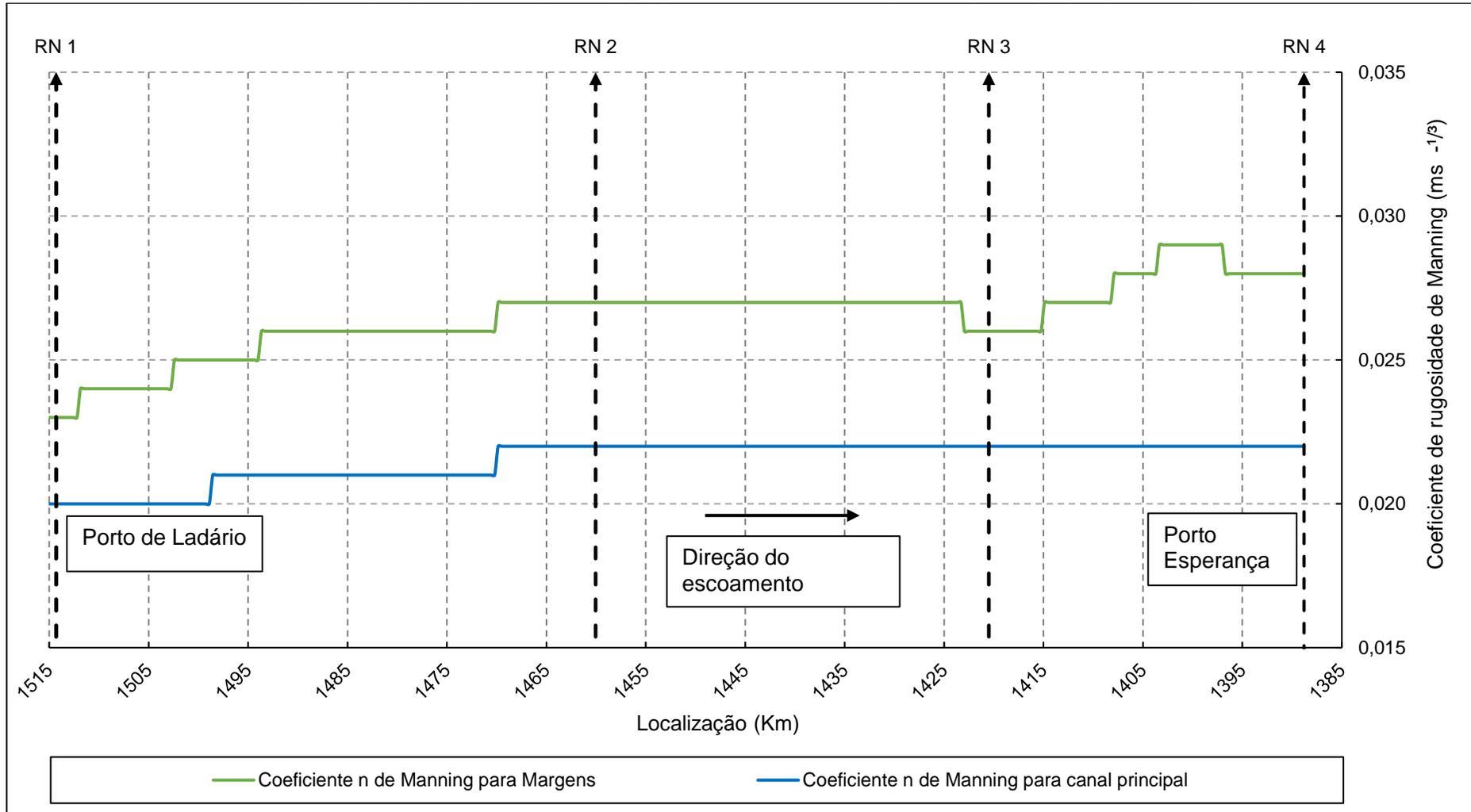
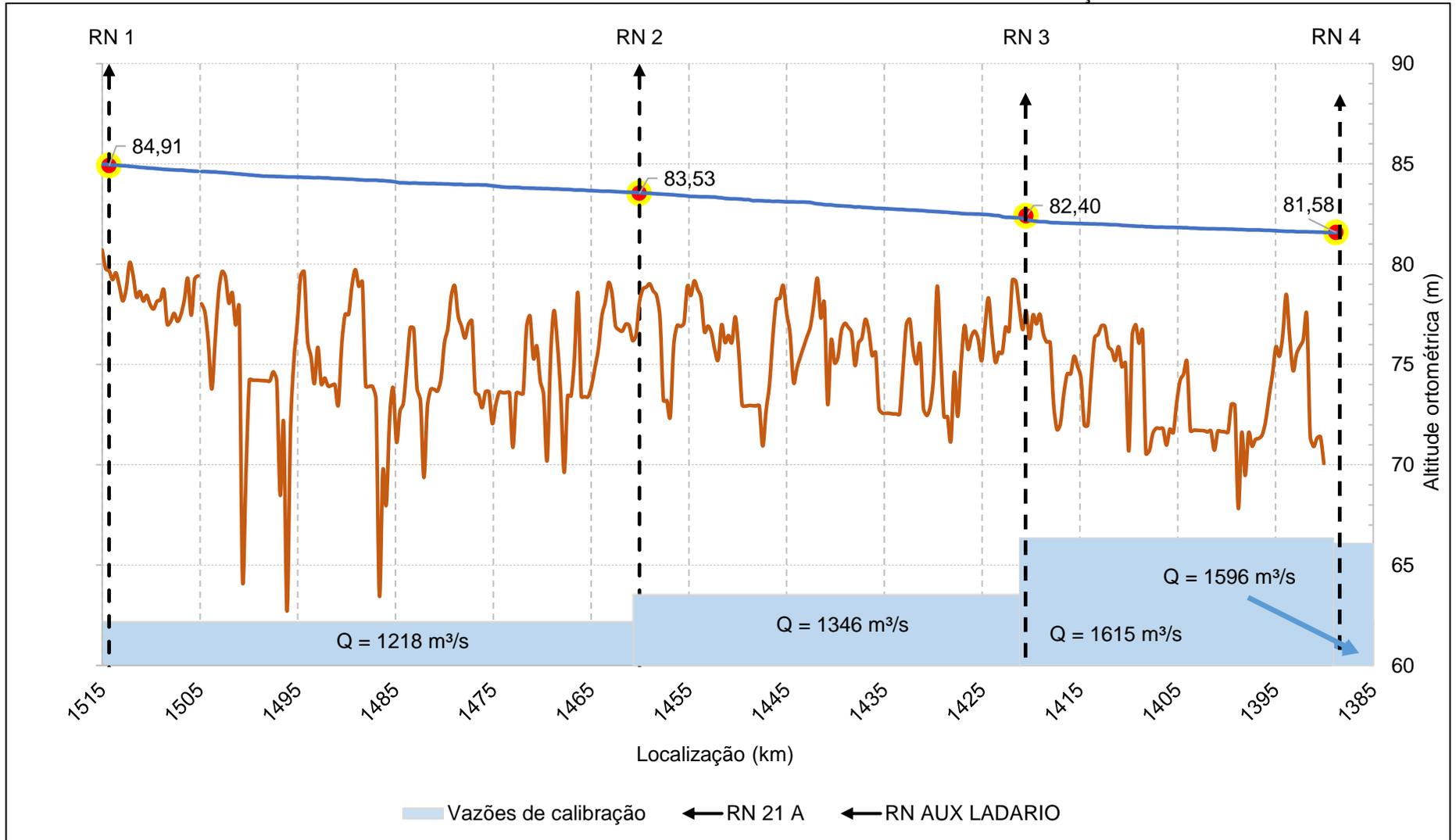


FIGURA 46 - PERFIL LONGITUDINAL DA LÂMINA D'ÁGUA DURANTE A ETAPA DE CALIBRAÇÃO DO MODELO.



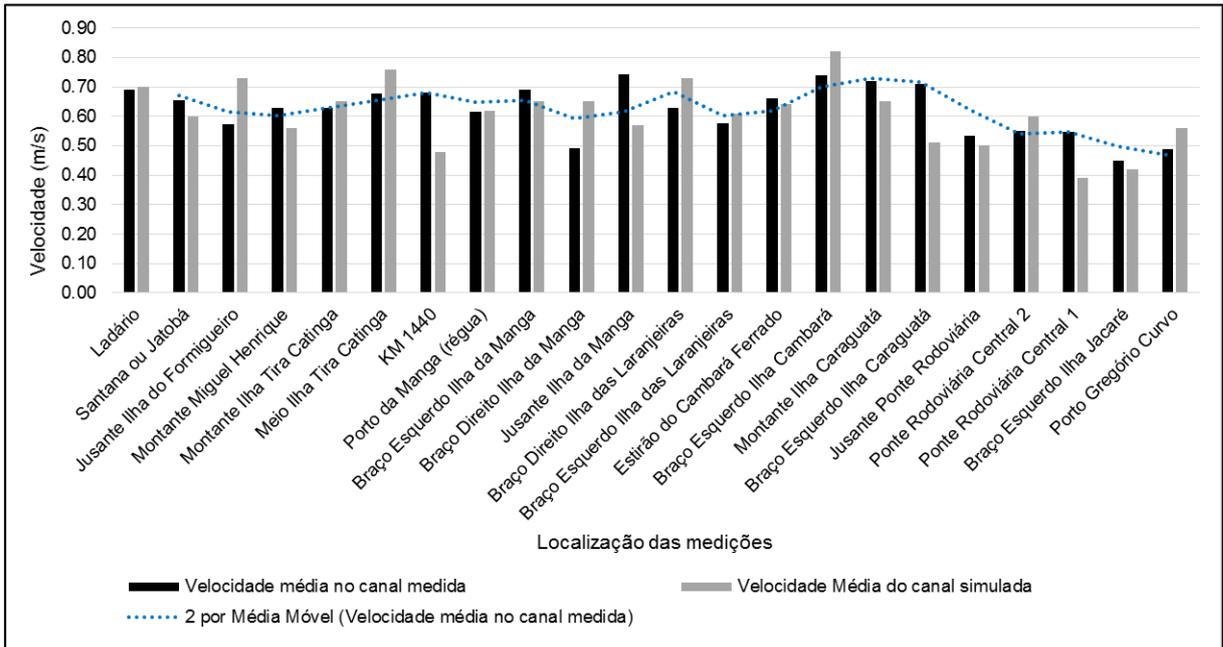
Um dos valores de saída do modelo, e também um referencial para a calibração, são as velocidades médias e as áreas nas seções transversais. Naquelas seções que coincidiram geograficamente com as medições de ADCP, pôde-se efetuar um comparativo entre as velocidades e áreas observadas e as velocidades e áreas calibradas (Tabela 12). Alguns locais apresentaram maiores variações bruscas nos níveis d'água, normalmente coincidindo com a bifurcação do canal ou na passagem do escoamento por obstáculos como ilhas e diques. A Figura 47 apresenta essa condição.

TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES CALBRADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM LEVANTAMENTOS DE CAMPO.

| NOME DA SEÇÃO | ¹ (V _M) (M/S) | ² (V _C) (M/S) | (V _M - V _C) (M/S) | ³ (A _C) (M ²) | ⁴ (A _M) (M ²) | (A _C /A _M) |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|-----------------------------------|
| Ladário | 0,69 | 0,70 | 0,01 | 1.734,83 | 1767,95 | 0,98 |
| Santana ou Jatobá | 0,66 | 0,59 | 0,07 | 2.067,45 | 2.101,75 | 0,98 |
| Jusante Ilha do Formigueiro | 0,57 | 0,53 | 0,04 | 2.284,24 | 2.320,91 | 0,98 |
| Montante Miguel Henrique | 0,63 | 0,59 | 0,04 | 2.065,86 | 2.100,03 | 0,98 |
| Montante Ilha Tira Catinga | 0,63 | 0,59 | 0,04 | 2.390,76 | 2.429,72 | 0,98 |
| Meio Ilha Tira Catinga | 0,68 | 0,75 | 0,07 | 1.619,38 | 1.850,95 | 0,87 |
| KM 1440 | 0,68 | 0,62 | 0,06 | 1.979,49 | 2.014,03 | 0,98 |
| Porto da Manga (régua) | 0,62 | 0,65 | 0,03 | 1.875,75 | 2.186,49 | 0,86 |
| Jusante Ilha da Manga | 0,74 | 0,73 | 0,01 | 1.674,08 | 1.813,40 | 0,92 |
| Estirão do Cambará Ferrado | 0,66 | 0,59 | 0,07 | 2.050,33 | 2.072,55 | 0,99 |
| Montante Ilha Caraguatá | 0,72 | 0,65 | 0,07 | 2.230,01 | 2.241,94 | 0,99 |
| Jusante Ponte Rodoviária | 0,53 | 0,50 | 0,03 | 2.423,89 | 2.978,51 | 0,81 |
| Ponte Ferroviária Central 2 | 0,56 | 0,56 | 0,00 | 2.161,45 | 2.813,85 | 0,77 |
| Ponte Ferroviária Central 1 | 0,55 | 0,42 | 0,13 | 2.879,54 | 2.907,15 | 0,99 |
| Porto Gregório Curvo | 0,49 | 0,48 | 0,01 | 2.548,02 | 3.207,57 | 0,79 |

¹ Velocidade média no canal medida; ² Velocidade média no canal calibrada; ³ Área calibrada; ⁴ Área medida.

FIGURA 47 - VELOCIDADES CALIBRADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM CAMPO.



As maiores diferenças podem ser atribuídas à diferença do local específico da medição de velocidade em campo e da velocidade calibrada pelo modelo. A primeira sempre ocorria em apenas um dos braços das ilhas, ao passo que no modelo, têm-se a seção transversal inteira, de margem a margem. Para assegurar a minimização destes erros, durante a calibração obstruía-se a parte do canal onde não havia medições de vazão e de corrente, analisando a coerência das velocidades. Após calibrada a seção, retirava-se a obstrução e seguia-se com a simulação.

5.2.2 Verificações hidrodinâmicas – Etapa de simulação

Esta etapa do trabalho consiste em avaliar as simulações efetuadas para a condição hidrológica condizente com os níveis de água considerados críticos no rio Paraguai.

Além disso, essa etapa implica em avaliar as condições hidrológicas do rio que podem apresentar obstáculos à navegação, identificar por meio da magnitude dos níveis d'água os locais e as causas que configuram estes obstáculos, e simultaneamente, avaliar a capacidade do modelo hidrodinâmico 1D em representar tais características nestas circunstâncias.

Para tal, utilizaram-se como níveis críticos os Níveis de Redução (NR's) das réguas limimétricas da área de estudo (Tabela 6), disponibilizados pela Marinha do

Brasil, e que condizem com os padrões buscados neste trabalho. Esses valores foram associados à vazão correspondente na curva-chave de cada estação fluviométrica, estimada previamente na seção 3.2.4. A Figura 48 e a Tabela 13 apresentam essa correlação para as três estações fluviométricas.

FIGURA 48 - VAZÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE LADÁRIO, PORTO DA MANGA E PORTO ESPERANÇA PARA O CENÁRIO DE ESTIAGEM (NÍVEL DE REDUÇÃO).

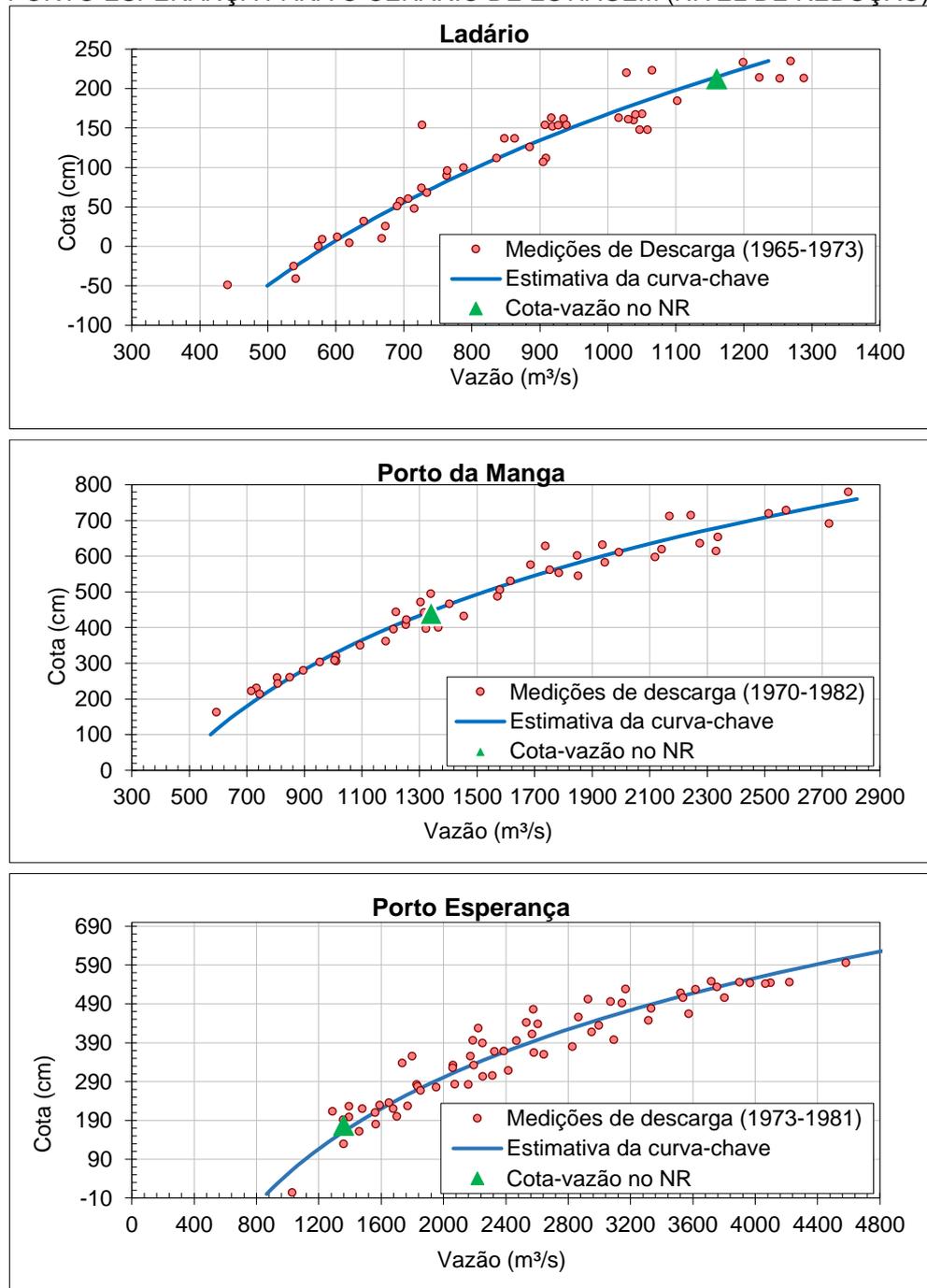
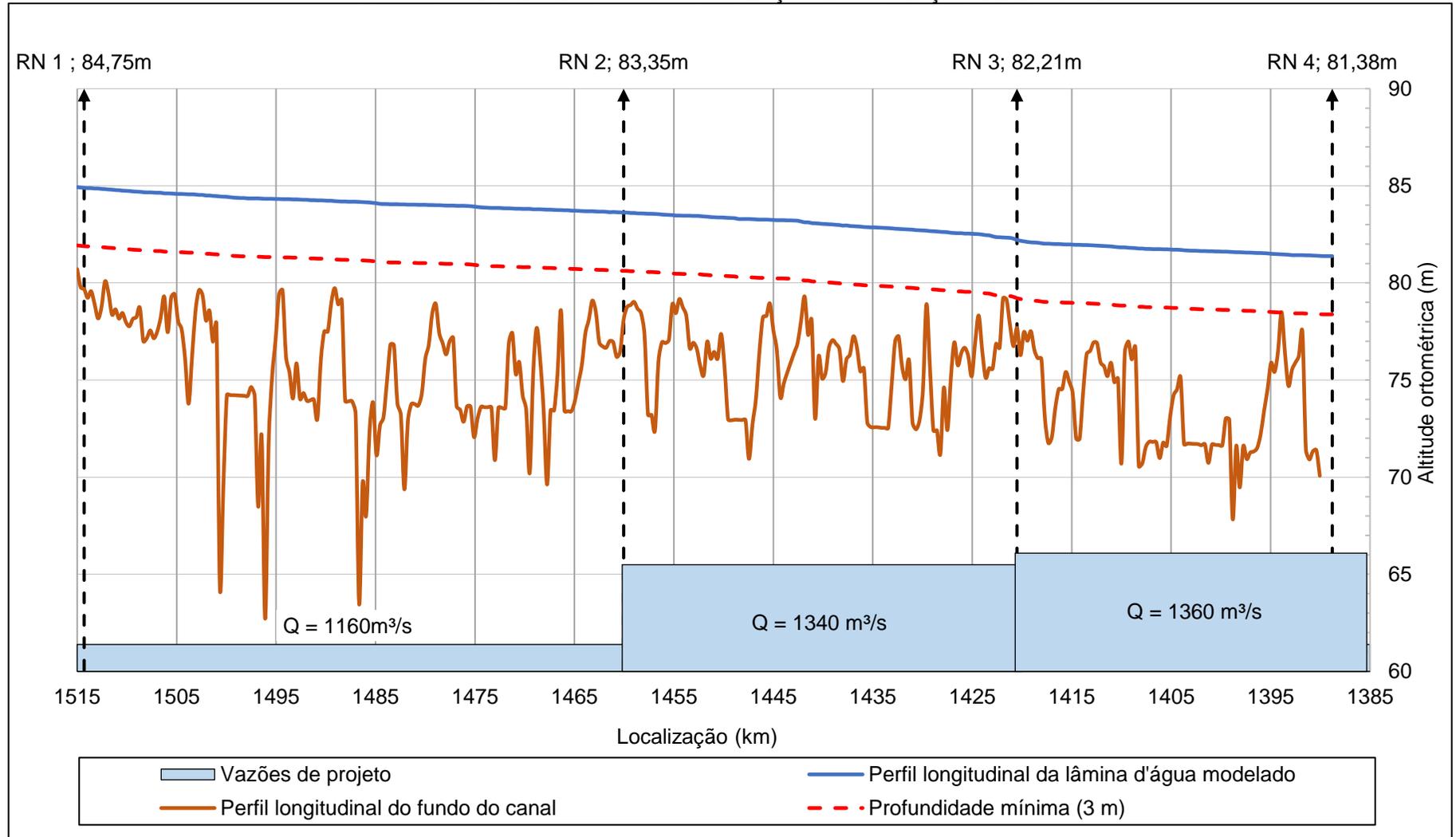


TABELA 13 - INFORMAÇÕES RELEVANTES PARA A SIMULAÇÃO DE ESTIAGEM.

| ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA/CÓDIGO | Q NR (M ³ /S) | NÍVEL DE REDUÇÃO (NR) (M) |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Ladário (Base naval) | 1.160 | 2,02 |
| Porto da Manga | 1.340 | 4,41 |
| Porto Esperança | 1.360 | 1,77 |

A estimativa dos níveis é um dos resultados mais importantes deste trabalho. Por meio dos valores apresentados na Tabela 13, inseridos como condições iniciais e de contorno no modelo hidrodinâmico, obtém-se o perfil longitudinal da lâmina d'água para esta condição hidrológica, como pode ser observado na Figura 49.

FIGURA 49 - RESULTADOS PARA A SIMULAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ESTIAGEM.



Em azul, tem-se o perfil longitudinal da lâmina d'água modelada para a condição de estiagem. O traçado em vermelho representa a profundidade mínima aceitável para a navegação (3,00m abaixo da lâmina d'água modelada).

O fundo do canal extraído do MDA está representado em marrom e intercepta a linha de profundidade mínima em dois locais. Os locais de intersecção correspondem às passagens críticas de navegação: Passo Caraguatá e Passo do Jacaré (Tabela 3), comprovando assim a possibilidade de um modelo hidrodinâmico 1D em identificar locais com restrições de profundidade em um trecho de um rio de meandro.

Outro resultado interessante que pode ser analisado a partir da Figura 49 é a suscetibilidade do modelo em relação a uma representação contínua dos níveis de água.

5.2.3 Comparações das medições de ADCP para diferentes geradores de superfície

Os resultados apresentados nesta seção referem-se à avaliação do modelo hidrodinâmico em termos de adequação e análise geométrica da seção transversal. Para tal, foi escolhida uma seção transversal de uma medição de ADCP para comparação da mesma com as seções geradas pelo modelo hidrodinâmico.

A seção escolhida foi a situada na ilha de Santana/Jatobá, no km 1.490 da hidrovia e a 25km a jusante da cidade de Ladário-MS.

As informações desta seção foram extraídas do software *River Surveyor Live*, ajustadas por meio de distâncias euclidianas e projetadas no plano cartesiano. Isso se fez necessário porque se tratam de medições de campo, e sendo assim, a seção pode apresentar algumas flutuações em suas coordenadas espaciais. Com os dados de profundidade e da Distância Retilínea Real (DMG) extraídos do software *River Surveyor Live*, foi gerado o gráfico batimétrico da seção. A construção do gráfico de batimetria se deu plotando a altimetria em função do DMG (*Distance Made Good*), ou seja, a distância definida pelo usuário do local do final da medição à margem do rio.

Deve-se ponderar que essa seção não leva em consideração a medida de margem a margem do canal, devido às baixas profundidades nas proximidades das margens do rio Paraguai. Como mencionado na seção 3.2.1, é necessário efetuar uma estimativa da distância linear entre a última medição e a margem da seção transversal.

As Figuras 51, 52 e 53 apresentam as comparações entre a medição de ADCP e as seções transversais retiradas do modelo hidrodinâmico, ilustrando algumas diferenças encontradas entre os respectivos perfis em termos de características geométricas.

FIGURA 50 - SEÇÃO TRANSVERSAL OBTIDA POR MEIO DA MEDIÇÃO DE ADCP PARA A ILHA DE SANTANA/JATOBÁ.

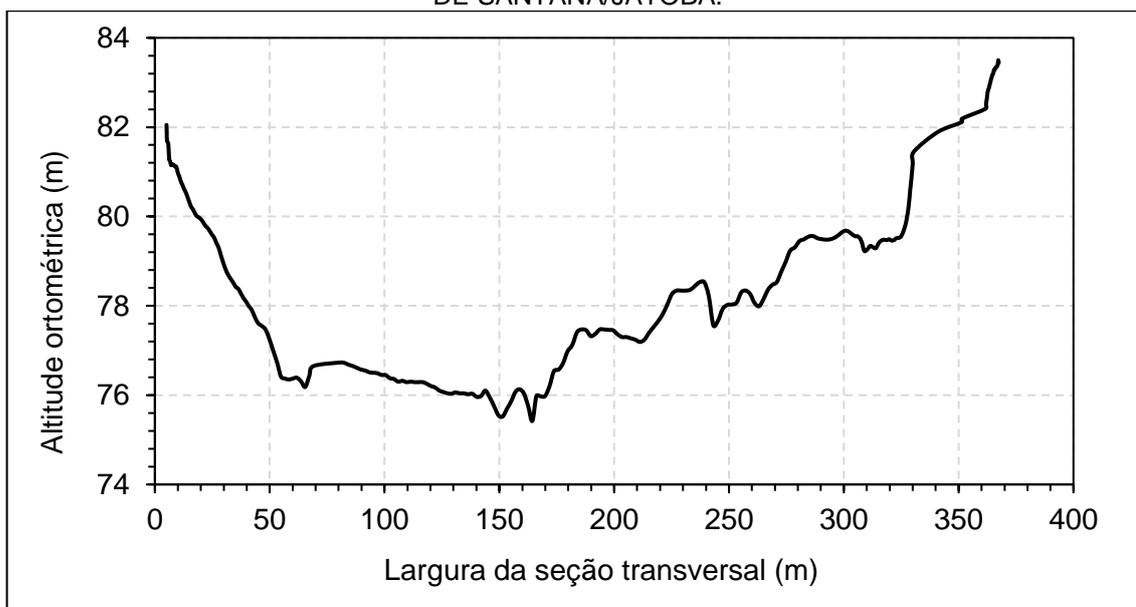


FIGURA 51 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DO MODELO HIDRODINÂMICO PARA DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE NA LOCALIDADE DE SANTANA/ JATOBÁ.

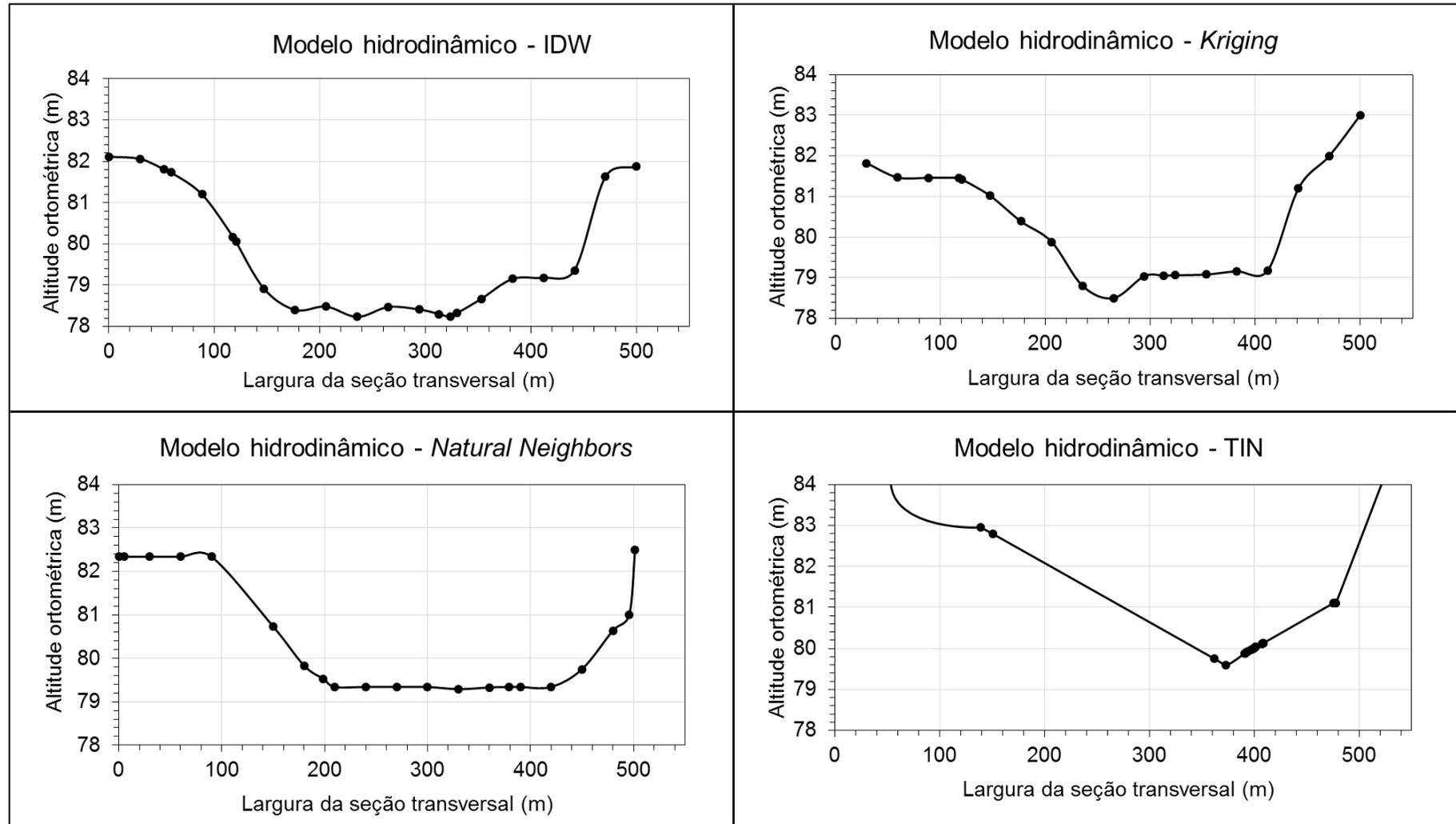
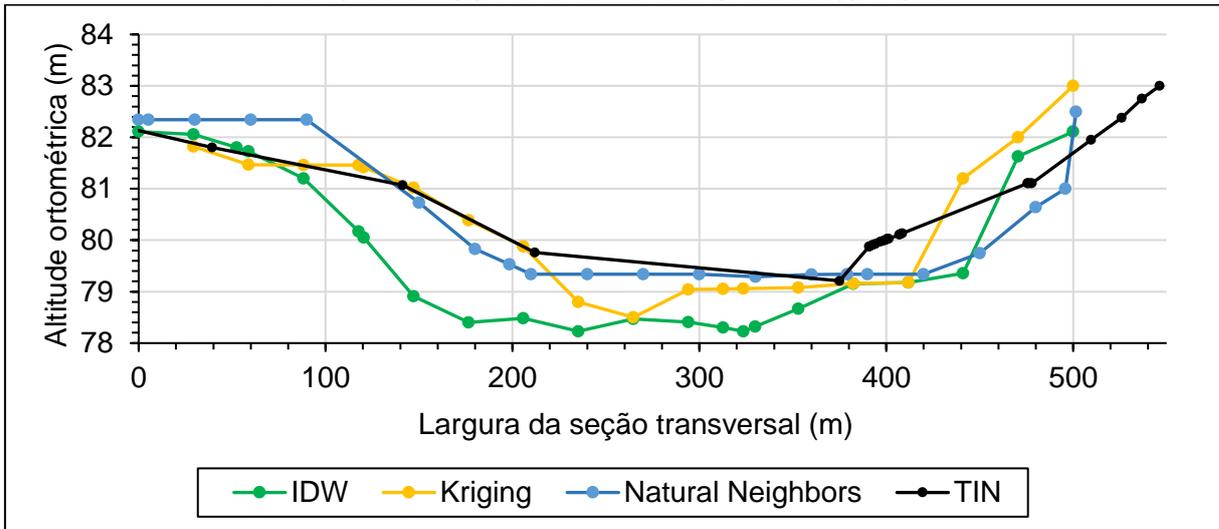


FIGURA 52 - SOBREPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO PARA A ILHA DE SANTANA/JATOBÁ.



A seção transversal proveniente da medição de ADCP (Figura 50) ilustra com boa resolução a superfície de fundo, detalhando até mesmo as pequenas variações de altimetria, com magnitudes inferiores a 1 cm.

Da Figura 51 é possível perceber que a quantidade de pontos durante a triangulação é relativamente menor quando comparada às demais técnicas de interpolação. Isso significa que as interpolações exibem um maior grau de suavização na superfície gerada. Além disso, todos os modelos apresentaram diferenças de altimetria da magnitude de até 2 m entre uma superfície de fundo e outra.

Um fato que deve ser levado em consideração e que justifica as diferenças de largura de margem da seção transversal medida em campo e daquelas geradas com o modelo são que, como mencionado na seção 3.2.5, para as medições de campo deve-se interpolar linearmente o ponto final da medição de ADCP e o ponto estimado da margem, além disso, temos as considerações de extrapolações de margens do modelo apresentadas na seção 5.2. A ideia principal é analisar a estrutura geométrica da seção, o que indica certa proximidade em relação às seções modeladas e a seção de campo, certificando o uso do modelo hidrodinâmico 1D no que diz respeito à representação das medições.

A fim de complementar a análise geométrica das seções transversais, efetuaram-se as simulações para o denominado cenário de estiagem com todos os MDA's, e os resultados para os perfis longitudinais do nível d'água identificaram algumas flutuações entre os perfis, o que confirma a hipótese da influência dos Modelos Digitais de Altitude (MDA) nos resultados do modelo hidrodinâmico 1D.

Porém, estes resultados também podem estar associados à utilização dos mesmos coeficientes de rugosidade de Manning para todos os modelos hidrodinâmicos.

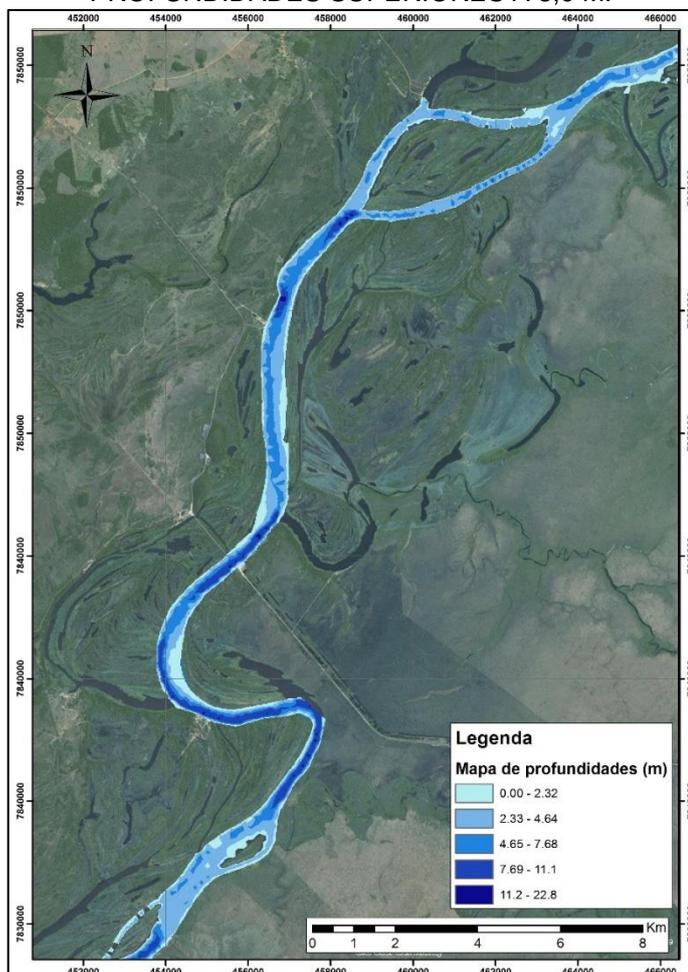
5.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D

Adicionalmente, outro resultado gerado é em relação ao pós-processamento do modelo na interação entre o SIG e o HEC-RAS. Os cálculos de níveis e velocidades obtidos puderam ser exportados em formato *ASCII* com as mesmas propriedades espaciais que foram inseridas no HEC-RAS, porém agora acrescidos de informações hidráulicas do canal modelado.

No ambiente de SIG, cada informação hidráulica calculada pela modelagem pode ser avaliada entre os perfis das seções transversais. Um dos resultados interessantes obtidos foi o mapa de profundidades para o canal de navegação.

A partir das altitudes da superfície da água das seções transversais obtidas pelo modelo matemático hidrodinâmico, foi gerada uma triangulação entre os respectivos perfis e os limites do canal. Com isso, subtraíram-se essas altitudes da superfície d'água das altitudes do fundo do rio, geradas pelo MDA, resultando em novos valores de profundidades, para uma condição de estiagem. A Figura 53 ilustra o mapa de profundidades gerado para a região da Ilha de Caraguatá até Porto Esperança.

FIGURA 53 - MAPA DE PROFUNDIDADES. RESULTADO DA INTERAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D E O AMBIENTE SIG. LOCAIS EM AZUL MAIS ESCURO APRESENTAM PROFUNDIDADES SUPERIORES A 3,0 M.



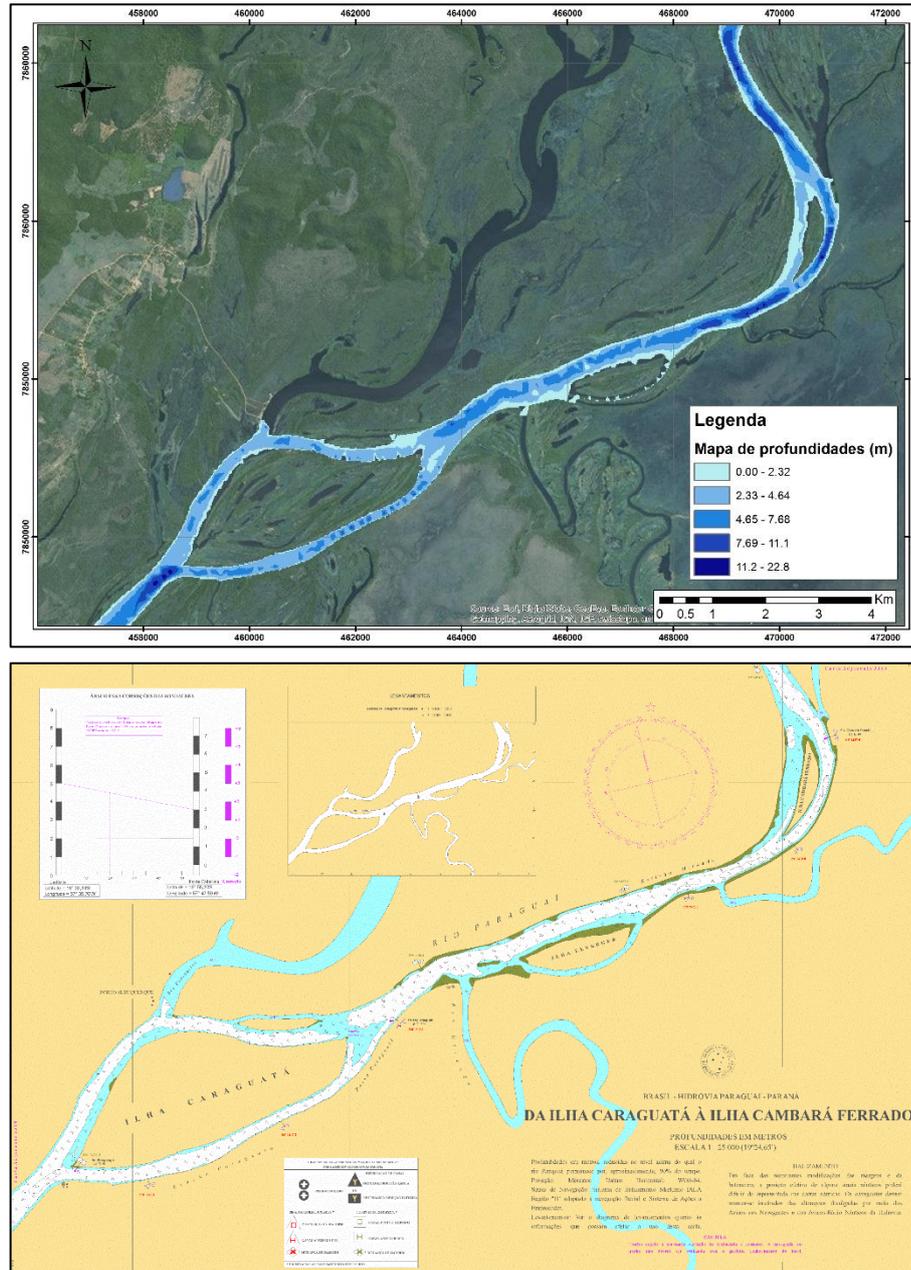
Por meio do mapa de profundidades e com a utilização do talvegue do rio, e adequando o mesmo às características hidráulicas do canal para esta região (105 m de largura e 3,0 m de profundidade), identificou-se com maior precisão os locais de restrição de navegação, como mostra a Figura 54 para a região da Ilha de Caraguatá.

FIGURA 54 - PROFUNDIDADES DA REGIÃO DA ILHA DE CARAGUATÁ. CONDIÇÃO DE ESTIAGEM.



Além disso, se compararmos os resultados do mapa de profundidades com as cartas náuticas de navegação, nota-se que esses resultados servem como um importante complemento e fornecem um maior detalhamento das informações nelas contidas. Isso possibilita a identificação mais precisa dos locais de difícil navegação, como mostra a Figura 55, onde a escala de cores no mapa de profundidades detalha os locais mais críticos de navegação para a condição de estiagem, ao passo que na carta náutica esses locais são delimitados de forma mais geral na cor branca e/ou por meio dos pontos cotados.

FIGURA 55 - DETALHAMENTO EM COMPARAÇÃO ÀS CARTAS NÁUTICAS PARA A ILHA DE CARAGUATÁ.



Em termos de velocidade, o modelo hidrodinâmico 1D gerou um valor de velocidade média para cada seção transversal inserida. As velocidades medidas em campo serviram de parâmetro para calibração do modelo, onde se conseguiu uma boa aproximação para a distribuição longitudinal das velocidades na área de estudo.

A maior parte das velocidades encontra-se na faixa de 0,6 e 0,7 m/s, concentrando 33,33% dos dados. A velocidade média para este trecho é de 0,63 m/s, característico de um sistema fluvial de meandro. A Figura 56 e a Figura 57 ilustram estes resultados.

FIGURA 56 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES RESULTANTES DO MODELO HIDRODINÂMICO 1D.

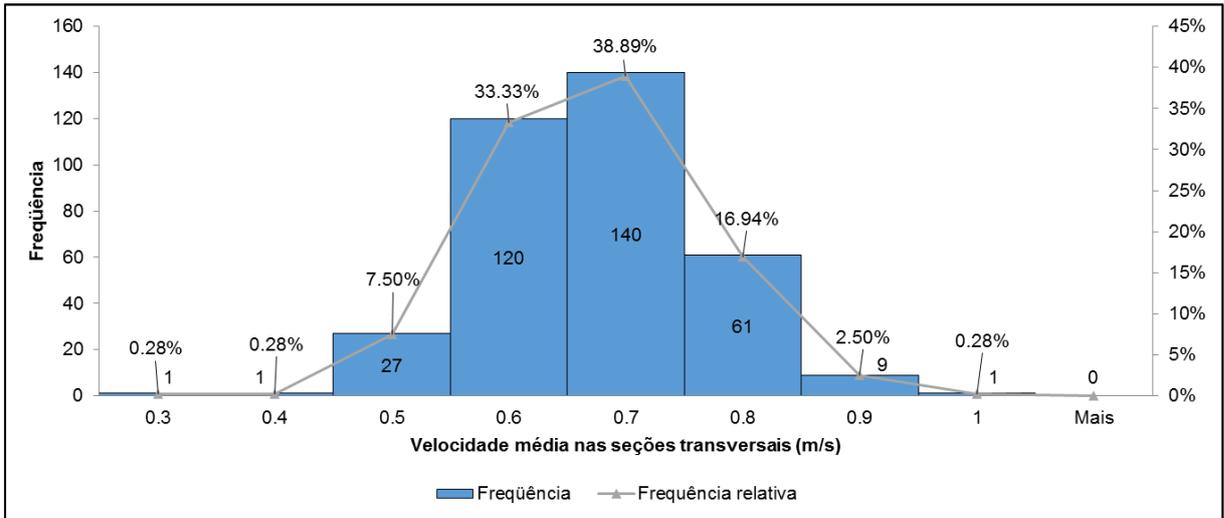
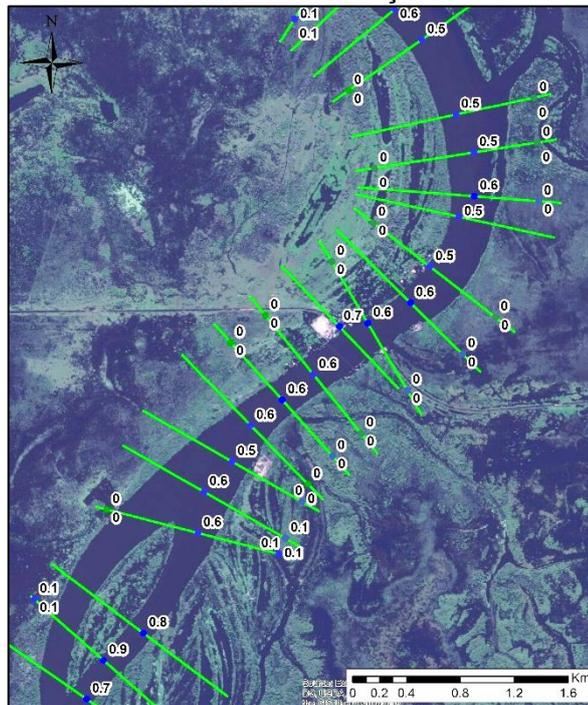


FIGURA 57 - VELOCIDADES NAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.



Por fim, os resultados do modelo (níveis e velocidades) não trazem detalhes suficientes para identificar a presença de dunas ou a sua dinâmica dentro do regime de escoamento. Porém, os resultados podem ser utilizados para calcular os parâmetros das características para o transporte de sedimento e/ou desenvolvimento de dunas, como por exemplo, a tensão de cisalhamento no fundo, o número de Froude, ou similares.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi a elaboração de um método para a integração e aplicação de um modelo hidrodinâmico em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com a finalidade de complementar a escassez de dados e demais informações referentes ao regime de escoamento e informações vetoriais para a otimização de sistemas de navegação em hidrovias. Com isso, espera-se que, de forma integrada e direcionada, os resultados deste trabalho auxiliem os futuros estudos relacionados às hidrovias em geral, a exemplo de subsídios para cálculos de manobrabilidade de embarcações e para métodos de previsão de níveis, acarretando em benefícios para as esferas acadêmica, econômica, ambiental e social.

I. Modelo Digital de Altitude

Em relação à avaliação do MDA, pode-se concluir que todos os modelos geradores de superfície foram capazes de simular o leito do rio. Sob uma análise estatística e geométrica, o interpolador do Inverso da Distância Ponderada (*IDW*) apresentou os melhores resultados em termos de RMSE e de representação geométrica de uma seção transversal escolhida para comparação com a medição de campo.

Devido à complexidade do sistema fluvial em questão, recomenda-se que sejam feitas análises a fim de identificar a anisotropia do fenômeno de batimetria para o rio Paraguai, a fim de avaliar a influência direta da morfologia fluvial de meandros e da presença de ilhas nos resultados estatísticos dos interpoladores.

Da interação entre o SIG e a modelagem hidrodinâmica 1D, neste trabalho ela possibilitou e otimizou a execução, em um único ambiente, de várias operações estatísticas, processamentos digitais, análises espaciais de dados e da manipulação dos bancos de dados espaciais para o trecho em estudo.

II. Modelo Hidrodinâmico 1D

Com base na quantidade, na qualidade dos dados disponíveis e considerando a escala deste trabalho, os resultados encontrados na elaboração e na avaliação do modelo hidrodinâmico foram capazes de reproduzir as medições de campo, e os

resultados hidráulicos permitiram caracterizar o regime de escoamento em termos de níveis, velocidades e geometria do canal, servindo de alicerce para uma análise mais detalhada da dinâmica do escoamento em canais de navegação com características de meandro.

Sugere-se, para futuros trabalhos, a utilização da batimetria das seções transversais advinda das medições de ADCP para a complementação dos dados de batimetria das cartas náuticas

No que se refere à identificação de passagens críticas com restrição de profundidades e na avaliação de níveis de água para as condições de estiagem, os resultados encontrados pelo modelo hidrodinâmico 1D proporcionam um progresso para a otimização do sistema atual de gerenciamento de hidrovias interiores, complementando os cálculos estatísticos de níveis de redução com um sistema determinístico para todo o canal, otimizando, por exemplo, o dimensionamento do canal de navegação e o cálculo de volumes de dragagem nas passagens identificadas como críticas.

Em relação às velocidades, notou-se que o modelo hidrodinâmico 1D proporciona resultados que podem ser empregados para calcular os parâmetros das características para o transporte de sedimentos e/ou desenvolvimento de dunas, como por exemplo, a tensão de cisalhamento no fundo, o número de Froude, ou similares.

Como recomendações para futuras investigações, em relação à comparação de níveis de água, sugere-se uma abordagem com o desenvolvimento de diversas calibrações do modelo hidrodinâmico, de acordo com as variações do MDA, sendo possível assim identificar qual é a relação entre os coeficientes de rugosidade de Manning para cada um dos casos.

No que se refere aos dados batimétricos, recomenda-se a utilização das seções batimétricas medidas com o ADCP, e os dados batimétricos provenientes da Marinha do Brasil, com o objetivo de incorporá-los ao modelo hidrodinâmico 1D, avaliando a sua influência nos resultados.

Ressalva-se também que pode ser analisada a influência das denominadas áreas sem escoamento (*ineffective areas*), nos locais a montante e a jusante das ilhas, a montante e a jusante de obras de arte especiais, por exemplo.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho não somente complementam os dados medidos, mas permitem um melhor aproveitamento dos mesmos e oferecem

ferramentas que complementam os sistemas atuais para avaliação de condições de navegabilidade em hidrovias. Em estudos e projetos futuros, a base de dados apresentada neste trabalho e o modelo hidrodinâmico 1D podem ser utilizados para cálculos hidromorfológicos e para a implementação de modelos 2D ou 3D para a otimização e complementação do atual sistema de navegação e identificação de locais críticos de passagem de embarcações em hidrovias interiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGETT, G. R.; WILSON, J. P. **Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river**. *Geomorphology*, v. 113, n. 1-2, p. 21–34, 2009.

AHIPAR - ADMINISTRAÇÃO DA HIDROVIA DO PARAGUAI. **A Hidrovia Paraguai-Paraná**. 2015. Disponível em: <<http://www.ahipar.gov.br/?s=hidrovia>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

ALLASIA, G. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; et al. **Modelo hidrológico da bacia do alto Paraguai**. *Anais*. v. 1, p.1689–1699, 2007.

ANA. Agência Nacional de Águas. **A navegação interior e sua interface com os Recursos Hídricos**. Caderno de Recursos Hídricos. Brasília – DF. 2005.

ANA. Agência Nacional de Águas. Acesso à informação. **Bacias hidrográficas – Região Hidrográfica do Paraguai**. 2015. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/paraguai.aspx>>. Acesso em: 15 mai 2015.

ANJOS, G. DOS; MANGIAVACCHI, N.; PONTES, J.; SOARES, C. **Simulação numérica das equações de saint-venant utilizando o método dos elementos finitos**. Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, p. 1–12, 2006.

ANTAQ. Agência Nacional de Transporte Aquaviário. **Estatísticas da navegação interior. Hidrovia do rio Paraguai**. 2010. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/estatisticanavinterior/hidroviaparaguai.pdf>>. Acesso em 03 ago 2015.

ANTAQ. Agência Nacional de Transporte Aquaviário. **Plano Nacional de Integração Hidroviária – Hidrovia do Paraguai**.Relatórios Técnicos. 2013.

ASSINE, M. L.; **River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil**. *Geomorphology* 70, p. 357–371. 2005.

BAILEY, T.C.; GATRELL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. Harlow, Essex, England: Longman Group, 413 p. 1995.

BARROS FILHO, M. N. M.; **Krigagem Ordinária aplicada à análise espacial da habitabilidade intra- urbana: o caso da cidade do Recife (Brasil)**. VII Seminário Internacional da LARES. São Paulo, 2007.

BERVEGLIERI, A.; JUNIOR, M. M.; PITERI, M. A. **Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia**. n. 2004, p. 2716–2723, 2011.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Avisos aos navegantes: Hidrovia Paraguai-Paraná nº 7**, 2015. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-aviso-navegantes/avngantes/hidrovia/par082010.pdf>>. Acesso em: 2 set. 2015.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Descritivo da estação fluviométrica de Ladário**. 2012. Disponível em: [https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoes-fluviometricas/27Paraguai/Ladario%20-%20Rio%20Paraguai%20\(F-43%20-%20Abaco\)V1-12.pdf](https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoes-fluviometricas/27Paraguai/Ladario%20-%20Rio%20Paraguai%20(F-43%20-%20Abaco)V1-12.pdf). Acesso em 09 dez 2016.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Transporte Aquaviário**. 2014. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-aquaviario.html>>. Acesso em 05 novembro 2015.

BUFFINGTON, J. M.; MONTGOMERY, D. R. **Geomorphic Classification of Rivers**. In: Shroder, J.; Wohl, E., ed. *Treatise on Geomorphology; Fluvial Geomorphology*, Vol. 9. San Diego, CA: Academic Press. p. 730-767. 2013.

BURMESTER, C. L. **Uso do perfilador a laser na estimativa da rugosidade em planícies de inundação**. Dissertação de mestrado. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná 2005.

BURROUGH, P. A; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. *Economic Geography*, v. 75, n. 4, p. 422, 1998.

BURROUGHES, J.E.; GEORGE, K.J. ; ABBOTT, V.J. **Interpolation of hydrographic survey data**. *The Hydrographic Journal* (99), pp. 21–29. 2001.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas**. SPRING, Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 1997.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. **Cap 3 - Análise espacial de superfícies**. In: Análise Espacial de Dados Geográficos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). p.1–37, Brasília-DF, 2004.

CARDOSO, A. H. **Hidráulica fluvial**. 1998.

CARTER, G. S.; SHANKAR, U. **Creating rectangular bathymetry grids for environmental numerical modeling of gravel-bed rivers**. Applied Mathematical Modeling, 20 (11), pp. 699–708. 1997.

CHAUDHRY, M. H. **Open-Channel Flow**. 2ed. Springer, 2008.

CHM-DHN. Centro de Hidrografia da Marinhha - Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Cartas Raster**. Disponível em: http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html. Acesso em: 08 de abril de 2015.

CHM-DHN. Centro de Hidrografia da Marinhha - Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Normas da Autoridade Marítima para Auxílios à Navegação: Normam 17-DHN**, 3 ed. 2008.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulic**. Illinois: Mcgraw-Hill Book Company. 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 1980. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAghYAD/geomorfologia-antonio-christofoletti#>>. Acesso em 15 jul 2015.

CHRISTOPHERSON, R. W. **Geossistemas - Uma Introdução à Geografia Física**. Revista brasileira de Climatologia.n. 10, v. 8, 2012.

CLARKE, R. T.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. **Variabilidade Temporal no Regime Hidrológico da Bacia do Rio Paraguai**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 8 n.1, pp 201–211. 2003.

CNT. Confereação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico – 2015**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>. Acesso em 15 de dezembro de 2015.

COLLISCHONN, W. **Modelos Hidrológico de Grandes Bacias**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Uiversidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

COOK, A.; MERWADE, V. **Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping**. Journal of Hydrology, v. 377, n. 1-2, p. 131–142. Elsevier B.V. 2009

CROWDER, D. W.; DIPLAS, P. **Using two-dimensional hydrodynamic models at scale of ecological importance**. Journal of Hydrology, v. 230, p. 172–191, 2000.

CUNGE, J. A.; HOLLY Jr F.M. e VERWEY A. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. Pitman, London. 1980.

DELAZARI, L. S. **Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de altitude**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geomática. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, 1996.

DELAZARI, L. S. **Modelagem Digital de Superfícies**. Grupo de Pesquisa em Cartografia e SIG da UFPR. 2012. Disponível em: <http://people.ufpr.br/~luciene/site_files/dtm.pdf>. Acesso em: 10 out 2015.

DINGMAN, L. **Fluvial hydraulics**. Oxford press, 2009.

EAMHW. Environment Agency Manager for Herefordshire and Worcestershire. **Environmental Agency**. 2014. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency/about>. Acesso em: 10 out 2014.

EGG, G. C. **Geração de modelos digitais de superfície compostos utilizando imagens do sensor PRISM/ALOS**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

FERREIRA, M. C. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Ed. Unesp, 2014. 343 p.

FRIGO, A. L.; BLENINGER, T. B. **A review of the navigability modeling for inland waterways**. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. 28 June – 3 July, The Hague, the Netherlands, 2015. Disponível em: <<http://89.31.100.18/~iahrpapers/86193.pdf>>. Acesso em: 5 dez 2015.

GAMARO, P. E. **Medidores Acústicos Doppler de vazão**. 1a edição ed. Foz do Iguaçu, Itaipu Binacional, 2012.

GEOMORFOLOGIA. **Galeria de Imagens.** Disponível em: http://geomorfolog4eso.blogspot.com.br/p/blog-page_22.html. Acesso em: 23 nov 2015.

GOFF, J. A.; NORDFJORD, S. **Interpolation of fluvial morphology using channel-oriented coordinate transformation: A case study from the New Jersey Shelf.** *Mathematical Geology*, 36 (6), pp. 643–658. 2004.

GRIBBIN, JOHN E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais.** Brasil. ISBN 13-978-85-221-0635-6. 2009.

GUARNERI, H.; CORREIA, R.; RATTON, P.; et al. **Determinação do modelo digital de elevação de rios de grande extensão para uso em projetos de engenharia - Estudo de caso do trecho brasileiro da Hidrovia do Rio Paraguai.** IX Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior - SOBENA. Manaus-AM, 2015.

HENDERSON, F. M. **Open channel flow.** New York. Macmillan. 471 pp. 1966.

HJELLE, O., DAEHLEN, M.; **Triangulations and applications.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 438 p. 2006.

HOLLEY, E. R.; JIRKA, G. H. **Mixing in rivers.** Environmental and water quality operational studies. Department of Civil Engineering. Final report. 1986.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. **Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow.** *Journal of Hydrology*, v. 253, n. 1-4, p. 239–249, 2001.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. **Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.** *Journal of Hydrology*, v. 268, n. 1-4, p. 87–99, 2002.

HOWARD, A. D. **Modelling channel migration and floodplain sedimentation in meandering streams.** *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*, p. 1–41, 1992.

IALA, International Association of Lighthouse Authorities. **Maritime Buoyage System and other Aids to navigation.** 2010. Disponível em: <http://www.automaticpower.com/pdf/regulations-guidelines/IALA/IALA-Maritime-Buoyage-System-2010.pdf>. Acesso em: 25 set 2015.

IBGE. Sistema Geodésico Brasileiro. **Bando de Dados Geodésicos**. 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sgb.shtm>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

IHO. International Hydrographic Organization. **Resolutions of the international hydrographic organization**. Publication M-13. International Hydrographic Bureau – Monaco, 2. ed. 2010.

JOHANESSON, H.; PARKER, G. **Linear theory of river meanders**. In: Water Resources Monograph, v 12. In: River Meandering – Chapter 7. American Geophysical Union. 1989.

JULIEN, P. Y. **River Mechanics**. New York: Cambridge University Press, 2002.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modelling - Principles and methodology**. CRC Press, 2005.

MAZZINI, P. L.; SCHETTINI, C. A. **Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos**. Braz. J. Aquat. Sci. Technol., v. 13, n. 1, p. 53–64, 2009.

MERWADE, V. M.; MAIDMENT, D. R.; GOFF, J. A. **Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry**. Journal of Hydrology, v. 331, n. 3-4, p. 731–741, 2006.

MERWADE, V. M.; MAIDMENT, D. R.; HODGES, B. R. **Geospatial Representation of River Channels**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 10, n. 3, p. 243–251, 2005.

MIGUENS, A. P. **Navegação: A ciência e a arte. Volume III – Navegação eletrônica e em condições especiais**. Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2000.

NADAL, C. A.; AUGUSTO, L.; VEIGA, K.; RATTON, E.; MORO, R. C.; BOESE, V.; NICOLAU, M. C.; GODOY, P. R. C. **Posicionamento Vertical em Hidrovias Segundo Prescrições Internacionais da FIG-International Federation of Surveyors**. IX Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior – SOBENA, Manaus-AM, 1–8, 2015.

NELSON, J. M.; SMITH, D., **Mechanics of flow over ripples and dunes**. Geophysics Program. Journal of Geophysical Research, 1989.

NILSON, E., LINGEMANN, I., KLEIN, B. AND KRAHE, P. **Impact of hydrological change on navigation conditions**, Bundesanstalt für Gewässerkunde. 2012.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. N. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista. 147 p. 2003.

NOVAK, P.; GUINOT, V.; ALAN, J.; E REEVE, D. **Hydraulic Modelling: an introduction, principles, methods and applications**. Spon Press, Londres, 1ed. 2010.

OLIVEIRA, F. F. **Desenvolvimento de uma plataforma de software para a modelagem digital de terrenos baseada em TIN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2014.

PAIVA, R. C. D. DE. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. p. 182, 2009.

PAZ, A. R. DA. **Simulação Hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

PAZ, A. R. DA; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrodinâmica integrada rio-planície em ambiente SIG: aplicação ao rio Aquidauana**. 1o Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, p. 116–125, 2006.

PAZ, A. R. DA; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PADOVANI, C. R. **Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil)**. Hydrological Processes, v. 25, n. 9, p. 1498–1516, 2011.

PIANC. Permanent International Association of Navigational Congress. **Approach Channels - Preliminary Guidelines. First Report of the Joint PIANC – IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA e IALA**. Boletim, Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), n. 87, 1996.

PITERI, M. A.; JUNIOR, M. M.; SANTOS, A. G.; OLIVEIRA, F. F. **Triangulação de Delaunay e o princípio de inserção randomizado**. Simpósio Brasileiro de Geomática. n. 1999, p. 655–663, 2007.

POSTEL, S.; RICHTER, B. **Rivers for life: managing water for people and nature**. Island Press. Washington (EUA), 253 p., 2003.

RAMOS, A. M.; KRUEGER, C. P. **Aplicação de reduções batimétricas GPS em levantamentos hidrográficos**. Boletim de Ciências Geodesicas, v. 15, n. 4, p. 615–635, 2009.

RATTON, P. **Previsão de vazões na Hidrovia do rio Paraguai com aplicação do filtro de Kalman**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná; 2015.

RIJN, L. C. V. **Unified view of sediment transport by currents and waves**. Journal of Hydraulic Engineering, 133 (6), 649-667. 2007.

SANTOS, G. R. L. DOS; SOUZA, C. A. **Pantanal de Cáceres: composição granulométrica dos sedimentos de fundo no rio Paraguai entre a foz do rio Cabaçal e a cidade de Cáceres, Mato Grosso, Brasil**. Revista Ambiente e Água, n. 3, 2012.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: ITD, 2001.

SANTOS, M.S.T.; SÁ, N.C de. **O uso do GNSS em levantamentos geofísicos terrestres**. Revista Brasileira de Geofísica, v.24, n.1, p.63-80, 2006.

SCHUMM, S. A. **Evolution and response of the fluvial system**. Department of Earth Resources Colorado State University. SEPM Special Publication, n. 31, p. 19–29, 1981.

SILVA, A.; ELIAS, E.; FILHO, D. S.; BAPTISTA, S. **Padrões de canal do rio Paraguai na região de Cáceres (MT)**. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 1, p. 167–177, 2008.

SILVEIRA, T. D. E. A. **Modelos de interpoladores aplicados a construção de superfícies batimétricas**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SONTEK RiverSurveyor S5/M9. **A new perspective to the notion of measuring open channel hydraulic**. 2015. Disponível em: <<http://www.sontek.com/productsdetail.php?riversurveyor-s5-m9-14>>. Acesso em: 05 jun 2015.

SONTEK. **RiverSurveyor S5/M9 System Manual**. Firmware version 1.0. 2010.

SSN-6. SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA DO OESTE. Sexto Distrito Naval. Marinha do Brasil. **Serviço de informações**. Ladário. 2015.

TOOMBES, L.; CHANSON, H. **Numerical limitations of hydraulic models**. 10th Hydraulics Conference. July, p. 2322–2329, 2011. Disponível em: <<http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=353537292076973;res=IELENG>>. Acesso em: 16 out 2014.

TUCCI, C.E. M. **Recursos Hídricos e Conservação do Alto Paraguai**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

TUCCI. **Modelos hidrológicos**. 1 ed ed. Porto Alegre, 1998.

UFPR/ITTI. Universidade Federal do Paraná/Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura. **EVTEA da Hidrovia do rio Paraguai. Volume 3A – Estudos Hidráulicos, hidrodinâmicos, de balizamento e sinalização**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015.

USACE. **HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS - User 's Manual**. 2009.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual**. 2010.

VIEIRA, S. R. **Curso de Atualização em Conservação do Solo - Uso de Geoestatística**. Campinas: IAC, 1995.

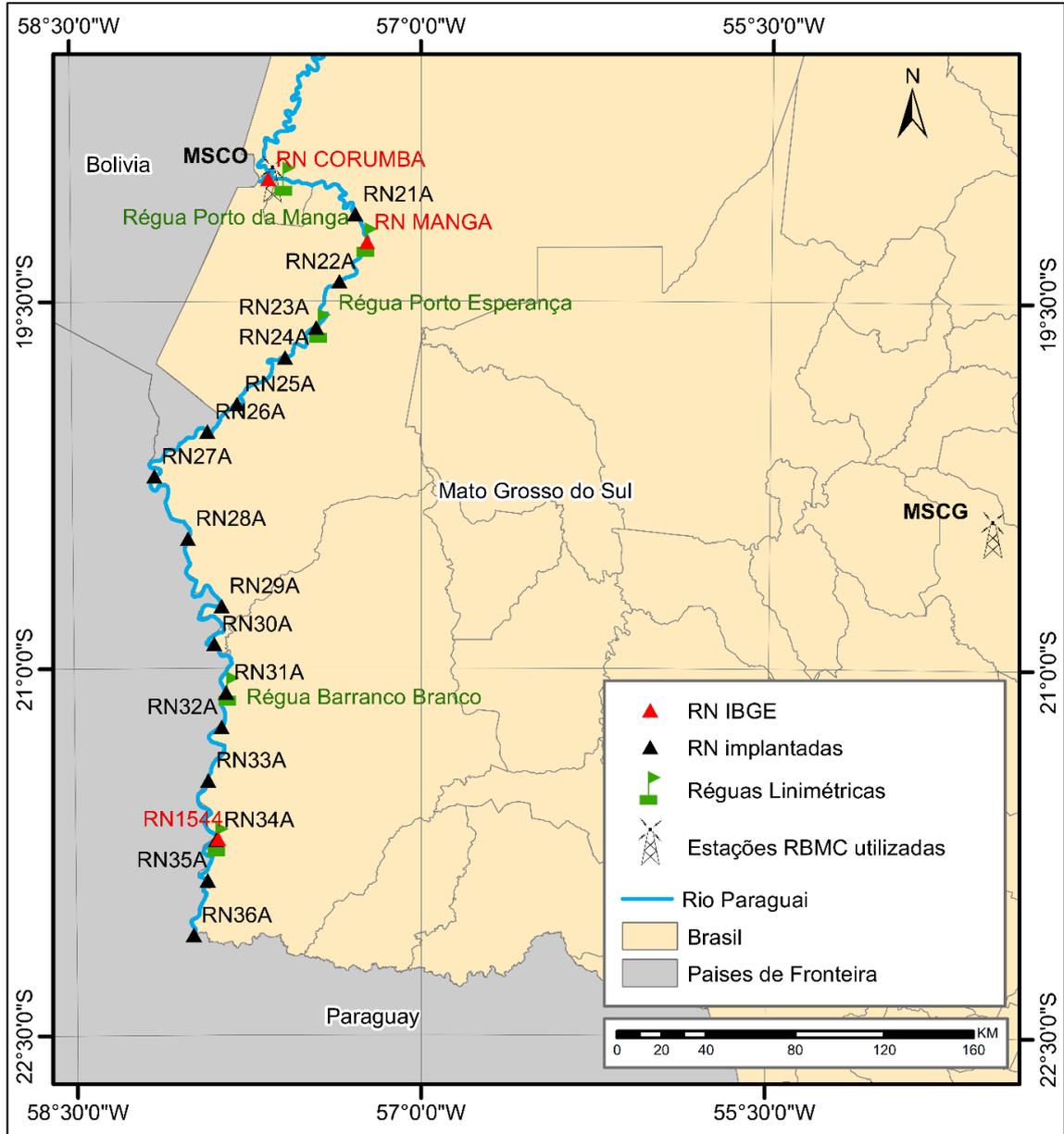
VIOLEAU, D., BOURBAN, S., CHEVIET, C., MARKOFSKY, M., PETERSEN, O., ROBERTS, W., SPEARMAN, J., TOORMAN, E., VESTED, H. J.AND WEILBEER, H. **Numerical simulation of cohesive sediment transport: intercomparison of several numerical models**. Proceedings in Marine Science, 5, 75-89. 2002.

WEIBEL, R.; HELLER, M. **Digital Terrain Modelling**, v.1, chap. 19. 1991.

**ANEXO I – REDE DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL (RRNN) IMPLANTADAS NO
TRAMO SUL DA HIDROVIA DO RIO PARAGUAI**

| RRNN | ALTITUDE ELIPSOIDAL AJUSTADA (M) | ALTITUDE ORTOMÉTRICA AJUSTADA (UFPR/ITTI) (M) | ALTITUDE ELIPSOIDAL PPP (M) | ALTITUDE ORTOMÉTRICA PPP (IBGE) (M) |
|------------------|--|--|-----------------------------------|---|
| RN3293F | 143,75 | 129,91 | 143,66 | 129,82 |
| AUXILIAR LÁDARIO | 103,56 | 89,86 | 103,51 | 89,81 |
| 21A | 98,86 | 85,66 | 99,12 | 85,97 |
| RN3298X | 98,96 | 85,87 | 98,99 | 85,84 |
| 22A | 98,35 | 84,65 | 98,32 | 84,66 |
| EG-MT | 99,07 | 85,17 | 99,04 | 85,14 |
| 24A | 98,32 | 84,20 | 98,36 | 84,22 |
| 25A | 101,94 | 87,11 | 101,91 | 87,02 |
| 26A | 97,71 | 82,47 | 97,61 | 82,29 |
| 27A | 96,82 | 81,28 | 96,81 | 81,14 |
| 28A | 93,86 | 79,12 | 93,79 | - |
| 29A | 94,47 | 79,98 | 94,36 | 79,70 |
| 30A | 93,5 | 78,91 | 93,47 | 78,69 |
| 31A | 95,68 | 81,17 | 95,63 | 80,91 |
| 32A | 95,55 | 80,98 | 95,69 | 80,89 |
| 33A | 92,82 | 77,95 | 92,70 | - |
| 34A | 95,46 | 80,79 | 95,27 | 80,31 |
| 35A | 90,07 | 75,39 | 90,07 | 75,08 |
| 36A | 89,69 | 74,92 | 89,68 | - |

Fonte: UFPR/ITTI, 2015.



Fonte: Elaborado por UFPR/ITTI (2015).

**ANEXO II – MEDIÇÕES DE VAZÃO E VELOCIDADE NO TRAMO SUL DA
HIDROVIA DO RIO PARAGUAI**

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VELOCIDADE MÉDIA NO CANAL MEDIDA (M/S) | ÁREA MEDIDA (M²) | VAZÃO MEDIDA (M³/S) |
|-----------------|---|--|------------------|---------------------|
| 09/01/2015 | Ladário | 0,689 | 1767.95 | 1218 |
| 10/01/2015 | Santana ou Jatobá | 0,656 | 2101.75 | 1379 |
| 10/01/2015 | Jusante Ilha do Formigueiro | 0,573 | 2320.91 | 1329 |
| 10/01/2015 | Montante Miguel Henrique | 0,63 | 2100.03 | 1323 |
| 10/01/2015 | Montante Ilha Tira Catinga | 0,63 | 2429.72 | 1531 |
| 10/01/2015 | Meio Ilha Tira Catinga | 0,677 | 1850.95 | 1253 |
| 10/01/2015 | KM 1440 | 0,682 | 2014.03 | 1373 |
| 10/01/2015 | Porto da Manga (régua) | 0,616 | 2186.49 | 1346 |
| 10/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha da Manga | 0,692 | 1135.37 | - |
| 10/01/2015 | Braço Direito Ilha da Manga | 0,492 | 1118.90 | 559 |
| 10/01/2015 | Jusante Ilha da Manga | 0,742 | 1813.40 | 1345 |
| 11/01/2015 | Braço Direito Ilha das Laranjeiras | 0,629 | 636.06 | 400 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha das Laranjeiras | 0,577 | 1599.29 | 923 |
| 11/01/2015 | Estirão do Cambará Ferrado | 0,66 | 2072.55 | 1368 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Cambará | 0,739 | 1346.67 | 995 |
| 11/01/2015 | Montante Ilha Caraguatá | 0,721 | 2241.94 | 1616 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Caraguatá | 0,71 | 1162.85 | 1162 |
| 11/01/2015 | Jusante Ponte Rodoviária | 0,533 | 2978.51 | 1586 |
| 11/01/2015 | Ponte Rodoviária Central 2 | 0,556 | 2813.85 | 1564 |
| 11/01/2015 | Ponte Rodoviária Central 1 | 0,546 | 2907.15 | 1587 |
| 11/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Jacaré | 0,453 | 2976.47 | 1349 |
| 11/01/2015 | Porto Gregório Curvo | 0,49 | 3207.57 | 1596 |
| 11/01/2015 | Porto Gregório Curvo | 0.498 | 3207.57 | 1596 |
| 11/01/2015 | Ilha do Bugio | 0.565 | 2498.94 | 1411 |
| 12/01/2015 | Montante Passo do Conselho | 0.583 | 2729.33 | 1590 |
| 12/01/2015 | Central Passo do Conselho | 0.579 | 1862.75 | 1077 |
| 12/01/2015 | Ilhas Gaivota | 0.725 | 2029.68 | 1472 |
| 12/01/2015 | Ilha da Ferradura | 0.576 | 2682.88 | 1547 |
| 12/01/2015 | Jusante Ilha da Ferradura | 0.44 | 3426.38 | 1507 |
| 12/01/2015 | Ilha Piúva | 0.586 | 2780.15 | 1628 |
| 12/01/2015 | Entrada Paratudal | 0.509 | 3058.33 | 1556 |
| 12/01/2015 | Jusante Ilha Paratudal - Braço Esquerdo | 0.696 | 1563.44 | 1085 |
| 12/01/2015 | Jusante Ilha Paratudal - Braço Direito | 0.456 | 1019.98 | 465 |
| 12/01/2015 | Estirão São Francisco - Montante | 0.636 | 2545.94 | 1621 |

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VELOCIDADE MÉDIA NO CANAL MEDIDA (M/S) | ÁREA MEDIDA (M²) | VAZÃO MEDIDA (M³/S) |
|-----------------|---|--|------------------|---------------------|
| 12/01/2015 | Régua Linimétrica Forte Coimbra | 0.527 | 3118.51 | 1643 |
| 12/01/2015 | Forte Coimbra | 0.53 | 3118.51 | 1643 |
| 12/01/2015 | Ilha Porto Carreira Braço Direito | 0.59 | 2292.02 | 1342 |
| 12/01/2015 | Ilha Fernandes Braga Braço Esquerdo | 0.51 | 2032.38 | 1039 |
| 12/01/2015 | Ihas Fernandes Braga Jusante | 0.59 | 2721.40 | 1595 |
| 13/01/2015 | Montante Rebojo Grande | 0.40 | 4004.38 | 1597 |
| 13/01/2015 | Km 1298.8 | 0.62 | 2604.24 | 1602 |
| 13/01/2015 | Jusante Rebojo Grande | 0.63 | 2530.41 | 1604 |
| 13/01/2015 | Ilha Biguá Braço Menor Esq | 0.66 | 591.63 | 393 |
| 13/01/2015 | Jusante Ilha Biguá | 0.65 | 2463.32 | 1609 |
| 13/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Santa Fé | 0.76 | 1326.40 | 1011 |
| 13/01/2015 | Montante Ilha Sta Rosa | 0.66 | 2458.27 | 1627 |
| 13/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Santa Rosa | 0.52 | 501.66 | 261 |
| 13/01/2015 | Braço Direito Ilha Santa Rosa | 0.67 | 1983.70 | 1331 |
| 13/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Sauce | 0.69 | 2258.75 | 1567 |
| 13/01/2015 | Jusante Ilha Sauce | 0.64 | 2559.27 | 1638 |
| 13/01/2015 | Montante Baía Negra | 0.62 | 2746.21 | 1696 |
| 13/01/2015 | Ilha Alarcon - Iuquery | 0.59 | 2790.84 | 1640 |
| 13/01/2015 | Braço Direito Ilha Sepultura | 0.67 | 2087.12 | 1401 |
| 14/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Seputa | 0.67 | 2124.92 | 1425 |
| 14/01/2015 | Jusante Ilha Seputa | 0.58 | 2901.75 | 1678 |
| 14/01/2015 | Ilha Cabeça de Boi | 0.60 | 2783.45 | 1672 |
| 14/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha de Puerto Esperanza | 0.60 | 2490.15 | 1482 |
| 14/01/2015 | Ilha Esperanza Canal Principal | 0.63 | 2577.12 | 1629 |
| 14/01/2015 | Montante Ilha Capão Queimado | 0.59 | 2891.61 | 1705 |
| 14/01/2015 | Braço Esquerdo Capão Queimado | 0.61 | 2452.39 | 1482 |
| 14/01/2015 | Braço Esquerdo Ilha Puerto Novo | 0.59 | 2745.14 | 1630 |
| 14/01/2015 | Jusante ilha Puerto Novo | 0.59 | 2876.30 | 1694 |
| 15/01/2015 | Braço Direito Ilha do Chapéu | 0.63 | 2138.66 | 1346 |
| 15/01/2015 | Km 1191.8 | 0.58 | 2893.25 | 1665 |
| 15/01/2015 | Jusante Porto Leda | 0.61 | 2676.63 | 1635 |
| 15/01/2015 | Porto Volta Rápida (Km 1182) | 0.58 | 2863.53 | 1673 |
| 15/01/2015 | Km 1176 | 0.62 | 2735.47 | 1686 |
| 15/01/2015 | Km 1175.4 Braço Esquerdo Ilha Voluntad | 0.62 | 1973.77 | 1220 |
| 15/01/2015 | Jusante Ilha Algodal | 0.66 | 2550.67 | 1673 |
| 15/01/2015 | Fazenda Nuguazu | 0.54 | 3121.30 | 1691 |
| 15/01/2015 | Passo Algodou Km 1170 | 0.60 | 2596.10 | 1560 |

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VELOCIDADE MÉDIA NO CANAL MEDIDA (M/S) | ÁREA MEDIDA (M²) | VAZÃO MEDIDA (M³/S) |
|-----------------|--|--|------------------|---------------------|
| 16/01/2015 | Montante Passo Alegrete Superior | 0.63 | 2595.11 | 1638 |
| 16/01/2015 | Ilha Passo Alegrete | 0.62 | 2336.94 | 1437 |
| 16/01/2015 | Passo Alegrete Inferior | 0.67 | 2259.18 | 1508 |
| 16/01/2015 | Jusante Passo Alegrete | 0.61 | 2763.85 | 1690 |
| 16/01/2015 | Ilha Rabo da Ema | 0.62 | 2384.54 | 1478 |
| 16/01/2015 | Km 1131.3 | 0.71 | 2050.23 | 1446 |
| 16/01/2015 | Km 1128.9 | 0.63 | 2007.86 | 1261 |
| 16/01/2015 | Ilha Spenillo | 0.63 | 1913.12 | 1196 |
| 16/01/2015 | Montante Ilha do Braga | 0.60 | 2809.63 | 1691 |
| 16/01/2015 | Ilha do Braga Central | 0.67 | 1661.06 | 1108 |
| 16/01/2015 | Jusante Porto Lidia | 0.65 | 2495.63 | 1631 |
| 17/01/2015 | Passo Curuçu Cancha | 0.59 | 2282.08 | 1340 |
| 17/01/2015 | Jusante Passo Curuçu - Montante Furado Nabileque | 0.69 | 2362.49 | 1634 |
| 17/01/2015 | Furado do Nabileque | 0.73 | 2011.80 | 1473 |
| 17/01/2015 | Jusante Furado do Nabileque | 0.62 | 2771.85 | 1713 |
| 17/01/2015 | Porto Santa Rosa | 0.57 | 3042.53 | 1724 |
| 17/01/2015 | Km 1094.9 - Ilha Barbero | 0.62 | 2782.48 | 1718 |
| 17/01/2015 | Passo Olimpo | 0.6 | 2963.76 | 1777 |
| 17/01/2015 | Braço Esquerdo Passo Olimpo | 0.66 | 1763.11 | 1170 |
| 18/01/2015 | Barranco Branco | 0.44 | 3686.6 | 3687 |
| 18/01/2015 | Braço direito Ilha Sucuri | 0.65 | 2318.84 | 2319 |
| 18/01/2015 | Baía Sucuri (seção de ADCP em afluente) | 0.06 | 5227.06 | 5227 |
| 18/01/2015 | Jusante Ilha Sucuri | 0.55 | 3008.77 | 3009 |
| 18/01/2015 | Montante Volta Jenipapo | 0.57 | 3119.81 | 3120 |
| 18/01/2015 | Estância Santa Ana | 0.53 | 3294.16 | 3294 |
| 18/01/2015 | Ilha Sacaro | 0.55 | 3160.88 | 3161 |
| 18/01/2015 | Passo José Kira | 0.57 | 3029.9 | 3030 |
| 18/01/2015 | Porto São Francisco | 0.65 | 2749.48 | 2749 |
| 18/01/2015 | Montante Ilha Km 1042,8 | 0.59 | 2985.98 | 2986 |
| 18/01/2015 | Braço direito Ilha Cambánupá | 0.61 | 1558.61 | 1559 |
| 18/01/2015 | Montante Fecho dos Morros | 0.49 | 3603.04 | 3603 |
| 19/01/2015 | Ilha Fecho dos Morros | 0.76 | 1745.91 | 1746 |
| 19/01/2015 | Puerto Cerrito | 0.47 | 3579.17 | 3579 |
| 19/01/2015 | Ilha Florinda | 0.55 | 3118.8 | 3119 |
| 19/01/2015 | Km 1022,7 | 0.50 | 3474.12 | 3474 |
| 19/01/2015 | Ilha do Tigre Km 1015,1 | 0.66 | 2328.45 | 2328 |
| 19/01/2015 | Montante Porto Taruma Km 1013,1 | 0.60 | 2928.18 | 2928 |

| DATA DA MEDIÇÃO | NOME SEÇÃO | VELOCIDADE MÉDIA NO CANAL MEDIDA (M/S) | ÁREA MEDIDA (M ²) | VAZÃO MEDIDA (M ³ /S) |
|-----------------|--------------------------------|--|-------------------------------|----------------------------------|
| 19/01/2015 | Jusante Porto Taruma Km 1009,7 | 0.60 | 2974.2 | 2974 |
| 19/01/2015 | Ilha Maria | 0.52 | 3060.37 | 3060 |
| 19/01/2015 | Porto Peralta Km 999,7 | 0.55 | 3232.61 | 3233 |
| 19/01/2015 | Braço direito Ilha Margarita | 0.55 | 1339.2 | 1339 |
| 19/01/2015 | Braço esquerdo Ilha Margarita | 0.59 | 1907.98 | 1908 |