



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

GILBERTO LOUREIRO MÁCOLA

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MINIMAS  
NO TRECHO ENTRE ITAITUBA/SANTARÉM - HIDROVIA DO RIO TAPAJÓS  
ESTADO DO PARÁ.**

**BELÉM  
2024**

**GILBERTO LOUREIRO MÁCOLA**

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MINIMAS  
NO TRECHO ENTRE ITAITUBA/SANTARÉM - HIDROVIA DO RIO TAPAJÓS  
ESTADO DO PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, do Instituto de Tecnologia – ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Naval.

Orientador: Dr. Hito Braga de Moraes.

**BELÉM**

**2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Mácola, Gilberto Loureiro.

Proposta de um modelo de previsão de profundidades mínimas no trecho entre Itaituba/Santarém - Hidrovia do Rio Tapajós - Estado do Pará / Gilberto Loureiro Mácola - Orientador – Hito Braga de Moraes - Belém, 2024.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Hito Braga de Moraes

1. Hidrovia do rio Tapajós; Modelagem Hidrodinâmica; HEC-RAS; Previsão de profundidades mínimas; Dinâmica fluvial; Recursos Hídricos.
2. UFPA / BC

**GILBERTO LOUREIRO MÁCOLA****PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MINIMAS  
NO TRECHO ENTRE ITAITUBA/SANTARÉM - HIDROVIA DO RIO TAPAJÓS  
ESTADO DO PARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, do Instituto de Tecnologia – ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Naval.

Orientador: Dr. Hito Braga de Moraes.

APROVADO EM: 15 de maio de 2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Hito Braga de  
Moraes (Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Susana Beatriz Vinzón  
(Membro)

---

Prof. Dr. Nelio Moura de Figueiredo  
(Membro)

## DEDICATÓRIA

À minha família, pelo amor, apoio incondicional e paciência ao longo de todos os anos de estudo. A vocês, que sempre acreditaram em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, por serem meus primeiros mestres e pela educação que me proporcionaram. Pelo exemplo de perseverança, dedicação e ética que sempre demonstraram.

À minha esposa, Josinete Mácola, pelo carinho, compreensão e incentivo constante, que sempre me apoiou em retornar aos meus estudos.

Aos meus amigos, colegas e em especial, à Equipe Técnica da CHD, através dos Doutores Iranilson Silva e Teodósio Zualo e da Eng. Uyla Migliora Azamor e da Técnica em Processamento de Dados Francianne Mileze, que compartilharam comigo momentos de aprendizado, alegria, desafios e conquistas. Vocês foram fundamentais, para tornar esta jornada mais leve e agradável.

Ao meu orientador, Dr. Hito Braga de Moraes, por sua orientação, paciência e por acreditar no meu potencial. Sua dedicação e conhecimento foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos professores e funcionários da UFPA, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, do Instituto de Tecnologia – ITEC, através do Dr. Prof. Nélio Nelio Moura de Figueiredo, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica. A Prof<sup>a</sup>. Dra. Susana Beatriz Vinzón, da UFRJ da COPPE, por ter aceitado em participar da banca.

E, finalmente, mas sempre o primeiro, a Deus, por me dar força, saúde e sabedoria para alcançar mais esta vitória.

A todos, o meu mais sincero agradecimento. Dedico este trabalho: “PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MINIMAS NO TRECHO ENTRE ITAITUBA/SANTARÉM - HIDROVIA DO RIO TAPAJÓS ESTADO DO PARÁ.”

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, agradeço a DEUS, assim como à Universidade Federal do Pará (UFPA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval do Instituto de Tecnologia (ITEC), pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por fornecer os recursos necessários, para a realização da pesquisa. Sou especialmente grato ao meu orientador, Dr. Prof. Hito Braga de Moraes, por sua orientação inestimável, paciência e apoio constante. Seu conhecimento e conselhos foram fundamentais para o sucesso deste estudo.

Também gostaria de agradecer às instituições de fomento que forneceram os dados para esta dissertação, em particular ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela concessão dos dados da Hidrovia do Rio Tapajós à UFPA.

Aos professores, colegas e amigos do Instituto de Tecnologia (ITEC), agradeço pela colaboração, pelas discussões enriquecedoras e pelo ambiente de estudo estimulante. Suas ajudas e incentivos, foram essenciais durante todo o processo.

Agradeço profundamente à minha família, em especial aos meus pais Lauro Alves Mácola e Alzira Loureiro Mácola, que, mesmo não fazendo mais parte deste mundo, serão sempre um incentivo de amor e apoio incondicional, ao longo de toda a minha jornada de vida.

Por fim, gostaria de fazer um agradecimento especial à minha esposa, Josinete Mácola, cuja presença e apoio contínuos foram uma fonte constante de motivação e inspiração. Sua paciência e compreensão tornaram possível a conclusão desta dissertação.

A todos, meu sincero muito obrigado. Agradeço a Deus por tudo!

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	23
1.3	HIPÓTESE .....	24
1.4	OBJETIVOS .....	25
1.4.1	OBJETIVO GERAL .....	25
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	28
3.1	REGIME HIDROLÓGICO DA BACIA AMAZÔNICA .....	28
3.1.1	FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA .....	29
3.2	FATORES NECESSÁRIOS PARA A SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO FLUVIAL ...	31
3.2.1	DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS – CARTAS NÁUTICAS ELETRÔNICAS.	32
3.2.2	SISTEMA DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA (BALIZAMENTO) .....	36
3.2.2.1	CANAL DE NAVEGAÇÃO .....	37
3.3	MODELOS HIDRODINÂMICOS .....	41
4	ASPECTO GERAL DO PROBLEMA.....	44
5	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	46
5.1	ANÁLISE HIDROLOGICA DO RIO TAPAJÓS.....	50
5.1.1	DADOS DE NÍVEL D'ÁGUA .....	51
6	METODOLOGIA.....	55
6.1	PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MÍNIMAS – APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	55
6.1.1	BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO .....	70
6.1.2	PREVISÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO DO RIO TAPAJÓS .....	76
6.1.3	DESCRIÇÃO DAS REDES NEURAS ADOTADAS PARA AS PREVISÕES ....	77

6.1.4	DESEMPENHO DAS PREVISÕES DAS REDES NEURAIIS.....	78
6.1.5	RESUMO DO DESEMPENHO DAS NARNN E CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS .....	89
6.2	PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.....	95
6.2.1	ANÁLISE INICIAL .....	95
6.2.2	CALIBRAÇÃO .....	97
7	RESULTADO - PREVISÃO DE PROFUNIDADES MÍNIMAS.....	105
7.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	108
8	CONCLUSÕES .....	116
8.1	RECOMENDAÇÕES.....	117
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Extensão das Vias Economicamente Navegadas em 2020 na Região Hidrográfica Amazônica. ....	17
Figura 2: Regiões hidrográficas das Vias Economicamente Navegadas em 2020, na Região Hidrográfica Amazônica. ....	18
Figura 3: A bacia do Tapajós, seus rios principais, afluentes e principais municípios. ....	19
Figura 4: Dados de nível d'água, medidos pela estação fluviométrica de Itaituba (Cod. ANA: 17730000) (linha verde) e da estação fluviométrica de Santarém (Cod. ANA: 17900000) (linha azul). A área de tracejado na cor azul claro, representa as vazões em Itaituba.....	21
Figura 5: Curva de variação média mensal, da altura da água e caracterização dos períodos hidrológicos (enchente, cheia, vazante e seca) do rio Tapajós em Santarém-PA.....	30
Figura 6: Carta Fluvial 4381A – Trecho de Santarém a Surucuí. Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até1981. ....	33
Figura 7: Composição das Cartas Náuticas, da Hidrovia do Rio Tapajós, entre os municípios de Itaituba e Santarém, estado do Pará. ....	35
Figura 8: Mapa da Hidrovia do Rio Tapajós, entre os municípios de Itaituba e Santarém, estado do Pará, com a indicação do traçado do canal de navegação.....	40
Figura 9: Histórico de registro de cotas, na estação fluviométrica Santarém.....	45
Figura 10: Mapa com a localizada e identificação do trecho, da Hidrovia do Rio Tapajós .....	46
Figura 11: Porto de Santarém (PA). ....	48
Figura 12: Mapa de localização das Estações de Transbordo de Carga (ETCs) em Miritituba, Itaituba/PA. ....	49
Figura 13: Mapa da área de estudo, indicando extensão dos trechos e a largura entre as margens do rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém/PA.....	50
Figura 14: Mapa de localização das estações fluviométricas/telemétricas, no trecho entre Itaituba e Santarém, Estado do Pará.....	53

Figura 15: Variação dos níveis d'água a cada 12 horas por dia, do período de 01/07/2021 a 01/01/2023, nas estações Itaituba (Cod. 17730000), Fordlândia (Cod. 17835600), Aveiro (Cod. 17835400) e Santarém (Cod. 17900000). Obs.: Os dados de níveis das 4 estações estão referenciados ao zero da régua. ....	54
Figura 16: Representação conceitual da malha computacional de modelos hidráulicos e de transporte de sedimentos unidimensionais (1D). ....	57
Figura 17: Classificação dos escoamentos. ....	58
Figura 18: Malha computacional do modelo 1D do rio Tapajós, no trecho entre os municípios de Itaituba (montante) à Santarém (jusante). ....	62
Figura 19: Detalhe da malha computacional 1D, mostrando as seções, margens e eixo do rio Tapajós. ....	63
Figura 20: Volume de controlo. ....	64
Figura 21: Perfil da Linha de Energia em escoamento livre. ....	67
Figura 22: Composição da seção transversal – método padrão. ....	69
Figura 23: Composição da seção transversal – método alternativo. ....	69
Figura 24: Condições de contorno utilizadas no modelo. ....	71
Figura 25: Fluxograma, do processo de cálculo, dos perfis diários de linha d'água, num horizonte de 14 dias, com base na modelagem hidráulica. ....	72
Figura 26: Mapa de localização do escopo geométrico, adotado no modelo hidrodinâmico. ....	74
Figura 27: Exemplos do tratamento das seções transversais, referente a delimitação das zonas de fluxo ineficiente. Nestes casos, referentes a lagoas marginais do rio Tapajós. Marcações em verde. ....	75
Figura 28: Escopo de modelagem, do trecho do rio Tapajós, de Itaituba a Santarém. ....	76
Figura 29: Arquitetura das redes neurais, utilizadas na previsão das séries temporais, do rio Tapajós. São utilizados 10 neurônios, na camada oculta, 20 defasagens temporais, para Itaituba e 30 para Santarém. ....	77
Figura 30: Esquema Walk-Forward, utilizado para a realização dos testes de desempenho, das previsões. ....	79
Figura 31: Histograma de erro do primeiro dia, de previsão em Itaituba. ....	79
Figura 32: Auto correlação da série de erros do primeiro dia, de previsão em Itaituba. ....	80

- Figura 33: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o primeiro e o sexto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE). ..... 82
- Figura 34: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o sétimo e o décimo segundo dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE). ..... 83
- Figura 35: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o décimo terceiro e o décimo quarto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE). ..... 84
- Figura 36: Histograma de erro do primeiro dia, de previsão em Santarém. .... 84
- Figura 37: Auto correlação da série de erros, do primeiro dia de previsão em Itaituba. .... 85
- Figura 38: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o primeiro e o sexto dia de previsão, considerando a estação de Santarém. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ). ..... 87
- Figura 39: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o sétimo e o décimo segundo dia de previsão, considerando a estação de Santarém. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE). ..... 88
- Figura 40: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o décimo terceiro e o décimo quarto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE). ..... 89
- Figura 41: Resumo do desempenho das previsões, das redes neurais. .... 90

Figura 42: Caracterização geomorfológica do rio Tapajós, ao longo de sua Hidrovia. .....	92
Figura 43: Curvas-chaves da estação Itaituba utilizadas para cálculo de descargas históricas pela ANA. ....	93
Figura 44: Simulação inicial (estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia). ....	95
Figura 45: Simulação inicial (estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro). ....	95
Figura 46: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Itaituba – Montante). ....	96
Figura 47: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia). ...	96
Figura 48: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro). ....	96
Figura 49: Dados observados e modelados na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 01, na simulação de calibração realizada para o ano 2022. ....	98
Figura 50: Dados observados e modelados na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 01, na simulação de calibração realizada para o ano 2022. ....	99
Figura 51: Coeficientes de manning, obtidos para o cenário 01. ....	99
Figura 52: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 01, na simulação de validação realizada para o ano 2021. ....	100
Figura 53: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 01, na simulação de validação realizada para o ano 2021. ....	100
Figura 54: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 02, na simulação de calibração realizada para o ano 2022. ....	101
Figura 55: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 02, na simulação de calibração realizada para o ano 2022. ....	102
Figura 56: Coeficientes de manning, obtidos para o cenário 02. ....	102
Figura 57: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 02, na simulação de validação realizada para o ano 2021. ....	103

- Figura 58: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 02, na simulação de validação realizada para o ano 2021. .... 103
- Figura 59: Séries de vazões e níveis na fronteira de montante do modelo (Itaituba). A porção da esquerda representa a série com dados reais observados na estação fluviométrica, enquanto que a porção da direita, representa a série prevista para o futuro..... 105
- Figura 60: Esquema explicativo da metodologia de determinação das profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação. Este exemplo, ilustra um caso específico para o rio Madeira, no entanto a metodologia aplicada é similar à aplicada no rio Tapajós. Painel superior esquerdo: mapa de localização. Painel superior direito: desenho do canal de navegação (eixo, seções transversais e soleiras), sobreposto ao mapa de previsão de profundidades mínimas. Painel inferior: perfil longitudinal de profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação. .... 107
- Figura 61: Mapas das profundidades mínimas, geradas na modelagem hidráulica no rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém, no dia 21/11/2023, com um horizonte futuro de 14 dias. Os mapas A1 a A5, mostram em detalhe as profundidades mínimas, calculadas para o dia 27/11/2023. .... 109
- Figura 62: Perfil longitudinal das profundidades mínimas calculadas, para o dia 27/11/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós. .... 111
- Figura 63: Perfil longitudinal das profundidades mínimas calculadas, para o dia 27/11/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós. .... 112
- Figura 64: Perfil longitudinal das profundidades mínimas, calculadas para o dia 27/11/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós. .... 113
- Figura 65: Nível d'água em Santarém, no final da previsão numérica do rio Tapajós. .... 114
- Figura 66: Nível na estação fluviométrica de Santarém (Cod. ANA 17900000), no mês de novembro de 2023, oscilando entre as condições de seca e seca extrema. .... 115
- Figura 67: Nível na estação fluviométrica de Itaituba (Cod, ANA 17730000), no mês de novembro de 2023, que desce e atinge a condição de seca extrema e nível mínimo histórico..... 115

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Profundidades mínimas calculadas, pela modelagem hidráulica com o HEC-RAS, nas áreas críticas na Hidrovia do Rio Tapajós, nas 4 semanas do mês de novembro. Valores com profundidades inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura, foram pintadas com a cor amarela. A cor verde foi pintada para as células em que a profundidade obtida na simulação numérica, foi inferior a 4,0 m, cujo valor é próximo ao do limite de restrição de calado. ....	114
--	-----

## RESUMO

Este estudo, tem como objetivo principal, avaliar a aplicação do modelo hidrodinâmico unidimensional (1D) HEC-RAS. Este modelo, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, é amplamente utilizado em estudos de hidrologia e engenharia fluvial, devido à sua capacidade de simular o fluxo de água em rios e canais. A aplicação do modelo HEC-RAS, no rio Tapajós, foi realizada considerando dados de variação de nível de água, de duas estações fluviométricas. Estes dados, foram utilizados para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, garantindo que as previsões geradas pelo modelo, sejam precisas e confiáveis. O modelo HEC-RAS, foi capaz de gerar previsões satisfatórias, para condições de seca severa, mas especificamente para o mês de novembro de 2023, influenciada pelo fenômeno climático El Niño. Este fenômeno, caracterizado por um aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico, pode causar alterações significativas no regime de chuvas e conseqüentemente, nos níveis de água dos rios. Os resultados das previsões do modelo HEC-RAS, foram coerentes com as profundidades observadas no mês de novembro/2023, indicando a baixa do nível d'água. Este resultado é de grande importância, pois permite a tomada de decisões antecipadas, para mitigar os impactos da seca, na navegação fluvial e nas comunidades ribeirinhas. Além disso, o modelo também, indicou a subida do nível de água no mês de dezembro/2023. Esta previsão é igualmente importante, pois permite a preparação para a gestão adequada, dos recursos hídricos. Em resumo, a aplicação do modelo hidrodinâmico unidimensional HEC-RAS, se mostrou uma ferramenta crucial, para a previsão de profundidades mínimas, no rio Tapajós, mostrou-se uma ferramenta eficaz. Através da calibração e validação do modelo, com dados de duas estações fluviométricas, foi possível gerar previsões precisas, para condições de seca extrema e para a subida do nível de água. Estas previsões, são de grande importância para a gestão dos recursos hídricos e para a mitigação dos impactos das alterações climáticas na região do rio Tapajós.

**Palavras-chave:** Hidrovia do Rio Tapajós. Modelo Hidrodinâmico. HEC-RAS. Previsão de Profundidades Mínimas. Dinâmica Fluvial. Recursos Hídricos.

## ABSTRACT

The main objective of this study is to evaluate the application of the one-dimensional (1D) hydrodynamic model HEC-RAS. This model, developed by the United States Army Corps of Engineers, is widely used in hydrology and river engineering studies due to its ability to simulate water flow in rivers and channels. The application of the HEC-RAS model to the Tapajós river was carried out considering data on water level variation from two river stations. These data were used for the calibration and validation of the hydrodynamic model, ensuring that the predictions generated by the model are accurate and reliable. The HEC-RAS model was able to generate satisfactory predictions for severe drought conditions, specifically for the month of November 2023, influenced by the El Niño climate phenomenon. This phenomenon, characterized by an abnormal warming of the waters of the Pacific Ocean, can cause significant changes in the rainfall regime and, consequently, in the water levels of the rivers. The results of the HEC-RAS model's predictions were consistent with the depths observed in the month of November, indicating the lowering of the water level. This result is of great importance as it allows for the making of early decisions to mitigate the impacts of drought on river navigation and riverside communities. In addition, the model also indicated the rise of the water level in the month of December. This prediction is equally important as it allows for preparation for possible floods and the proper management of water resources. In summary, the application of the one-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS proved to be a crucial tool for predicting minimum depths in the Tapajós river. Through the calibration and validation of the model with data from two river stations, it was possible to generate accurate predictions for extreme drought conditions and for the rise of the water level. These predictions are of great importance for the management of water resources and for the mitigation of the impacts of climate change in the Tapajós river region.

**Keywords:** Tapajós River Waterway. Hydrodynamic Model. HEC-RAS. Prediction of Minimum Depths. River Dynamics. Water Resources.

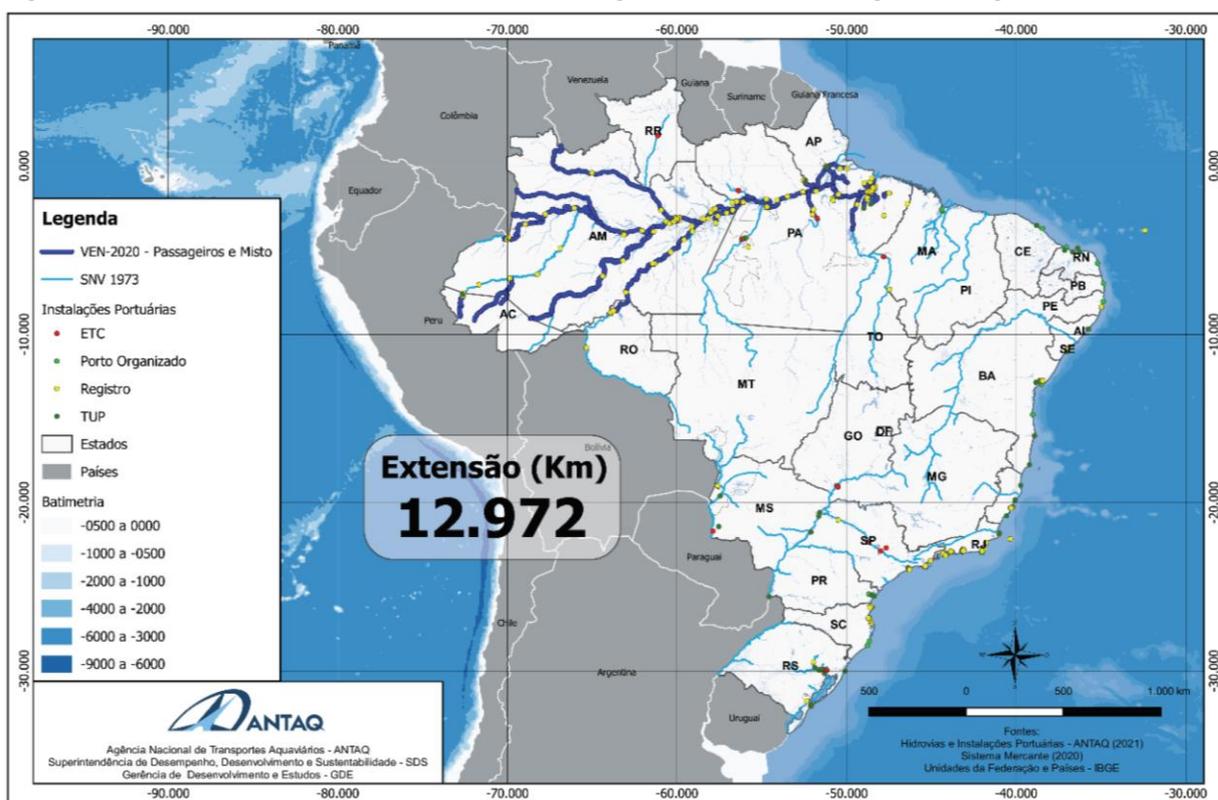
## 1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ, atualiza bianualmente, desde 2011, a matriz hidroviária de origem e destino (O/D) das cargas e passageiros em trânsito, nas vias aquaviárias interiores economicamente navegadas.

O levantamento realizado no ano de 2018 e documentado na Nota Técnica nº 23/2019/GDE/SDS1, apresentou uma estimativa de 18.616 (dezoito mil seiscentos e dezesseis) quilômetros de vias economicamente navegadas, sendo está a extensão total onde foi verificado o transporte longitudinal de cargas e passageiros no ano de 2018. A revisão dessa estimativa, busca acompanhar a dinamicidade dos transportes no país, principalmente com o cenário econômico, os efeitos das estiagens em algumas regiões do país, o aumento da infraestrutura de transportes, entre outras ocorrências ao longo dos 2 anos (2020) (ANTAQ, 2021).

Os principais rios, que integram a Amazônia brasileira, são navegáveis em grande parte de seu percurso e formam a espinha dorsal que estrutura a sua rede viária, cuja extensão é de 12.972 km, de acordo com o relatório da ANTAQ (2021).

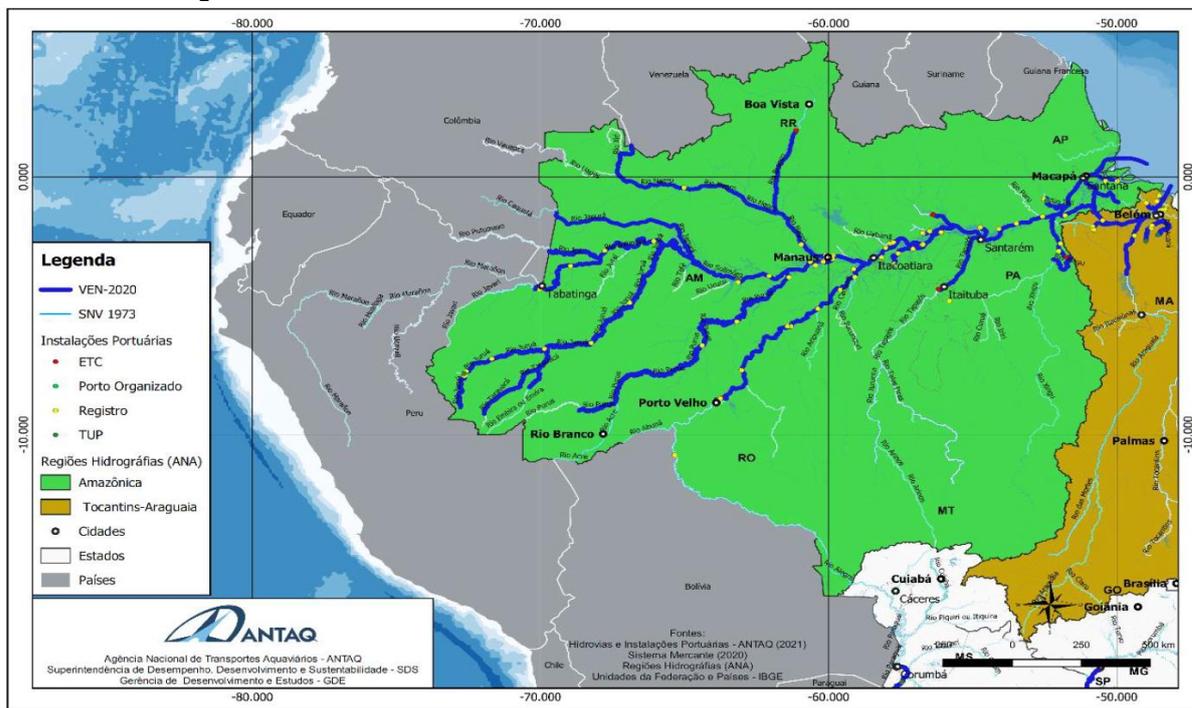
Figura 1: Extensão das Vias Economicamente Navegadas em 2020 na Região Hidrográfica Amazônica.



Fonte: ANTAQ, 2021.

Esta rede viária se localiza nas regiões hidrográficas Amazônica e do Tocantins-Araguaia, como se pode observar na Figura 2.

Figura 2: Regiões hidrográficas das Vias Economicamente Navegadas em 2020, na Região Hidrográfica Amazônica.



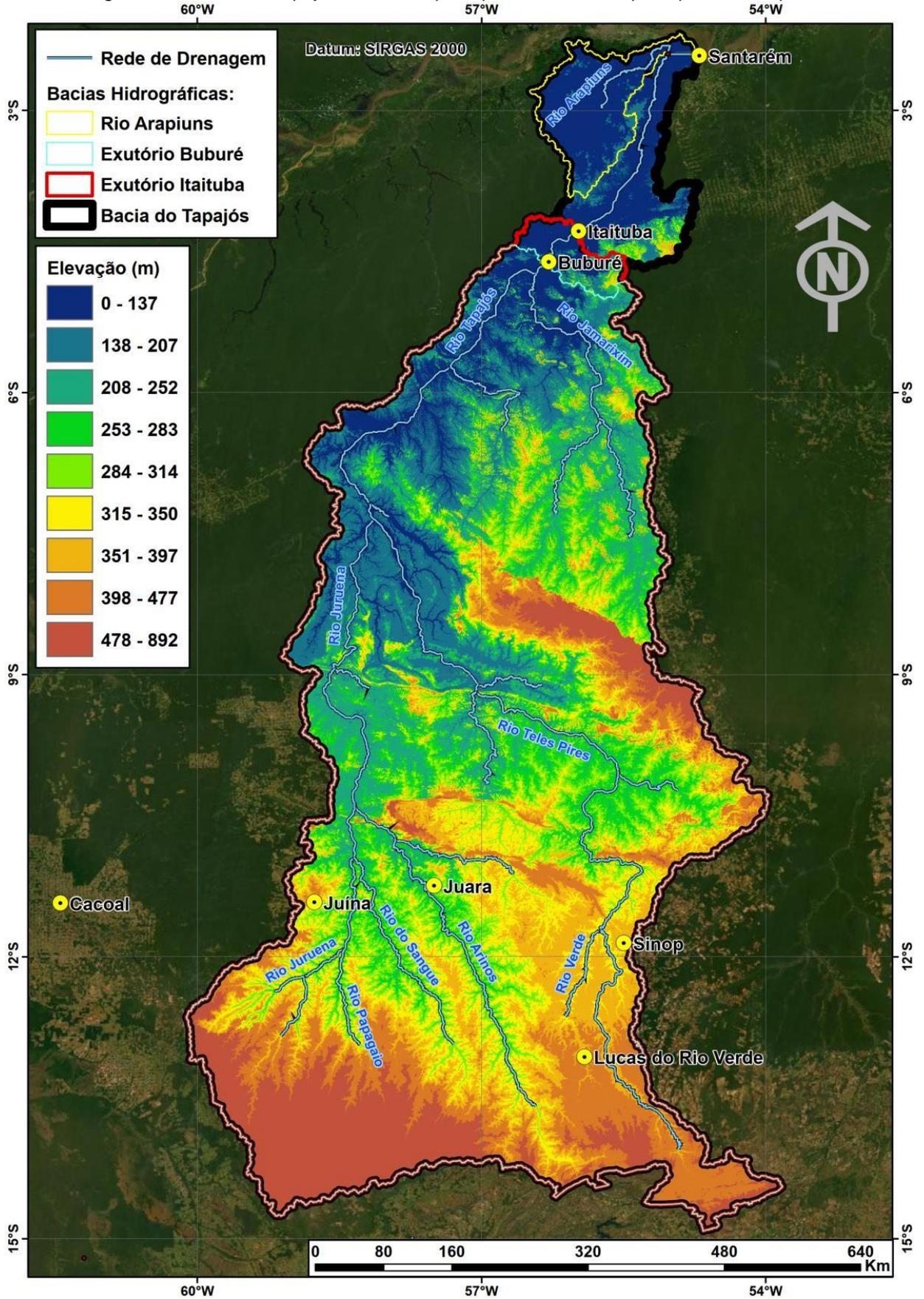
Fonte: ANTAQ, 2021.

Um dos grandes problemas na navegação nos rios da Amazônia, no que concerne o transporte de commodities, é a variabilidade do nível de água dos rios, que dependendo da situação, trazem problemas, de caráter socioeconômico para a região e o Brasil.

Considerando-se que a bacia do rio Tapajós é influenciada por diferentes sistemas climáticos, como as massas de ar equatoriais, as frentes frias, as zonas de convergência intertropical, entre outras, a quantidade de chuva é importante fator, que afeta diretamente a variação do nível d'água do rio Tapajós. A variação sazonal, dos níveis d'água, neste rio é altamente influenciada pelo regime de chuvas e pelo escoamento dos rios afluentes.

A sazonalidade da bacia, depende do regime de chuvas e da vegetação das sub-bacias dos rios Juruena e Teles Pires, seus formadores e Jamanxim, o principal afluente. MONTEIRO (2011), afirma que se todas as hidrelétricas planejadas, forem construídas nesses rios, haverá alterações no regime e no clima da bacia do rio Tapajós. As consequências para a biodiversidade, podem ser equivalentes a uma hecatombe na Amazônia.

Figura 3: A bacia do Tapajós, seus rios principais, afluentes e principais municípios.



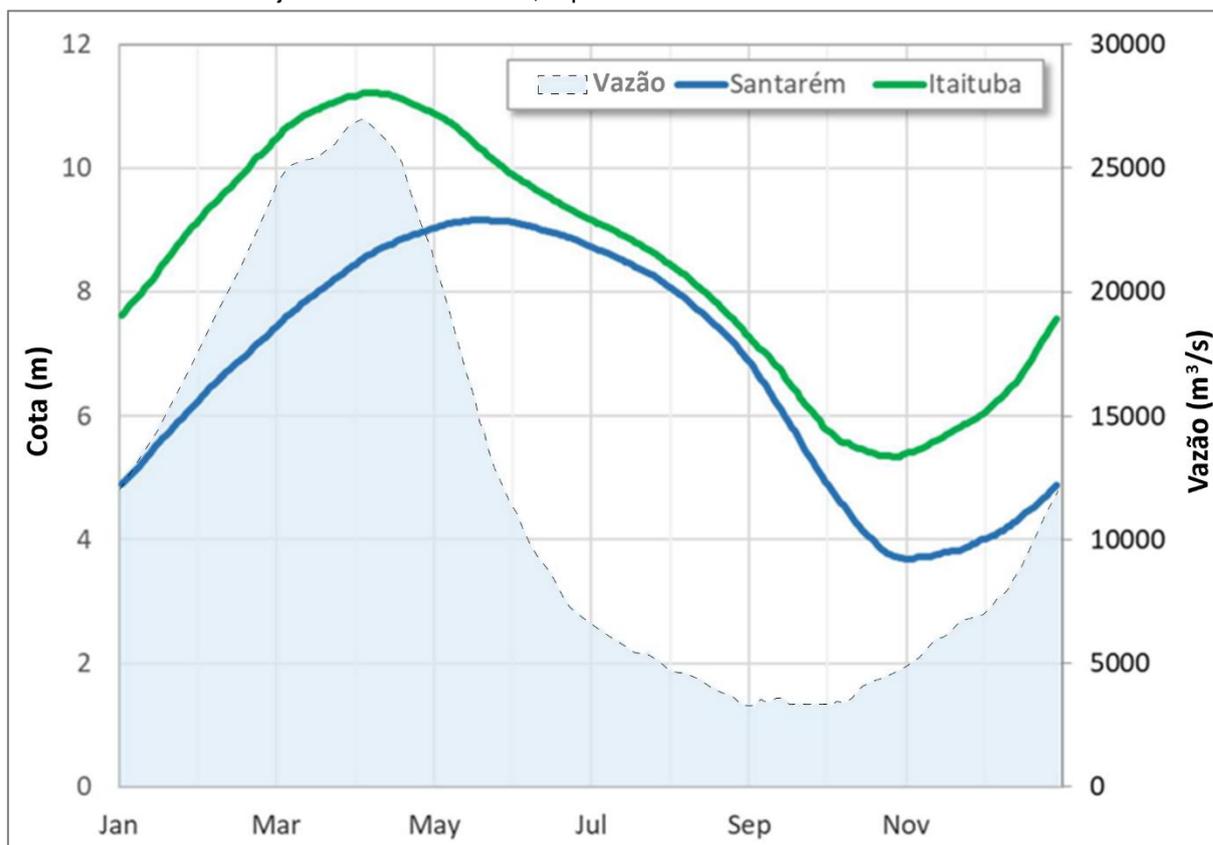
Fonte: O próprio autor.

O rio Tapajós é um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas. Devido à sua importância econômica, é utilizado para a navegação de navios de carga, barcas e passageiros. No entanto, os níveis d'água dos rios da Amazônia, sofrem variações sazonais significativas, ao longo do ano, o que pode afetar, a navegabilidade e as atividades econômicas, relacionadas com a maior vazão no período chuvoso, que ocorre entre os meses de janeiro a maio e com a menor vazão, no período de estiagem, entre os meses de agosto a novembro, é também responsável pelo abastecimento de água de várias cidades do Estado do Pará, como Itaituba e Santarém, além de ser utilizado também para a pesca.

No estudo hidrográfico elaborado pela USACE & o DNIT (2019), sobre o rio Tapajós, se constata que as vazões na estação fluviométrica de Itaituba (Cod. ANA: 17730000), variam anualmente entre 30.000 a 2.000 m<sup>3</sup>/s, entre os períodos chuvoso e seco. Se observa também, que nesta estação fluviométrica de Itaituba, a queda da vazão é abrupta, enquanto o nível cai lentamente, entre os períodos chuvoso e seco.

Os níveis d'água baixos, ocorrem geralmente nos meses de outubro e novembro, aproximadamente 1 a 3 meses, após as vazões mais baixas, que se tem registrados. Os níveis d'água em Itaituba, são fortemente influenciados pelo remanso do rio Amazonas, que atinge seu pico mais tarde do que no rio Tapajós. Portanto, mesmo que o mês de agosto tenha vazão baixa no rio Tapajós, o nível d'água está moderadamente alto neste período (Figura 4) (USACE & DNIT, 2019).

Figura 4: Dados de nível d'água, medidos pela estação fluviométrica de Itaituba (Cod. ANA: 17730000) (linha verde) e da estação fluviométrica de Santarém (Cod. ANA: 17900000) (linha azul). A área de tracejado na cor azul claro, representa as vazões em Itaituba.



Fonte: USACE & DNIT, 2019

Considerando as dimensões da Amazônia e os desafios para o seu desenvolvimento econômico, são necessárias ferramentas, que permitam avaliar de forma mais precisa, os efeitos de cenários hidrológicos extremos, para o planejamento de estimativas de impactos, sobre os diferentes setores econômicos e sociais.

Entre essas ferramentas, existem diversos modelos hidrológicos, que podem ser empregados por exemplo: para prever as cheias, sendo destacados por Oliveira, GUASSELLI E SALDANHA (2012); os de chuva-vazão; os de propagação da vazão, que realizam a previsão da vazão, a partir de dados de nível e/ou vazão de uma seção a montante de interesse; e os de relação cota-cota, em que os níveis na seção de interesse, são estimados considerando os níveis registrados a montante.

Ainda que os modelos hidrológicos, permitam modelar fisicamente os fenômenos hidrológicos, a aplicação desses modelos, deve ser criteriosa, em decorrência das incertezas, relativas à estrutura dos modelos, à estimativa dos parâmetros, às condições iniciais e de contorno. Portanto, a escolha do modelo a ser aplicado, depende das informações disponíveis, da precisão desejada e dos custos envolvidos.

Deste modo, para avaliar a variabilidade do regime hidrológico do rio Tapajós, principalmente na ocorrência de eventos extremos, que podem ser associados ao período de seca. Com o intuito de melhorar e aprofundar o conhecimento científico e o entendimento dos processos hidrológicos, da bacia hidrográfica do rio Tapajós. E em estudos meramente de pesquisa científica, bem como os de Engenharia, os modelos numéricos computacionais, vêm sendo cada vez mais utilizados, como ferramentas de análise do comportamento hidrodinâmico, em rios, lagos, estuários, oceanos e etc.. Este estudo, teve como objetivo a aplicação de um modelo numérico, para simulação e prognóstico de nível d'água (profundidades mínimas), ao longo do trecho do rio Tapajós, entre os municípios de Itaituba e Santarém (PA).

Aplicou-se então o HEC-RAS®, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE), é um modelo hidrodinâmico unidimensional, com módulos de cálculo, para situações de escoamento permanente ou variado no tempo. Onde se fez uma simulação para 4 semanas do mês de novembro de 2023, obtendo-se as profundidades mínimas nas áreas críticas do canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós.

Na simulação numérica da primeira semana do mês de novembro, se observou que na maioria das áreas críticas, as profundidades são inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura na hidrovia.

No mês de novembro de 2023, o nível na estação fluviométrica de Itaituba (Cod, ANA 17730000), desce e atinge a condição de seca extrema e nível mínimo histórico. O que corrobora, as previsões de agravamento da seca no mês de outubro/2023, que assola a região amazônica, mas se mantendo também no mês de novembro.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Existem apenas dois períodos bem marcados em toda a região Amazônica: período de chuvas intensas e período de chuvas esparsas. No entanto, isso só não é suficiente, no sentido de racionalizar o uso de hidrovias na Amazônia, dentro do contexto do ciclo hidrológico. Segundo SANT'ANNA (1998), as condições naturais da Amazônia, fazem com que o transporte hidroviário, seja tomado, como um ponto de referência básico, para a rede de transporte.

Neste contexto, a região hidrográfica do rio Tapajós, consiste em uma região com grande potencial hídrico, sendo que atualmente, existem projetos previstos, para construção de hidrelétricas. A região também é considerada estratégica, devido à localização entre os estados do Pará e Mato Grosso, facilitando o escoamento de produtos agrícolas, viabilizando a construção de portos e terminais hidroviários.

Logo, o estudo da variação dos níveis d'água do rio Tapajós é importante para a navegação, pois a profundidade da água, afeta diretamente o "calado" dos barcos, barcaças e navios, que navegam na região. Quanto menor a profundidade, menor o calado e mais difícil é a navegação. Além disso, a variação dos níveis d'água, também afeta a velocidade da correnteza, que pode dificultar ou facilitar a navegação.

Para garantir a segurança e eficiência da navegação, é importante que haja informações precisas, sobre a profundidade e velocidade da água, em diferentes períodos do ano. Sendo assim, o estudo utilizando ferramentas, que possam auxiliar na previsão da variação dos níveis d'água é fundamental, para o planejamento de rotas de navegação, a definição de horários e períodos mais seguros, para a navegação e a adequação, do tamanho e carga dos barcos, das barcaças e dos navios utilizados.

### 1.3 HIPÓTESE

Dados de níveis d'água, vazão líquida, vazão sólida e de topobatimetria, devem possibilitar o desenvolvimento de estudos, por meio de ferramentas computacionais, visando a uma navegação mais econômica e segura, ao longo da Hidrovia do Rio Tapajós, no trecho entre Santarém e Itaituba PA.

A aplicação do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, quando calibrado e validado, com dados de variação de nível d'água de estações fluviométricas, instaladas no rio Tapajós, no trecho entre Santarém e Itaituba, pode prever, profundidades para cenários de seca severa e/ou enchentes. Essas previsões, podem ser fundamentais para a gestão eficaz dos recursos hídricos e para a mitigação dos impactos das alterações climáticas na região do rio Tapajós.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GERAL**

Este estudo, tem como objetivo geral, desenvolver um modelo de previsão de profundidades mínimas, para otimizar a navegação na Hidrovia do Rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém, no estado do Pará. Para isso, será utilizado o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), que é um software, desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers, para realizar análises hidráulicas de canais, rios e sistemas de drenagem. Ele é amplamente utilizado, para modelagem e simulação de fluxo de água, em canais e rios, permitindo a avaliação de riscos de inundação, projetos de controle de enchentes, simulação do transporte de sedimentos e estudos de avaliação morfológica, bem como, diversos outros estudos de impacto ambiental.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Implementar através do software HEC-RAS, um modelo hidrodinâmico unidimensional (1D), para a Hidrovia do Rio Tapajós, para a previsão de profundidades mínimas, ao longo do trecho entre Itaituba e Santarém, no estado do Pará;
- b) Calibrar e validar o modelo HEC-RAS (1D), utilizando dados de variação de nível de água de duas estações fluviométricas, garantindo a precisão das previsões geradas pelo modelo hidráulico;
- c) Utilizar o modelo HEC-RAS (1D), para prever condições de seca extrema influenciadas pelo El Niño, comparando as previsões do modelo com as profundidades observadas nos postos fluviométricos;

## **2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

No Capítulo 1, Introdução, aborda-se a importância do entendimento sobre as variações climáticas e como afetam a hidrologia da região Amazônica, principalmente no que diz respeito, as variações do nível d'água e como afetam a navegação e os transportes nas hidrovias da região. Estando nesse contexto, a Hidrovia do Rio Tapajós, no trecho entre Itaituba e Santarém. Faz-se também, uma breve abordagem da importância da aplicação de modelos hidrológicos, para avaliar a variabilidade do regime hidrológico, que possam auxiliar na previsão da variação dos níveis d'água, para facilitar o planejamento de rotas de navegação segura e a adequação do tamanho e carga dos barcos, das barcaças e dos navios utilizados, principalmente na ocorrência de eventos extremos, que podem ser associados ao período de seca. Também se apresenta os objetivos a serem verificados nesse estudo, principalmente no que diz respeito a aplicação de ferramenta de modelagem numérica, para a previsão de profundidades mínimas, para esse trecho de interesse do estudo.

No Capítulo 2, Estrutura da Dissertação.

No Capítulo 3, Referencial Teórico, foram detalhados estudos sobre o regime hidrológico da região amazônica, assim como também, sobre a variação do nível d'água. Além disso, abordou-se também alguns fatores necessários para a segurança da navegação, tais como: documentos cartográficos, sistema de sinalização náutica (balizamento), definição do canal de navegação e sistema de divulgação dos níveis d'água. E uma breve contextualização da aplicação da modelagem numérica, na previsão de profundidades mínimas.

No Capítulo 4, Aspecto Geral do Problema, foi apresentado um panorama geral do problema em estudo, onde foram discutidas informações sobre a região amazônica, no que diz respeito aos eventos extremos hidrológicos, influenciados pela ocorrência do fenômeno meteorológico EN (El Niño). Abordando um pouco das consequências desses eventos e suas influências na hidrologia, resultando em grandes flutuações do nível dos rios o que, conseqüentemente, resulta na ocorrência dos eventos extremos hidrológicos.

No Capítulo 5, Definição da Área de Estudo, com foco para a importância dos Portos de Itaituba e Santarém, no que diz respeito ao transporte de commodities. Detalhou-se a rede fluviométrica do trecho, que atualmente conta com quatro estações fluviométricas/telemétricas.

No Capítulo 6, Metodologia, detalha-se o modelo hidrodinâmico 1D, que vêm sendo cada vez mais utilizados, como ferramentas de análise do comportamento hidrodinâmico em rios, lagos, estuários, oceanos e etc. Como é o caso do HEC-RAS®, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE), foi desenvolvido com o objetivo de realizar simulações computacionais para resolver a hidráulica de canais abertos, incluindo vazão em regime permanente (1D), vazão em regime não permanente (1D, 2D e 1D/2D), transporte de sedimentos em regime quase não permanente e qualidade da água (BRUNNER, 2016). Aborda-se também, o escopo da modelagem para a previsão de profundidades mínimas; a aplicação de rede neural para prevê o comportamento do nível da água, para os próximos 14 dias. Também se apresenta a calibração do modelo hidrodinâmico utilizando dados das estações fluviométricas.

No Capítulo 7, Resultados, se apresenta os resultados de uma rodada de simulação no modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para previsão das profundidades mínimas, ao longo do trecho de interesse ao estudo, para quatro senários, ou seja, para quatro semanas do mês de novembro de 2023. Onde se constatou valores com profundidades inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura.

No Capítulo 8, Conclusões, apresenta-se as conclusões da avaliação dos dados das estações fluviométricas Aveiro e Fordlândia, que foram utilizados na calibração e validação do modelo computacional hidrodinâmicos HEC-RAS. Assim como também, uma breve contextualização dos resultados satisfatórios, alcançados da aplicação do HEC-RAS, para a previsão de profundidades mínimas, em um evento de seca severa no rio Tapajós.

No Capítulo 9, Referências Bibliográficas, foram listadas todas as Referências Bibliográficas utilizadas ao longo da dissertação. Foram incluídos livros, artigos científicos, relatórios técnicos e outras fontes relevantes, para embasar a pesquisa e fundamentar as discussões apresentadas nos capítulos anteriores.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 REGIME HIDROLÓGICO DA BACIA AMAZÔNICA**

O rio Amazonas, apresenta grande regularidade no regime hidrológico anual, quando as sub-bacias, estão no regime de estiagem, são compensadas pelas sub-bacias na época de cheia, assim, o regime hidrológico anual, varia pouco de ano para ano, porém quando se trata da sazonalidade essa normalidade muda (CALLÈDE et al. (2002) e MOLINIER et al. (1996)). A estação chuvosa, que vai de novembro à abril, com 70% da precipitação total anual e a estação seca, que vai de maio a outubro, somente com 30% (SATYAMURTY et al. (2013)).

Segundo os estudos de TOMASELLA et al. (2013), o regime de chuvas na bacia Amazônica é diferente nos afluentes da margem esquerda e da direita, que são influenciadas pelo deslocamento da ZCIT e pela ZCAS, respectivamente. Observou que a precipitação máxima nos afluentes da margem direita, ocorre dois meses antes (dezembro-janeiro-fevereiro), da precipitação máxima na calha principal (fevereiro-março-abril) e 6 meses mais cedo, do que sobre os afluentes da margem esquerda (junho-julho-agosto). Já a precipitação mínima nos afluentes da margem direita, ocorre em junho-julho-agosto, seis meses mais cedo, do que o mínimo no extremo norte, afluentes da margem esquerda, que são, em janeiro-fevereiro-março.

Assim VILLAR et al. (2009), que estudaram a vazão das sub-bacias, da bacia Amazônica, incluindo o Andes e o Peru, durante o período 1974-2004, concluíram que existe uma estabilidade da vazão média no fluxo principal em Óbidos, que é explicada por características regionais inversas, às que envolvem os rios andinos, ocorrendo diminuição do “runnof” na fase baixa na região sul e o aumento na fase alta na região noroeste, a partir dos anos noventa. Mostraram também que as mudanças nos extremos de vazão, estão relacionadas com a variação regional plurianual de precipitação e a circulação atmosférica. Portanto, esse regime de chuvas influencia todo o ciclo hidrológico.

As vazões dos principais rios das bacias hidrográficas da América do Sul, tiveram uma tendência de aumentar desde o ano de 1970, podendo refletir em impactos de grande escala, nas mudanças climáticas, além de periodicidades com eventos EM. Esta tendência, foi verificada nos estudos de GARCÍA e MERCHOSO (2005), a partir de 30 anos de dados (1968 a 1980). Estes resultados, também foram comprovados por SATYAMURTY et al. (2013), pois detectaram que o nível das águas aumentou 10 cm ano<sup>-1</sup>. O ciclo anual da precipitação na região centro-sul da Amazônia, estudado por SOUZA et al. (2000) e MARENGO et al. (2001), constataram que mostra um máximo, durante o verão austral, que está relacionado com a ZCAS, enquanto a porção norte da Amazônia, apresenta o máximo no outono austral devido a ZCIT, mais ao sul, também confirmado por TOMASELLA et al. (2013).

### **3.1.1 FLUTUAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA**

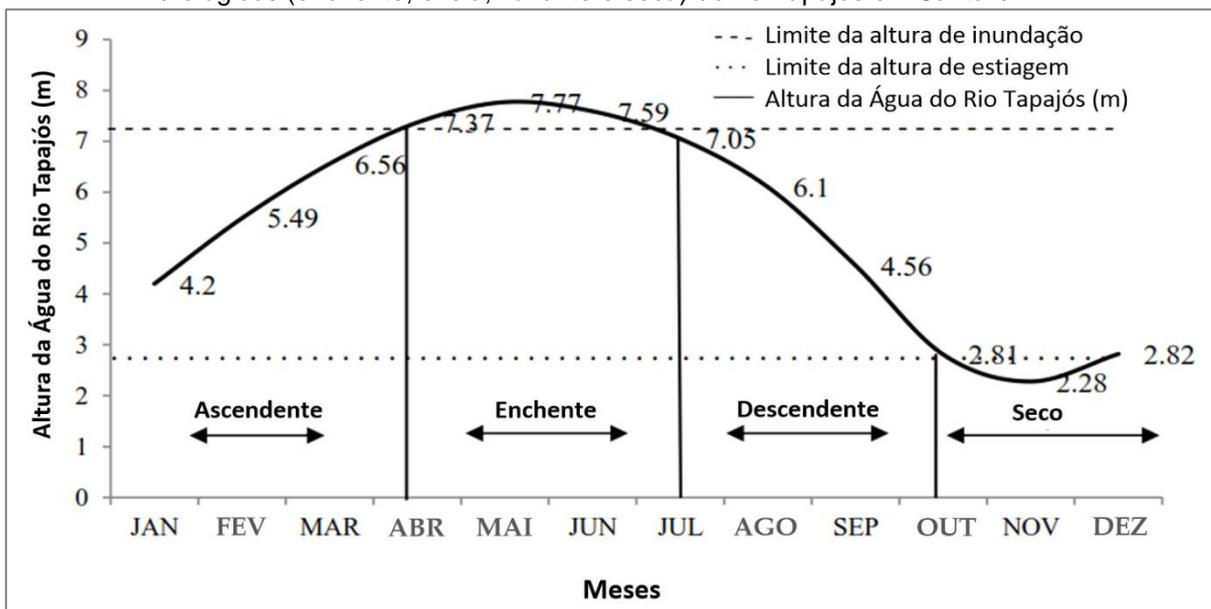
Segundo BENTES (2018), conhecer a dinâmica hidrológica da região Amazônica é o fator chave na medição das mudanças, que ocorrem no ambiente aquático. Uma vez que esses ambientes, são influenciados principalmente pela periodicidade dos ciclos de chuvas e degelo nos Andes, o que provoca uma oscilação anual, de grande amplitude no nível das águas dos rios amazônicos (ISAAC e BARTHEM, 1995; RAMALHO et al., 2009).

Em seu estudo BENTES (2018), através dos dados de nível fluviométrico (nível de água) do rio Tapajós, do período de 2000 a 2015, conseguiu identificar os períodos hidrológicos (“pulso de inundação”) da região, com a variabilidade hidrológica, durante o período analisado, apresentando um padrão unimodal anual, resultando em períodos bem definidos de enchente e vazante (Figura 5). Devido a esta flutuação temporal do nível do rio, quatro fases hidrológicas (enchente, cheia, vazante e seca), foram delimitadas durante um ciclo sazonal completo. Destes, destacam-se como períodos extremos as estações cheias e secas (Figura 5).

A determinação das estações em Santarém, como cheia e seca, foi feita pelo nível máximo da água (7,77 m) em maio e o mínimo (2,28 m) em novembro. Assim, conseguimos mostrar intervalos de níveis de água, para a determinação dos meses que compõem as diferentes fases hidrológicas. Para isso, foram consideradas cheias ( $3 \text{ m} \leq \text{nível} \leq 7,10 \text{ m}$ ), enchentes ( $7,10 \text{ m} \geq 3 \text{ m}$ ) e seca ( $3 \text{ m} > \text{nível}$ ) (Bentes, et al., 2018). A cota de alerta de cheia do rio Tapajós, para o município de Santarém é de 7,10 m (SUDAM/UFPA, 2017).

Os dados referentes à altura de nível de água, oriundos de estações convencionais, constituem-se em cotas médias diárias, disponibilizados pela ANA, no portal HIDROWEB (ANA, 2020a).

Figura 5: Curva de variação média mensal, da altura da água e caracterização dos períodos hidrológicos (enchente, cheia, vazante e seca) do rio Tapajós em Santarém-PA.



Fonte: BENTES, et al., 2018. Revista Brasileira de Geografia Física v.11, n.04 (2018) 1478-1489.

De acordo com a Figura 5, a oscilação do nível das águas durante o ciclo hidrológico do rio Tapajós, caracteriza-se pelos seguintes períodos (BENTES, et al., 2018):

- ✓ Enchente (janeiro a março), com cota média de 5,41 m, cota mínima em janeiro de 4,20 m e cota máxima em março de 6,56 m;
- ✓ Cheia (abril a junho), com cota média de 7,44 m, sendo cota mínima de 7,37 m em abril e cota máxima em maio de 7,77 m, caracterizada por baixa oscilação do nível da água;
- ✓ Vazante (julho a setembro), com cota média de 5,33 m, cota mínima de 4,56 m em setembro e cota máxima de 7,05 m em julho; e
- ✓ Seca (outubro a dezembro), com nível médio de 2,63 m e seus níveis mínimo e máximo, com valores de 2,28 m e 2,82 m, em novembro e dezembro, respectivamente.

### 3.2 FATORES NECESSÁRIOS PARA A SEGURANÇA DA NAVEGAÇÃO FLUVIAL

De acordo com o Livro “Navegação: A Ciência e a Arte (2019), Volume III”, os principais fatores necessários para garantir a segurança da navegação nas hidrovias interiores, especialmente naquelas de condições de navegabilidade restritas, são:

- 1 – *Existência de documentos cartográficos (cartas náuticas ou croquis de navegação) adequados, representando a hidrovia em escala apropriada e de publicações de segurança da navegação (Roteiro Fluvial, Lista de Faróis e de Sinais Cegos, Avisos aos Navegantes, etc.) atualizadas, cobrindo a hidrovia;*
- 2 – *Existência de um sistema de Sinalização Náutica (balizamento) eficiente, que indique continuamente ao navegante as ações a empreender para manter-se navegando no canal, ou os perigos a evitar;*
- 3 – *Existência de um sistema de divulgação do nível do rio, em diversas estações fluviométricas, ao longo da hidrovia;*
- 4 – *Familiarização dos navegantes com o trajeto, ou seja, conhecimento prático das características e particularidades da hidrovia, o que os torna capazes de atender prontamente às diversas manobras necessárias à permanência da embarcação no canal de navegação;*
- 5 – *Emprego de métodos e técnicas próprios da navegação fluvial;*
- 6 – *Existência de normas e regulamentos especiais para o tráfego nas hidrovias, visando um transporte seguro e a salvaguarda da vida humana e do meio ambiente;*
- 7 – *Emprego de embarcações adequadas e providas de recursos específicos para a navegação fluvial.*

Pode-se então afirmar, que a segurança da navegação fluvial é função desses sete fatores, porém, dentro desse contexto, vamos abordar os 3 (três) primeiros fatores, considerando o trecho de interesse do rio Tapajós:

### **3.2.1 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS – CARTAS NÁUTICAS ELETRÔNICAS**

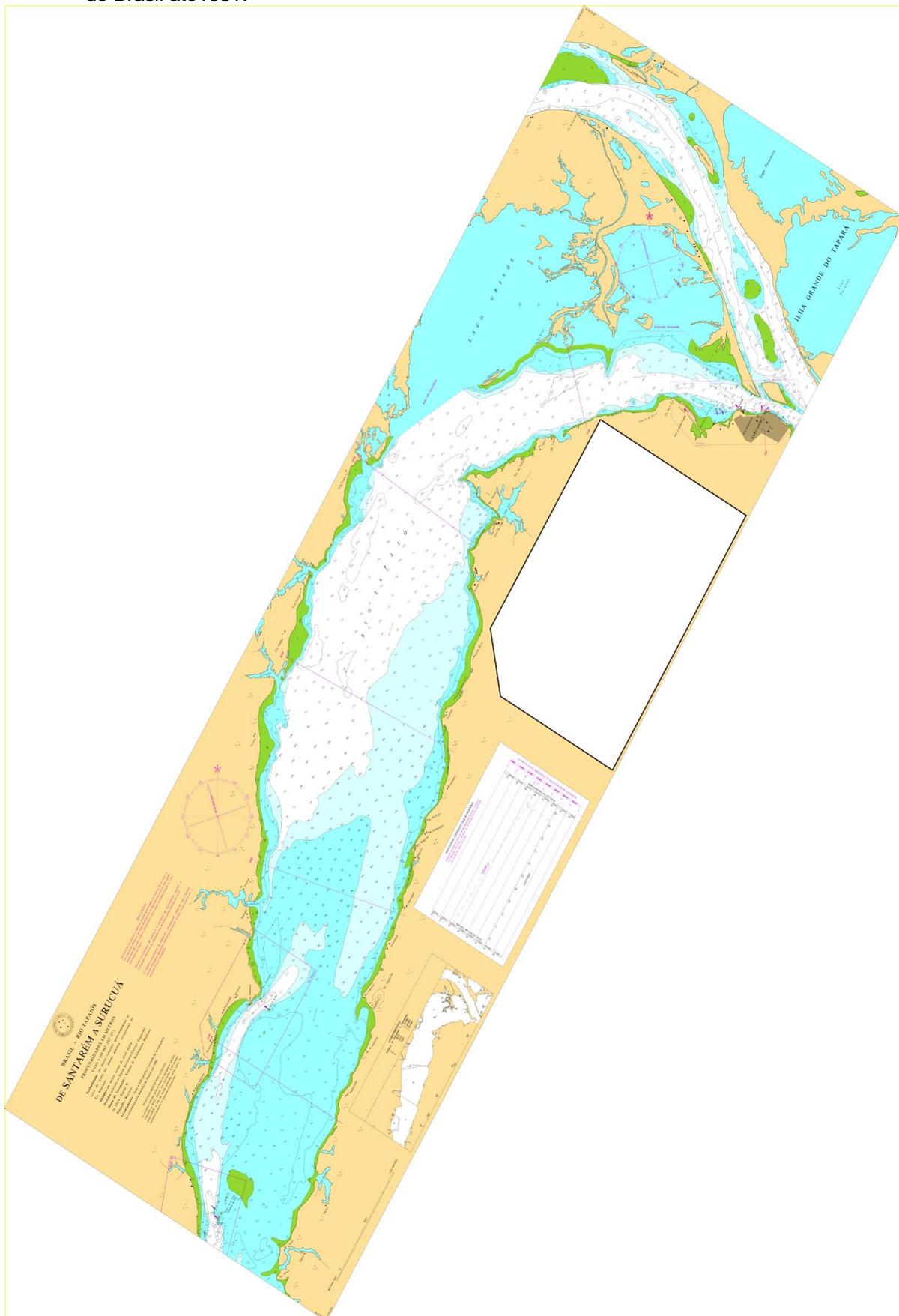
A especificação de sistemas para automação da carta náutica, vem sendo coordenada pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI), órgão conselheiro da Organização Marítima Internacional (OMI) e parte da Organização das Nações Unidas, para regulamentação da carta eletrônica (OLIVEIRA, 1995).

No Brasil, o órgão responsável por esse desenvolvimento é a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), vinculada ao Ministério da Marinha, a DHN, possui projetos para a produção automática de cartas e desenvolvimento de uma base integrada de dados oceanográficos, que são a base de dados da carta eletrônica.

A carta náutica é o documento cartográfico, destinado a fornecer aos navegantes, informações que lhes permitam conduzir com segurança, as suas embarcações, possibilitando a avaliação precisa de distâncias e direções e a localização geográfica de pontos, áreas e detalhes.

As cartas fluviais, são oriundas de levantamentos hidrográficos sistemáticos e precisos, construídas de acordo com os mesmos princípios das cartas para navegação marítima, porém com características e peculiaridades próprias (Figura 6).

Figura 6: Carta Fluvial 4381A – Trecho de Santarém a Surucuí. Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até 1981.



Fonte: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>.

As cartas fluviais, são construídas numa escala tal que, a topografia subfluvial da área por elas abrangida é representada com o grau de detalhe, precisão e clareza exigidos. Assim, a escala das cartas de uma determinada hidrovia, depende das dimensões e características desta hidrovia.

Nas cartas fluviais, são representadas as profundidades, as isóbatas e as demais informações de interesse para o navegante, tais como:

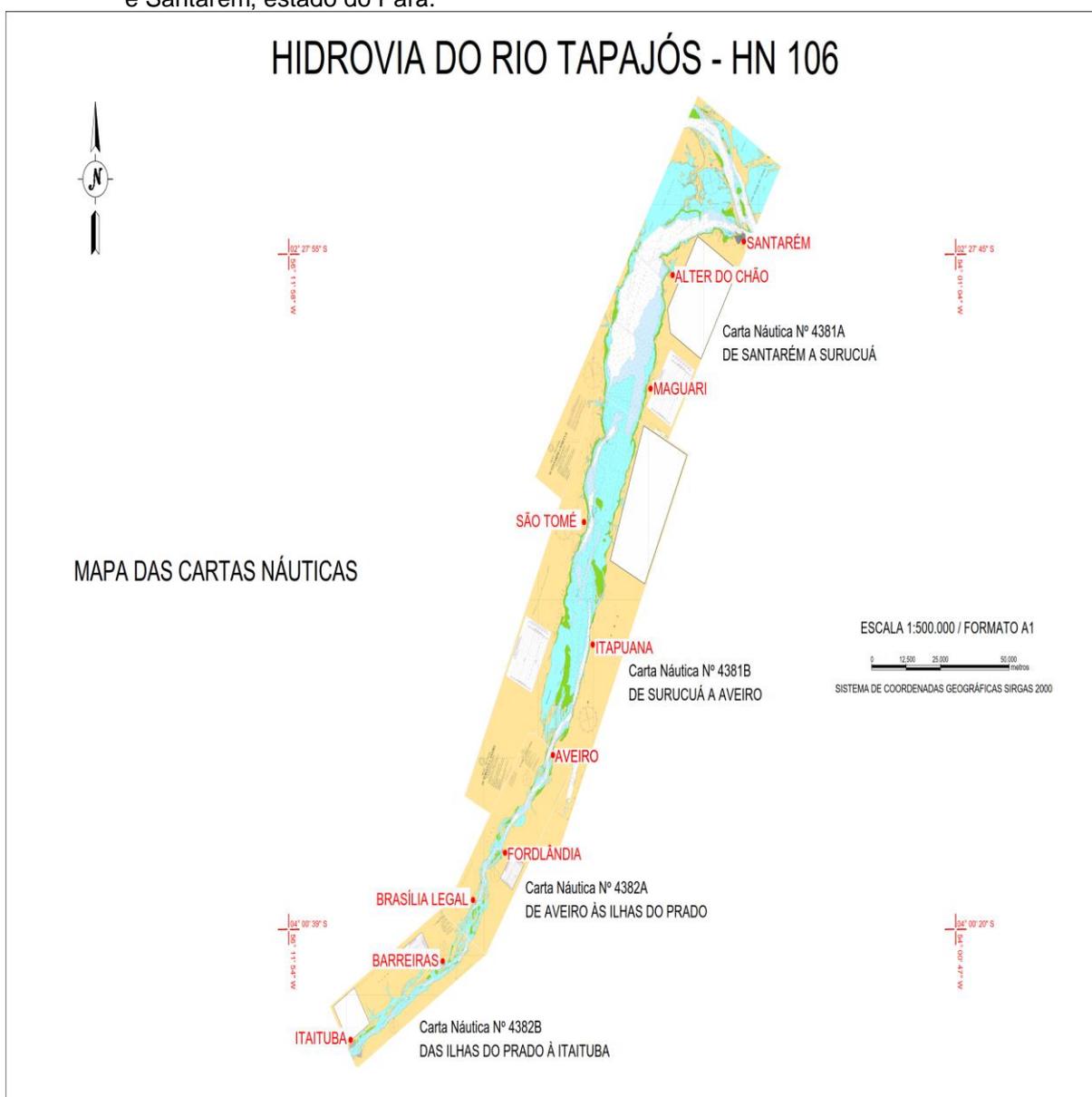
- ✓ Bancos, pedras, obstáculos submersos, cascos soçobrados ou qualquer outro perigo à navegação;
- ✓ A representação procura ressaltar o talvegue, ou canal mais profundo, por onde deve ser conduzida a navegação;
- ✓ Todo o balizamento existente;
- ✓ As marcas naturais e artificiais utilizadas, como auxílio à navegação, realçando a representação de árvores notáveis, tipos de vegetação nas margens (especialmente as mudanças de um tipo de vegetação para outro);
- ✓ Barrancos;
- ✓ Elevações notáveis;
- ✓ Construções nas margens;
- ✓ Bocas de riachos; e
- ✓ Diversos outros detalhes de menor importância, em cartas marítimas, mas que constituem referências significativas, para a navegação fluvial.

No final do ano de 2021, o Centro de Hidrografia e Navegação do Norte (CHN-4), publicou, pela primeira vez, uma Carta Náutica Eletrônica da Região Amazônica, atendendo ao Plano de Readequação dos Setores de Hidrografia e Cartografia, proposto pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (OLIVEIRA, 1995).

As cartas náuticas existentes, ao longo da Hidrovia do Rio Tapajós e seus respectivos trechos, entre os municípios de Santarém e Itaituba, Estado do Pará, estão listadas abaixo e sua composição, ou seja, união em um único mapa está apresentado na Figura 7 a seguir:

- ✓ 4381A - DE SANTARÉM A SURUCUÁ – Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até1981;
- ✓ 4381B - DE SURUCUÁ A AVEIRO - Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até 1981;
- ✓ 4382A - DE AVEIRO ÀS ILHAS DO PRADO - Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até 1982; e
- ✓ 4382B - DAS ILHAS DO PRADO À ITAITUBA- Levantamentos efetuado pela Marinha do Brasil até 1982.

Figura 7: Composição das Cartas Náuticas, da Hidrovia do Rio Tapajós, entre os municípios de Itaituba e Santarém, estado do Pará.



Fonte: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Acessado em junho de 2023.

Os levantamentos que geraram estas cartas náuticas, datam de 41 e 42 anos respectivamente. Nessas cartas fluviais, estão indicados os Pontos Críticos no trecho em estudo, ou seja, os locais que oferecem riscos à navegação, no entanto, passados mais de 4 décadas, utiliza-las como referência para identificar a posição desses perigos, pode não ser o meio mais indicado, pois nesse período de mais de 40 anos, a morfologia do rio e o próprio canal de navegação, deve ter passado por mudanças consideráveis. No entanto, até os dias atuais, essas cartas, são utilizadas como referência para a navegação, nesse trecho da Hidrovia do Rio Tapajós.

Em um rio ocorrem, com razoável frequência, modificações naturais que alteram as condições de navegabilidade, de determinados trechos, com mudanças no canal de navegação. Devido a isso, as cartas fluviais, têm que ser permanentemente atualizadas, com elementos oriundos de levantamentos hidrográficos de verificação e atualização, para que não fiquem obsoletas. Da mesma forma, o posicionamento dos sinais do balizamento correspondente, também deve ser alterado, para que indique sempre ao navegante o melhor caminho a seguir.

Os Avisos aos Navegantes irradiados, especialmente pelas estações de radiodifusão comercial, existentes na região da hidrovia e os folhetos periódicos publicados, também constituem importantes fatores, para a segurança da navegação fluvial.

### **3.2.2 SISTEMA DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA (BALIZAMENTO)**

As ações da navegação fluvial, ou seja, as manobras que se tem que empreender para manter-se navegando corretamente dentro do canal, especialmente numa via fluvial de condições de navegabilidade restritas, ocorrem numa sequência, tal que se torna imprescindível, que os documentos cartográficos (cartas fluviais ou croquis de navegação), sejam acompanhados de balizamento adequado, para garantir uma navegação segura.

A regulamentação nacional da sinalização náutica, está discriminada no documento Normas da Autoridade Marítima para Auxílios à Navegação, criado pela DHN, abreviadamente conhecida como NORMAM-17/DHN. Neste documento, constam diversos tópicos acerca da sinalização no Brasil, divididos em capítulos e seções, para melhor absorção do regulamento (PINA e NASCIMENTO, 2016).

De acordo com o documento, o navegante possui três principais responsabilidades para com a sinalização náutica, de modo a tornar esse sistema o mais eficiente e seguro possível (PINA e NASCIMENTO, 2016).

- *A primeira delas é a que o navegante, não deve se limitar aos auxílios a navegação em determinada área, sendo sua obrigação, possuir todas as publicações e cartas náuticas atualizadas, caso precise consultar. O aviso aos navegantes é uma das principais maneiras do navegante, se manter atualizado acerca de mudanças na sinalização.*
- *O segundo caso, decorre do fato de sinais náuticos flutuantes, poderem se afastar de suas posições originais projetadas. Isso demonstra, que a posição desse tipo de sinal, não se deve ser confiado, para a determinação da posição da embarcação do navegante e nem de uma marcação. Existem diversos fatores como vento, corrente, por exemplo, que podem afastar um sinal flutuante para outro local.*
- *Por último, qualquer irregularidade constatada nesses auxílios de navegação, o próprio navegante, deverá comunicar o quanto antes o fato à Capitania/Delegacia/Agência mais próxima ou ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).*

### **3.2.2.1 CANAL DE NAVEGAÇÃO**

Segundo as Normas da Autoridade Marítima para Navegação (NORMAM 28), da Marinha Brasileira, “o espaço físico, natural ou não, nas águas dos oceanos, mares, rios, lagos e lagoas utilizado para a navegação é classificado como via navegável”. Além disso, “a navegação fluvial e lacustre, em enseadas, rios, baías e angras ou de travessia destinada para o transporte, denomina-se transporte hidroviário interior”. Por último, “vias de navegação interior, com características padronizadas para determinados tipos de embarcações, mediante obras de engenharia e de regulação, dotada de sinalização e equipamentos de auxílio à navegação, são classificadas como hidrovias” (ROSSI, 2020).

Quando um navio trafega em um canal ou uma baía, a profundidade do local é uma informação estratégica para sua segurança. A embarcação não pode raspar no leito, sob o risco de bater seu casco em alguma rocha ou objeto (e até naufragar) ou, se encontrar bancos de areia, encalhar (PORTOS & NAVIOS, 2015).

Nessas condições, o navio deve manter uma distância segura do leito marítimo (ou fluvial). Para isso, é definido um limite da profundidade a ser atingida por seu casco (especificamente, por sua quilha). A altura da parte do casco que permanece submersa é o calado desse cargueiro (PORTOS & NAVIOS, 2015).

A definição do calado, não é feita de maneira aleatória. Pelo contrário, esse parâmetro é definido a partir de pesquisas feitas, por autoridades e centros de estudos internacionais, como a Associação Mundial para a Infraestrutura do Transporte Marítimo (conhecida como PIANC). Para determinar esse parâmetro, o órgão leva em conta a embarcação, o nível do mar e o sedimento que forma esse leito (PORTOS & NAVIOS, 2015).

O rio Tapajós, é navegável desde a foz no rio Amazonas, até a região de São Luís do Tapajós, numa extensão total de 280 km. Desde trecho a montante, o rio se apresenta com corredeiras, afloramentos rochosos e cachoeiras, obstáculos naturais para o avanço da navegação e que só poderão ser superados com obras de infraestrutura. A hidrovia é planejada para abranger todo o comprimento do rio, onde suporta a navegação de comboio com comprimento de 200 metros, 24 metros de boca e calado mínimo de 1,50 metros, podendo alcançar 2,50 metros na época das águas altas, com uma capacidade de carga de 7.500 *ton.* por comboio (DNIT, 2021).

Portanto, a profundidade do canal de navegação é uma informação estratégica, para a segurança da navegação.

O canal de navegação até então, tem como referência as cartas náuticas existentes, ao longo da Hidrovia do Rio Tapajós e seus respectivos trechos, entre os municípios de Santarém e Itaituba, as quais são: Cartas náuticas – 4.382 B, 4.382 A, 4.381 B e 4.381 (ilustradas na composição Figura 7 do item 6.2.1):

- ✓ Profundidade reduzidas aproximadamente ao nível da média das alturas mínimas excepcionais do rio Amazonas;
- ✓ Marcações de milhas náuticas presentes na carta:
  - Santarém: marco 0 (zero);
  - Itaituba/Miritituba: próximo ao marco da milha 150;
  - Distância aproximada entre Itaituba e Santarém de 160 milhas náuticas ou 296,32 quilômetros.

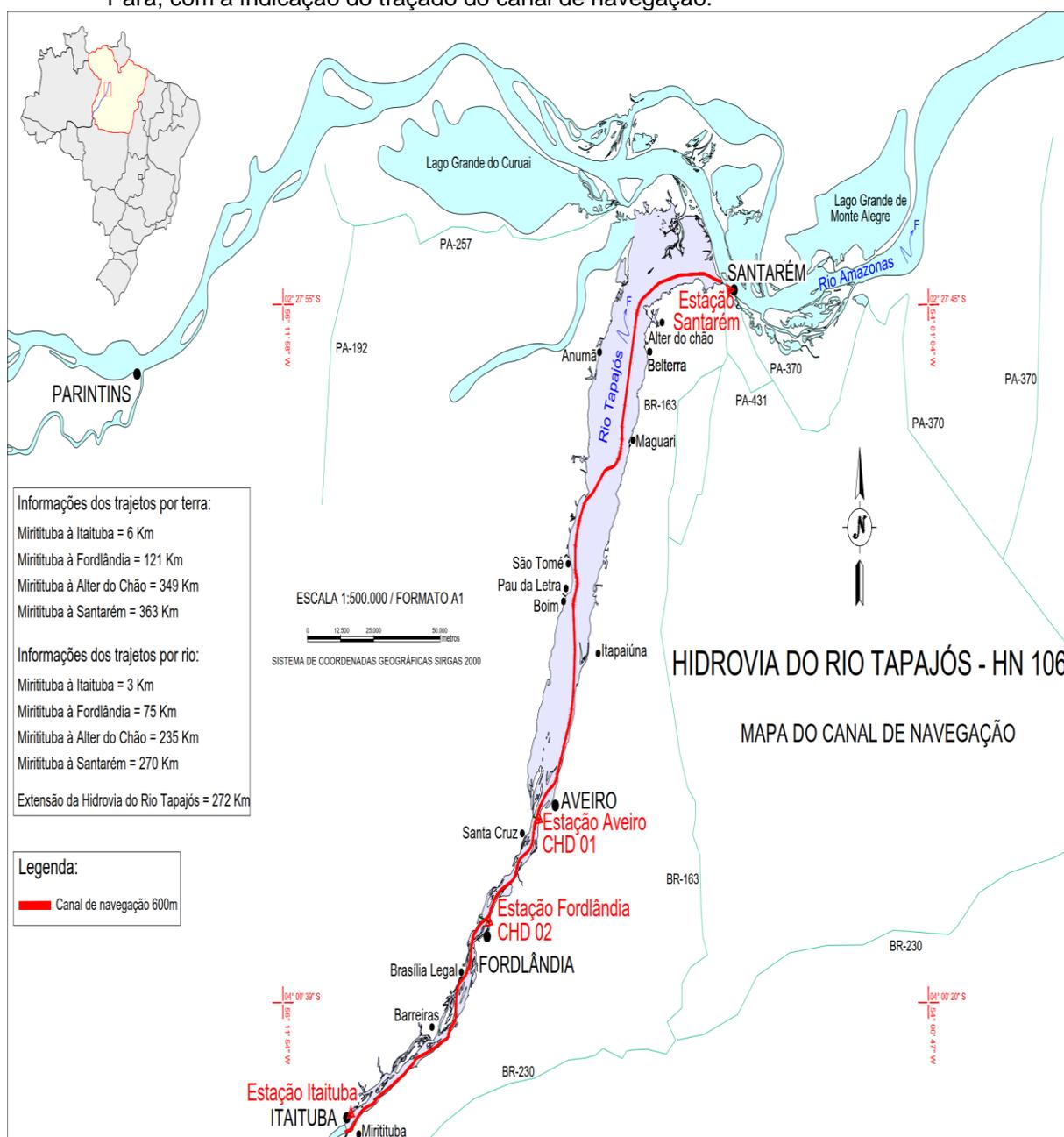
Os levantamentos que geraram estas cartas náuticas, datam de 41 e 42 anos atrás.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), mais especificamente a Diretoria de Infraestrutura Aquaviária da autarquia, é responsável pela gestão, manutenção, ampliação, modernização, construção, fiscalização e elaboração de estudos técnicos das hidrovias, portos interiores e eclusas nacionais. Entretanto, a outorga de canais de navegação é responsabilidade da Marinha do Brasil, entidade que detém a jurisdição em Águas Jurisdicionais Brasileiras.

A Marinha do Brasil, recomenda que seja utilizada as orientações da PIANC, como documentação técnica de referência, para o dimensionamento de canais de navegação de hidrovias nacionais. Não existe impedimentos associados à utilização de outras metodologias, porém a adoção de um método distinto, obriga o projetista a realizar simulação de manobras, onerando consideravelmente a elaboração do projeto. Vale salientar, que as simulações fornecem informações extremamente relevantes, para o projeto do canal de navegação, podendo resultar em uma redução nos custos de implantação da hidrovia, porém demandam de coleta sistemática de uma quantidade de dados satisfatória, para a caracterização física, detalhada da área em estudo, incluindo realização de modelagens hidráulicas, entre outros esforços. Tais esforços se justificam, quando se tratam de trechos que apresentam correntes com velocidades intensas, canais sobre leitos rochosos, que trazem riscos à segurança da navegação.

Atualmente no âmbito do Plano de Monitoramento Hidrovia (PMH), da Hidrovia do Rio Tapajós (HN-117), de alçada do DNIT, que está em fase de execução desde fevereiro de 2021, foi definido levantamento batimétrico de margem a margem e longitudinal desse trecho, entre Itaituba e Santarém, a partir dos dados desses levantamentos, foi proposto um traçado do canal de navegação do rio Tapajós (Figura 8), com diferenças de posição em alguns trechos, relativo ao canal das cartas náuticas da região. O canal traçado, com largura de 500m, está detalhado no mapa da Figura 8 a seguir.

Figura 8: Mapa da Hidrovia do Rio Tapajós, entre os municípios de Itaituba e Santarém, estado do Pará, com a indicação do traçado do canal de navegação.



Fonte: O próprio autor.

### 3.3 MODELOS HIDRODINÂMICOS

O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005). O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e simular o comportamento da bacia hidrográfica e prognosticar condições diferentes das observações. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de muitos modelos, que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das propriedades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados.

Os modelos hidrológicos, estão presentes na prática da engenharia como uma das principais ferramentas utilizadas, em diversos tipos de projetos (estruturas hidráulicas, sistemas de abastecimento d'água, redes de drenagem pluvial, navegação, usinas hidroelétricas, etc.). Destacam-se entre estes, os modelos hidrodinâmicos 1D (unidimensionais), que são utilizados para simular as variáveis do escoamento, em rios e canais e que têm sido muito utilizados em análises de sistemas de proteção contra cheias (REMO et al., 2007), verificação do dimensionamento de canais sujeitos a escoamento não permanente (BAUTISTA et al. 2006; CLEMMENS et al., 2005; BAUME et al., 2005).

Atualmente, o desenvolvimento e aplicação de modelos hidrológicos, vêm utilizando tecnologias ligadas à cartografia digital. O avanço dos processadores computacionais e a nova visão, quanto à gestão das águas pluviais propiciaram o desenvolvimento de vários modelos hidrológicos distribuídos (conceituais ou com embasamento físico), associados a softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário à compreensão da estrutura do modelo e suas limitações. Além desses fatos, deve-se ressaltar que muitos modelos necessitam de calibração para que reproduza o mais próximo possível, o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos da bacia.

De acordo com FIGUEIREDO, N. M., & BLANCO, C. J. C. (2014), o estudo do regime hidrológico da bacia do rio Tapajós, assume, cada vez mais, importância estratégica na previsão de vazões e de níveis de água; na percepção de alterações do regime hídrico, em função de geração em períodos de vazão reduzida a jusante de barragens; na prospecção de condições de navegabilidade e na harmonização de conflitos ambientais e socioeconômicos, gerados pela formação dos reservatórios das UHEs. Para a previsão de níveis de água, de condições de navegabilidade e de capacidade de carga de comboios de empurra, na bacia do rio Tapajós, PA, os autores utilizaram um modelo estocástico do tipo ARIMA. Obterão bons resultados, que podem viabilizar o planejamento logístico, para o transporte de carga no rio Tapajós, com antecedência.

FIGUEIREDO (2016), realizou a previsão de níveis de água, com base em séries de dados pretéritas dos postos fluviométricos, de interesse ao Sistema de Otimização de Usos Múltiplos da Água – SOUMA, foi feita com a utilização de modelo estocástico do tipo ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average), embasado na metodologia desenvolvida por BOX e JENKINS (1976). Com base nos resultados aferidos da aplicação do modelo SOUMA e da aplicação dos modelos ARIMA e RNA, aos dados fluviométricos e pluviométricos da bacia do rio Tapajós, FIGUEIREDO (2016), constatou-se que os modelos desenvolvidos, são ferramentas de fundamental importância à otimização operacional de sistemas de reservatórios, com usos múltiplos.

O River Analysis System (RAS) é um programa desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), órgão vinculado ao Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE) em Davis, Califórnia. O objetivo deste software é a realização de simulações computacionais para resolver a hidráulica de canais abertos, incluindo vazão em regime permanente (1D), vazão em regime não permanente (1D, 2D e 1D/2D), transporte de sedimentos em regime quase não permanente e qualidade da água (BRUNNER, 2016).

O módulo de simulação de vazão em regime não permanente é baseado na resolução da “Equação de Saint-Venant” (SAINT-VENANT, 1871), para o fluxo não permanente e não uniforme, para um canal aberto unidimensional (1D), baseada em duas leis da física, o princípio da conservação de massa e o princípio da conservação do momento.

LARA (2017), investigou os processos hidrodinâmicos do rio Tapajós, empregando dados de topo-batimetria e fluviometria, no modelo numérico hidrodinâmico HEC-RAS. O HEC-RAS, mostrou ser útil na reconstituição do comportamento no nível d’água do rio Tapajós e através de sua formulação, foi possível identificar o padrão de variabilidade hidráulico e temporal do coeficiente de Manning.

Mais recentemente os modelos hidrodinâmicos 1D, também passaram a ser mais utilizados na propagação do escoamento em modelos hidrológicos distribuídos (LIAN et al., 2007; PAZ, 2010; PAIVA, 2009).

Nos estudos hidrológicos, desenvolvidos na presente Dissertação de Mestrado, no intuito de prever profundidades mínimas ao longo do canal de navegação do rio Tapajós, optou-se pela utilização do modelo HEC-RAS®, versão 6.4.1.

#### 4 ASPECTO GERAL DO PROBLEMA

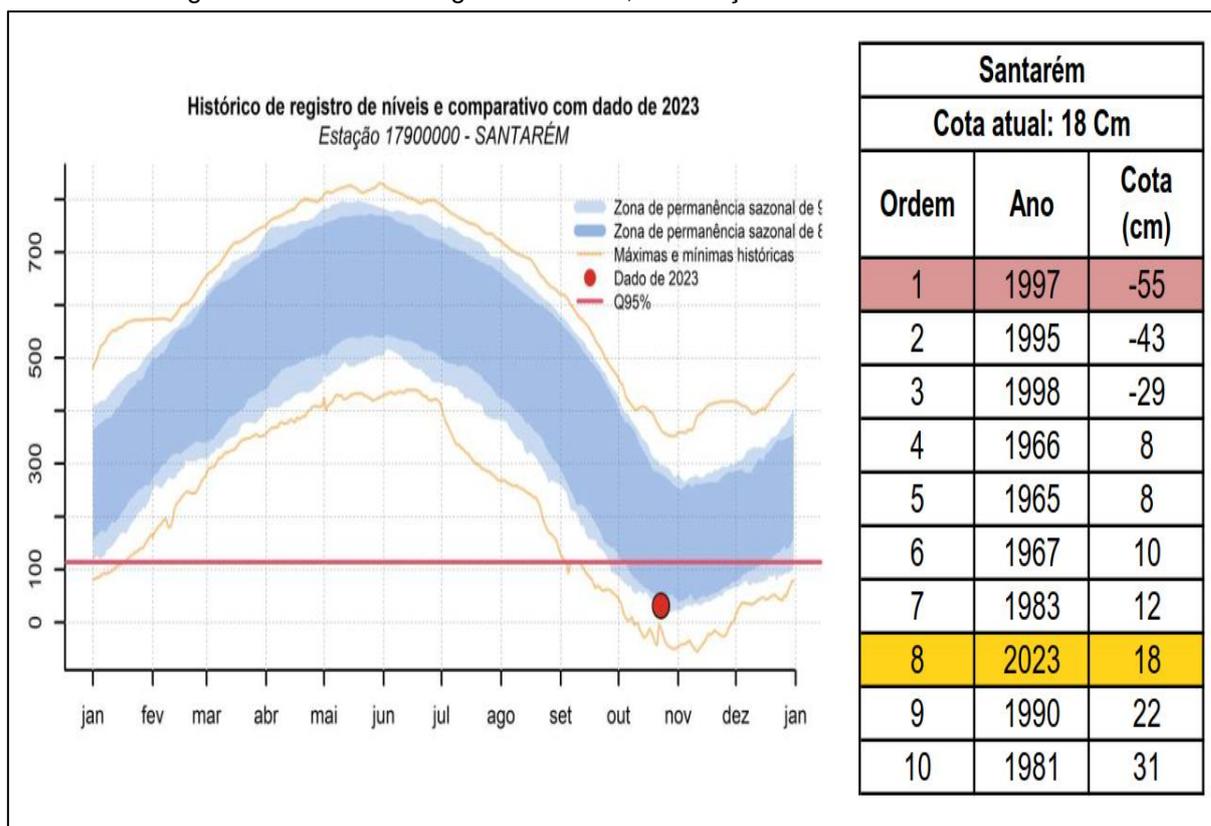
Na Amazônia, as grandes flutuações do nível dos rios, afetam diretamente o escoamento da produção, ou seja, tem implicações econômicas e sociais. O volume de mercadorias transportado é afetado também, pelas flutuações do nível d'água, uma vez que há diferença, do tamanho de calado entre o período de cheia e o período de seca dos rios. Não há sistema de transporte hidroviário, que resista a um contínuo aumento do número de restrições à navegação. Na maioria dos rios amazônicos, não há condições físicas, para a operação em época de estiagem, o sistema de transporte funciona plenamente, por exemplo, em oito ou nove meses por ano. PADOVEZI (2003), afirma que quanto maior tempo a embarcação puder operar, melhores são os resultados econômicos para o transporte.

BENTES, K. L. S., et al. 2018, caracterizou as fases hidrológicas do rio Tapajós, a partir dos dados da estação hidrometeorológica de Santarém, para isso utilizou um período de 16 anos de dados (2000 a 2015). Observou que a flutuação sazonal do rio Tapajós é definida por quatro fases (enchente, cheia, vazante, seca), sendo que a cheia (7,77 m) e seca (2,28 m) são períodos extremos.

O SACE é a plataforma desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), para disponibilizar todas as informações geradas no contexto dos Sistemas de Alerta Hidrológico (SAHs) desde 1989. O objetivo dos SAHs, consiste no monitoramento e previsão de níveis de rios, gerando e disseminando informações hidrológicas, para subsidiar a tomada de decisões, por parte da população e dos órgãos relacionadas à mitigação dos impactos, de eventos hidrológicos extremos.

De acordo com o 4º Boletim de Monitoramento Hidrológico da Bacia do Amazonas, publicado no dia 24/10/2023 e disponíveis em <http://www.cprm.gov.br/sace/amazonas>, podemos observar (Figura 9), o histórico das cotas registradas na estação fluviométrica Santarém, desde a década de 1960 até o outubro de 2023 (cota registrada 18 cm), para eventos de seca extrema que ocorreram no rio Tapajós. Podemos verificar que Santarém, registra níveis baixos (extremos), para esta época de seca.

Figura 9: Histórico de registro de cotas, na estação fluviométrica Santarém.



Fonte: [https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20231024\\_12-20231024%20-%20123923.pdf](https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20231024_12-20231024%20-%20123923.pdf)

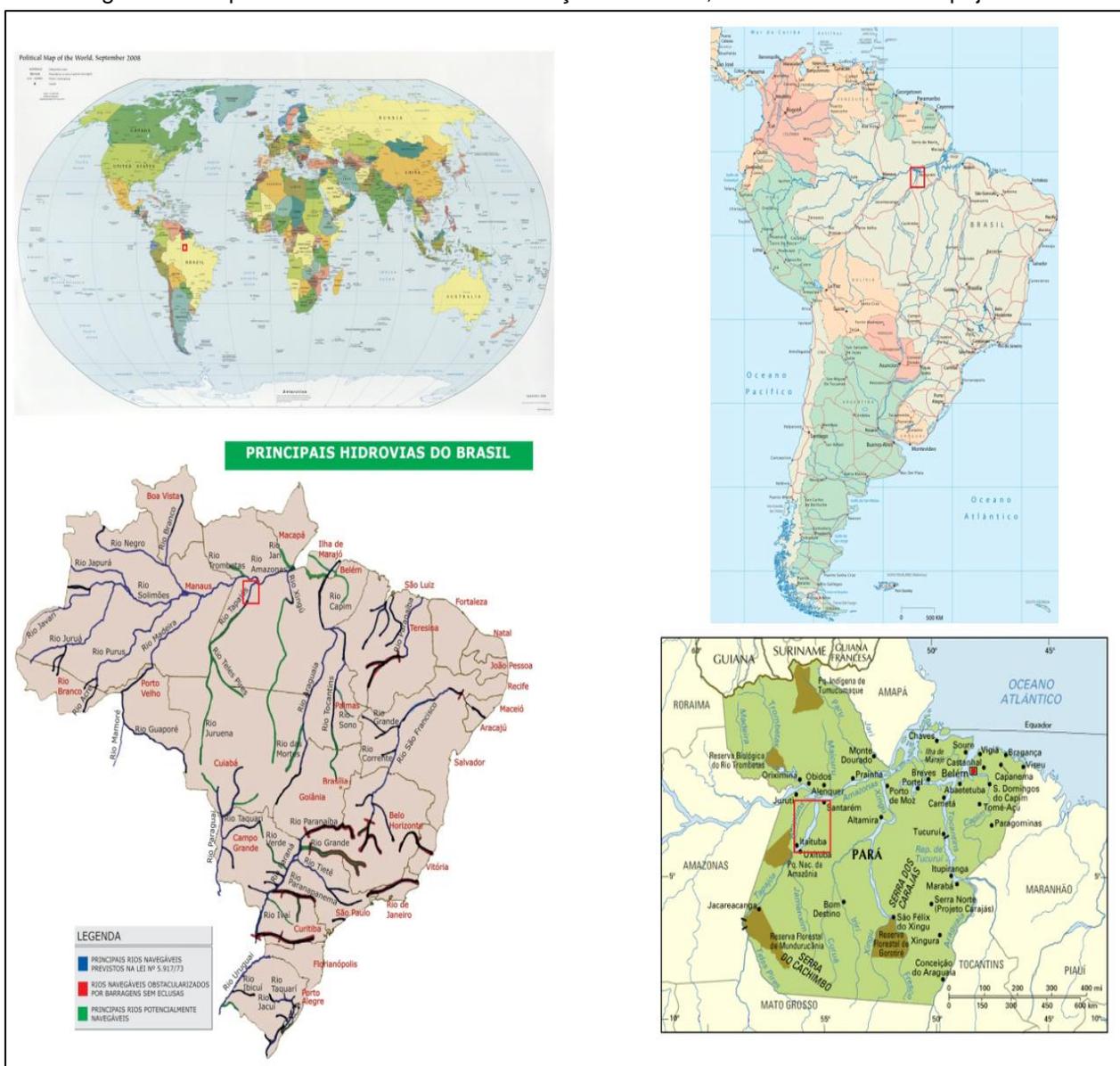
Diversas atividades do setor produtivo (particularmente aquelas ligadas à agricultura, geração e distribuição de energia hidroelétrica, indústria, etc.), são dependentes da variabilidade pluviométrica regional, em especial, nas regiões situadas nos trópicos (como é o caso da Amazônia), tornando a população vulnerável ao comportamento e variabilidade do sistema climático o que, conseqüentemente, resulta na ocorrência dos eventos extremos hidrológicos.

Portanto, estudos que visam o entendimento científico das causas e conseqüências da variabilidade de chuva e uma ferramenta que possa prevê-la, são imprescindíveis para gerar informações e produtos climatológicos, úteis ao benefício da sociedade. Dentro desse contexto, há a utilização de ferramentas, como a modelagem hidrodinâmica, que podem ser empregadas nas previsões de profundidades mínimas, principalmente, para os períodos de seca. De modo que a partir da dessas informações, divulgação pelas autoridades competentes, os usuários das hidrovias, possam planejar suas atividades, de modo a minimizar os impactos para a população, a sociedade e a economia local e nacional.

## 5 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse para esse estudo, compreende o principal trecho navegável da Hidrovia Tapajós-Teles Pires, delimita-se entre os municípios de Itaituba e Santarém, localizados no oeste do estado do Pará (Figura 10). Esse trecho, compreende uma parte significativa do rio Tapajós, um dos principais afluentes do rio Amazonas, localizado mais especificamente, entre as Coordenadas de Início (Porto de Santarém): Latitude: 02°24'54"S e Longitude: 054°44'18"O e as Coordenadas de Fim (Terminal Hidroviário de Itaituba): Latitude: 04°16'32"S e Longitude: 055°58'56"O.

Figura 10: Mapa com a localização e identificação do trecho, da Hidrovia do Rio Tapajós



Fonte: O próprio autor.

O sistema hidroviário formado pelos rios Tapajós e Teles Pires, tem um grande potencial para o comércio e o abastecimento das regiões norte e nordeste de Mato Grosso e do sul do Pará. A navegabilidade dessa hidrovia, só alcançará seu auge que é de 1.043 km, com intervenções como derrocamento, barragens e até eclusas, ligando a foz em Santarém-PA até a região de Cachoeira Rasteira, na divisa do Estado do Pará com o Mato Grosso (POMPERMAYER, CAMPOS NETO e PAULA, 2014).

Segundo o DNIT (2018), a Hidrovia Tapajós - Teles Pires, possui uma estratégica posição geográfica, uma vez que interliga aos grandes centros de produção agrícola brasileiros ao rio Amazonas e conseqüentemente, ao Oceano Atlântico. A hidrovia, possui um total 843 km de extensão, até a confluência com os rios Teles Pires e Juruena, na divisa dos Estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso e sua foz, em Santarém - PA.

É possível dividir a Hidrovia Tapajós - Teles Pires, em três grandes trechos, o primeiro, chamado de baixo Tapajós (270 km de extensão) corresponde ao trecho entre Santarém e Itaituba no Pará, se caracterizando por ser totalmente navegável, com profundidade mínima de 2,5 m. O segundo trecho possui cerca de 420 km de extensão e fica entre as corredeiras de São Luís do Tapajós e de Chacorão, se caracterizando, por se um trecho dificultoso para a navegação, apresentando trechos intransponíveis. A profundidade mínima encontrada para esse trecho é de 1,5 m. O terceiro e último trecho, encontra-se entre as corredeiras de Chacorão e a confluência dos rios Juruena e Teles Pires, possuindo cerca de 80 km de extensão, possuindo características semelhantes ao segundo trecho (SILVA, 2022).

O Porto de Santarém (Figura 11), está situado na Ponta do Salé, na cidade de Santarém, Estado do Pará, à margem direita do rio Tapajós a cerca de 3 km da confluência com o rio Amazonas e uma distância fluvial de 876 km de Belém. Em frente ao porto de Santarém, se visualiza a Ponta Negra, que delimita a barra do rio Tapajós, pela margem esquerda. Os acessos rodoviários são pela BR-230 (Transamazônica) e BR-163 (Cuiabá-Santarém), até o porto de Santarém, na área urbana, pela Avenida Cuiabá. O acesso fluvio-marítimo, se dá a partir da barra do rio Pará ou barra Norte do rio Amazonas e através deste, até a foz do rio Tapajós.

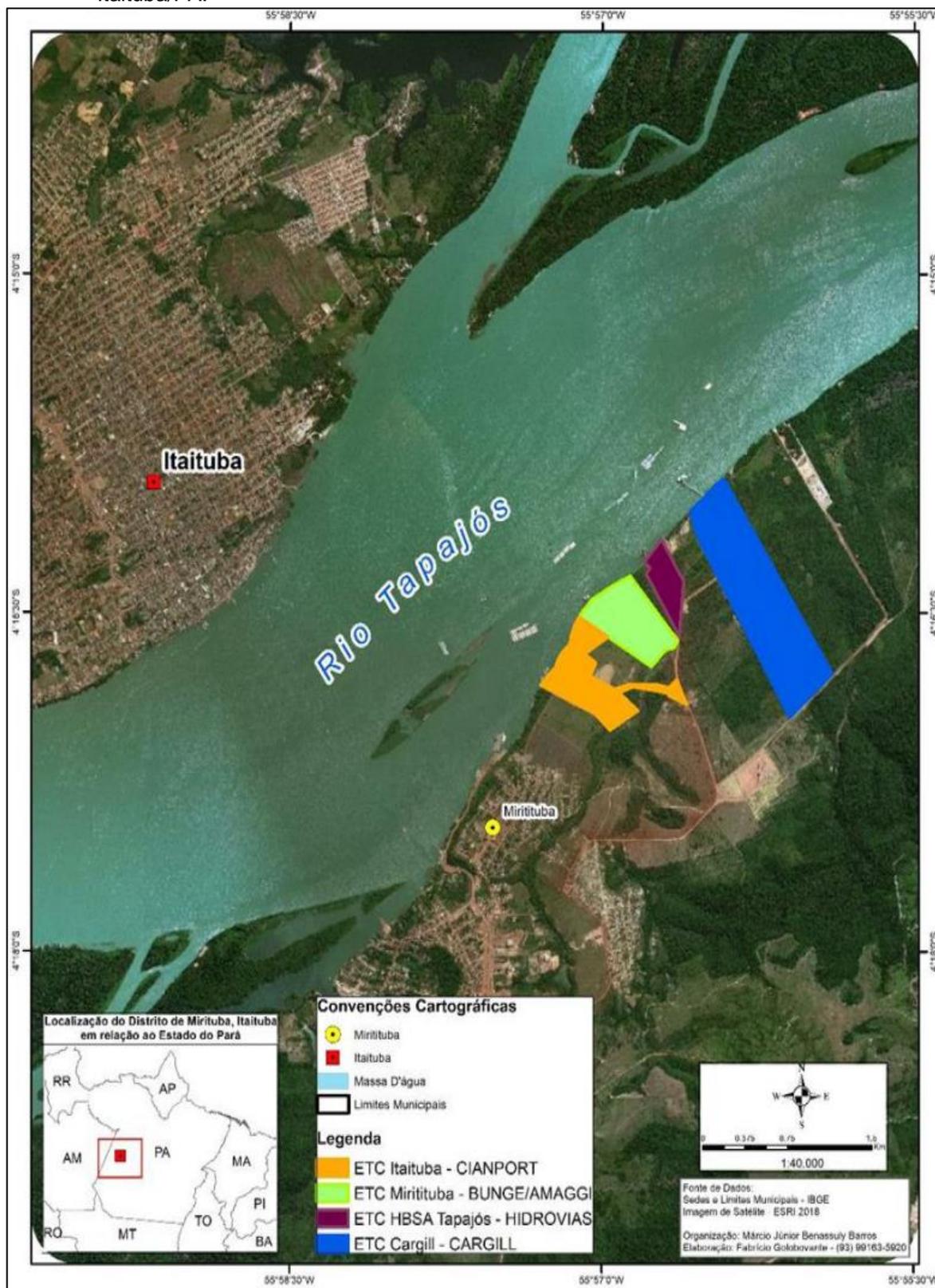
Figura 11: Porto de Santarém (PA).



Fonte: Portos e Navios (2020): <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/atracacao-de-embarcacoes-no-porto-de-santarem-e-suspensa-pela-justica-a-pedido-da-prefeitura>

Já no município de Itaituba (PA), também situado na margem direita do rio Tapajós, encontra-se o Complexo Portuário, constituído por Estações de Transbordo de Carga (ETCs) de Miritituba (Figura 12), que faz parte da mais importante rota de escoamento do Corredor Logístico de Exportação do Interflúvio Tapajós-Xingu, pela qual, são transportadas commodities agrícolas, produzidas no centro-norte de Mato Grosso pela BR-163, até o Complexo Portuário do rio Tapajós, em Itaituba/PA e Rurópolis/PA, de onde a carga segue via hidrovia, até os portos de Santarém/PA, Barcarena/PA e Santana/AP.

Figura 12: Mapa de localização das Estações de Transbordo de Carga (ETCs) em Miritituba, Itaituba/PA.



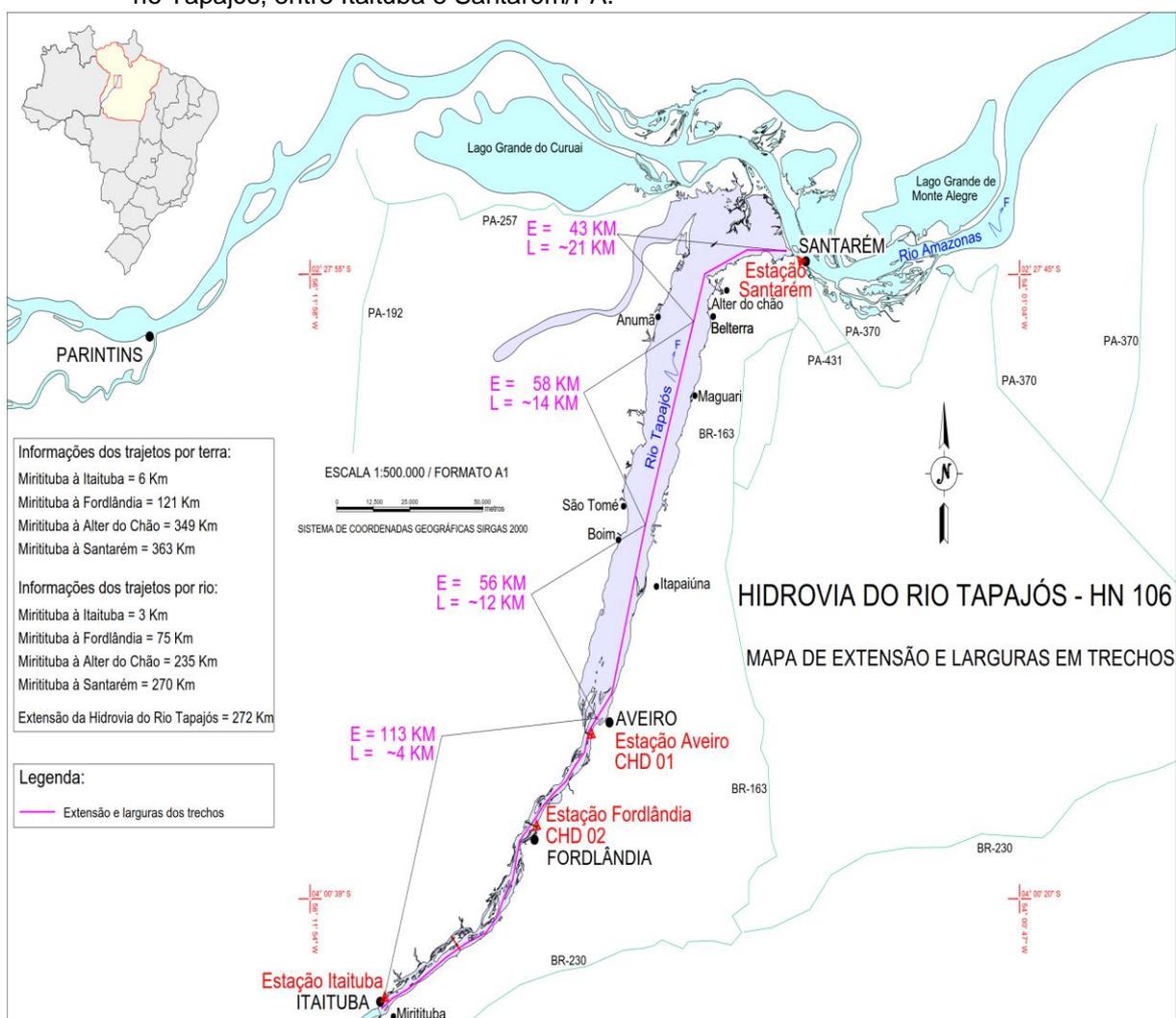
Fonte: BARROS, Márcio Júnior Benassuly (2019).

## 5.1 ANÁLISE HIDROLOGICA DO RIO TAPAJÓS

Para este estudo, será utilizado dados de níveis d'água de 4 (quatro) estações fluviométricas/telemétricas, instaladas ao longo do trecho, entre os municípios de Santarém e Itaituba, Estado do Pará. Neste contexto, optou-se por dividir o trecho do estudo em 2 (duas) unidades de interesse, limitadas de acordo com a localização das estações fluviométricas/telemétricas.

A 1ª unidade, compreende o trecho entre o município de Itaituba, o Distrito de Fordlândia e o município de Aveiro, tendo aproximadamente uma extensão de 113 km. A 2ª unidade, compreende o trecho entre o município de Aveiro e Santarém, com uma extensão de aproximadamente 157 km. A Figura 13 a seguir, apresenta o mapa com a localização dos principais municípios, extensão da via fluvial e a largura entre as margens nesse trecho do rio Tapajós.

Figura 13: Mapa da área de estudo, indicando extensão dos trechos e a largura entre as margens do rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém/PA.



Fonte: O próprio autor.

### 5.1.1 DADOS DE NÍVEL D'ÁGUA

Neste trecho, se tem disponível os dados da estação Itaituba (Código: 17730000) e da estação de Santarém (Código: 17900000), ambas operada pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). A série histórica de mais de 20 anos de dados fluviométricos, tem sido de grande relevância para diversos estudos.

#### ➤ **Estação Fluviométrica Itaituba - Código: 17730000**

A estação fluviométrica Itaituba, encontra-se localizada, dentro do Terminal Portuário, nas coordenadas Latitude: 4° 16' 30" S / Longitude: 55° 58' 54" W, possui NR (Nível de Redução) definido, pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), que disponibiliza em sua página na internet a Ficha F-43, para utilização pelos usuários. Nesta estação, há instalada réguas fluviométricas e os dados encontram-se disponíveis, na página da Agência Nacional de Águas (ANA). De acordo com a ficha de cadastro disponível na página da ANA, a telemetria teve seu início no dia 01/06/2003.

#### ➤ **Estação Fluviométrica Santarém - Código: 17900000**

A estação fluviométrica de Santarém, encontra-se localizada no Terminal Portuário da CDP (Companhia Docas do Pará), coordenadas Latitude: 2° 24' 50" S / Longitude: 54° 44' 17.002" W, possui NR (Nível de Redução) definido pelo Centro de Hidrografia da Marinha CHM, que disponibiliza em sua página na internet, a Ficha F-43, para utilização pelos usuários. Nesta estação, encontram-se instalados, sensor de nível e réguas fluviométricas, possui transmissão por telemetria e os dados, são disponibilizados, na Página da Agência Nacional de Águas (ANA). De acordo com a ficha de cadastro disponível na página da ANA, a telemetria, teve seu início no dia 01/11/2002.

Na porção do meio desse trecho, foram instaladas em junho de 2021, duas estações fluviométricas/telemétricas, no distrito de Fordlândia e no município de Aveiro, respectivamente. A instalação dessas duas estações, ocorreu no âmbito do Plano de Monitoramento Hidrovia (PMH) da Hidrovia do Rio Tapajós (HN-117), de alçada do DNIT e cujos dados, a partir do dia 01/01/2023, também estão disponíveis no site da ANA (Agência Nacional das Águas).

➤ **Estação Fluviométrica Fordlândia - Código: 17835600**

A estação fluviométrica/telemétrica Fordlândia, está situada a 193,0 km ao sul da cidade de Santarém/PA. Ela foi instalada na margem direita do rio Tapajós, no sentido jusante, na localidade de Fordlândia, nas coordenadas geográficas de latitude 3°49'53,70"S e longitude 55°30'1,90"W. A estação fluviométrica/telemétrica Fordlândia, foi construída próximo ao edifício da casa de bombas d'água, que abastece Fordlândia. De acordo com a ficha de cadastro disponível na página da ANA, a telemetria teve seu início no dia 01/06/2021. Porém, essa estação teve sua telemetria ativada, após instalação da PCD (Plataformas de Coleta de Dados), no dia 08/06/2021.

➤ **Estação Fluviométrica Aveiro - Código: 17835400**

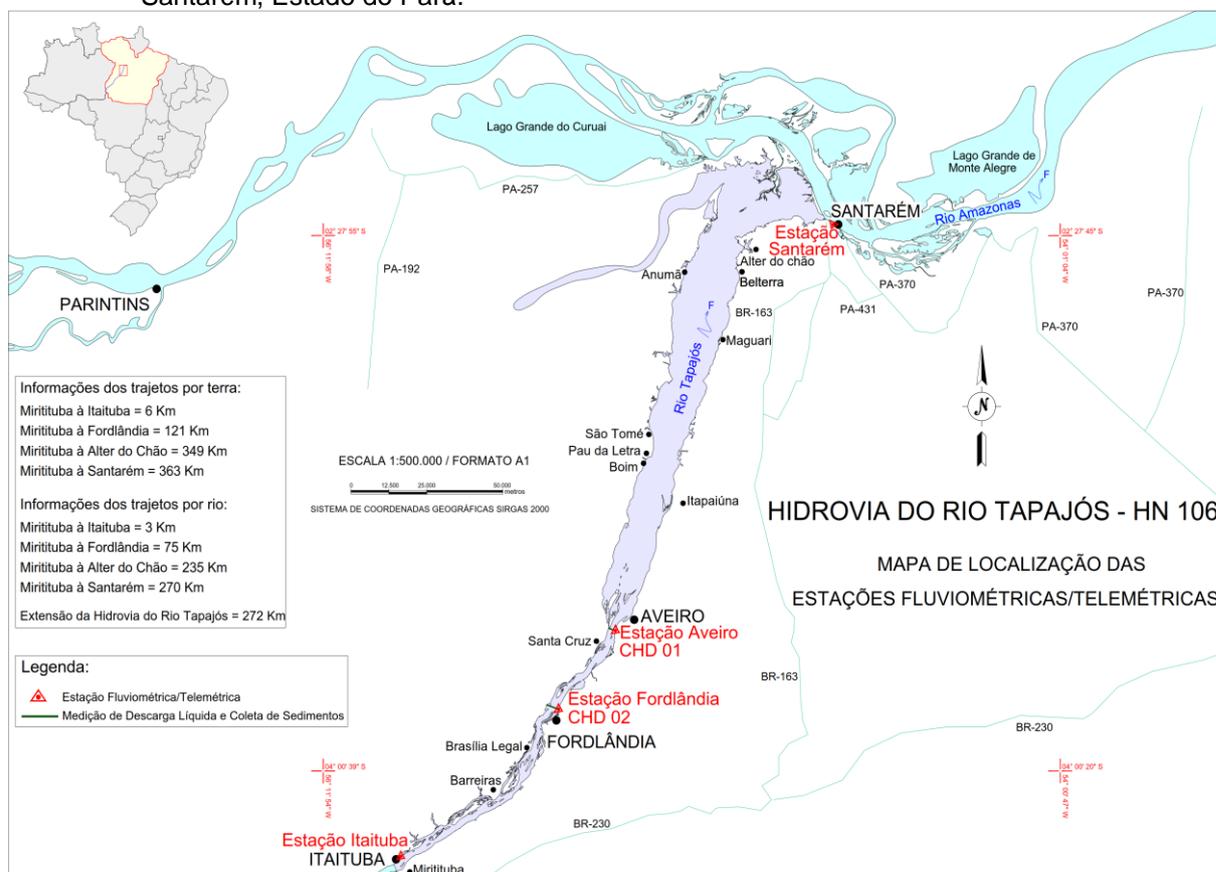
A estação fluviométrica/telemétrica Aveiro, está situada a 163,0 km ao sul da cidade de Santarém/PA. Ela foi instalada na margem direita do rio Tapajós, no sentido jusante, na localidade de Aveiro, nas coordenadas geográficas de latitude 3°36'9,80"S e longitude 55°19'53,40"W. A estação, foi construída nas proximidades do edifício da Prefeitura de Aveiro. De acordo com a ficha de cadastro disponível na página da ANA, a telemetria teve seu início no dia 01/06/2021. Porém, essa estação, teve sua telemetria ativada, após instalação da PCD (Plataformas de Coleta de Dados), no dia 06/06/2021.

Os dados da estação Aveiro e da estação Fordlândia, desde a data de suas ativações, vem sendo transmitidos para a empresa VETORLOG (<https://www.vetorlog.com/home/>), em intervalos mínimos de 01 hora, onde estão sendo armazenados, processados, qualificados e retransmitidos à ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), conforme orientações descritas no documento Procedimentos, para Envio de Dados Hidrológicos em Tempo Real das Estações Telemétricas.

A VETORLOG, possui uma plataforma específica, para o acompanhamento de seus clientes, por meio do site EMETER (<https://api.emeter.com.br/#/>), que só pode ser acessado, por meio de login e senha. Portanto, os dados utilizados neste estudo, foram disponibilizados pelo DNIT, por meio do acesso ao site EMETER.

A Figura 14 apresenta mapa contendo a localização e identificação das estações fluviométricas/telemétricas da ANA (Itaituba e Santarém) e do DNIT (Aveiro e Fordlândia), posicionadas ao longo do trecho do estudo.

Figura 14: Mapa de localização das estações fluviométricas/telemétricas, no trecho entre Itaituba e Santarém, Estado do Pará.

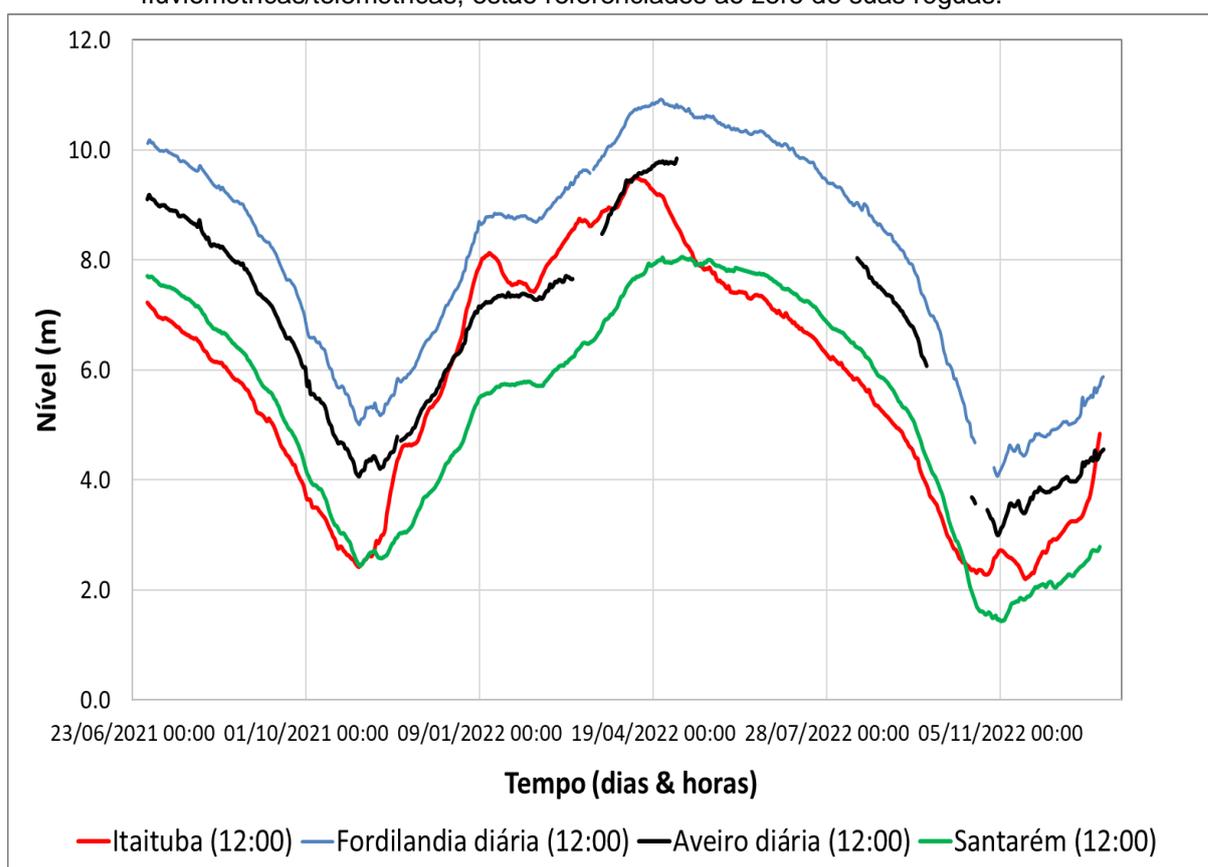


Fonte: O próprio autor.

Conforme já detalhado anteriormente, as estações Fordlândia (Cod. 17835600) e Aveiro (Cod. 17835400), foram instaladas em junho de 2021. A Figura 15 a seguir, traz o registro dos dados de níveis d'água, para o período compreendido entre 01/07/2021 a 01/01/2023. Onde se observa a comparação com os dados para as estações Itaituba e Santarém, também para o mesmo período. Apesar de se ter períodos longos sem registros de dados na estação Aveiro, fica evidente a tendência do padrão de subida e descida do níveis d'água, de acordo com o período sazonal e hidrológico (vazões ascendente, cheia, vazões descentes e seca) do rio Tapajós. Portanto, as curvas dos dados registrados na estação Fordlândia e Aveiro, seguem o mesmo padrão de variação da altura dos níveis d'água, observados nas estações dos extremos (Itaituba e Santarém). É relevante menionar, que os dados de níveis d'água, estão referenciados ao zero da régua, de cada uma das estações.

Os dados das estações intermediárias (Fordlândia e Aveiro), foram analisados e passaram por uma filtragem e ajustes, de acordo com o padrão de descida e subida do nível d'água, observados nas estações dos extremos (Itaituba e Santarém). Após esse processamento/ajustes, foi considerado a serie do período de 01/07/2021 a 01/01/2023, ou, seja, 20 meses, com valores de níveis d'água a cada 12 horas por dia, obtendo-se as curvas apresentadas na Figura 15 abaixo.

Figura 15: Variação dos níveis d'água a cada 12 horas por dia, do período de 01/07/2021 a 01/01/2023, nas estações Itaituba (Cod. 17730000), Fordlândia (Cod. 17835600), Aveiro (Cod. 17835400) e Santarém (Cod. 17900000). Obs.: Os dados de níveis das 4 estações fluviométricas/telemétricas, estão referenciados ao zero de suas réguas.



Fonte: Dados cedidos pelo DNIT do Projeto do PMH do rio Tapajós.

Devido ao fato de se ter dados disponíveis de níveis d'água, desse período em Fordlândia (Cod. 17835600) e Aveiro (Cod. 17835400), no caso dos anos de 2021 e 2022, também foram utiliza-los para a calibração e validação do modelo hidráulico HEC-RAS desenvolvido para esse trecho do rio Tapajós, que será empregado para gerar as previsões de profundidades mínimas avaliadas nesse estudo.

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MÍNIMAS – APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Nos estudos hidrológicos, desenvolvidos na presente Dissertação de Mestrado, com enfoque para o rio Tapajós, à semelhança do que é praxe na literatura sobre o tema, se estabelece critérios para a determinação de vazões e níveis d'água ao longo do tempo, em corpos d'água naturais. E em estudos meramente de pesquisa científica, bem como os de Engenharia, os modelos numéricos computacionais, vêm sendo cada vez mais utilizados, como ferramentas de análise do comportamento hidrodinâmico em rios, lagos, estuários, oceanos e etc.

O uso de modelos numéricos na Engenharia Fluvial, permite através do estabelecimento prévio das condições de contorno da área de interesse do corpo hídrico, estudar:

1. **Circulação Hidrodinâmica** → avaliar alterações em Quantidades de Movimento {massa x velocidade}, que geram variações em níveis de água e correntes;
2. **Qualidade das Águas** → avaliar o transporte de substâncias que geram alteração nos constituintes das águas e sua qualidade, e;
3. **Processos Sedimentológicos** → avaliar ciclos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que geram a evolução da morfologia ou a morfodinâmica.

Existem diversos sistemas de modelagem no mercado, que propõem soluções para uma boa avaliação da hidrodinâmica, bem como para os mecanismos de transporte de sedimentos coesivos e não coesivos, onde, dentre os principais, podemos citar o Delft3D®, o Telemac-Mascaret®, o MIKE®, o HEC-RAS®, o SisBaHiA®, o FESWMS®, dentre outros.

Os modelos hidrodinâmicos, são extremamente sofisticados e demandam investimentos em equipes de profissionais, com atuação nos diversos aspectos de seu desenvolvimento, seja na parametrização dos diversos processos físicos, sejam estes, resolvíveis ou não totalmente, bem como no aperfeiçoamento de técnicas numérico-computacionais.

Modelos hidrodinâmicos em fluido homogêneo: são modelos para determinação do padrão de correntes em corpos d'água com superfície livre, tais como águas costeiras, baías, sistemas estuarinos, rios, lagos, reservatórios, etc. Tais modelos, variam grandemente em complexidade, indo desde modelos unidimensionais (1D), até modelos tridimensionais (3D), passando por modelos bidimensionais em planta ou promediados verticalmente (2DH), bidimensionais em perfil ou promediados lateralmente (2DV).

Modelos hidrodinâmicos, em fluidos não homogêneos: são semelhantes aos descritos acima, mas por incluírem gradientes de densidade, são acoplados a modelos de transporte advectivo-difusivo, dos escalares constituintes da equação de estado, usualmente sal e calor.

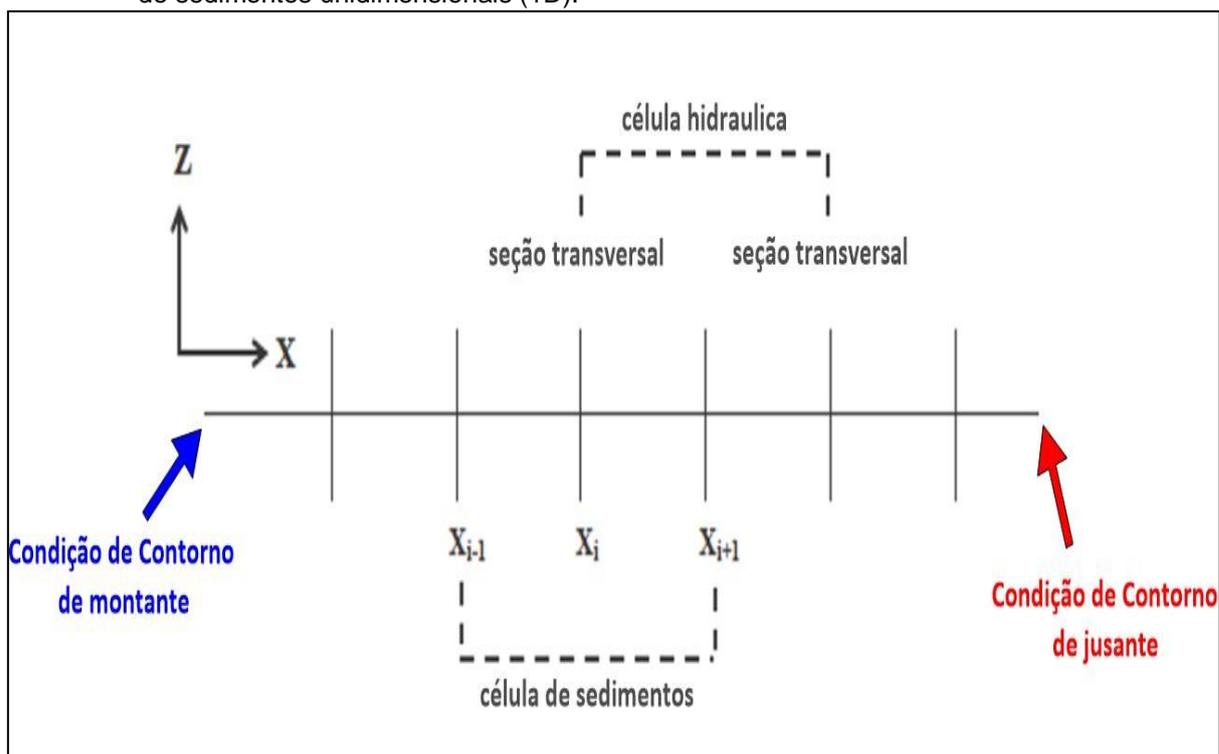
Modelos numéricos computacionais, truncam os infinitos graus de liberdade, presentes no comportamento exato do fenômeno físico, em um número finito de variáveis, a serem resolvidas computacionalmente. A quantidade dessas variáveis é definida por uma malha de pontos de cálculo. A natureza deste truncamento é determinada pela escolha da técnica numérica empregada, como por exemplo, diferenças finitas, volumes finitos, elementos finitos, entre outras. Além disso, cada método tem suas próprias variações, que controlam a qualidade da aproximação. Métodos numéricos, com alta qualidade na aproximação, normalmente levam a um maior tempo de processamento (CABRAL, 2009; PIGOOT et al., 2004; PAIN et al., 2005).

A resolução da malha, deve estar comprometida com a representação da geometria do domínio modelado e com feições hidrodinâmicas importantes, bem como, levar em conta os erros numéricos que, além de comprometerem a qualidade da solução, também podem causar instabilidades no modelo. Quanto maior for a resolução da malha, maior será o número de variáveis e conseqüentemente, maior será o tempo de processamento dos cálculos (CABRAL, 2009; ROSMAN, 1987; PAIN et al., 2005).

O HEC-RAS®, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE), foi desenvolvido com o objetivo de realizar simulações computacionais para resolver a hidráulica de canais abertos, incluindo vazão em regime permanente (1D), vazão em regime não permanente (1D, 2D e 1D/2D), transporte de sedimentos em regime quase não permanente e qualidade da água (BRUNNER, 2016).

Os modelos unidimensionais (1D), são aplicáveis em corpos d'água com seção transversal homogênea, resultando em variáveis médias na seção transversal. Sendo o eixo  $x$  o longitudinal e as variáveis têm dimensões  $(x, t)$  (EZZINE et al., 2020; TAWFIK, 2023; MUNNA, 2021; BHARATH, 2021). Sendo o modelo HEC-RAS® (1D), ideal para o propósito do presente estudo, que tem por objetivo, realizar previsões futuras de níveis d'água no rio Tapajós, entre Itaituba a Santarém, para o planejamento da navegação. A geometria do canal é representada por seções transversais que são perpendiculares a direção do fluxo (Figura 16).

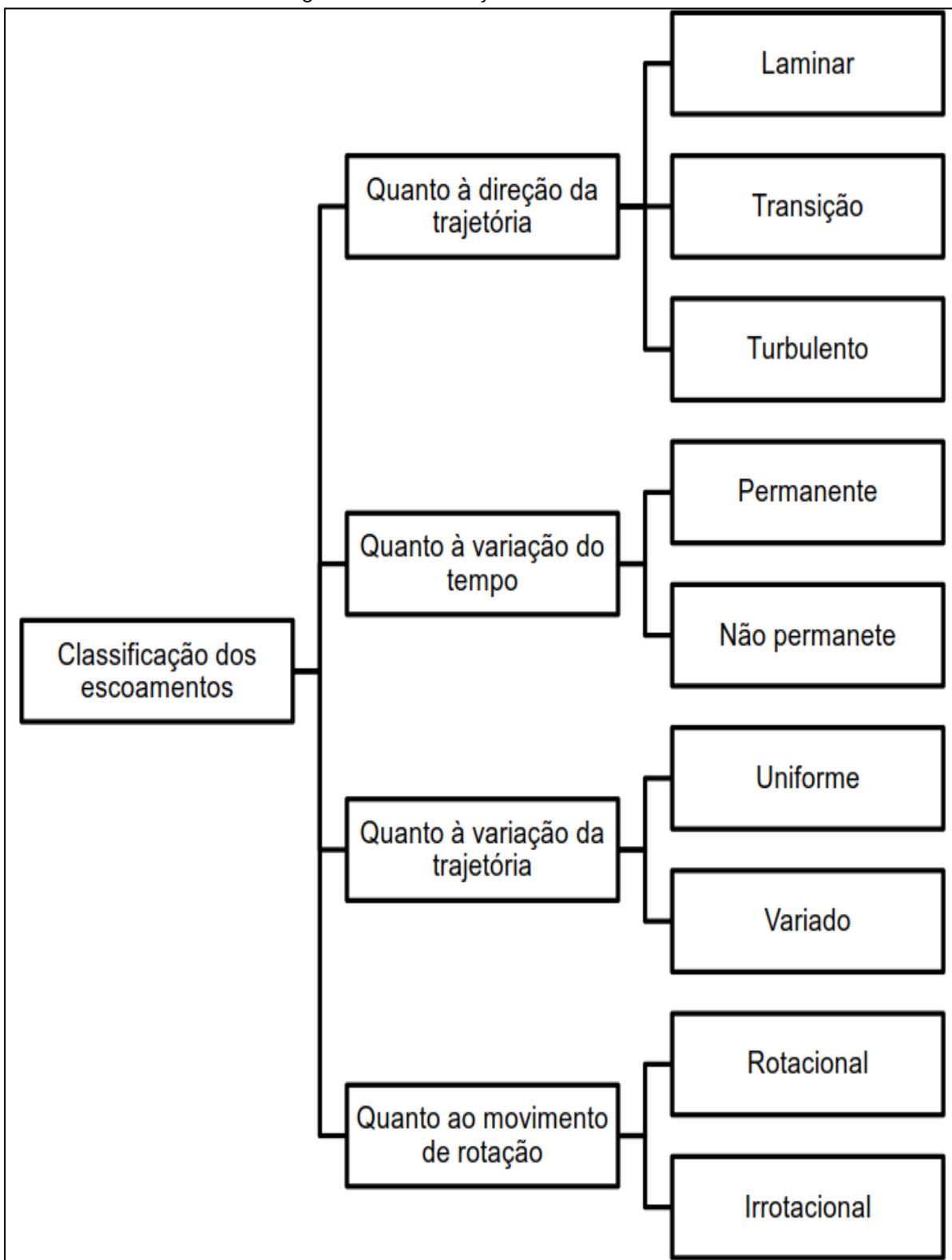
Figura 16: Representação conceitual da malha computacional de modelos hidráulicos e de transporte de sedimentos unidimensionais (1D).



Fonte: O próprio autor.

Em rios, é comum existirem vários tipos e regimes de escoamentos que podem ser caracterizados de várias maneiras a observar na Figura 17.

Figura 17: Classificação dos escoamentos.



Fonte: Adaptado de (FERNANDES, 2008).

**I. Quanto a direção da trajetória, o escoamento pode ser considerado como:**

- 1) **Laminar:** existe quando as partículas do fluido se movem ao longo de trajetórias definidas, aparentando lâminas ou camadas, a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência, aparece em fluidos que apresentam grande viscosidade e em baixas velocidades;
- 2) **Transição:** significa a mudança do escoamento de laminar para turbulento e vice-versa;
- 3) **Turbulento:** existe quando as partículas do fluido, não se movem ao longo de trajetórias definidas, descrevem trajetórias irregulares, ocorre em fluidos com viscosidade baixa.

Para determinar se o escoamento é laminar, transição ou turbulento usamos o coeficiente de Reynolds,  $R_e$ , que ilustra rigorosamente, a importância das forças da viscosidade na geração de um fluxo num canal, e é dado pela seguinte equação:

$$R_e = \frac{U \cdot R_h}{\nu} \quad (1)$$

Sendo:

$U$  – Velocidade característica (m/s);

$R_h$  – Raio hidráulico (m), relação entre a área da secção molhada ( $m^2$ ) e o perímetro molhado da mesma (m);

$\nu$  – Viscosidade cinemática do fluido, ( $m^2/s$ ).

Assim classificamos o escoamento como:

- a) Escoamento laminar – se  $R_e < 500$ ;
- b) Escoamento de transição – se  $500 < R_e < 2000$ ;
- c) Escoamento turbulento – se  $R_e > 2000$ .

Outro fator inerente é o número de Froude,  $F_r$ , que é um número adimensional utilizado em escoamentos de superfície livre, representa a relação entre uma velocidade característica e a velocidade gravitacional, faz a separação dos tipos de regime de escoamento em três tipos, de acordo com sua ligação com o nível crítico da água, no canal utilizando a seguinte equação:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

Sendo:

$U$  – Velocidade característica (m/s);

$g$  – Aceleração gravítica (m/s<sup>2</sup>);

$h$  – Profundidade hidráulica (m), resulta da equação  $h = A / B$  ( $A$ , a área da secção transversal, m<sup>2</sup>,  $B$ , largura da superfície livre, (m);

Assim classificamos o escoamento como:

- a) Escoamento fluvial (lento) – se  $F_r < 1$ ;
- b) Escoamento torrencial (rápido) – se  $F_r > 1$ ;
- c) Escoamento crítico – se  $F_r = 1$ .

Relacionando as duas combinações dos valores de Froude e Reynolds, resultam os subsequentes em quatro regimes de escoamento:

- a) Fluvial/Laminar –  $F_r < 1$  e  $R_e < 500$ ;
- b) Fluvial/Turbulento –  $F_r < 1$  e  $R_e > 2000$
- c) Torrencial/Laminar –  $F_r > 1$  e  $R_e < 500$ ;
- d) Torrencial/Turbulento –  $F_r > 1$  e  $R_e > 2000$ .

**II. Quanto a variação no tempo, o escoamento pode ser classificado em duas classes importantes: (1) regime permanente e (2) não permanente.**

- 1) No escoamento **permanente ou estacionário**, as grandezas físicas de interesse como velocidade ( $U$ ), pressão ( $p$ ) e massa específica ( $\rho$ ), permanecem constantes com decorrer do tempo ( $t$ ), num determinado ponto do escoamento, ou seja:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

- 2) Por outro lado, no escoamento **não permanente ou transitório**, as grandezas físicas de interesse ( $U, p, \rho$ ), variarem com decorrer do tempo ( $t$ ), num determinado ponto do escoamento, ou seja:

$$\frac{\partial U}{\partial t} \neq 0 \quad ; \quad \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0 \quad ; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0 \quad (4)$$

**III. O comportamento de um fluido quanto à variação na trajetória das partículas, pode ser classificado como: (1) uniforme e (2) não uniforme, ou variado.**

- 1) **Escoamento uniforme:** aquele no qual todos os pontos da mesma trajetória, que seguem as partículas, apresentam a mesma velocidade, não havendo variação seu módulo, direção e sentido que permanecem constantes. Neste escoamento, a seção transversal da corrente de fluido é invariável.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

- 2) **Escoamento não Uniforme ou variado:** quando a velocidade média variar, em qualquer ponto ao longo do escoamento, para um determinado tempo, ou seja:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \neq 0 \quad (6)$$

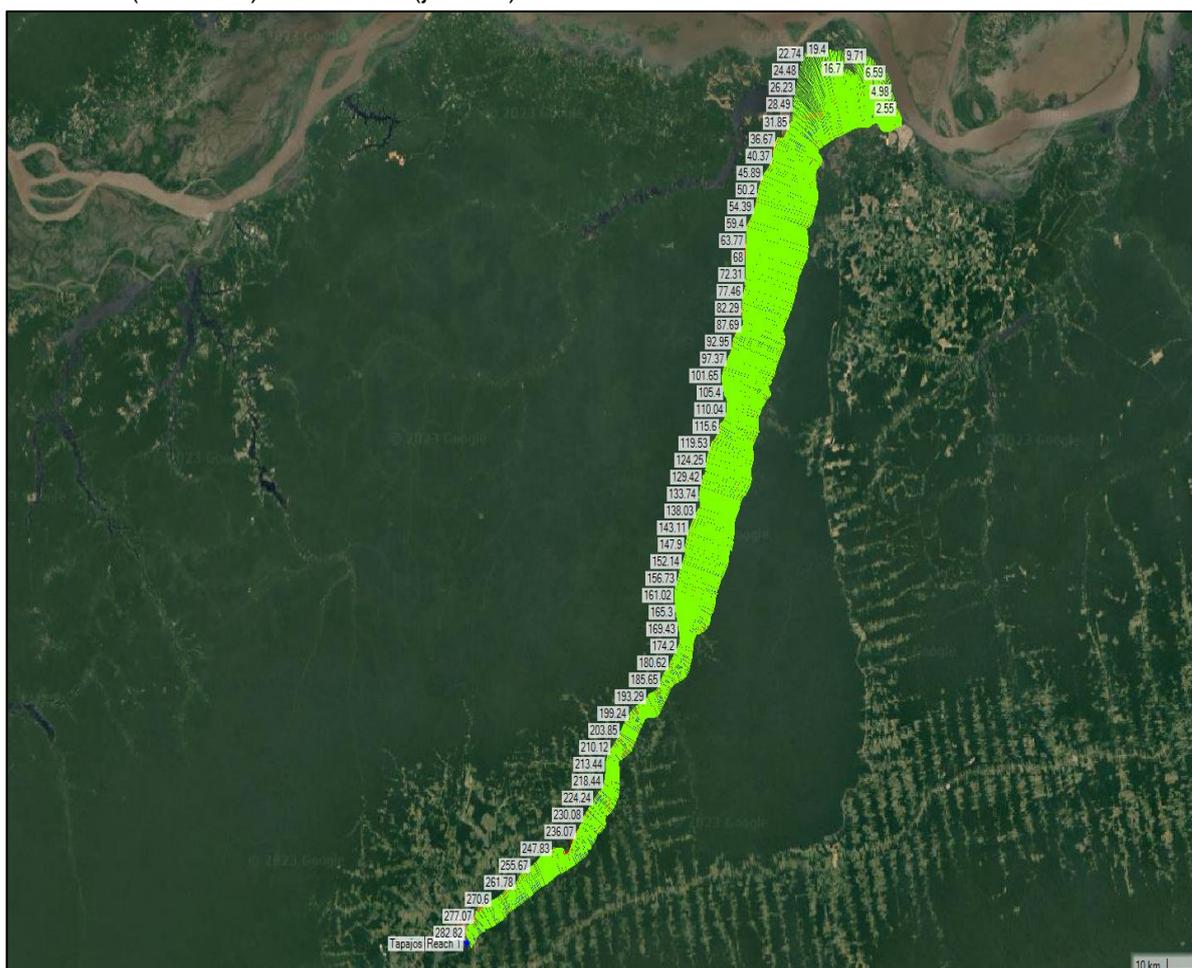
As situações mais comuns na natureza, correspondem ao escoamento não-permanente e gradualmente variado.

#### IV. O comportamento de um fluido quanto ao movimento de rotação pode ser classificado como:

- 1) **Rotacional:** neste caso as partículas movimentam-se de forma ativa com velocidade angular em torno do seu centro de massa, originando um movimento de rotação;
- 2) **Irrotacional:** neste caso as partículas movimentam-se linearmente sem apresentar um movimento de rotação aparente.

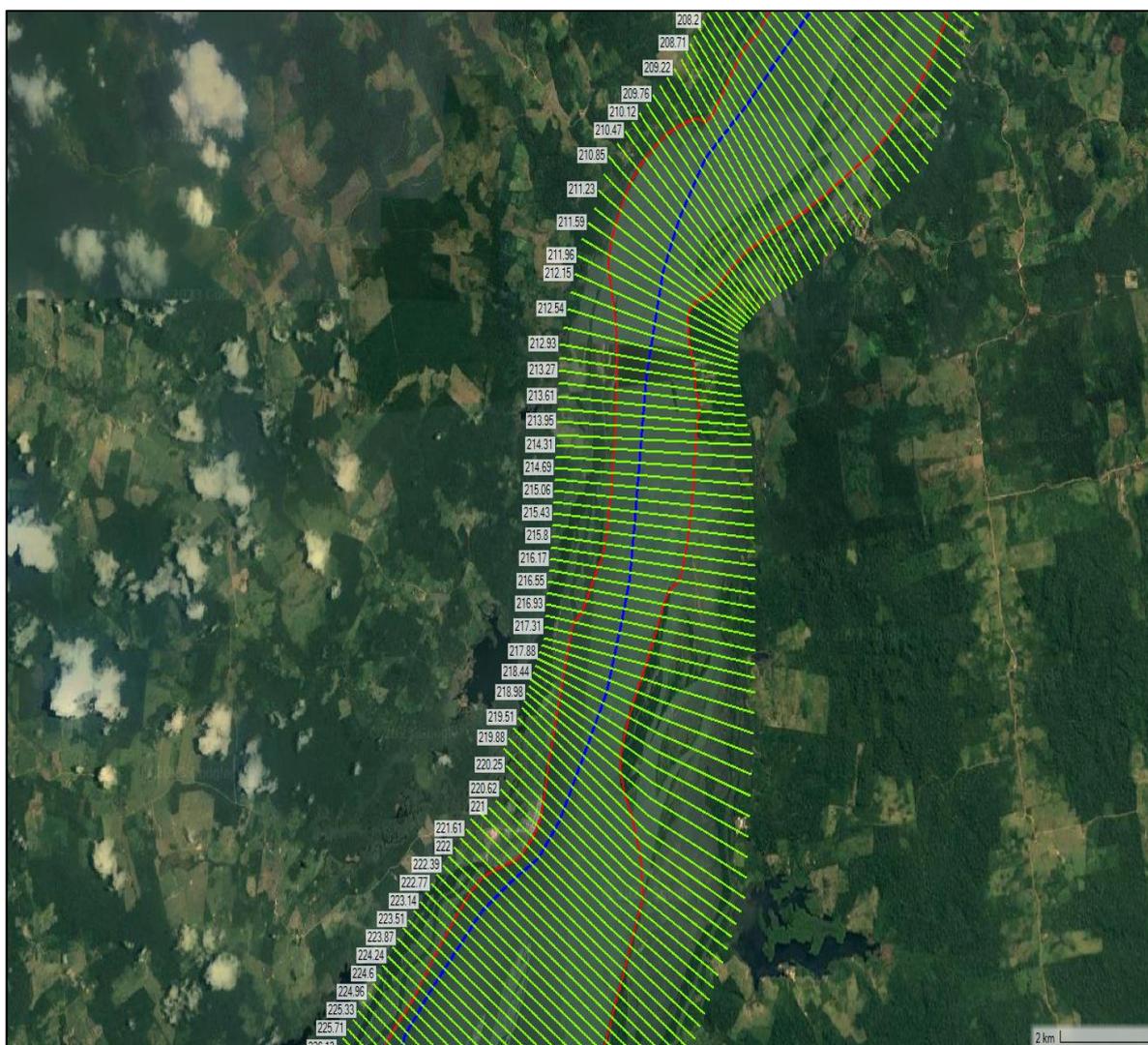
A malha ou células de cálculo que compõem, o método de diferenças finitas no modelo HEC-RAS é exibido na Figura 18 e Figura 19. As células, são desenhadas em ambiente GIS dentro da região de interesse, como é o caso do modelo sobre o rio Tapajós, garantindo a detecção dos fenômenos de interesse em estudo, nas suas escalas espaciais e temporais primárias, através da aplicação do teorema de Nyquist.

Figura 18: Malha computacional do modelo 1D do rio Tapajós, no trecho entre os municípios de Itaituba (montante) à Santarém (jusante).



Fonte: O próprio autor.

Figura 19: Detalhe da malha computacional 1D, mostrando as seções, margens e eixo do rio Tapajós.



Fonte: O próprio autor.

As hipóteses básicas e simplificadoras admitidas, nas aplicações do HEC-RAS®, considerando o trecho hidroviário do rio Tapajós, foram as seguintes:

- i. As configurações de fundo se manterão inalteradas, no período compreendido entre duas campanhas de levantamentos batimétricos, sucessivos;
- ii. Escoamento unidimensional, não permanente, gradualmente variado;
- iii. Fluido homogêneo e incompressível;
- iv. Declividades longitudinais suaves, da linha d'água;
- v. Efeitos termodinâmicos e dos ventos, na superfície desprezíveis; e
- vi. Perda de carga calculada, pela equação de Manning.

Para fins de tratamentos de dados da modelagem hidráulica e geração de produtos gráficos, se utilizam softwares tais como o ArcGis®, Qgis®, Surfer®, Matlab® e Python®. Em termos de hardware, a modelagem deve contar com computadores dedicados e equipados com processador de alto desempenho, memória e placa de vídeo, dimensionados às necessidades destes softwares.

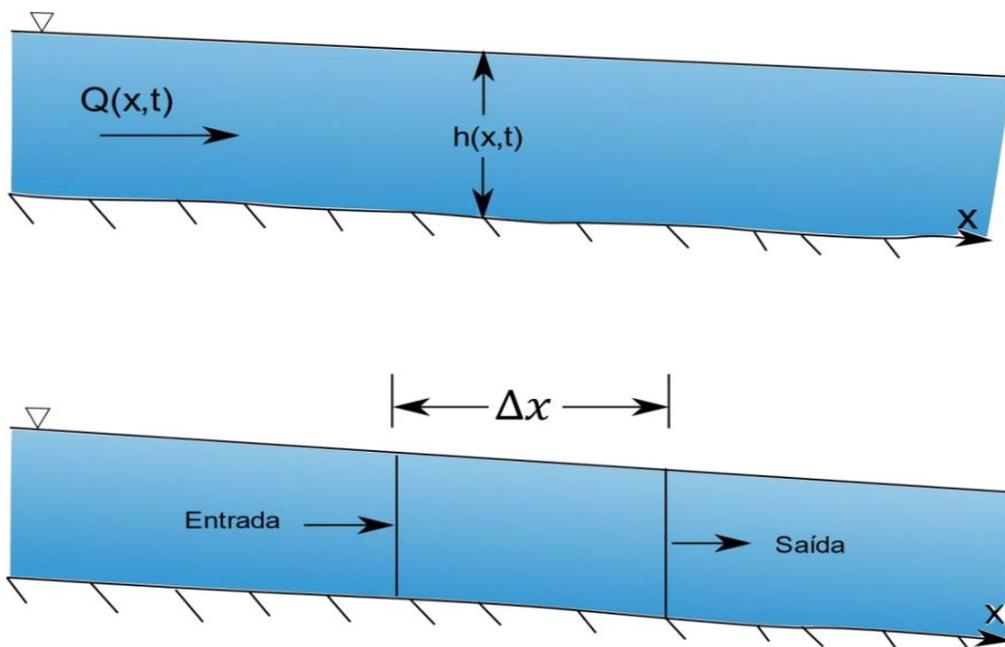
O módulo de simulação de vazão em regime não permanente é baseado na resolução da “Equação de Saint-Venant” (SAINT-VENANT, 1871), para o fluxo não permanente e não uniforme, para um canal aberto unidimensional. É baseada em duas leis da física, o princípio da conservação de massa (7) e o princípio da conservação do momento (8). Esses princípios são expressos matematicamente na forma de equações diferenciais parciais e são igualmente referidas, como equações da continuidade e do momento.

O princípio da conservação da massa, aplicado a um volume de controle elementar, delimitado pelo canal natural e por duas secções transversais do escoamento, permite escrever, Figura 20.

A equação da continuidade, descreve a conservação da massa para o sistema unidimensional, expressa matematicamente pela equação (7).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (7)$$

Figura 20: Volume de controle.



Fonte: BRUNNER, 2015.

Onde:

$A$  – Área da seção transversal ( $m^2$ );

$t$  – Tempo (s);

$Q$  – Vazão ( $m^3/s$ );

$q_l$  – Vazão adicional lateral por unidade de comprimento ( $m^3/s/m$ );

$x$  – Distância longitudinal do canal (m).

A equação do momento (8), estabelece que a taxa de mudança no momento é igual às forças externas agindo no sistema.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (8)$$

Os termos da equação (8), apresentam os seguintes significados:

$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$  – A aceleração local descreve a variação da quantidade de movimento devida à variação da velocidade em relação ao tempo;

$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)$  – A aceleração convectiva descreve a variação da quantidade de movimento devido a uma mudança de velocidade do escoamento ao longo do canal;

$g \frac{\partial h}{\partial x}$  – Diferença das resultantes das pressões hidrostáticas atuantes na fronteira do volume de controle, a qual é proporcional à variação da profundidade do escoamento ao longo do canal;

$g \cdot S_0$  – Trabalho realizado pelas forças da gravidade por unidade de massa do fluido e por unidade de comprimento;

$g \cdot S_f$  – Trabalho realizado pelas forças resistentes por unidade de massa do fluido e por unidade de comprimento.

Onde:

$x$  – Direção do perfil longitudinal do canal (m);

$t$  – Tempo (s);

$Q$  – Vazão (m<sup>3</sup>/s);

$v$  – Velocidade do escoamento (m/s);

$z$  – Elevação da superfície da água acima da linha de referência (m);

$A$  – Área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$g$  – Aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>/s);

$S_0$  – Declividade do fundo do rio (m/m);

$S_f$  – Inclinação da linha de energia (m/m), que pode ser dada pela equação (9) a seguir:

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

Os perfis da superfície de água são computados de uma seção para outra resolvendo a equação da energia, iterativamente através do método “Standard Step” (Figura 21). A equação de energia é escrita da seguinte forma:

$$h_{i+1} + z_{i+1} + \frac{\alpha_{i+1}U_{i+1}^2}{2g} = h_i + z_i + \frac{\alpha_i U_i^2}{2g} + h_e \quad (10)$$

Onde:

$z_i, z_{i+1}$  – Elevação do talvegue dos canais (m);

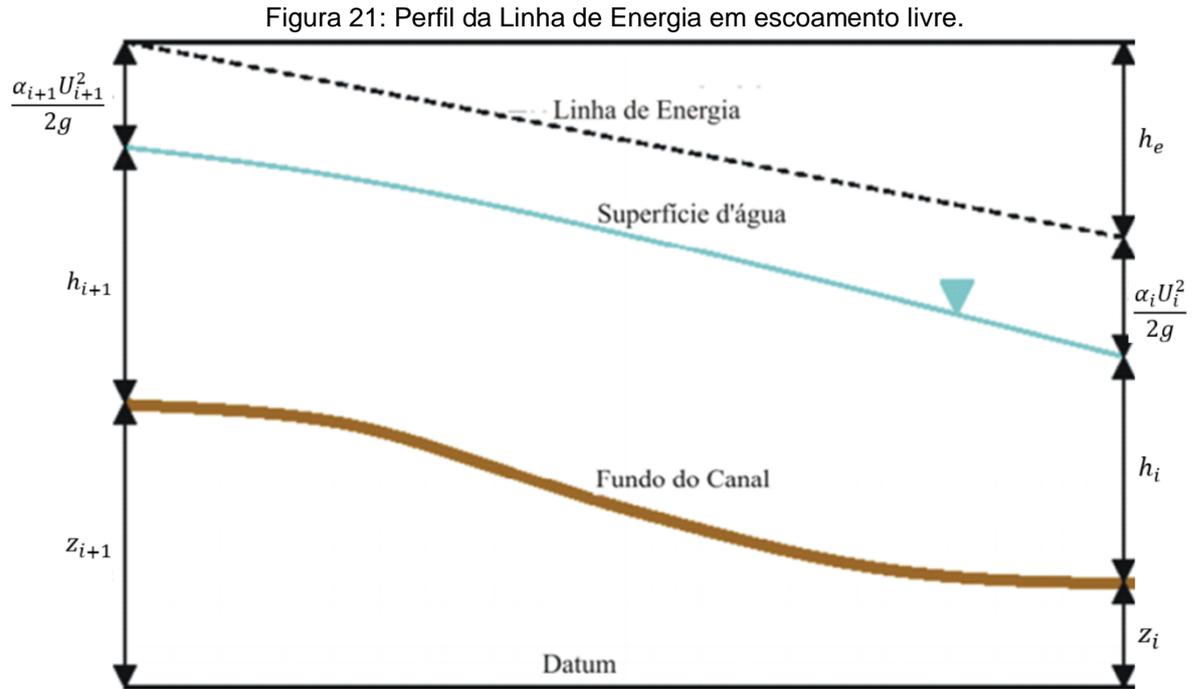
$h_i, h_{i+1}$  – Profundidades da água, nas seções transversais (m);

$\alpha_i, \alpha_{i+1}$  – Coeficiente de ponderação das velocidades

$U_i^2, U_{i+1}^2$  – Velocidade média na secção (m/s);

$h_e$  – Perda de carga de energia entre a secção 1 e 2 (m);

$i$  – Secções 1 e 2.



Fonte: BRUNNER, 2015.

A perda de carga de energia entre duas seções transversais é formada pelas perdas de fricção e perdas de contração e expansão. A equação para perdas de energia é a seguinte:

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_{i+1} U_{i+1}^2}{2g} - \frac{\alpha_i U_i^2}{2g} \right| \quad (11)$$

Em que:

$L_{\Delta i}$  – Comprimento ponderado com base na vazão;

$\bar{S}_{f\Delta i}$  – Inclinação da perda de carga por fricção entre duas seções;

$C$  – Coeficiente de contração e expansão;

O comprimento ponderado é calculado como:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (12)$$

Em que:

$L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}$  – Distância entre as seções transversais, para planície de inundação a esquerda, canal principal e planície de inundação a direita, respectivamente.

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$  – Média aritmética entre as seções transversais, para planície esquerda, canal principal e planície direita, respectivamente.

A determinação da capacidade de transporte e coeficiente de ponderação da velocidade para uma seção transversal requer que o fluxo seja subdividido em unidades nas quais as velocidades, são uniformemente distribuídas. A abordagem, utilizada no HEC-RAS, é dividir o fluxo em área de planície de inundação, utilizando pontos de quebras com base no valor  $n$  (lugares onde o valor de  $n$  muda), como base para subdivisão. A capacidade de transporte é em cada subdivisão, através da equação de Manning:

$$K = \frac{A \cdot R^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (13)$$

$$Q = K \cdot S_f^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Em que:

$K$  – Capacidade de transporte numa seção do escoamento ( $m^3/s$ );

$n$  – Coeficiente de rugosidade de Manning ( $m^{1/3} s^{-1}$ );

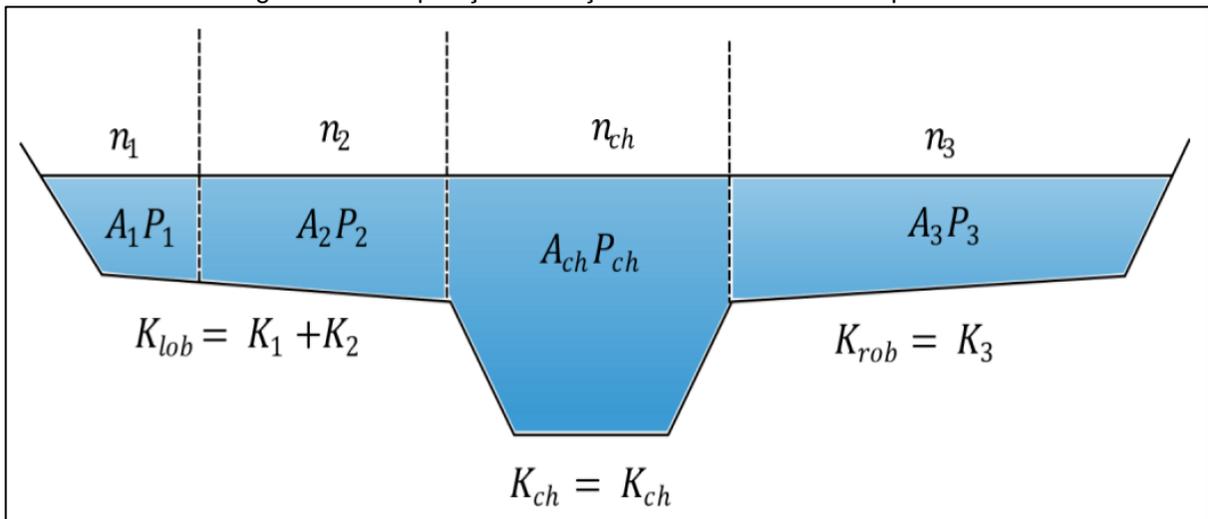
$A$  – Área da seção transversal da seção transversal de escoamento ( $m^2$ );

$R$  – Raio hidráulico da seção transversal de escoamento (m);

$S_f$  – Inclinação da linha de energia entre duas seções (m/m).

O programa soma todas as capacidades de suporte, para a planícies para obter a capacidade equivalente para planície de inundação esquerda e direita. O canal principal, normalmente, é computado como uma única capacidade de suporte. A capacidade total de suporte é a soma das três capacidades (esquerda, canal e direita), a observar na Figura 22.

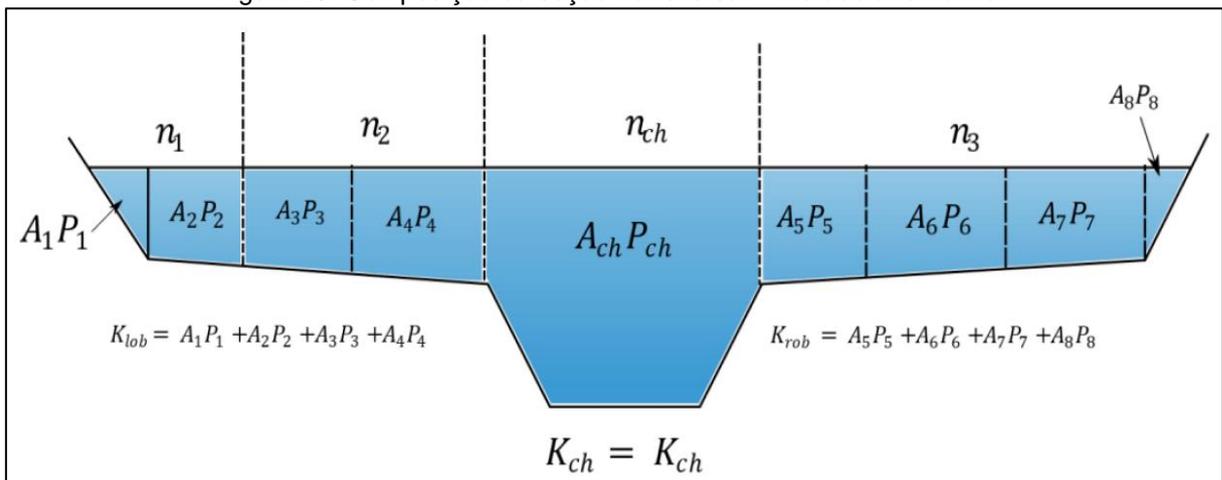
Figura 22: Composição da seção transversal – método padrão.



Fonte: BRUNNER, 2015.

Um método alternativo que está disponível no HEC-RAS, é calcular a capacidade de transporte entre cada coordenada da área de planície de inundação (Figura 23). As capacidades individuais, são somadas para obter a capacidade total para área de planície de inundação.

Figura 23: Composição da seção transversal – método alternativo.



Fonte: BRUNNER, 2015.

Os dois métodos, irão produzir resultados diferentes, sempre que porções das planícies de inundação, tiverem terrenos com grandes inclinações. De forma geral, o método padrão do HEC-RAS, irá produzir resultados com menores capacidades de suporte para mesmas elevações de superfícies de água.

### 6.1.1 BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO

A base de dados, será dividida em três conjuntos de dados finais:

- i. Conjunto de dados, referente a geometria do canal fluvial (batimetria e Modelo Digital do Terreno (MDT) e rugosidade do leito (granulometria do material do leito);
- ii. Série histórica de vazão e nível, nas estações fluviométricas, presentes no domínio do modelo; e
- iii. Previsão de vazões de montante.

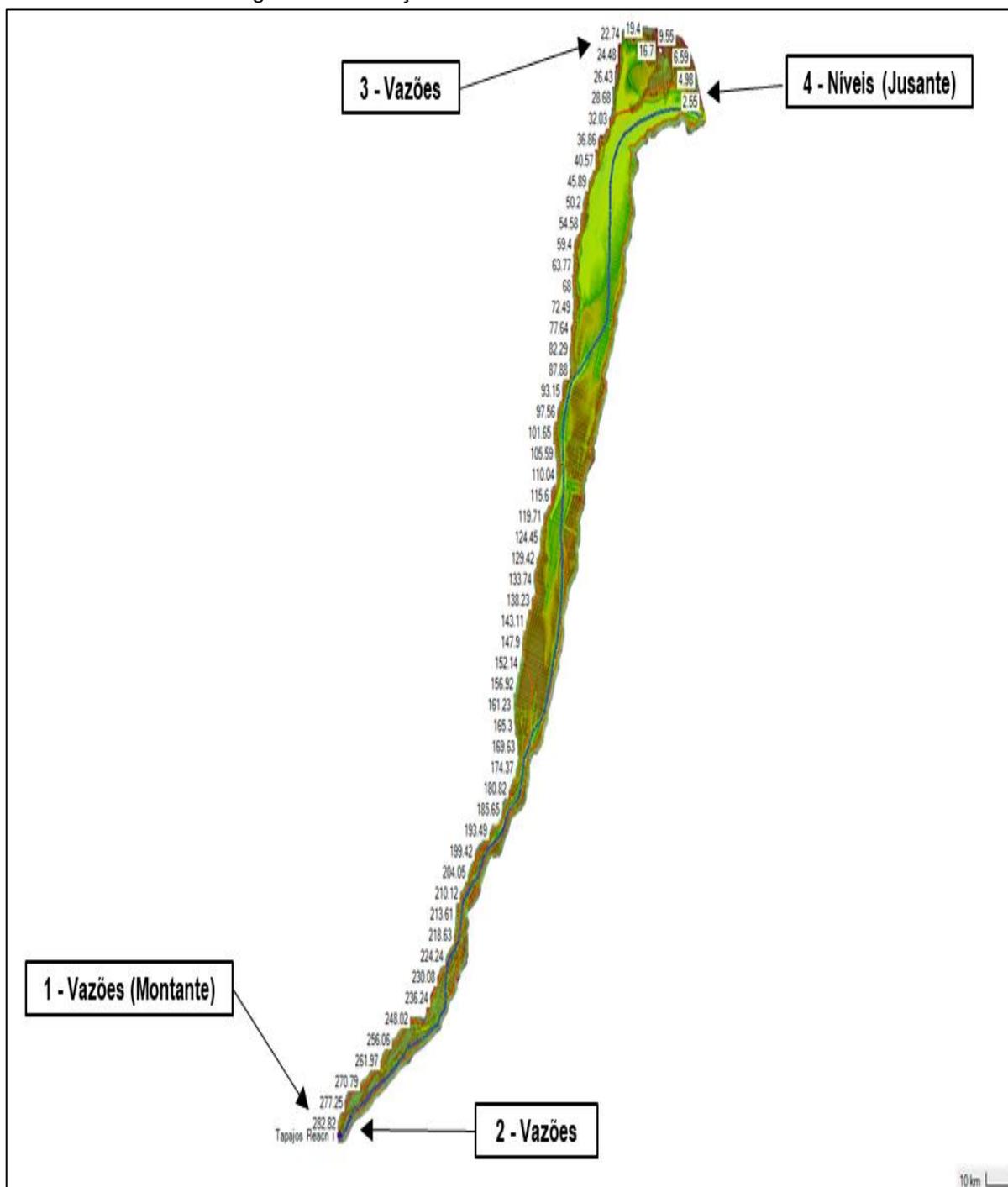
Os modelos hidráulicos, dependem de dados de entrada, tanto na fase de sua concepção, calibração e validação, como na fase operacional das previsões. Os dados de entradas básicos para a sua elaboração, são formados por:

- **Conjunto de dados referentes a geometria do leito fluvial** (modelo digital de elevação) e rugosidade do leito (granulometria do material do leito). Caracterização topobatimétrica da região de estudo, por meio de levantamentos de campo e por bases altimétricas, fornecidas por satélites (sensoriamento remoto); e
- **Condições de contorno**, isto é, vazões a montante e nível a jusante, do trecho modelado. As condições de contorno, são condições introduzidas nos extremos dos trechos estudados, a montante e jusante do modelo, para que o modelo, dê início aos cálculos da superfície da linha d'água.

As condições de contorno inseridas no modelo, durante a realização da calibração, estão descritas a seguir e a observar na (Figura 24).

1. *Flow Hydrograph* (Vazão no tempo): Seção 282,82 – **Montante, em Itaituba**;
2. *Uniform Lateral Inflow* (Vazão no tempo): Seção 282,63 – **Vazão difusa**;
3. *Lateral Inflow Hydrograph* (Vazão no tempo): Seção 24,48 – **Rio Arapiuns**; e
4. *Stange Hydrograph* (Níveis no tempo): Seção 0,04 – **Jusante**.

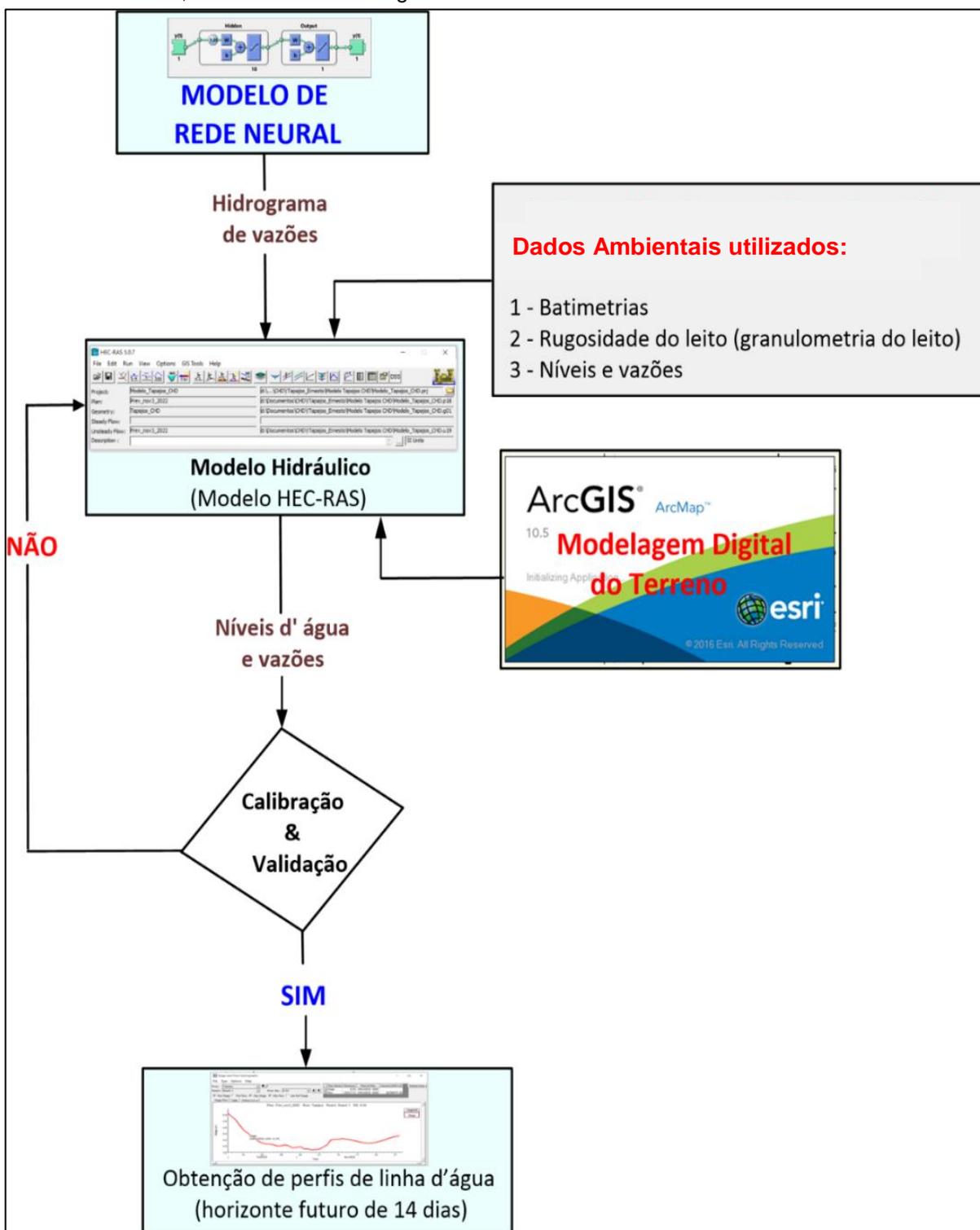
Figura 24: Condições de contorno utilizadas no modelo.



Fonte: O próprio autor.

Uma vez definidas as características geométricas do modelo e impostas as devidas condições de contorno, procede-se à aplicação da metodologia, descrita na Figura 25, fluxograma do processo de modelagem hidrodinâmica.

Figura 25: Fluxograma, do processo de cálculo, dos perfis diários de linha d'água, num horizonte de 14 dias, com base na modelagem hidráulica.



Fonte: O próprio autor.

Dentro deste escopo geométrico, destaca-se a elaboração do Modelo Digital do Terreno (MDT), atualizado, que é composto por três camadas de dados, ordenados, por prioridade dos mais antigos, para os mais recentes:

**a - Altimetria de satélite:** Esta é a camada de mais baixa prioridade, sendo utilizada exclusivamente, para a representação dos trechos não navegáveis, incluindo as margens do rio Tapajós e as suas diversas ilhas, pedrais e bancos, que eventualmente, ficam emersos durante o ciclo hidrológico. Foi utilizada a base de dados altimétricos global “Alos World 3D”, com resolução espacial de 30 metros, de domínio público e disponibilizada pela Agência de Exploração Espacial Japonesa (JAXA). Ao todo, foram empregados 156 quadros de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , abrangendo uma área de busca inicial, de aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados;

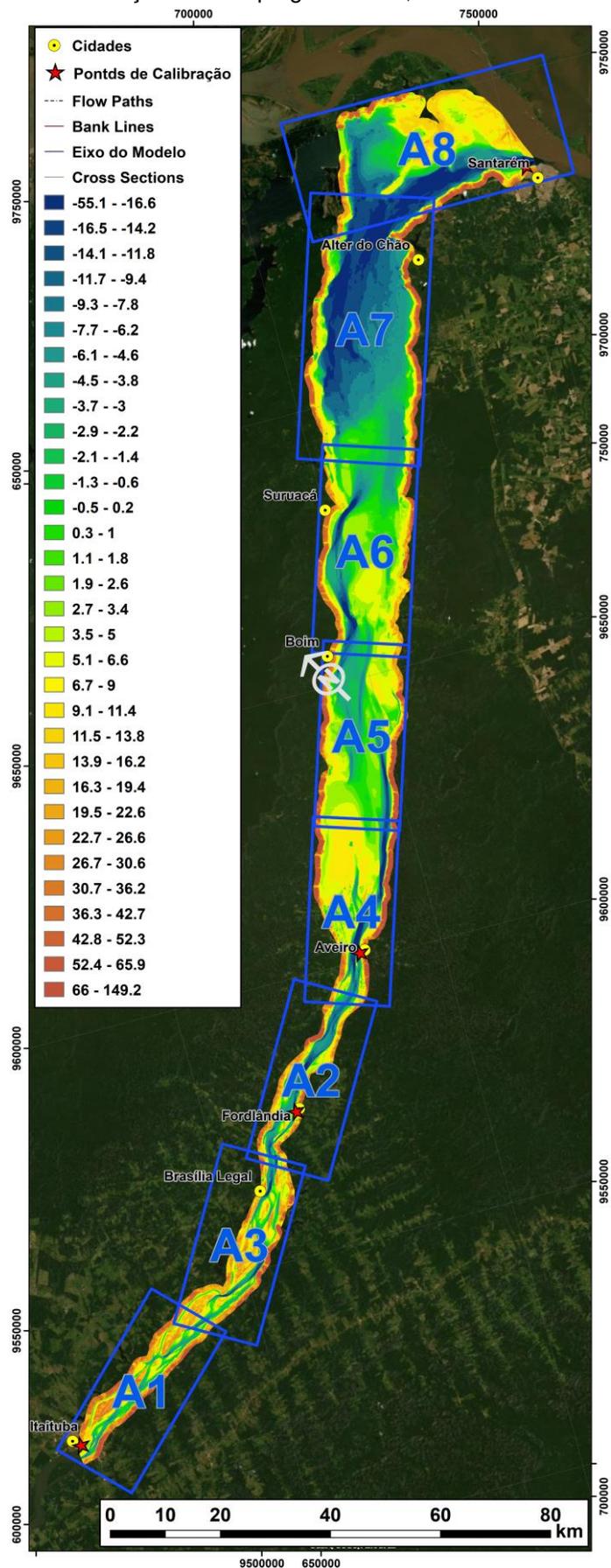
**b - A batimetria:** fornecida pelas campanhas de levantamentos batimétricos monofeixe, de margem a margem; e

**c - A batimetria:** fornecida pelas campanhas de levantamentos batimétricos monofeixe, do canal de navegação.

Uma vez concluída a elaboração do MDT, da região de interesse, formado pela composição das três camadas de dados, procedeu-se a elaboração da discretização espacial deste MDT, dentro da plataforma HEC-RAS®. Dentro deste contexto, foram definidos o eixo do talvegue do rio Tapajós, as duas linhas de margem do canal, as duas linhas de fluxo e o conjunto de seções transversais, que representam as células de cálculo do modelo hidrodinâmico. Ao todo, foram definidas 1513 seções transversais, resultando em um espaçamento médio entre seções de aproximadamente 180 m, similar ao espaçamento utilizado, no levantamento batimétrico de margem a margem. O conjunto de todas as informações citadas neste tópico é ilustrado na Figura 26.

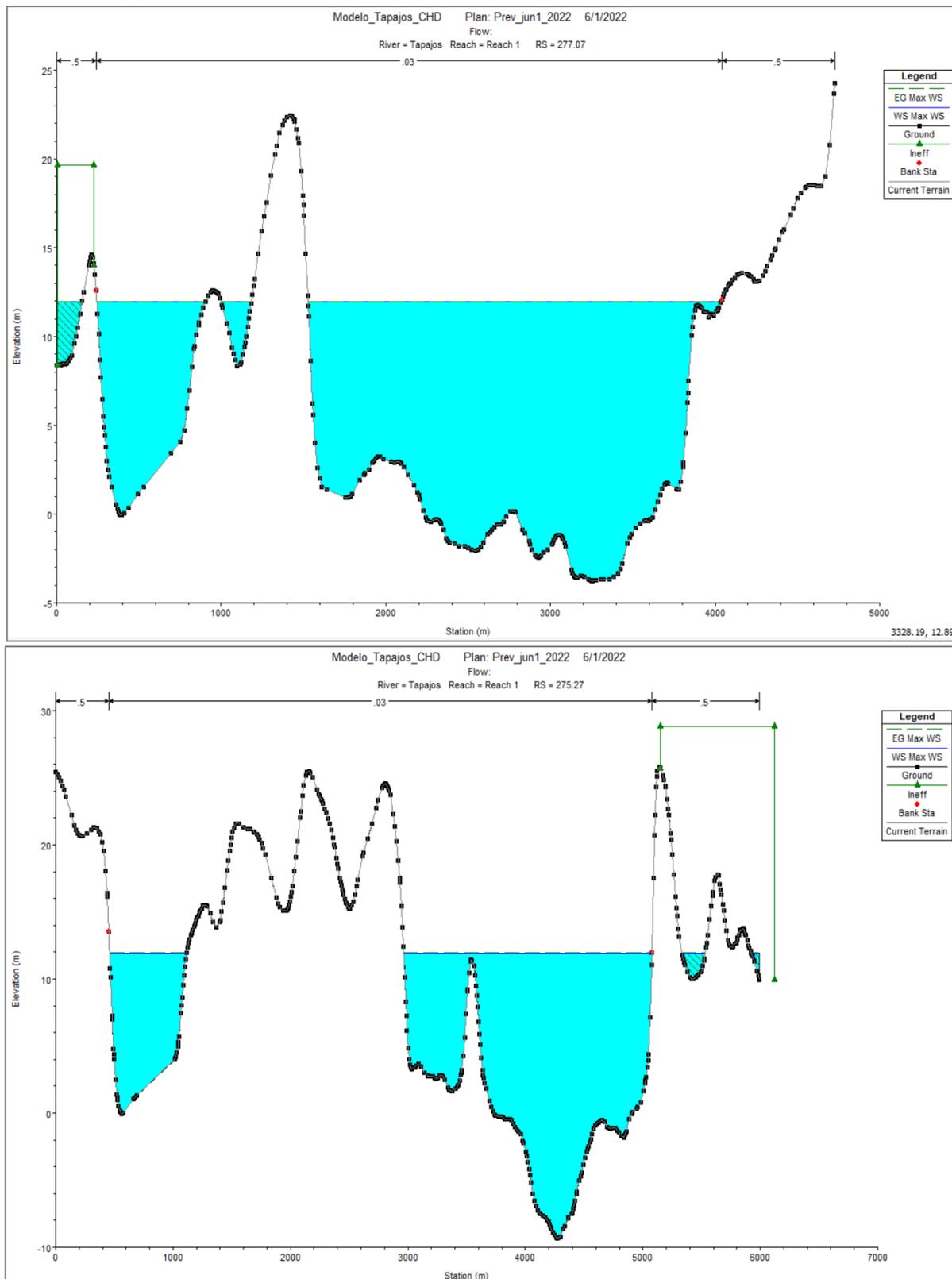
Uma vez concluído o desenho das principais linhas diretrizes do modelo hidrodinâmico, procedeu-se ao tratamento individual de cada uma das 1513 seções transversais, por meio da determinação das zonas de fluxo ineficiente. Estas zonas, representam trechos das seções transversais, que são passíveis de inundação, atuam como regiões de armazenamento, mas que, no entanto, não permitem o fluxo longitudinal livre da água. Estas regiões, representam trecho onde o corpo de água, tem natureza estagnada ou lântica, como lagoas laterais ou regiões sujeitas ao fenômeno de trapping hidrodinâmico. A Figura 27, apresenta alguns exemplos deste tipo de tratamento, realizado nas seções transversais.

Figura 26: Mapa de localização do escopo geométrico, adotado no modelo hidrodinâmico.



Fonte: O próprio autor.

Figura 27: Exemplos do tratamento das seções transversais, referente a delimitação das zonas de fluxo ineficiente. Nestes casos, referentes a lagoas marginais do rio Tapajós. Marcações em verde.

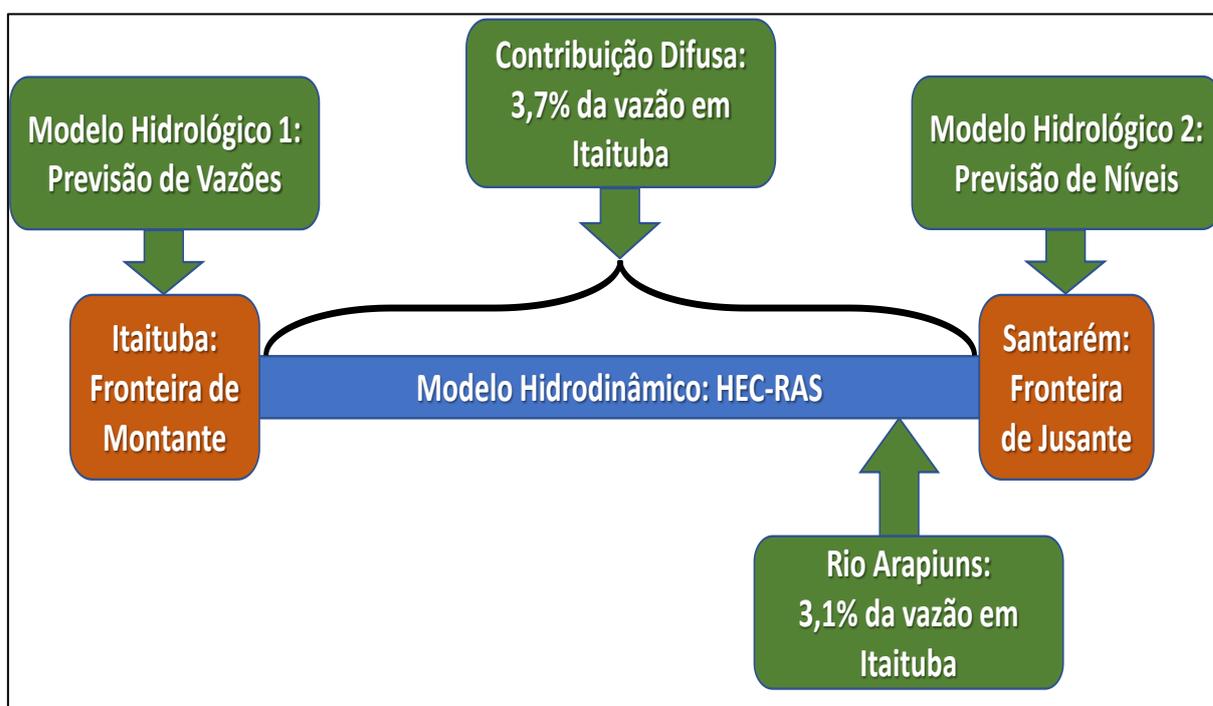


Fonte: O próprio autor.

### 6.1.2 PREVISÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO DO RIO TAPAJÓS

A elaboração de modelos computacionais hidrodinâmicos, no intuito de prever profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação do rio Tapajós, exige o estabelecimento de condições de contorno a montante (vazão em Itaituba) e a jusante (níveis d'água em Santarém). No contexto do estabelecimento de modelos de previsão em horizonte próximo, a definição destas condições de contorno, depende diretamente da disponibilidade de dados fluviométricos/telemétricos, em ambas estações (Itaituba e Santarém). Estes dados, alimentam os modelos de previsão da série temporal, que por sua vez, fornecem as condições de contorno para o modelo computacional hidrodinâmico. A Figura 28, ilustra o escopo de modelagem adotado, para a previsão de profundidades mínimas, no rio Tapajós.

Figura 28: Escopo de modelagem, do trecho do rio Tapajós, de Itaituba a Santarém.



Fonte: O próprio autor.

Como mencionado anteriormente, todas as vazões de entrada do modelo hidrodinâmico (HEC-RAS®), serão dependentes dos resultados do modelo hidrológico de previsão de vazões em Itaituba (Modelo Hidrológico 1) e de níveis em Santarém (Modelo Hidrológico 2).

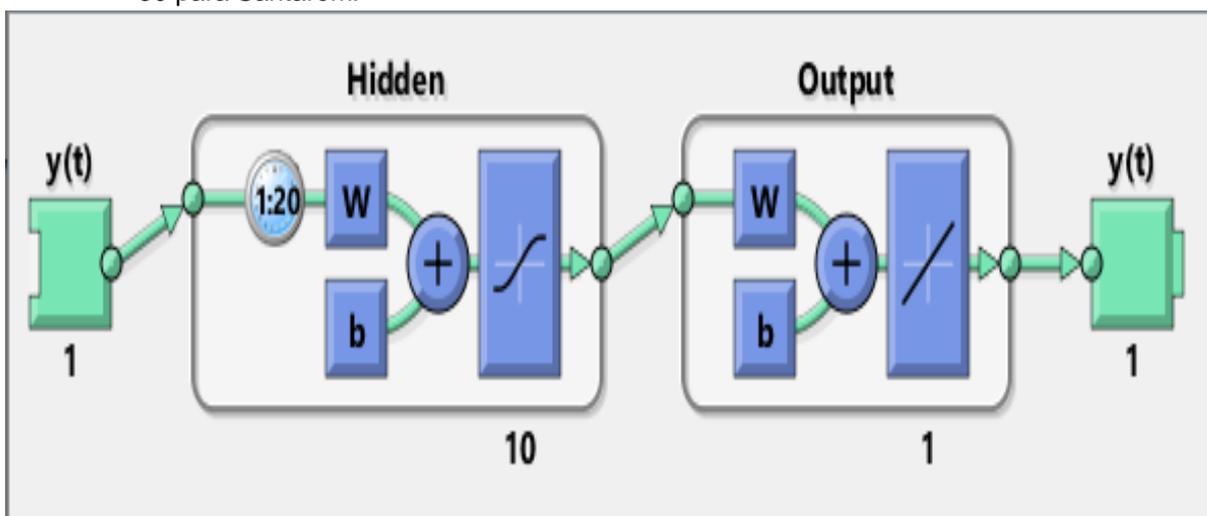
### 6.1.3 DESCRIÇÃO DAS REDES NEURAIS ADOTADAS PARA AS PREVISÕES

A arquitetura definitiva escolhida, consiste em uma rede rasa (aquela que possui uma única camada oculta), de 10 neurônios e 20 defasagens temporais, para Itaituba e 30 para Santarém (valores mínimos necessários, para a existência de auto correlações de erro estatisticamente insignificantes). Considerando que o modelo é baseado na predição de vazões médias diárias, o emprego de 20 defasagens, significa que o valor predito para o dia seguinte é uma função dos valores observados, nos últimos 20 dias, da série histórica da variável em questão, conforme a Equação 1, abaixo:

$$y(t) = f(y(t - 1)), f(y(t - 2)), \dots, f(y(t - 20)) \quad (15)$$

A Figura 29, consiste em uma ilustração da arquitetura adotada, para as redes neurais, conforme descrita no parágrafo anterior.

Figura 29: Arquitetura das redes neurais, utilizadas na previsão das séries temporais, do rio Tapajós. São utilizados 10 neurônios, na camada oculta, 20 defasagens temporais, para Itaituba e 30 para Santarém.



Fonte: O próprio autor.

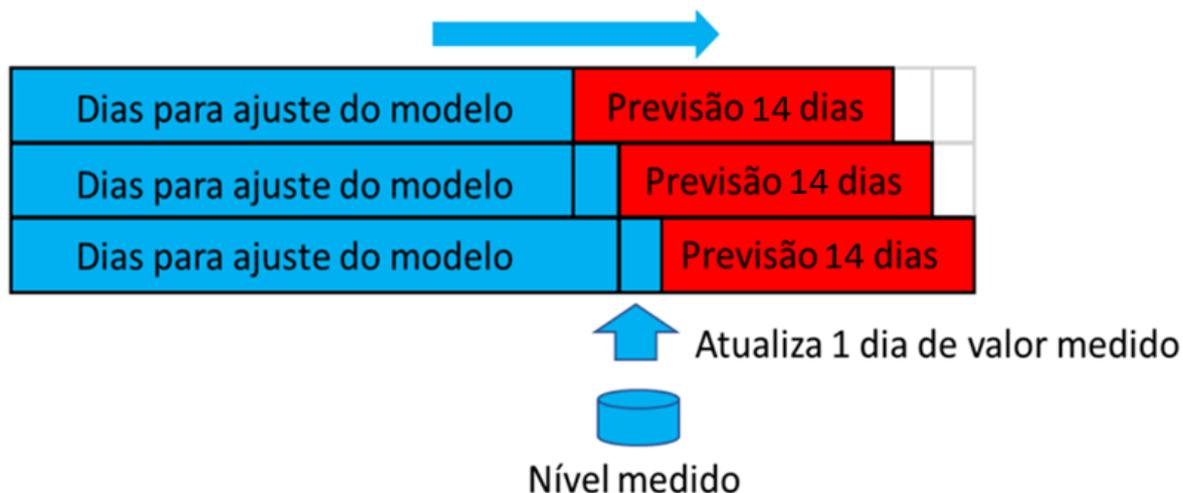
#### 6.1.4 DESEMPENHO DAS PREVISÕES DAS REDES NEURAIAS

O teste de desempenho, consistiu em usar os modelos NARNN, para realizar previsões de 14 dias, durante toda a série histórica disponível, para cada estação, utilizando como comparativo, as próprias séries históricas disponíveis. Para tal, utilizou-se do método de análise Walk-Forward (Figura 30).

O treinamento das redes neurais, foi feito em plataforma MATLAB, por meio do algoritmo conhecido como *Levenberg-Marquardt Backpropagation*, utilizando as bases de dados, referentes às séries históricas, de níveis médios diários, para as estações de Itaituba (de 1974 a 2019) e Santarém (de 1971 a 2020). Estas séries, foram divididas em três partes: 70% para o treinamento propriamente dito, 15% para o processo de validação e 15% para o teste final da rede. Uma vez treinada e validada com os dados da série histórica, a rede recebe, como entrada, os últimos 30 dias de dados limnimétricos, das estações e prevê o comportamento do nível da água, para os próximos 14 dias. Os diferentes parâmetros do treinamento das redes, bem como um informe sobre a qualidade das previsões geradas, serão discutidos especificamente, para cada estação fluviométrica nos tópicos a seguir.

O método consiste em, primeiramente, prever os próximos 14 dias, em seguida, ‘andar’ um dia para frente e depois, calibrar novamente o modelo, atualizando este dia, com o valor medido pela estação fluviométrica e então prever os próximos 14 dias. Este procedimento é repetido até chegar ao fim do conjunto de teste. Como resultados deste processo, chega-se a 14 vetores de série temporal equivalente a cada dia da previsão. Estes vetores, quando comparados com a série histórica da estação fluviométrica em questão, permitem a elaboração de métricas, que aceita a quantificação da qualidade destas previsões.

Figura 30: Esquema Walk-Forward, utilizado para a realização dos testes de desempenho, das previsões.

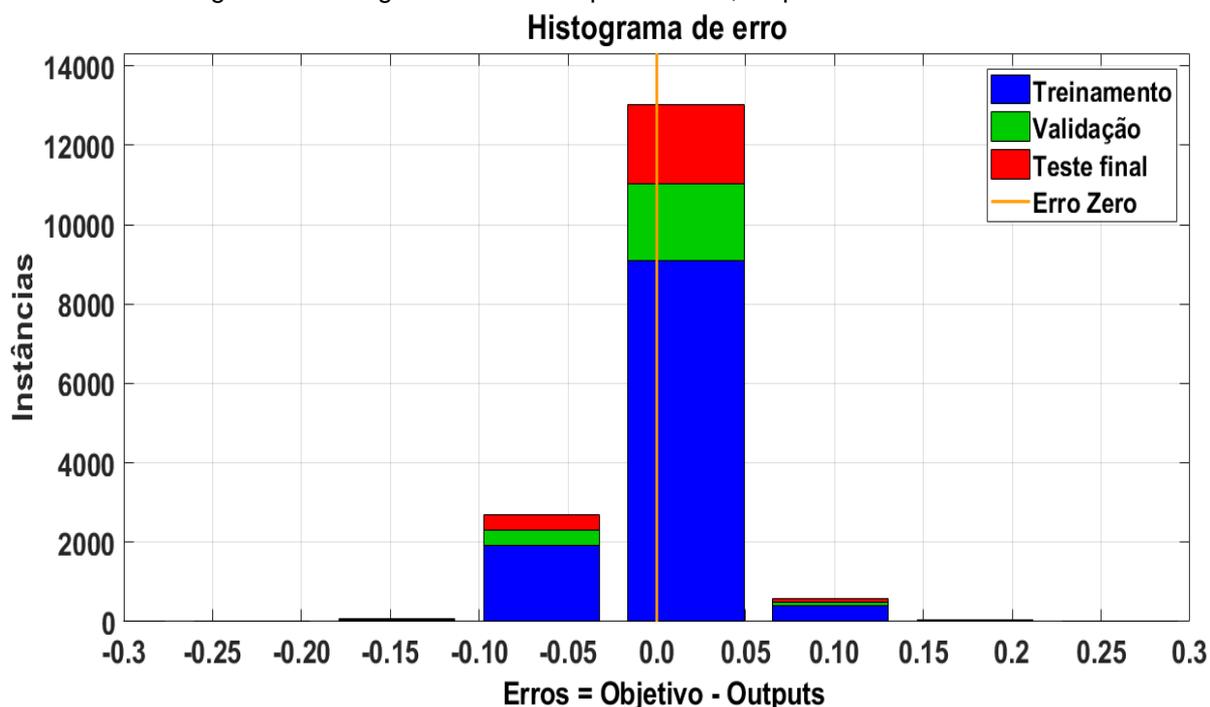


Fonte: O próprio autor.

## I. Estação de Itaituba

A Figura 31, representa o histograma dos erros observados, para todos os primeiros dias de previsão gerados, ao longo da série histórica. Como podemos observar a 75% dos erros, está abaixo dos 5 cm, enquanto que 97% dos erros, estão abaixo dos 10 cm.

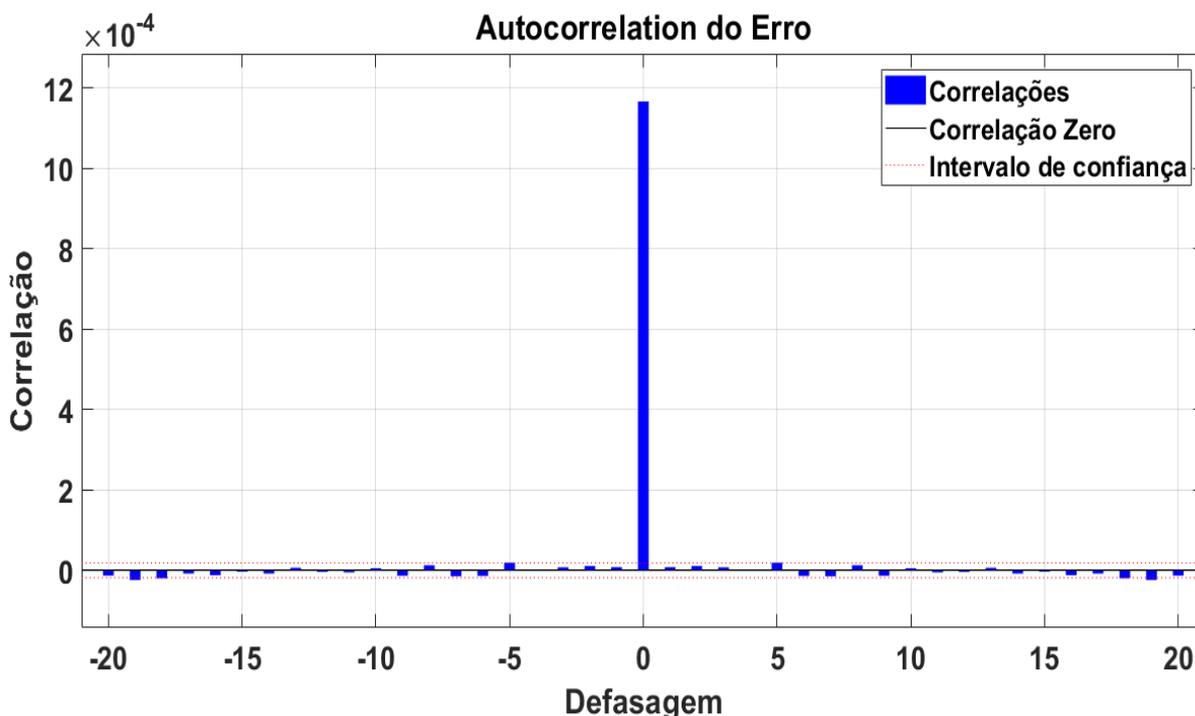
Figura 31: Histograma de erro do primeiro dia, de previsão em Itaituba.



Fonte: O próprio autor.

Uma condição importante para o bom desempenho de um modelo preditivo, como o que está em questão é que a auto correlação dos erros gerados, seja estatisticamente insignificante, como podemos observar na Figura 32, esta condição foi satisfeita.

Figura 32: Auto correlação da série de erros do primeiro dia, de previsão em Itaituba.



Fonte: O próprio autor.

A próxima etapa dos testes de desempenho, das previsões de nível em Itaituba, consistiu na geração de gráficos de dispersão entre os vetores de cada dia de previsão (do 1º ao 14º dia) e os dados reais observados na estação fluviométrica (Figura 33, Figura 34 e Figura 35).

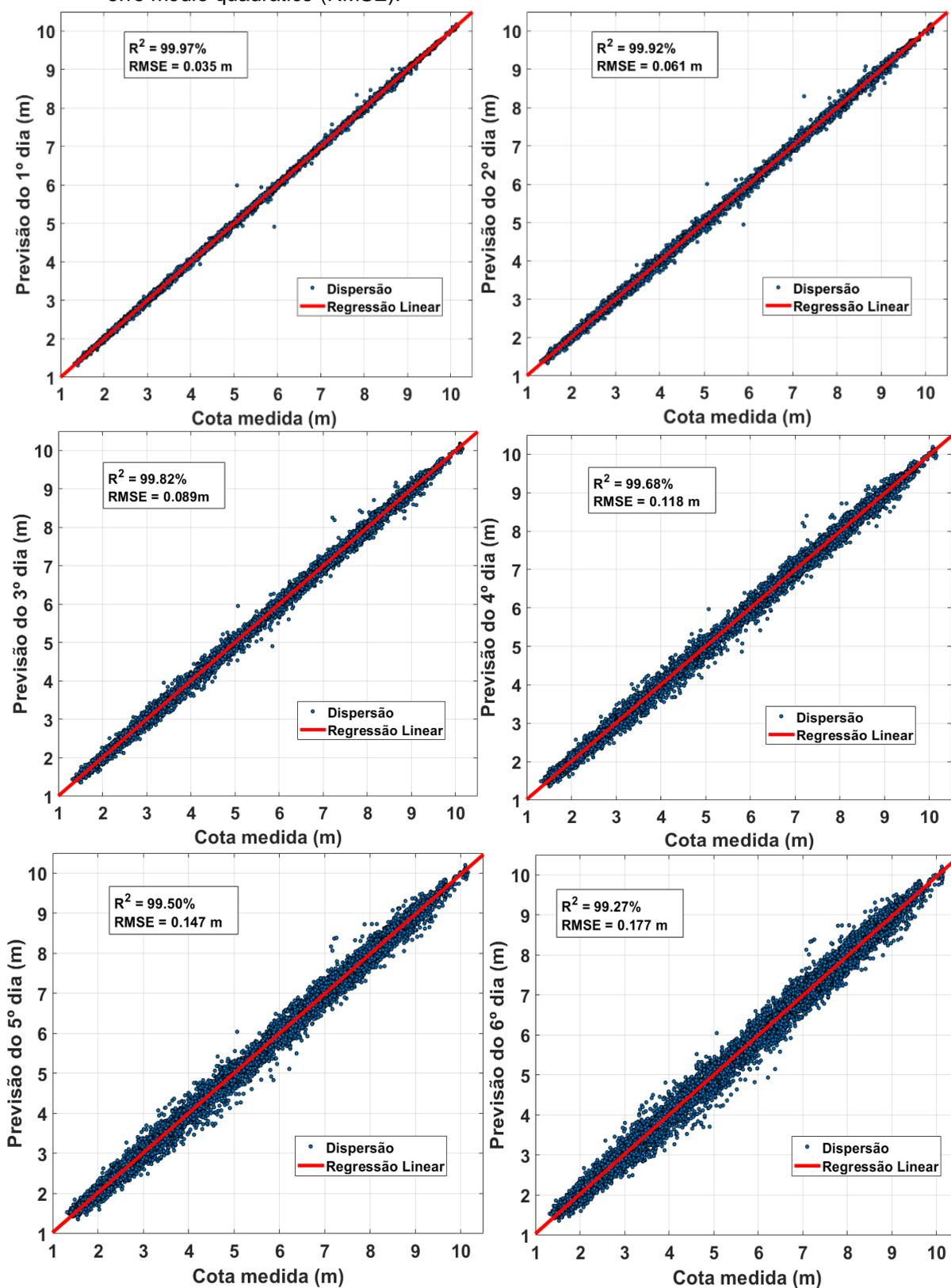
Nestes gráficos, é possível observar como, de maneira previsível, a qualidade das previsões vai piorando gradativamente, conforme o dia da previsão, se afasta da atualidade. Para cada gráfico, foram calculados os valores de correlação de Pearson ( $R^2$ ) e de raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Para o caso da correlação na estação de Itaituba, parte-se de um valor de  $R^2$ , igual a 99,97% e chega-se a um valor de 96,20%, para o 14º dia de previsão. Estes valores, apesar de decaírem com o passar dos dias de previsão, estão sempre acima de 95% e portanto, podem ser considerados satisfatórios.

Considerando a variabilidade dos valores de RMSE, ao longo dos dias da previsão, observa-se, que se parte de um valor de 3,5 cm, para o 1º dia e chega-se a um valor de 39,9 cm para o 14º dia de previsão. Tendo em vista, que a variabilidade típica da série completa, é da ordem de 10 m, o erro referente ao 1º dia de previsão, representa 0,35%, desta variabilidade, enquanto que o erro, referente ao 14º dia de previsão, representa 3,99% da mesma variabilidade. Todos estes valores, parecem adequados, dentro do contexto da sua aplicação, para a previsão de profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação do rio Tapajós.

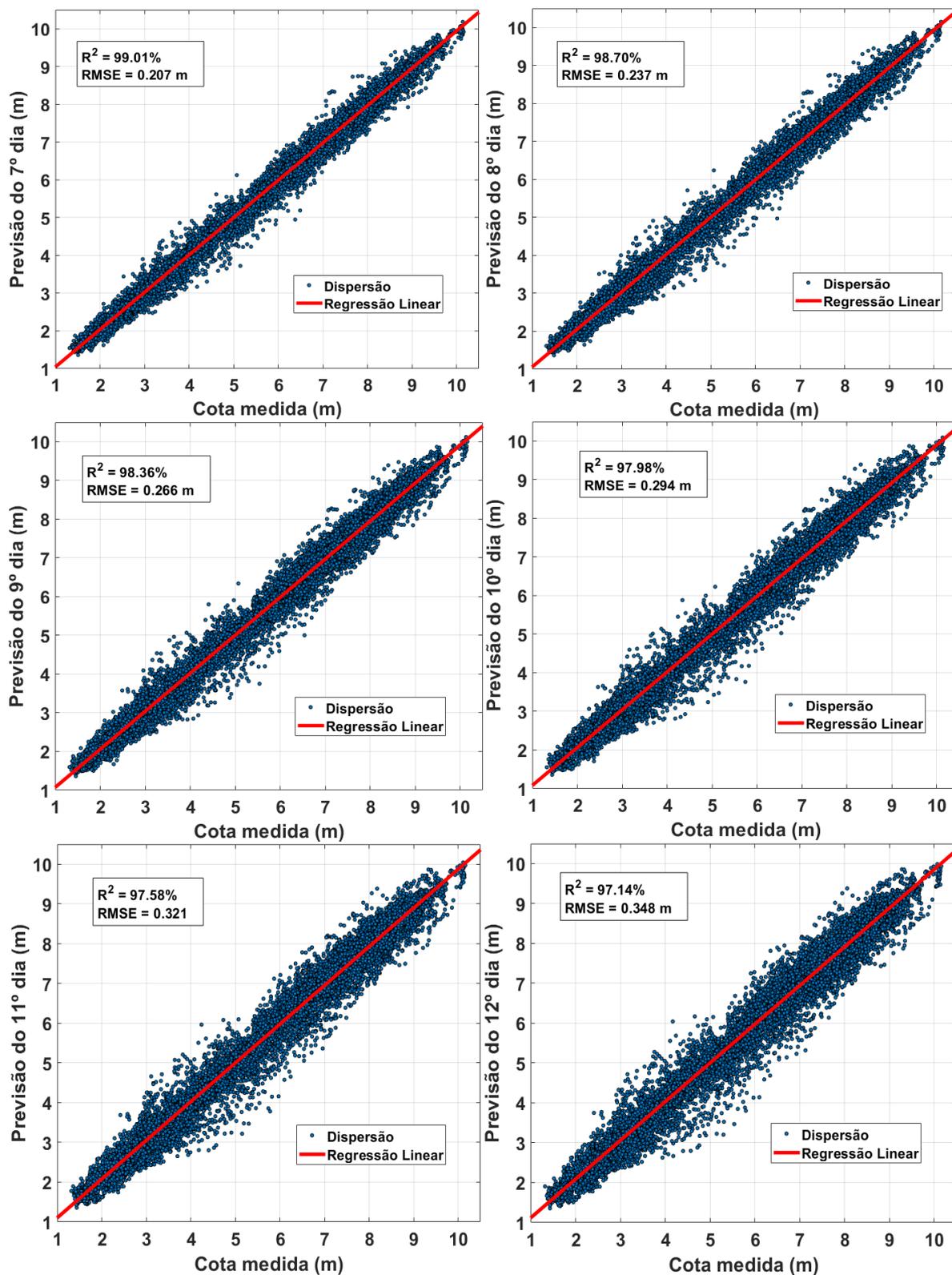
Outra característica relevante, no contexto da avaliação do desempenho das previsões, consiste em observar, que a magnitude típica destes erros, não é uniforme ao longo dos níveis observados. Os erros máximos, ocorrem sempre associados a cotas intermediárias, referentes aos momentos de enchente e vazante do rio (quando a variabilidade temporal da série é maior), enquanto que os erros mínimos, sempre ocorrem, associados aos níveis mais baixos, nos períodos de estiagem (quando a variabilidade temporal da série, diminui significativamente). Esta constatação, representa um fator positivo para a previsão das profundidades mínimas no rio Tapajós, uma vez que é justamente nos momentos de estiagem, que se requer um melhor desempenho dos modelos, devido aos riscos à navegação.

Figura 33: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o primeiro e o sexto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).



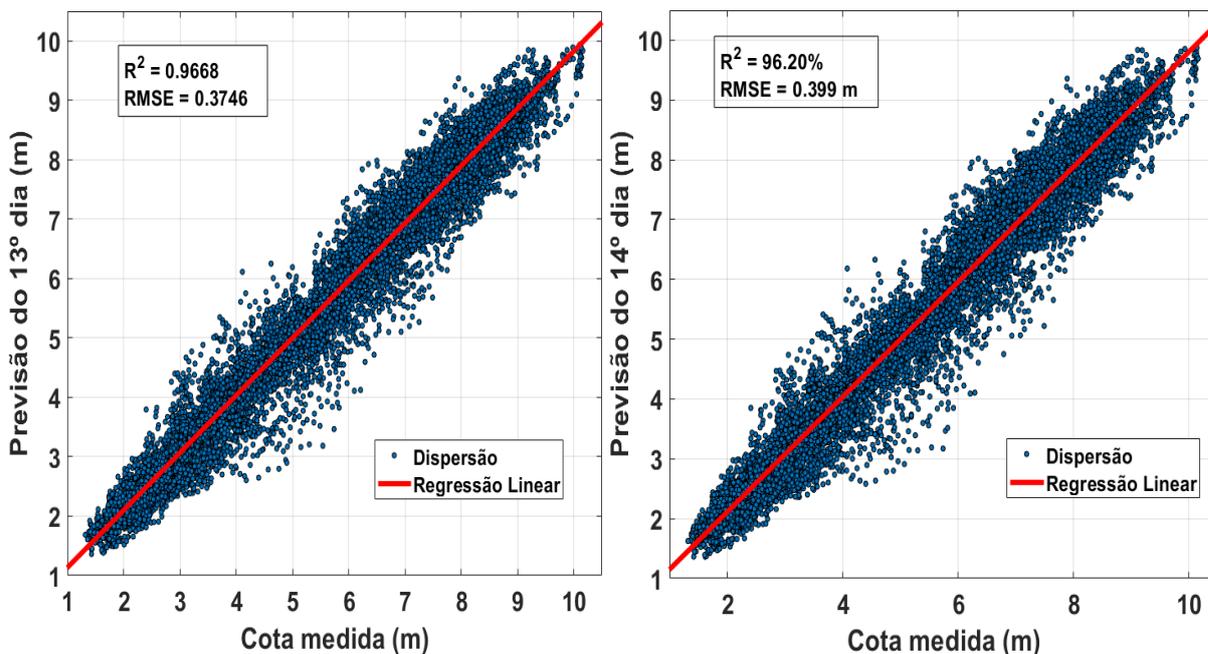
Fonte: O próprio autor.

Figura 34: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o sétimo e o décimo segundo dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).



Fonte: O próprio autor.

Figura 35: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o décimo terceiro e o décimo quarto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

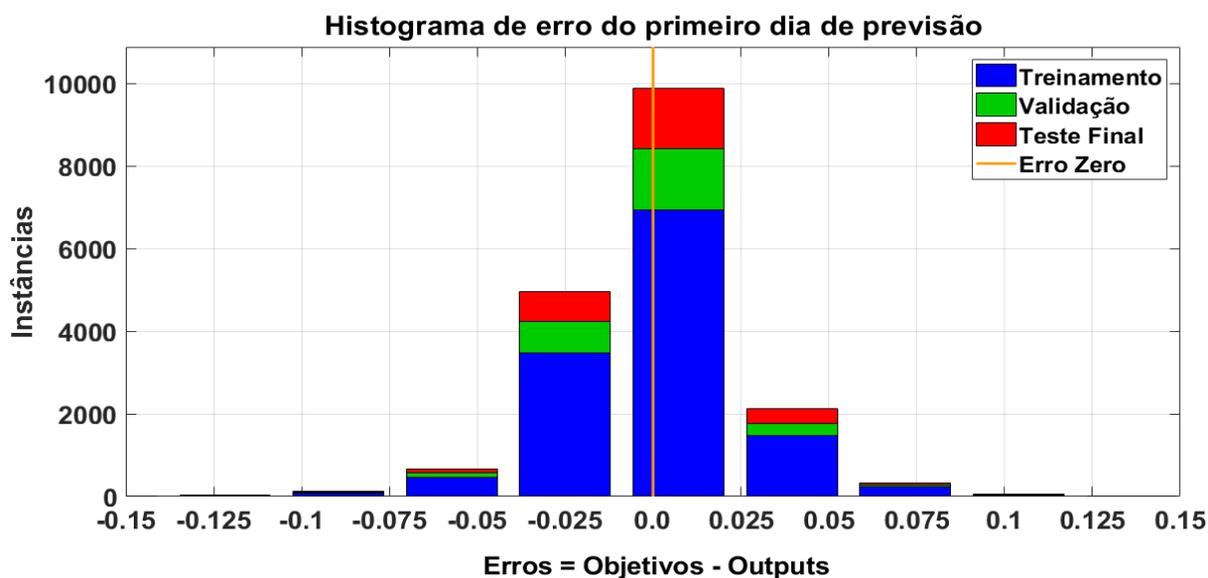


Fonte: O próprio autor.

## II. ESTAÇÃO SANTARÉM

A Figura 36, representa o histograma dos erros observados, para todos os primeiros dias de previsão, gerados ao longo da série histórica. Como podemos observar, cerca de 70% dos erros, está abaixo dos 2,5 cm, enquanto que 92% dos erros, estão abaixo dos 5 cm.

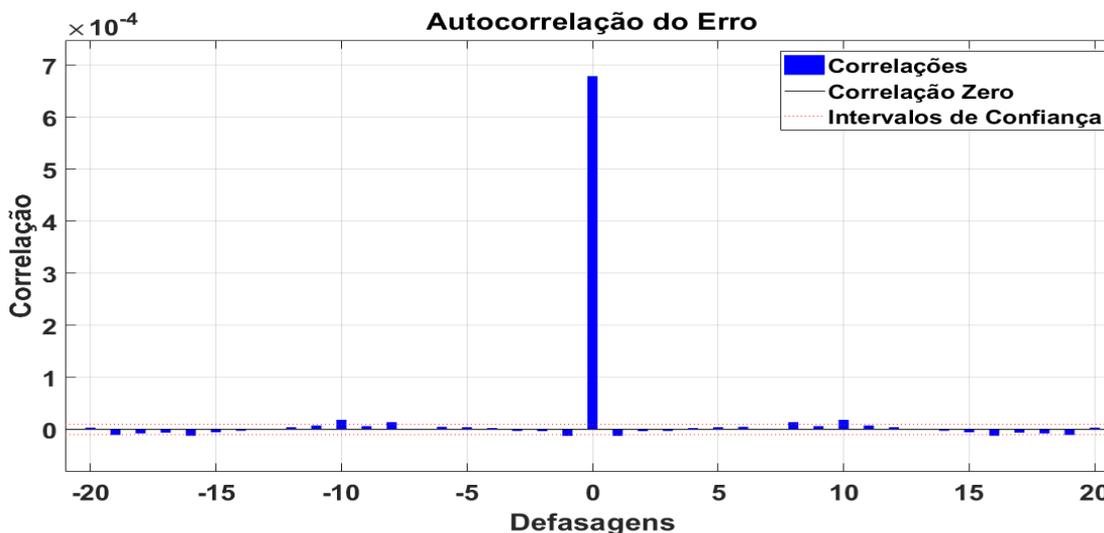
Figura 36: Histograma de erro do primeiro dia, de previsão em Santarém.



Fonte: O próprio autor.

Uma condição importante para o bom desempenho de um modelo preditivo, como o que está em questão é que a auto correlação dos erros gerados, seja estatisticamente insignificante, como podemos observar na Figura 37, esta condição foi satisfeita.

Figura 37: Auto correlação da série de erros, do primeiro dia de previsão em Itaituba.



Fonte: O próprio autor.

De maneira similar ao que se apresentou para a estação de Itaituba, no tópico anterior, seguiremos a etapa dos testes de desempenho, com a exposição dos gráficos de dispersão, entre os vetores de cada dia de previsão (do 1º ao 14º dia) e os dados reais observados, na estação fluviométrica (Figura 38, Figura 39 e Figura 40).

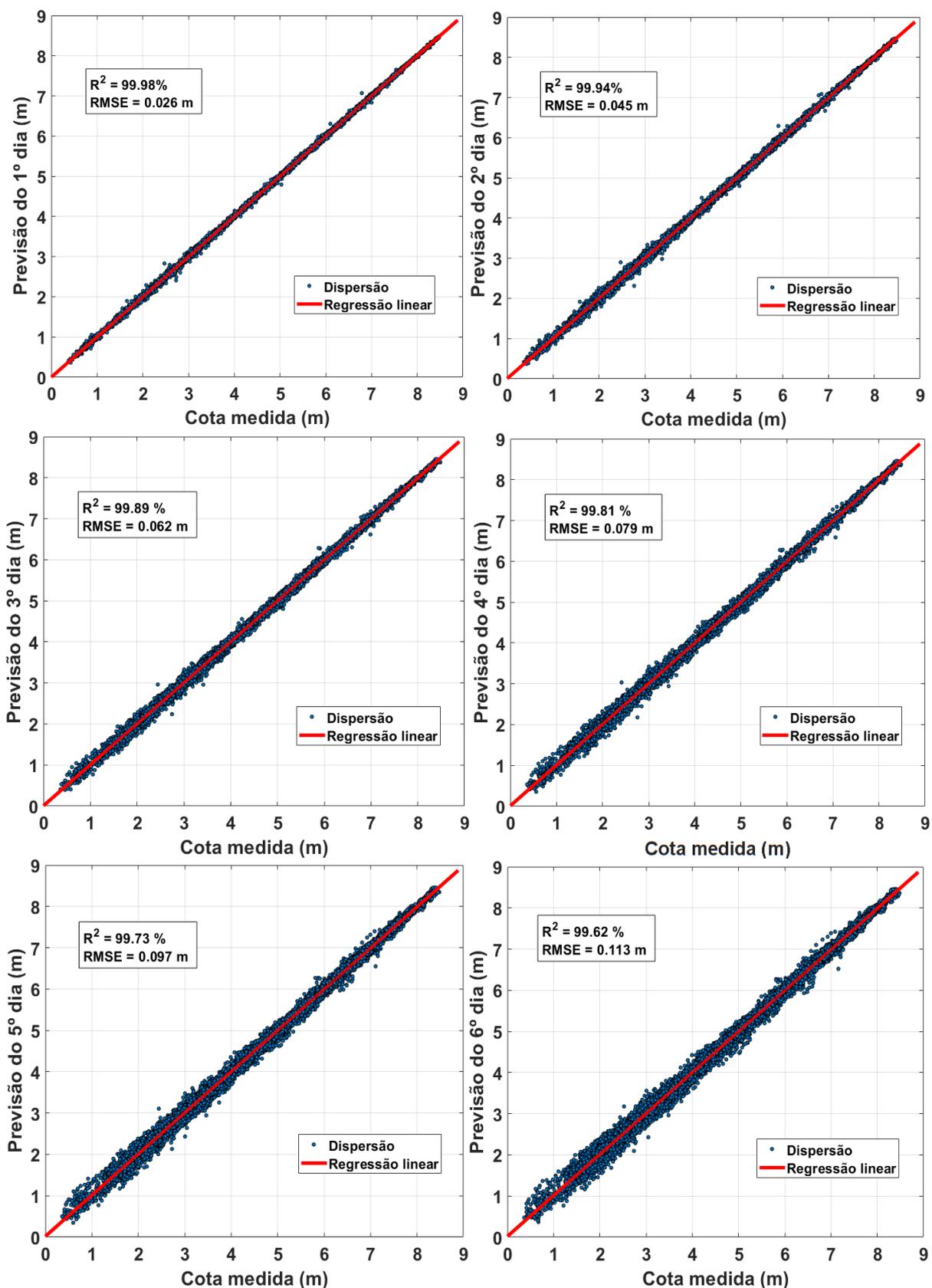
Nestes gráficos é possível observar, como de maneira previsível, a qualidade das previsões, vai piorando gradativamente, conforme o dia da previsão, se afasta da atualidade. Para cada gráfico, foram calculados os valores de correlação de Pearson ( $R^2$ ) e de raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Comparativamente, o resultado do ajuste do modelo NARNN, aos dados de Santarém, foi significativamente melhor, do que para a estação de Itaituba. Isto se deve ao fato, de que, a variabilidade temporal de alta frequência na estação de Santarém é muito menor do que em Itaituba, uma vez que o rio Amazonas, funciona como agente estabilizador da série. Considerando a correlação na estação de Santarém, parte-se de um valor de  $R^2$ , igual a 99.98%, no 1º dia e chega-se a um valor de 98,65% para o 14º dia de previsão. Estes valores, apesar de decaírem com o passar dos dias de previsão, estão sempre acima de 98% e portanto, podem ser considerados extremamente satisfatórios.

Considerando a variabilidade dos valores de RMSE, ao longo dos dias da previsão, observa-se que se parte de um valor de 2,6 cm, para o 1º dia e chega-se a um valor de 21,4 cm, para o 14º dia de previsão. Tendo em vista que a variabilidade típica da série completa é da ordem de 9 m, o erro referente ao 1º dia de previsão, representa 0,28%, desta variabilidade, enquanto que o erro referente ao 14º dia de previsão, representa apenas 2,38%, da mesma variabilidade. Todos estes valores, parecem adequados, dentro do contexto da sua aplicação para a previsão de profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação do rio.

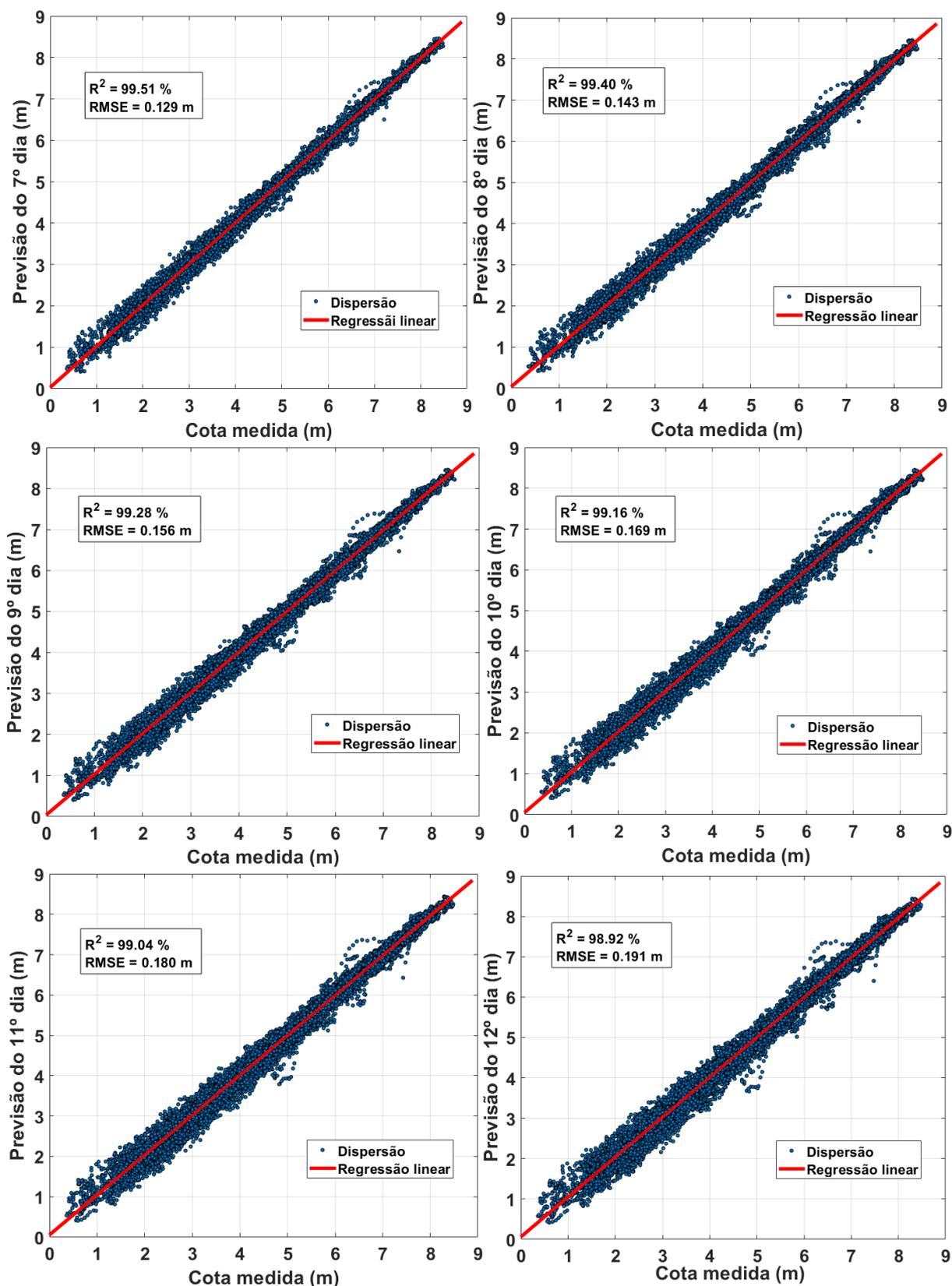
Diferentemente do que se observou para a estação de Itaituba, a magnitude típica dos erros observados em Santarém, tende a ser maior para as cotas médias-baixas (seca), em relação as cotas altas (cheia). Sob forte influência do rio Amazonas, a estação de Santarém tende a seguir o comportamento do maior rio do mundo, cuja série histórica, se caracteriza por uma maior variabilidade temporal de nível, durante a estação seca. Esta constatação, apesar de representar um fator negativo no contexto da previsão das profundidades mínimas no rio Tapajós, é amplamente compensada, pela excelente qualidade, associada as previsões geradas, com erros típicos muito menores, do que aqueles observados em Itaituba.

Figura 38: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o primeiro e o sexto dia de previsão, considerando a estação de Santarém. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ).



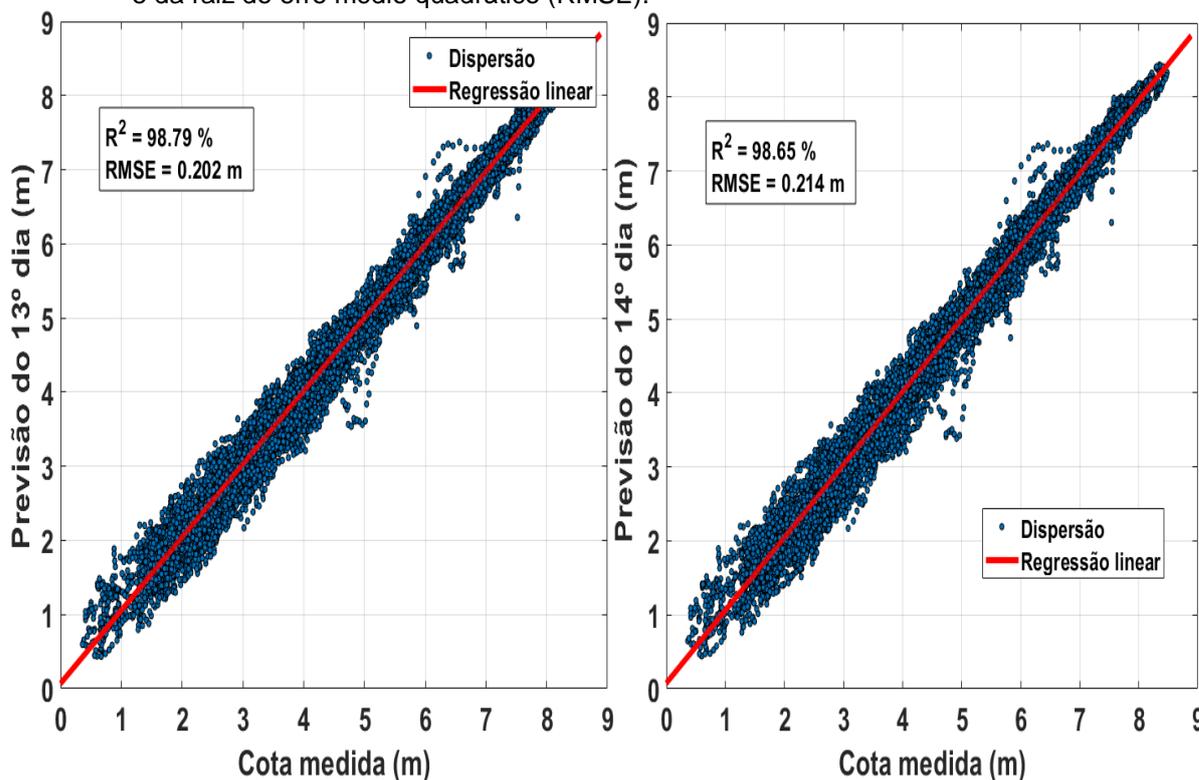
Fonte: O próprio autor.

Figura 39: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o sétimo e o décimo segundo dia de previsão, considerando a estação de Santarém. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).



Fonte: O próprio autor.

Figura 40: Dispersão entre os valores observados na série histórica e as previsões geradas, pela rede neural, entre o décimo terceiro e o décimo quarto dia de previsão, considerando a estação de Itaituba. No canto superior esquerdo, constam os valores de coeficiente de Pearson ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

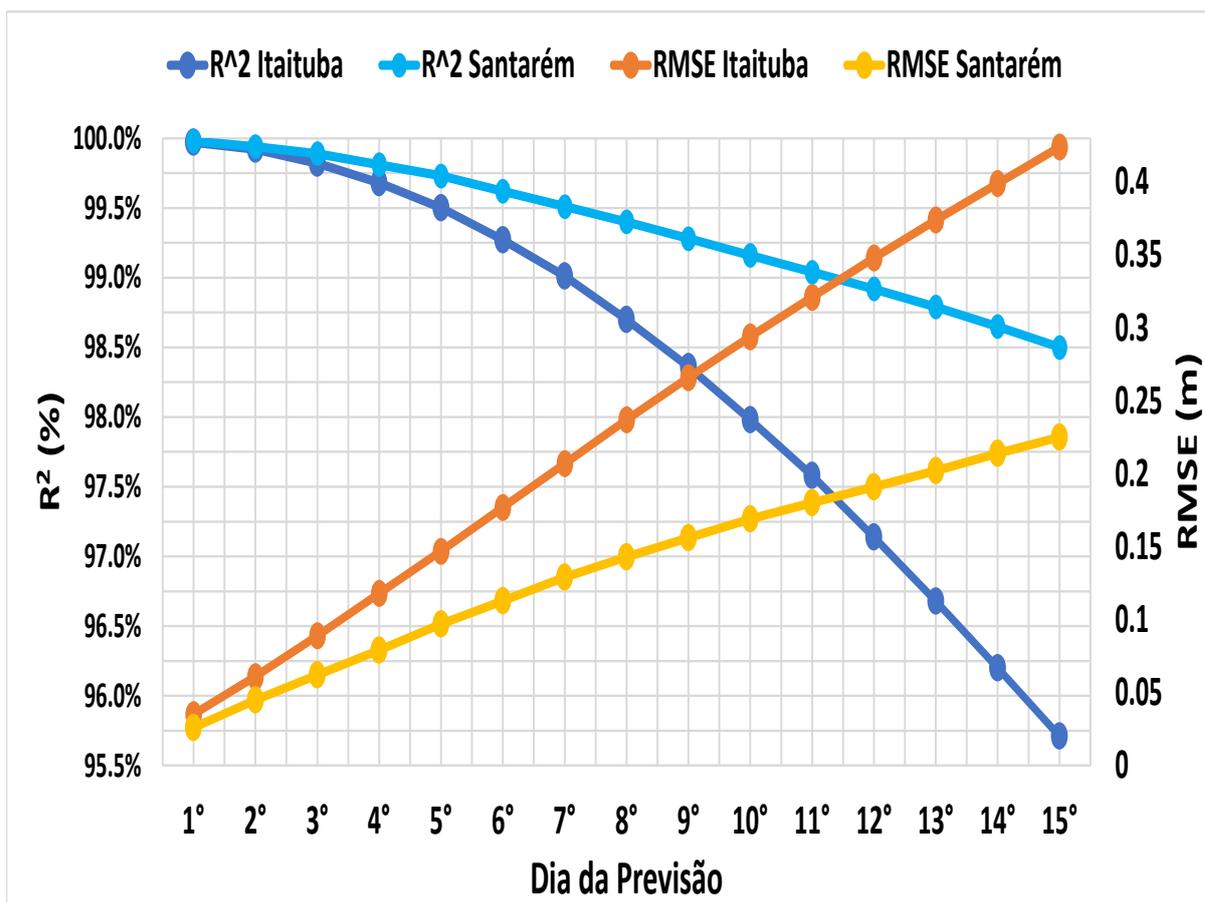


Fonte: O próprio autor.

### 6.1.5 RESUMO DO DESEMPENHO DAS NARNN E CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS

A Figura 41, apresenta um resumo dos testes de desempenho descritos nos tópicos anteriores. Como comentado anteriormente, a qualidade das previsões de nível para a estação de Santarém, foi significativamente superior, àquela obtida para a estação de Itaituba. No entanto, ambos resultados, foram considerados amplamente satisfatórios, no contexto da previsão de profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação do rio Tapajós.

Figura 41: Resumo do desempenho das previsões, das redes neurais.



Fonte: O próprio autor.

Cabe neste ponto da descrição metodológica, levantar a questão: “o que faz uma previsão ser boa ou ruim?”. A resposta a essa pergunta é ao mesmo tempo simples e complexa. A qualidade de uma previsão, qualquer que seja, está intimamente relacionada a sua utilidade frente ao objetivo, para o qual ela foi desenvolvida. Nesse contexto, dois fatores entram em jogo: o primeiro é dado pela eficiência quantitativa da previsão (quanto menores os erros associados, melhor será a previsão), enquanto que, o segundo se refere ao seu alcance temporal (quanto mais distante for o horizonte da previsão, mais útil ela será).

Um exemplo simples desta relação, pode ser dado pelo caso em que a previsão, do que vai acontecer com o rio Tapajós, no próximo minuto, possui um erro quantitativo praticamente nulo, no entanto, esta previsão, seria completamente inútil, visto que o seu horizonte é ridiculamente curto. Sendo assim, o equilíbrio ideal para uma previsão é dado pelo horizonte mais distante possível, cuja margem de erro, seja aceitável para o objetivo ao qual ela se propõe.

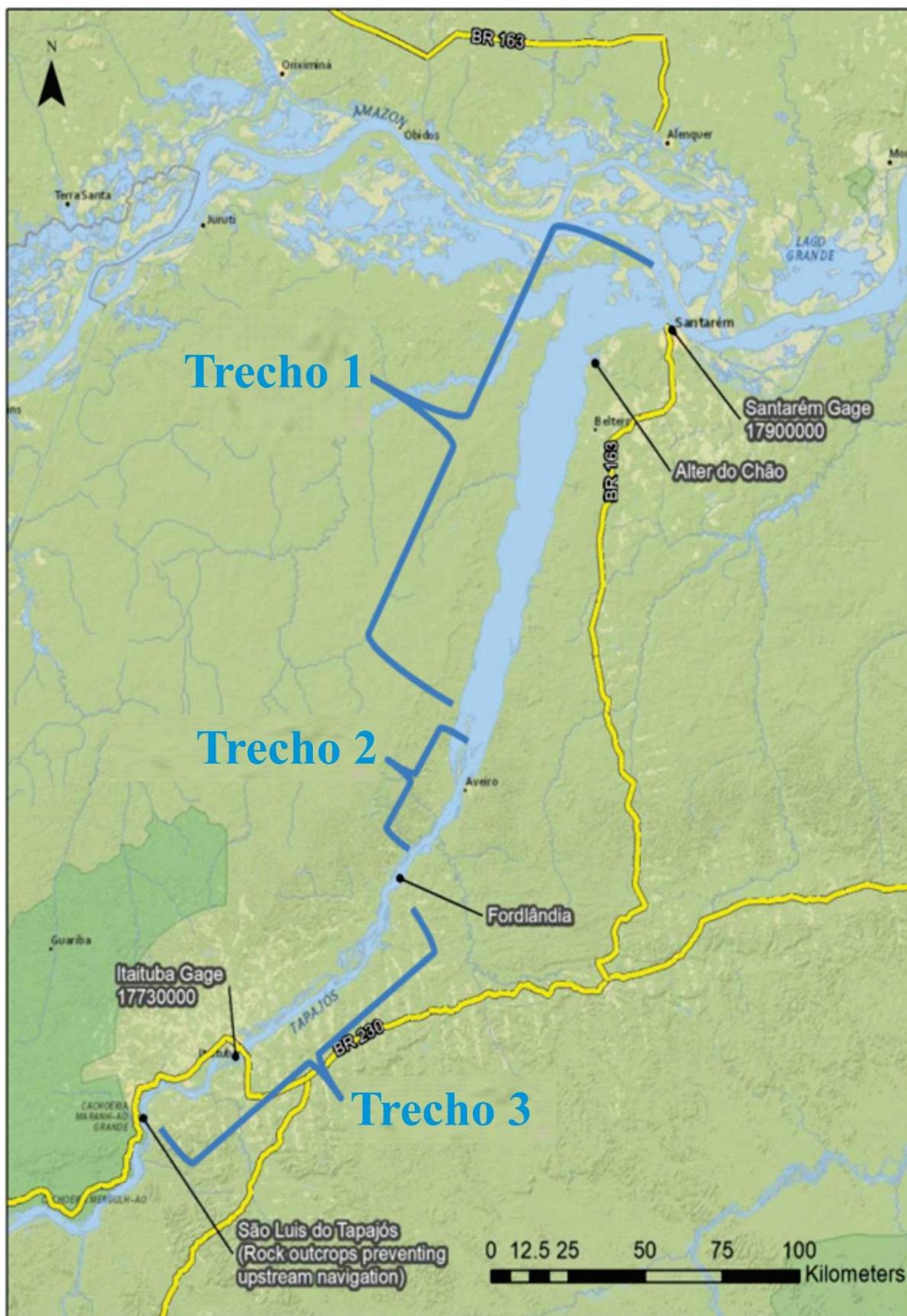
Neste contexto, se propõe o exercício de comparar os resultados das previsões geradas, para o 10° e o 14° dia. Considerando a estação de Itaituba, a previsão do 14° dia, possui uma queda na correlação de apenas 1,75%, em relação ao 10° dia de previsão. A variabilidade do RMSE, para o mesmo intervalo é de apenas 12,5 cm. Considerando a estação de Santarém, estes saltos são de 0,7% (correlação) e 5,6 cm (RMSE). Nesse sentido, defende-se o ponto de que uma previsão, com horizonte de quatorze dias, representa um ganho expressivo em utilidade, uma vez que existe mais tempo hábil, para que esta seja divulgada e de fato, utilizada pelos usuários finais, os transportadores de carga do rio Tapajós. O ônus deste ganho em utilidade, parece extremamente aceitável, uma vez que o aumento na incerteza da previsão é baixo.

Para avaliar esses níveis de incerteza, inicia-se, afirmando que o domínio em questão é influenciado por ambas estações (Itaituba e Santarém), no entanto, sabe-se que o comportamento em Santarém, tende a ser dominante, uma vez que o seu comportamento é regido, pela variabilidade do rio Amazonas.

Considerando uma perspectiva geomorfológica (Figura 42), o trecho do rio Tapajós, que vai de Aveiro até Santarém (167 km ou 58% da extensão da hidrovia), pode ser considerado com uma Ria Fluvial (ou Lago Fluvial – Trecho 1), termo intrinsecamente associado, a sistemas cujo nível da água é essencialmente dominado, por sua condição de contorno de jusante. Sendo assim, o nível de incerteza sobre as profundidades mínimas nesse trecho, será dado essencialmente, pelo nível de incerteza, da previsão de níveis em Santarém (22,5 cm, considerando o 14° dia de previsão).

A montante de Aveiro (Trecho 2), passa-se a observar algum nível de influência associada ao comportamento da estação de Itaituba. No entanto, mesmo na altura da estação de Itaituba, ainda se observa uma forte influência da variabilidade dos níveis em Santarém, uma vez que a curva de remanso do rio Amazonas, chega até a cidade de São Luiz do Tapajós (a montante de Itaituba - Trecho 3).

Figura 42: Caracterização geomorfológica do rio Tapajós, ao longo de sua Hidrovia.



Fonte: USACE/DNIT - Adaptada pelo Autor.

A ANA, publica dados históricos de descarga, calculadas para a estação de Itaituba no site da Hidroweb. De acordo com o estudo da USACE (2020), havia 189 medições de vazão, em Itaituba e esses dados, juntamente com a cota associada a estação de Itaituba, foram utilizados, para o desenvolvimento da curva-chave. Nestes dados, há uma clara variabilidade de vazões, para um determinado período do rio Tapajós, na estação de Itaituba. A histerese é causada pelo remanso do rio Amazonas, especialmente pronunciada, quando a vazão do rio Tapajós é baixa, relativamente ao alto estágio, do rio Amazonas (USACE, 2020).

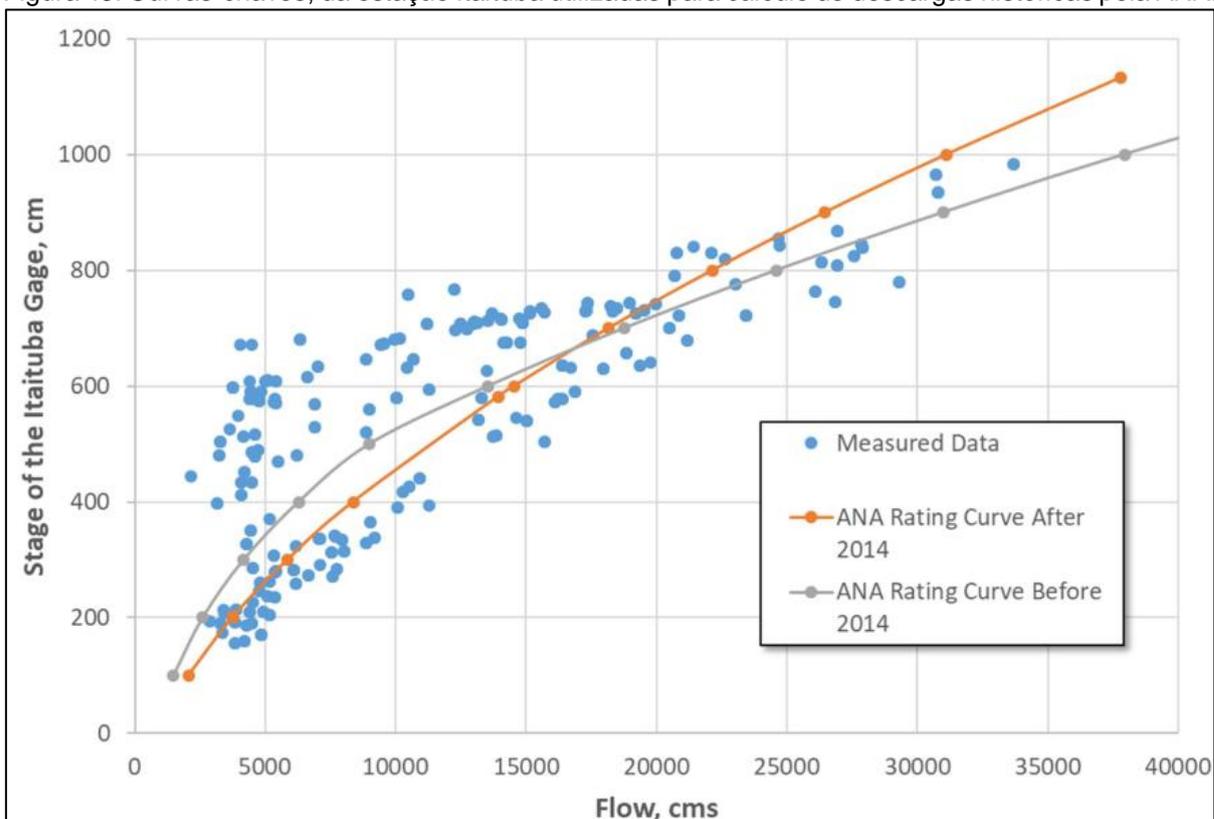
Para a estação de Itaituba, historicamente, foram estabelecidas duas curvas-chave de vazão, considerando o período hidrológico. A primeira curva-chave, é considerada válida pela ANA, para dados de 1968 até 2014 e a segunda curva-chave, válida após 10 de março de 2014. As equações para cada curva-chave, são mostradas nas Equações 16 e 17 abaixo e plotadas na Figura 43.

$$\text{Antes de 2014: se } h < 5.01, Q = 12.9869 * (h + 3.85)^3 \quad (16a)$$

$$\text{se } h > 5.01, Q = 1252.483 * (h - 1.57)^{1.6} \quad (16b)$$

$$\text{Depois de 2014: } Q = 402.68 * (h + 1.5)^{1.78} \quad (17)$$

Figura 43: Curvas-chaves, da estação Itaituba utilizadas para cálculo de descargas históricas pela ANA.



Fonte: Tapajos Waterway Planning Study (USACE/DNIT, 2020).

Para condicionar o modelo HEC-RAS, com dados de vazão, que inclua o horizonte futuro de 14 dias em Itatuba (montante), obtido pela conversão de níveis d'água, pela respectiva curva-chave, é primordial que se obtenham estes níveis d'água, para os próximos 14 dias vindouros, através do modelo de rede neural (NARNN). A jusante, em Santarém, o modelo é prescrito por níveis d'água futuros. Os detalhes sobre as condições de contorno, estão descritos no item 6.1.2.

Deste modo, importa frisar, para que se possa condicionar o modelo numérico, é necessário que dados de níveis d'água, consistidos e ininterruptos, das estações de Itaituba (Cod: 17730000) e Santarém (Cod: 17900000), provenientes do Portal HidroWeb da ANA, estejam disponíveis. E em alternativa aos dados de telemetria, destas estações fluviométricas é necessário que estejam disponíveis, dados de níveis d'água alternativos, por exemplo, provenientes dos respectivos leitores de régua.

Neste trabalho, no que diz respeito a condição de contorno de montante, ou por outra, as vazões em Itaituba, foram calculadas, usando a equação da curva-chave, dada pela Equação 17, que também consta na Figura 43.

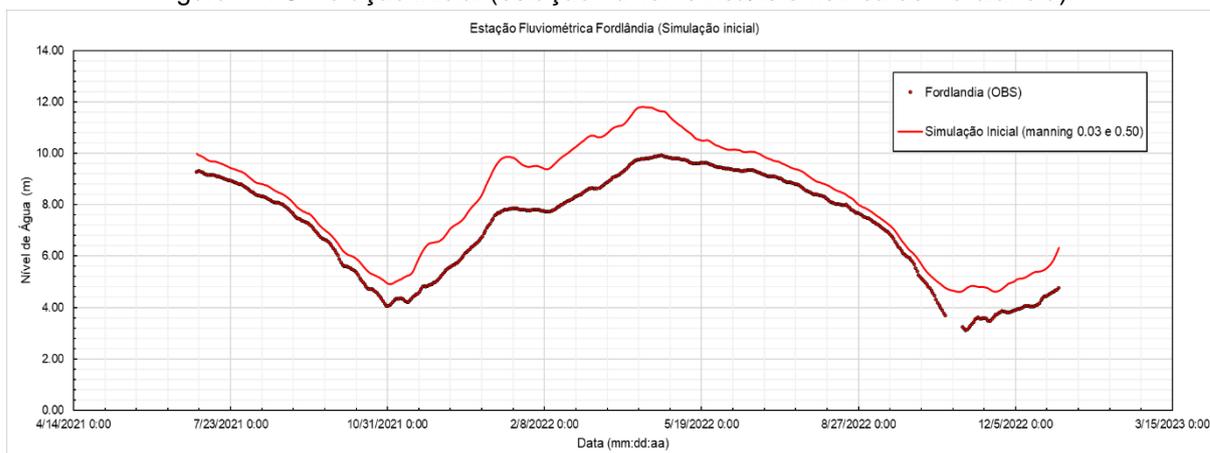
## 6.2 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

### 6.2.1 ANÁLISE INICIAL

Após a fase de concepção do modelo hidrodinâmico, quando se estabelece os dados de entrada básicos, para a sua elaboração, deu-se início, ao processo de calibração, ou seja, a avaliação do “modelo HEC-RAS” que será utilizado, na previsão das profundidades mínimas.

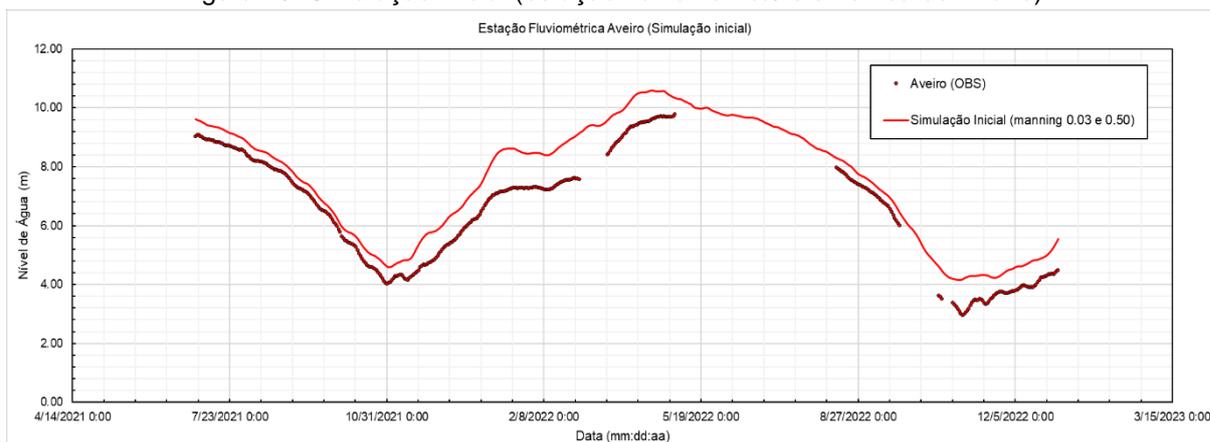
Para avaliar o quão próximo ou díspar os resultados do modelo hidráulico, em relação aos dados medidos nas estações fluviométricas/telemétricas, instaladas no âmbito do projeto, foram realizadas simulações numéricas, ou rodadas computacionais do “modelo HEC-RAS base” e posteriormente, comparados os valores de níveis obtidos pelo modelo (*linha vermelha*), com os níveis medidos pelas estações fluviométricas/telemétricas de Fordlândia (Figura 44) e Aveiro (Figura 45) (pontos vermelhos). O “modelo HEC-RAS base” neste estudo, contém coeficientes de manning de 0,03 e 0,50.

Figura 44: Simulação inicial (estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia).



Fonte: O próprio autor.

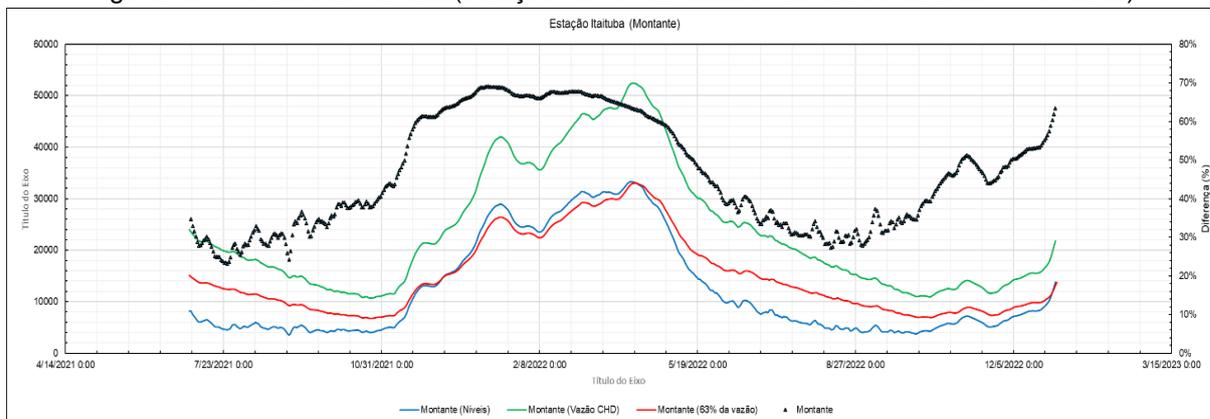
Figura 45: Simulação inicial (estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro).



Fonte: O próprio autor.

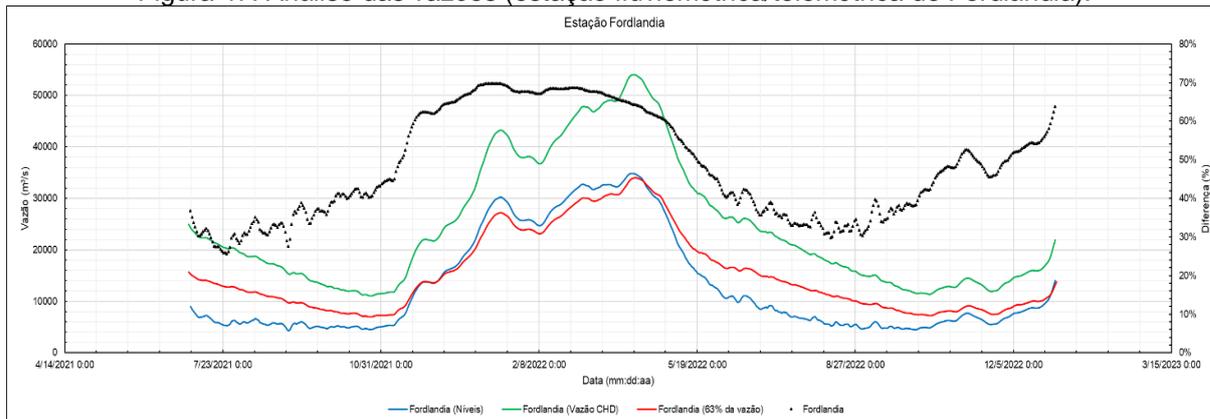
Para as estações Fordlândia e Aveiro, os níveis simulados apresentaram diferenças significativas, em relação aos dados observados, para a maior parte do tempo simulado, tendo em vista um manning factível (0,03 para a calha principal), para o rio Tapajós. Dessa forma, foi feita uma análise das vazões inseridas no modelo, pois são observadas vazões máximas superestimadas, da ordem de 50.000 m<sup>3</sup>. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 46 a Figura 48.

Figura 46: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Itaituba – Montante).



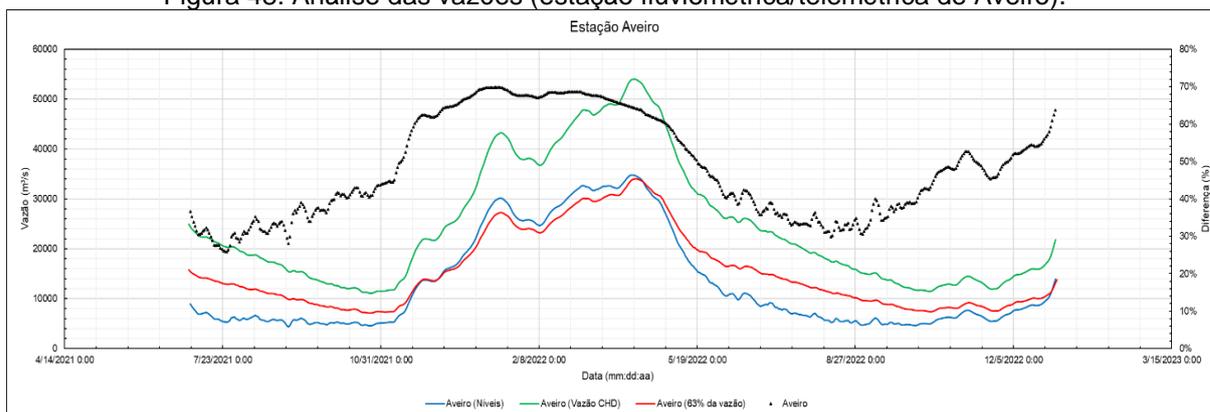
Fonte: O próprio autor.

Figura 47: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia).



Fonte: O próprio autor.

Figura 48: Análise das vazões (estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro).



Fonte: O próprio autor.

Foi simulado um cenário de análise, utilizando a condição de contorno do tipo *Stage Hydrograph*, para a condição de contorno de montante, para se ter uma sensibilidade das vazões, no rio Tapajós em função dos dados de níveis observados, para a estação fluviométrica Itaituba (Cod. 17730000). Conforme pode ser verificado, utilizando os níveis observados a montante (*curva em azul*), as vazões máximas, apresentaram uma redução significativa. Dessa forma, foi observada uma diferença da ordem de 37 % entre o hidrograma inserido no “modelo HEC-RAS base” e o hidrograma obtido através dos níveis.

Foi feita então, uma redução do hidrograma inicial em 37%, utilizando um fator (*Multiplier*: 0,63), disponível no *software* HEC-RAS, resultando em um deslocamento do hidrograma inicial e fazendo com que as vazões máximas se igualem (*curva em vermelho*). Vale ressaltar, que esse processo, foi feito tendo como objetivo, uma análise de sensibilidade dos dados inseridos no modelo, para então avaliar a sua influência, nos resultados finais e no seu comportamento.

### 6.2.2 CALIBRAÇÃO

De posse das informações descritas, no item 6.2.1, foram estabelecidos dois cenários de simulação numérica com o HEC-RAS, nomeadamente: (1) simulação numérica do “modelo HEC-RAS base”, com redução de vazão em 37% do hidrograma inicial e (2) simulação numérica, com as vazões obtidas através do modelo, considerando a série história de níveis a montante. Para ambos os cenários, foram utilizados um coeficiente de manning inicial de 0,025 (Figura 51).

Para avaliar o desempenho da calibração e a consolidação dos resultados simulados do modelo, foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), que é um indicador estatístico, para avaliar a qualidade dos resultados do modelo, em relação aos dados observados, definidos pela equação (18) abaixo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (18)$$

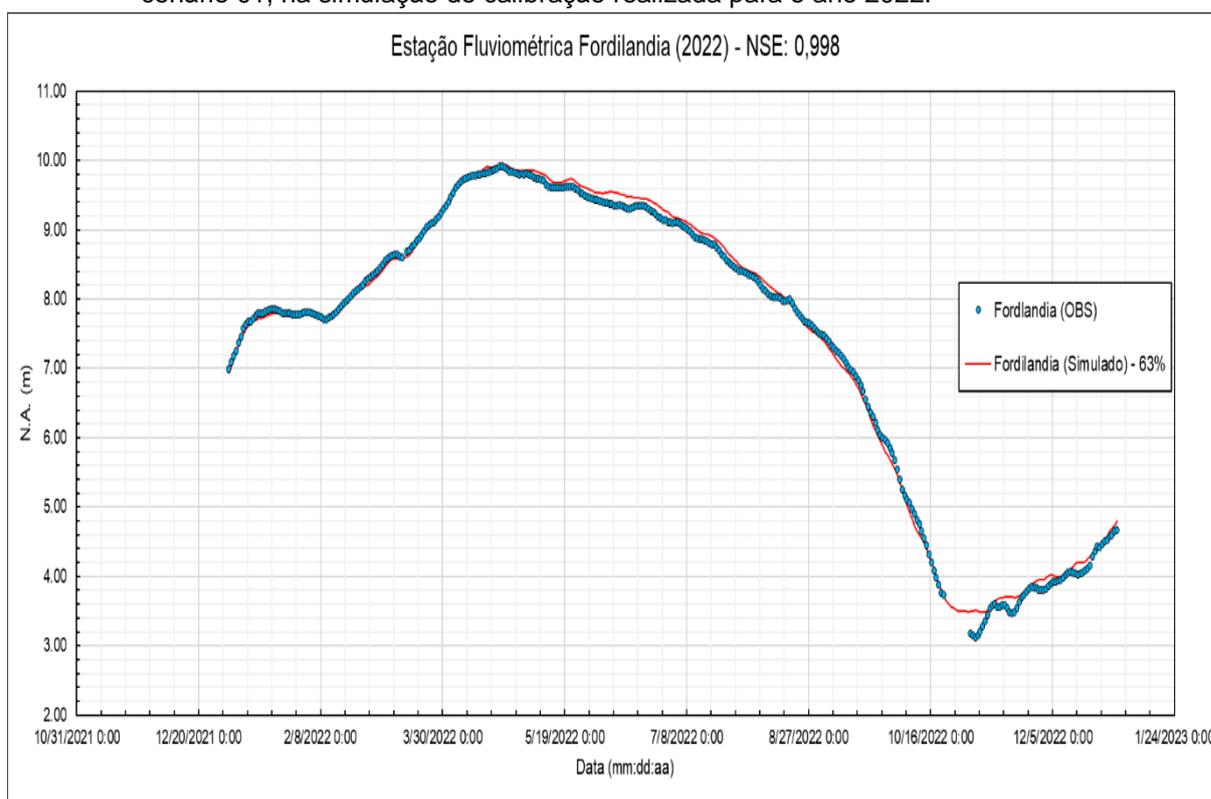
Onde  $Q_o$  é média das vazões observadas,  $Q_m$  a descarga simulada e  $Q_o^t$  a vazão observada no tempo  $t$ .

A eficiência de Nash–Sutcliffe, é calculada como um menos, a razão da variância do erro da série temporal modelada, dividida pela variância da série temporal observada. Na situação de um modelo perfeito, com variância do erro de estimação igual a zero, a eficiência de Nash–Sutcliffe, resultante é igual a 1,0 (NSE=1). Por outro lado, um modelo que produz uma variância, do erro de estimativa igual à variância da série temporal observada, resulta em uma eficiência de Nash–Sutcliffe de 0,0 (NSE=0).

- **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO “MODELO HEC-RAS BASE” COM REDUÇÃO DE VAZÃO EM 37% DO HIDROGRAMA INICIAL - CENÁRIO 01**

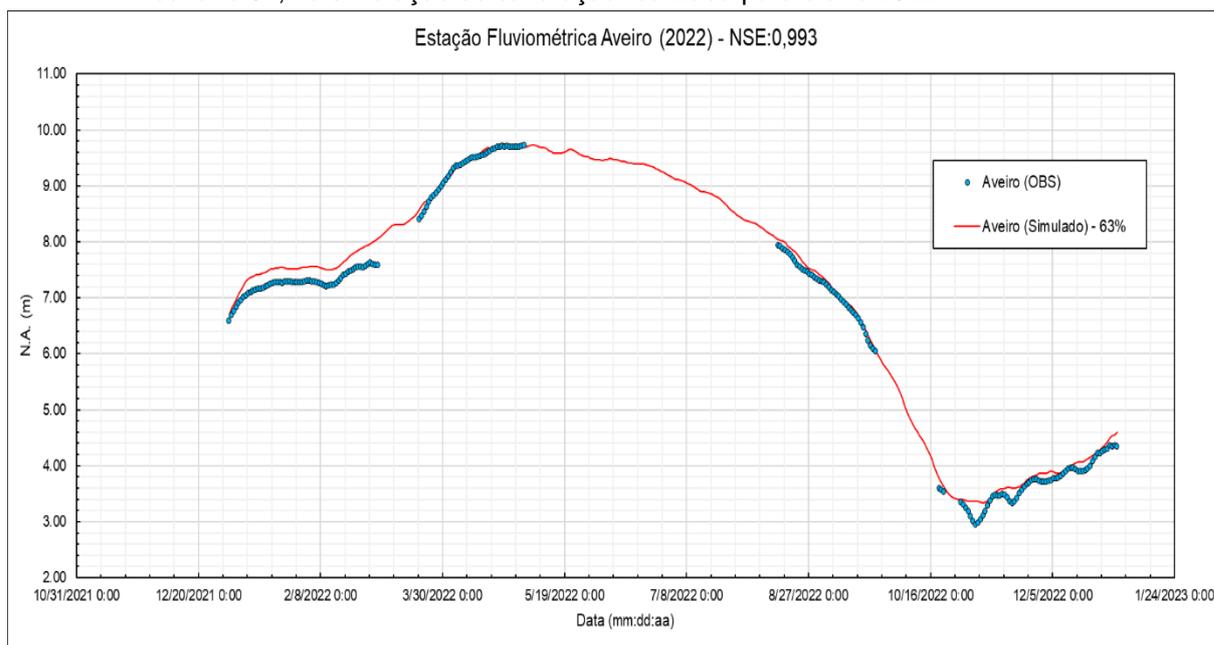
A Figura 49 e Figura 50, exibem os resultados de níveis, obtidos através da simulação numérica (linha vermelha), para o ano de 2022, no qual o modelo hidráulico de calibração, resulta da redução dos valores de vazão do “modelo HEC-RAS base” em 37%, que são comparados, com os níveis d’água medidos nas estações fluviométricas Fordlândia e Aveiro (pontos em azul).

Figura 49: Dados observados e modelados na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 01, na simulação de calibração realizada para o ano 2022.



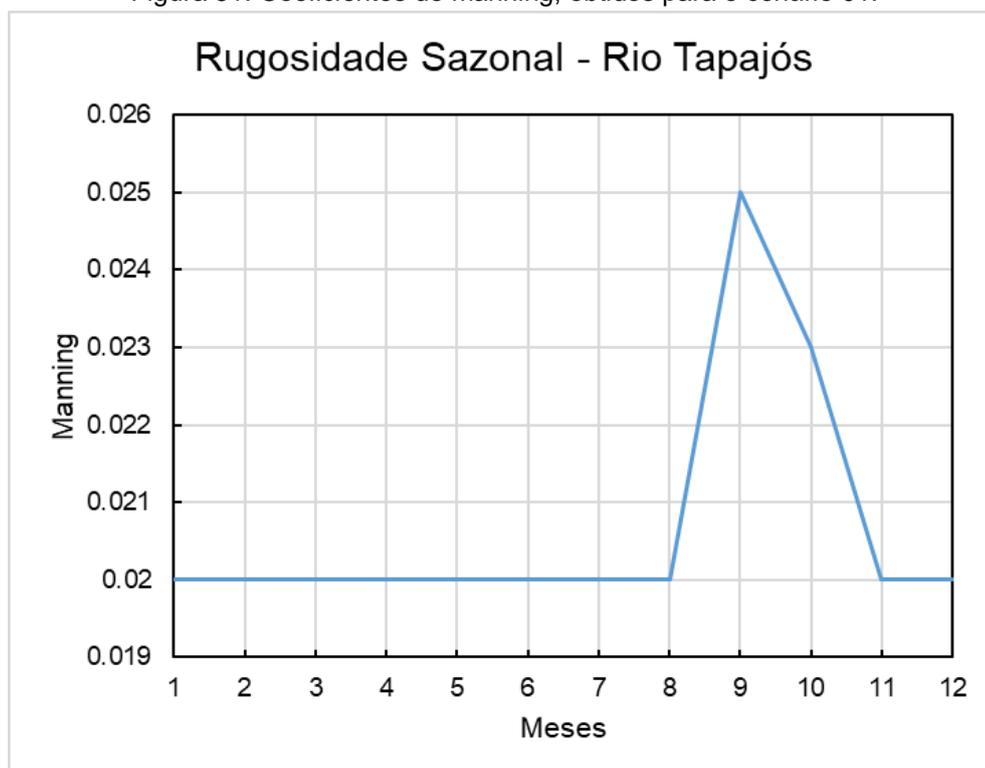
Fonte: O próprio autor.

Figura 50: Dados observados e modelados na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 01, na simulação de calibração realizada para o ano 2022.



Fonte: O próprio autor.

Figura 51: Coeficientes de manning, obtidos para o cenário 01.

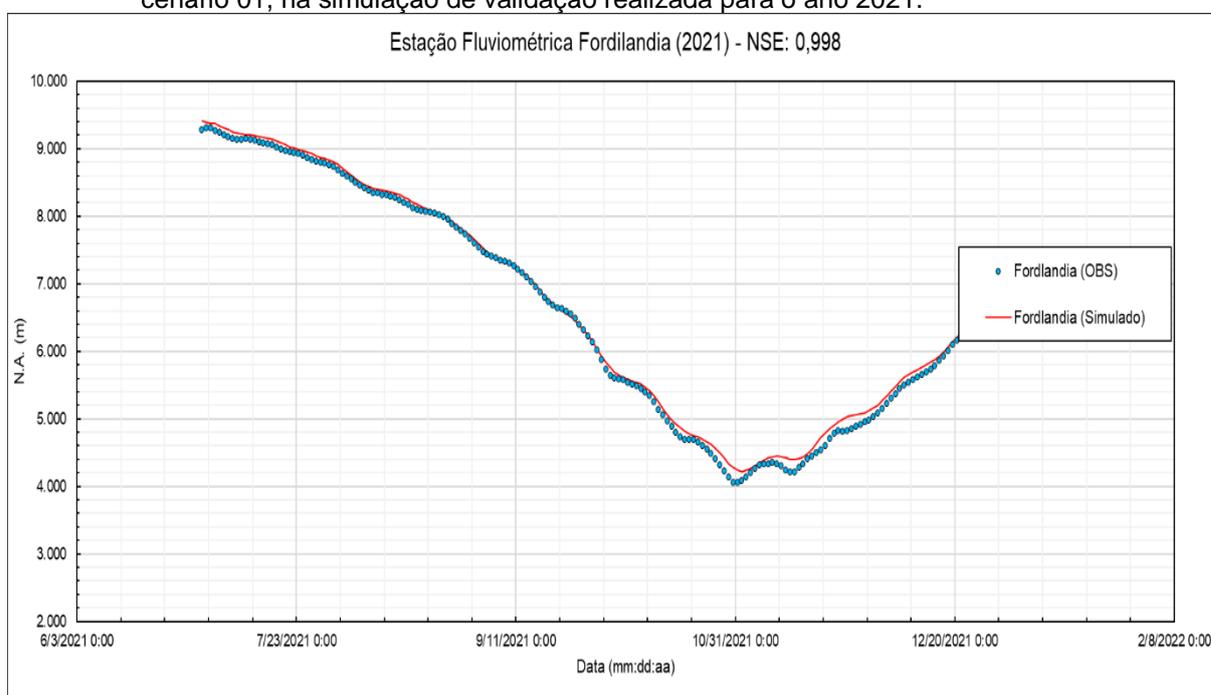


Fonte: O próprio autor.

Um processo de validação da simulação numérica do cenário 01, foi elaborado para o ano de 2021, se utilizando dos mesmos coeficientes de manning obtidos, através do processo de calibração do ano de 2022, apresentado na Figura 51.

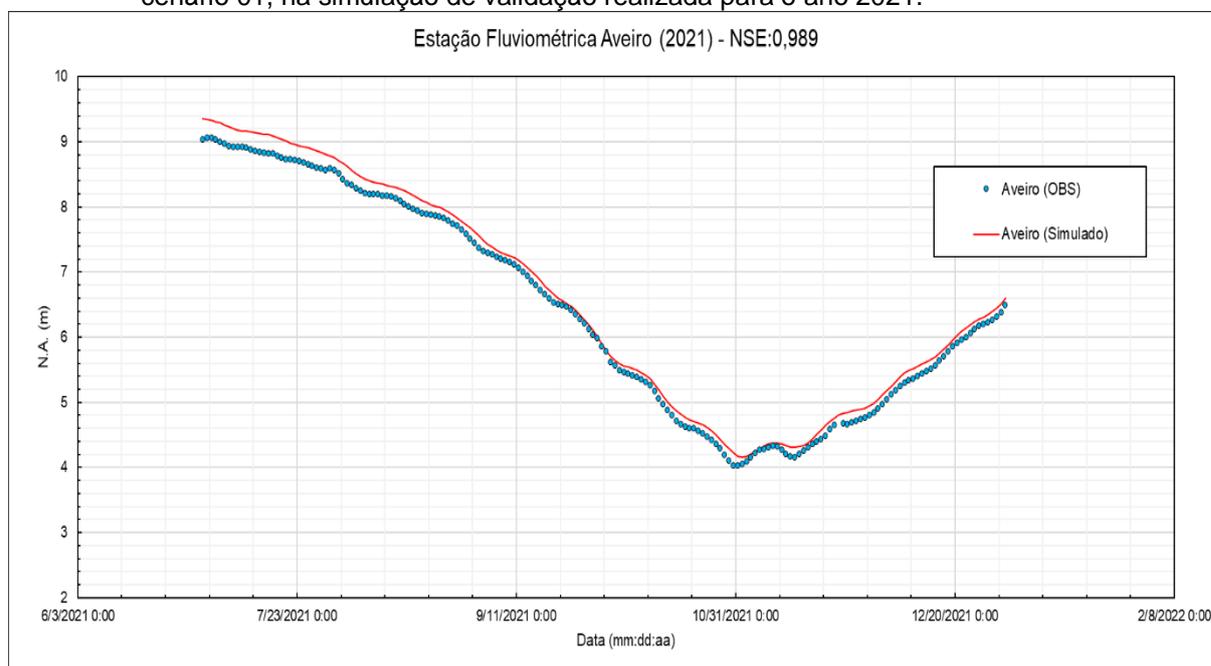
Os resultados numéricos do processo de validação do modelo hidráulico, através da comparação dos resultados da simulação para o ano de 2021 (linha vermelha), comparados com os níveis medidos nas estações Fordilândia e Aveiro (pontos em azul), são apresentados na Figura 52 e Figura 53.

Figura 52: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordilândia, para o cenário 01, na simulação de validação realizada para o ano 2021.



Fonte: O próprio autor.

Figura 53: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 01, na simulação de validação realizada para o ano 2021.



Fonte: O próprio autor.

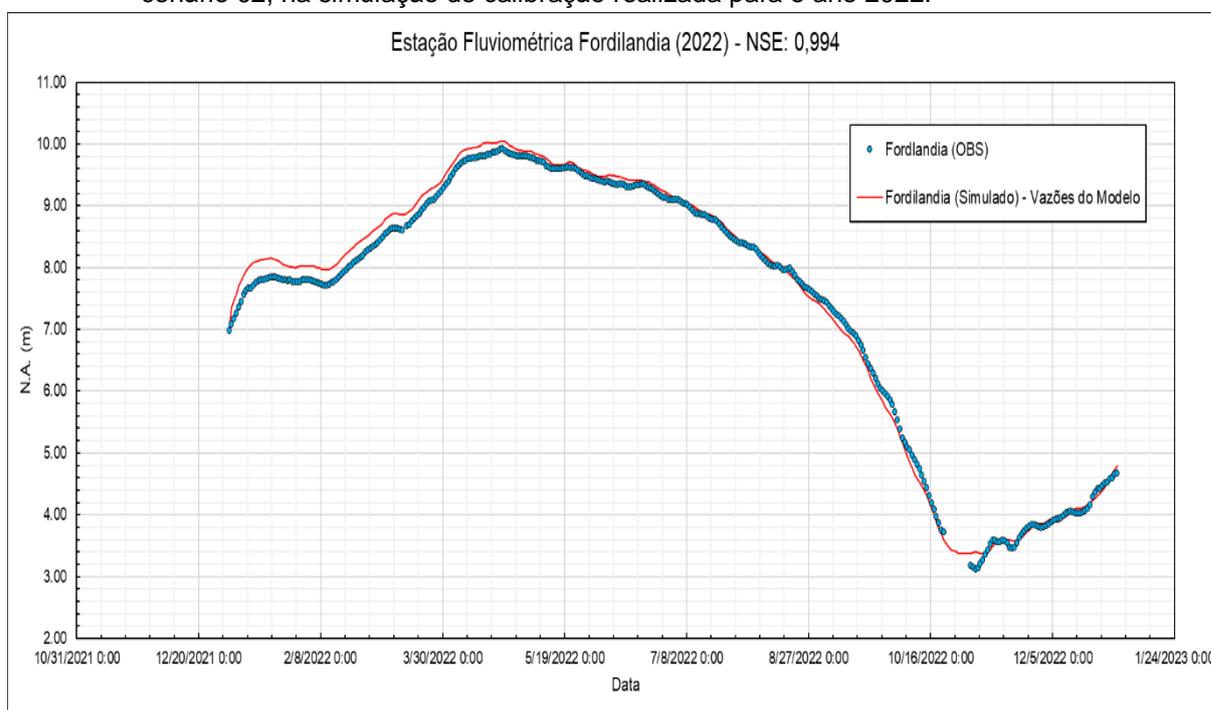
- **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO DE CALIBRAÇÃO OBTIDO ATRAVÉS DE MODELO CONDICIONANDO A MONTANTE POR NÍVEIS OBSERVADOS EM COTA ORTOMÉTRICA - CENÁRIO 02**

O modelo hidráulico de calibração, cenário 02, foi condicionado por vazões a montante (*em Itaituba*), vazão difusa (*Uniform Lateral Inflow*), vazão no rio Arapiuns (*Lateral Inflow*) e por fim, níveis a jusante (*em Santarém*), como descrito no item 6.2.1.

No entanto, importa referir que as vazões impostas na região de montante (*em Itaituba*), do modelo de calibração, correspondente ao cenário 02, foram obtidas a partir de uma simulação numérica prévia, em que o modelo hidráulico, foi simulado por níveis à montante (*em Itaituba*), vazão difusa (*Uniform Lateral Inflow*), vazão no rio Arapiuns (*Lateral Inflow*) e por fim, níveis a jusante (*em Santarém*). Aqui se reforça, que este modelo prévio, permitiu obter vazões para Itaituba, que condicionaram o modelo do cenário 02.

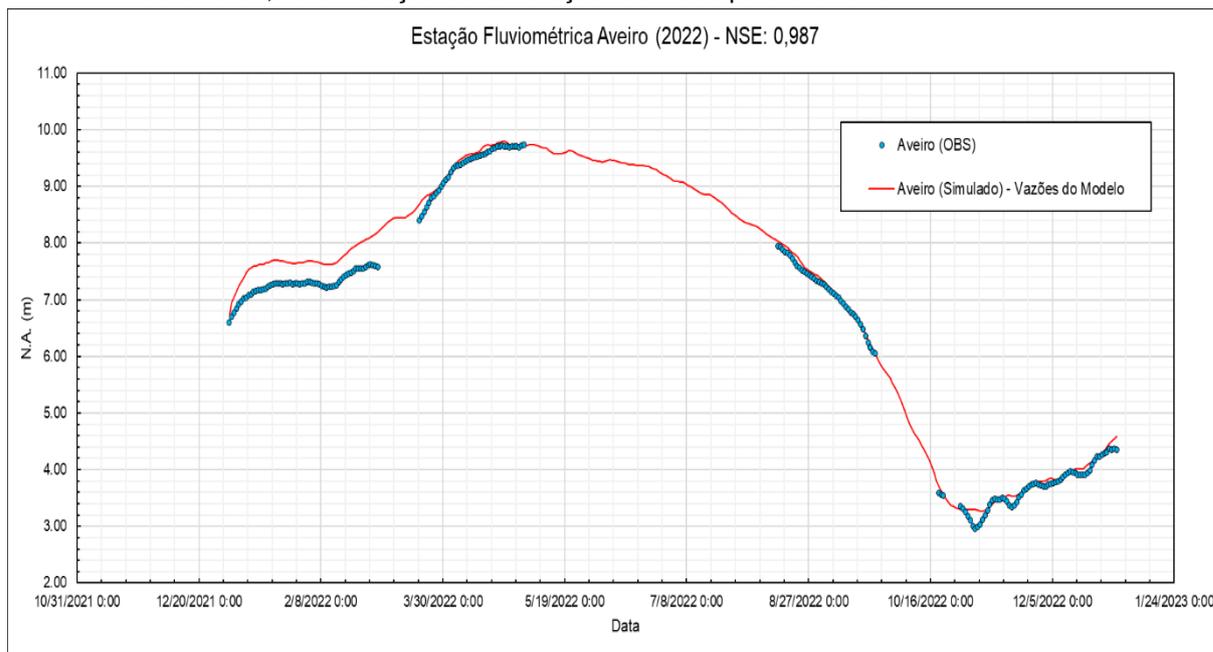
A Figura 54 e Figura 55, exibem a comparação dos resultados de níveis obtidos, através da simulação numérica do modelo hidráulico de calibração (linha vermelha), para o ano de 2022, com os níveis d'água, medidos pelas estações fluviométrica/telemétricas de Fordlândia e Aveiro (pontos em azul).

Figura 54: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 02, na simulação de calibração realizada para o ano 2022.



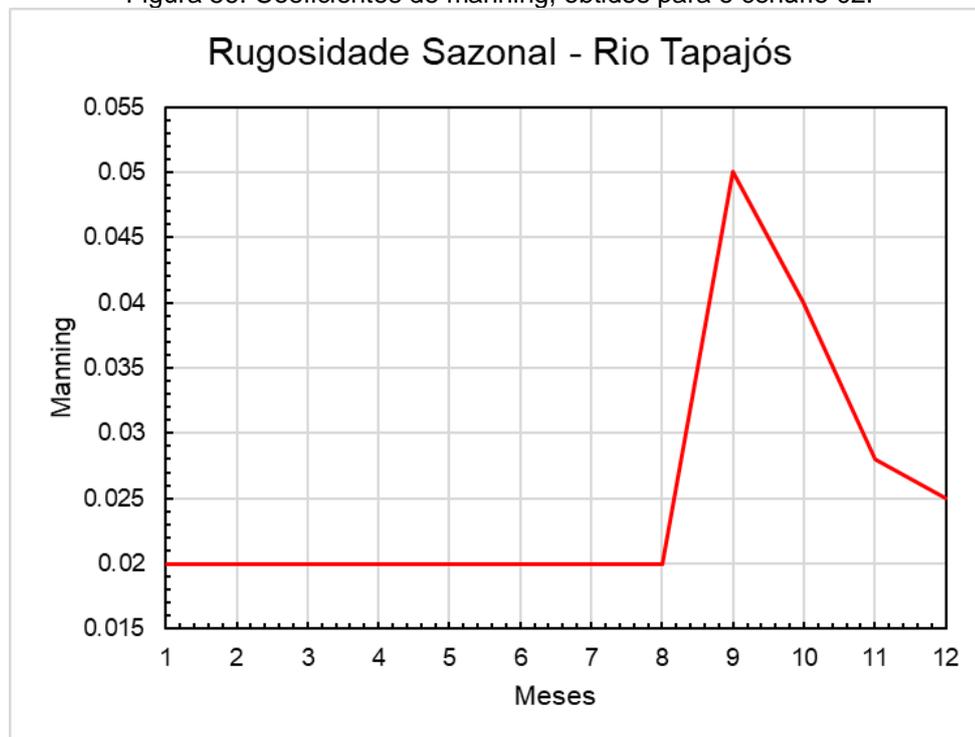
Fonte: O próprio autor.

Figura 55: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 02, na simulação de calibração realizada para o ano 2022.



Fonte: O próprio autor.

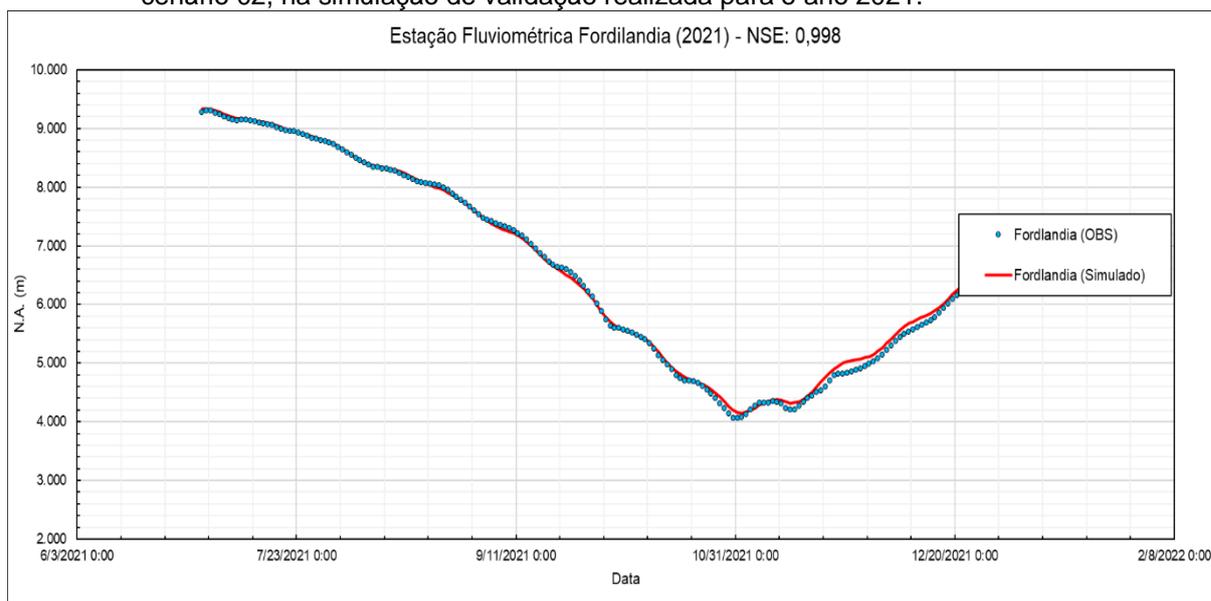
Figura 56: Coeficientes de manning, obtidos para o cenário 02.



Fonte: O próprio autor.

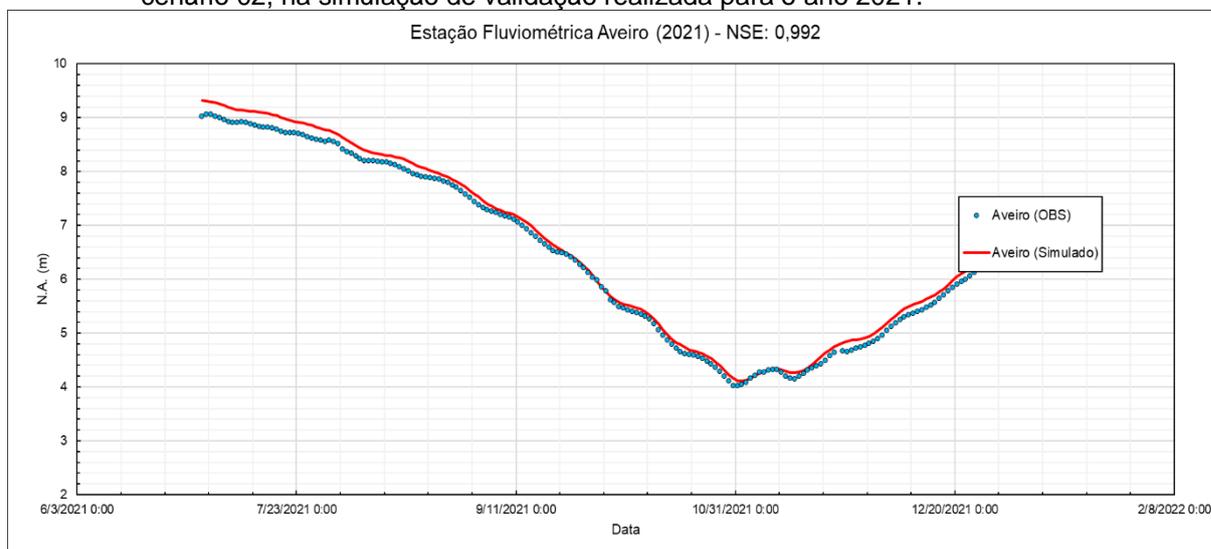
Os resultados do processo de validação numérica do cenário 02, realizado para o ano de 2021, em que foram comparados os seus valores de níveis (linha vermelha), com os obtidos das estações Fordlândia e Aveiro (pontos em azul), são apresentados nos gráficos da Figura 57 e Figura 58.

Figura 57: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Fordlândia, para o cenário 02, na simulação de validação realizada para o ano 2021.



Fonte: O próprio autor.

Figura 58: Dados observados e modelados, na estação fluviométrica/telemétrica de Aveiro, para o cenário 02, na simulação de validação realizada para o ano 2021.



Fonte: O próprio autor.

Este processo de calibração, realizado para o “modelo HEC-RAS base”, do rio Tapajós, elaborado para este estudo. Conforme citado ao longo do item 6.2.1, os hidrogramas, estavam com valores superestimados, para o rio Tapajós (vazões máximas da ordem de 50.000 m<sup>3</sup>), resultando em níveis maiores, que os observados para todo o período simulado. Assim, foi feita uma análise de sensibilidade, com os dados de entrada (hidrogramas), de forma a avaliar a sua influência nos resultados, para que então, se pudesse iniciar o processo de calibração. Sendo posteriormente, definidos, dois cenários de simulação, apresentados neste item 6.2.2.

De posse dos resultados finais, para ambos os cenários, foram obtidos coeficientes NSE da ordem de 0,99, tanto para o período de calibração (2022), quanto para o período de validação (2021). Embora qualquer processo de calibração, possa conter eventuais incertezas e limitações, os resultados obtidos, mostram que o modelo hidrodinâmico-computacional elaborado e calibrado nesse estudo, está representando o comportamento fluvial do rio Tapajós, com as curvas de N.A. modeladas, apresentando a mesma forma, que a série história registradas nas estações dos extremos (Itaituba e Santarém), com os picos coincidentes, além de valores de níveis simulados, muito próximos dos níveis observados, para os cenários analisados.

A utilização de modelos é fundamental para a previsão de profundidades mínimas, em trechos fluviais, como o da Hidrovia do Rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém. Os modelos hidrológicos, levam em consideração as variações sazonais, por meio de parâmetros e dados específicos, possibilitando uma análise, mais completa dos processos, que afetam a navegabilidade e a capacidade de acumulação de água, na Hidrovia. Aqui estão algumas maneiras, pelas quais esses modelos, abordam as variações sazonais:

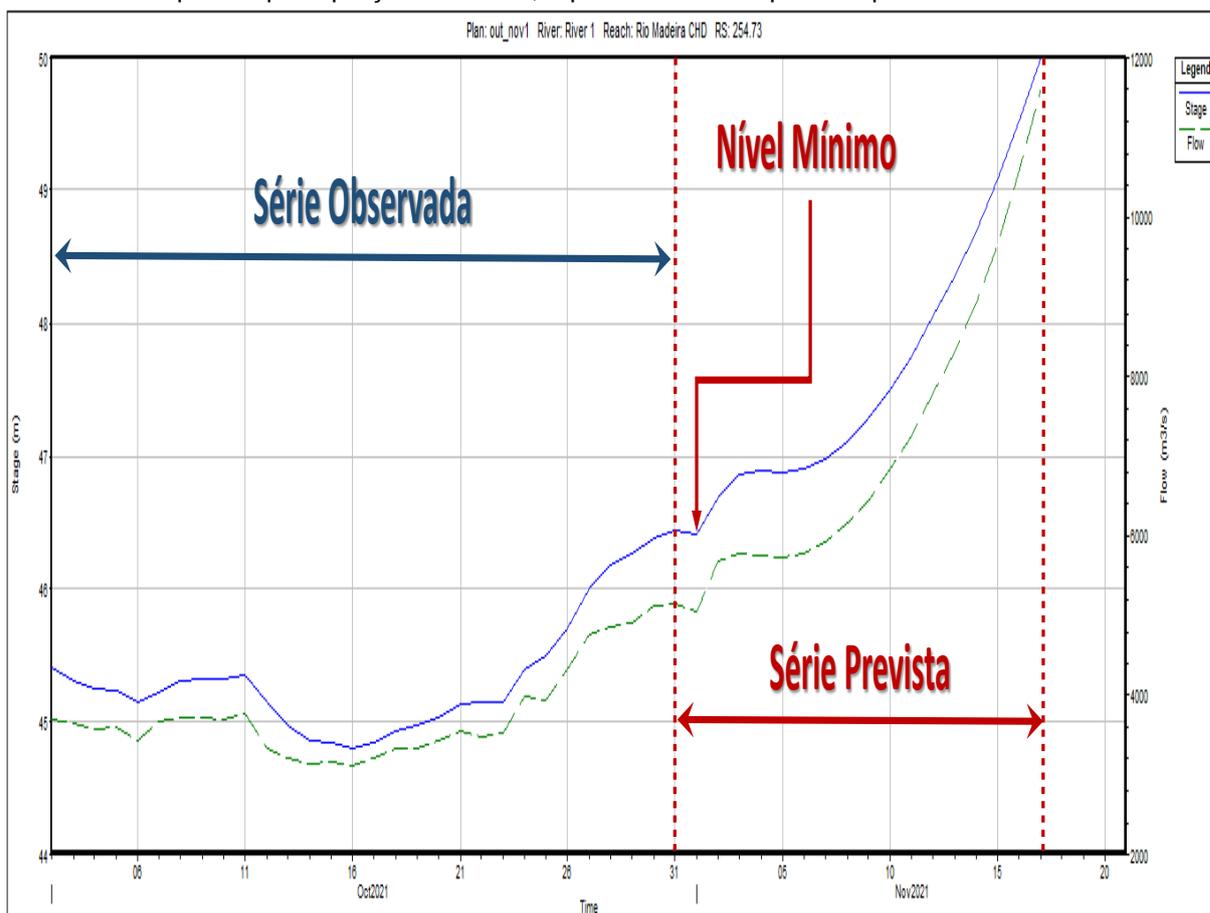
- 1) Dados históricos: Os modelos, utilizam séries temporais de dados, como níveis de água, vazão e precipitação, coletados ao longo, de diferentes estações do ano. Esses dados, permitem que o modelo capture as flutuações sazonais.
- 2) Calibração e validação: Os modelos, são calibrados, com base em dados observados, para ajustar seus parâmetros e garantir que reproduzam, com precisão as variações sazonais. A validação posterior, verifica se os resultados do modelo, correspondem aos dados reais.
- 3) Incorporação de padrões climáticos: Os modelos, consideram padrões climáticos sazonais, como a estação chuvosa e a seca. Isso influencia a entrada de água no rio, a evapotranspiração e a recarga de aquíferos.

Em resumo, o modelo HEC-RAS é uma ferramenta valiosa, para entender e prever as variações sazonais nos rios, permitindo estimar a variação do nível d'água, em trechos navegáveis. Isso é fundamental para a navegação, controle de cheias e planejamento de recursos hídricos. Portanto, a utilização de modelos hidrodinâmicos unidimensionais, como o HEC-RAS, é crucial para prever as profundidades mínimas, em trechos navegáveis de rios, como no trecho entre Itaituba e Santarém.

## 7 RESULTADO - PREVISÃO DE PROFUNDIDADES MÍNIMAS

Uma vez definido o escopo de modelagem computacional e a discretização espacial adotada, dentro da plataforma do HEC-RAS, podemos dar continuidade a descrição da metodologia, das previsões de profundidades propriamente ditas. Cada simulação desenvolvida, tem duração mínima de 45 dias, sendo os primeiros 30 dias, alimentados por dados reais do passado, oriundos das estações fluviométricas disponíveis, seguidos de 14 dias, que foram calculados, com base nas previsões de vazão, para a estação de Itaituba e de nível para a estação de Santarém. A inclusão da série observada, antecedente à previsão é necessária, tanto para o “aquecimento” do modelo, como para a correta representação da histerese, associada às variabilidades dos níveis e vazões do sistema (Figura 59).

Figura 59: Séries de vazões e níveis na fronteira de montante do modelo (Itaituba). A porção da esquerda representa a série com dados reais observados na estação fluviométrica, enquanto que a porção da direita, representa a série prevista para o futuro.

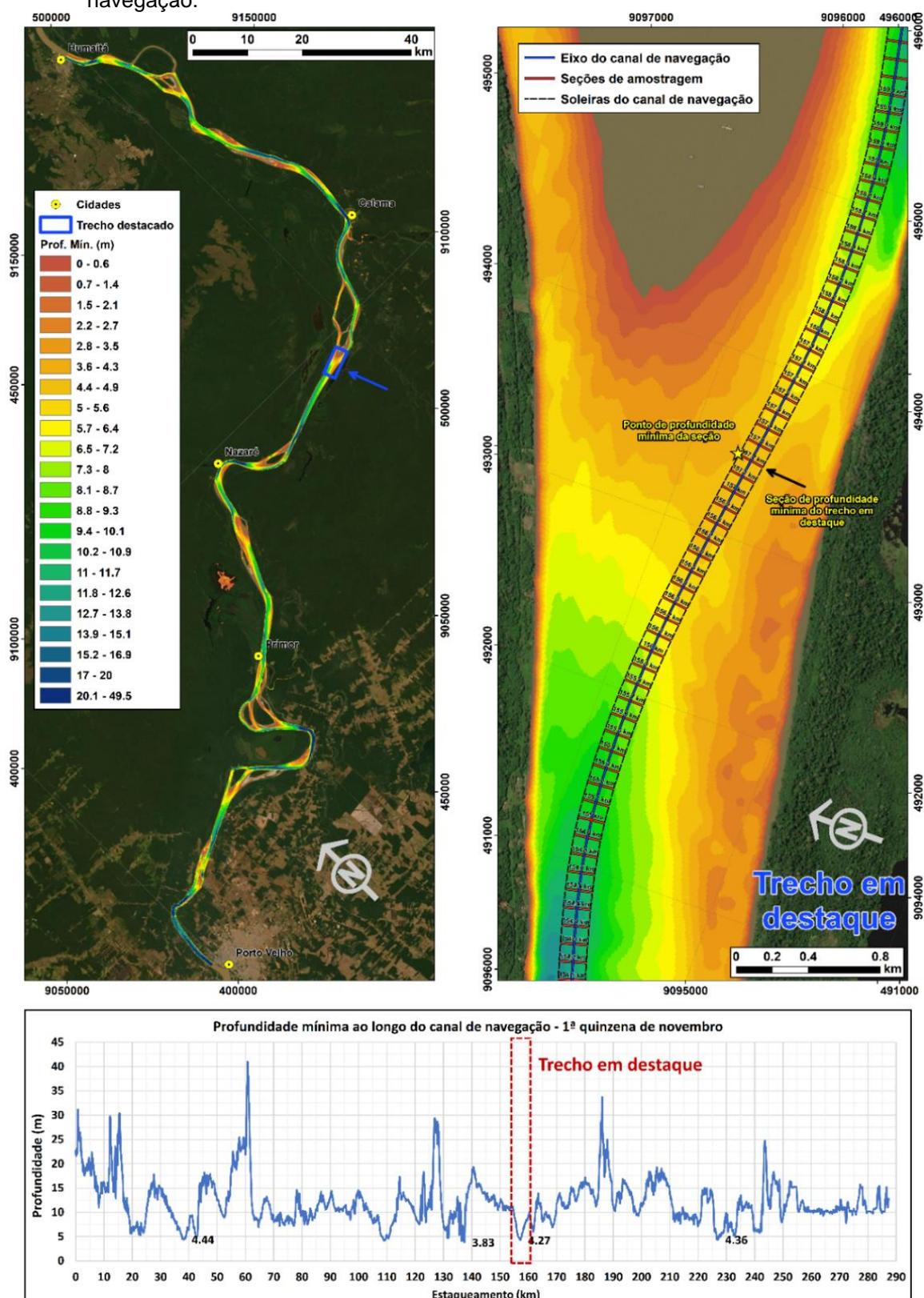


Fonte: O próprio autor.

Concluída a simulação computacional, se procede na identificação do momento, onde ocorre o nível mais baixo, dentro do período de previsão. Este instante, serve de referência, para a exportação do arquivo de profundidades, que o caracterizam. As profundidades mínimas de cada previsão, são, portanto, definidas como a diferença entre as cotas ortométricas, do nível da lâmina de água mais baixo observado e do Modelo Digital do Terreno (MDT). Este processo, tem como resultado, a geração de um arquivo do tipo raster, com resolução de 10 m e área de cobertura, coincidente com a área molhada do rio, incluindo as suas planícies de inundação, nos períodos de cheia.

Posteriormente se faz necessária, a definição das profundidades mínimas, dentro do canal de navegação projetado (Figura 60, ilustra um exemplo do rio Madeira, porém com metodologia idêntica à do rio Tapajós). Tomando por base o eixo central do canal, são definidas seções transversais com 150 m de comprimento (coincidindo com a largura do canal), espaçadas a cada 100m. Cada uma destas seções é estaqueada a cada 5, gerando uma nuvem de pontos georreferenciados (aproximadamente 4 milhões de pontos, portanto não é possível utilizar o Excel), que servirá de base, para a extração dos dados do mapa geral de profundidades mínimas. Para cada uma das seções destacadas em vermelho, na Figura 60 é calculada uma profundidade mínima, cada uma destas profundidades, está atrelada a uma posição em relação ao eixo do canal de navegação, gerando assim, o painel inferior da Figura 60. Este processo realizado, tomando por base o arquivo “dbf” de um shapefile, criado em plataforma GIS, é lido e processado através de uma rotina de Matlab e o arquivo de saída, serve de base, para geração das tabelas e gráficos de profundidades mínimas.

Figura 60: Esquema explicativo da metodologia de determinação das profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação. Este exemplo, ilustra um caso específico para o rio Madeira, no entanto a metodologia aplicada é similar à aplicada no rio Tapajós. Painel superior esquerdo: mapa de localização. Painel superior direito: desenho do canal de navegação (eixo, seções transversais e soleiras), sobreposto ao mapa de previsão de profundidades mínimas. Painel inferior: perfil longitudinal de profundidades mínimas, ao longo do canal de navegação.



Fonte: O próprio autor.

## 7.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Um resultado da previsão de níveis de água no rio Tapajós, através da simulação numérica com o HEC-RAS®, realizada no dia 21/11/2023, evidência o local onde se tem profundidades mínimas na hidrovia no dia 27/11/2023 (Figura 61 e Figura 62).

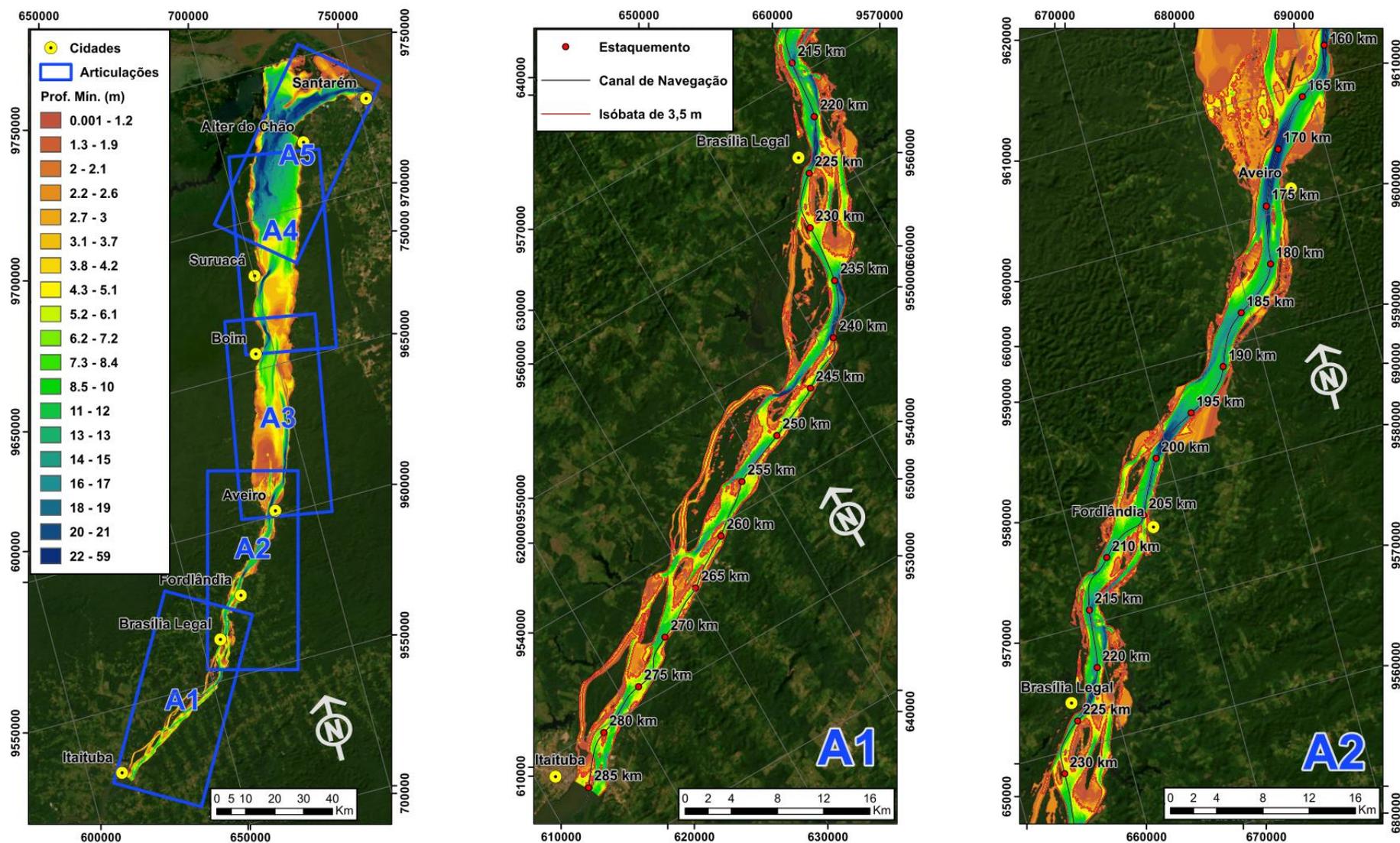
Em Santarém, os níveis d'água, descessem e sobem ligeiramente, entre o início e o fim da simulação numérica da previsão de profundidades mínimas, como é ilustrado na Figura 65.

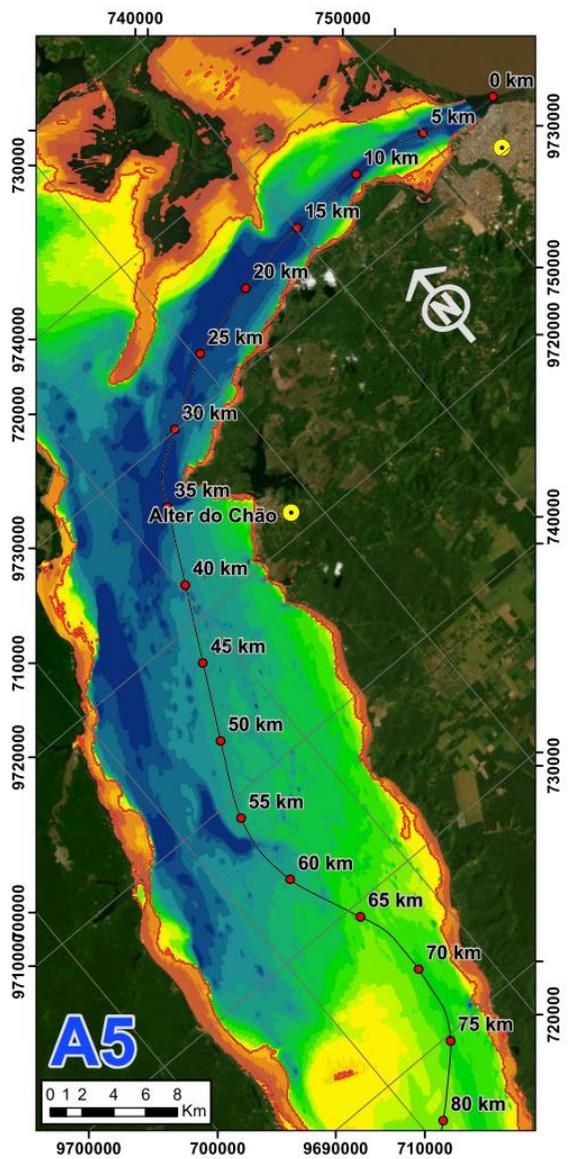
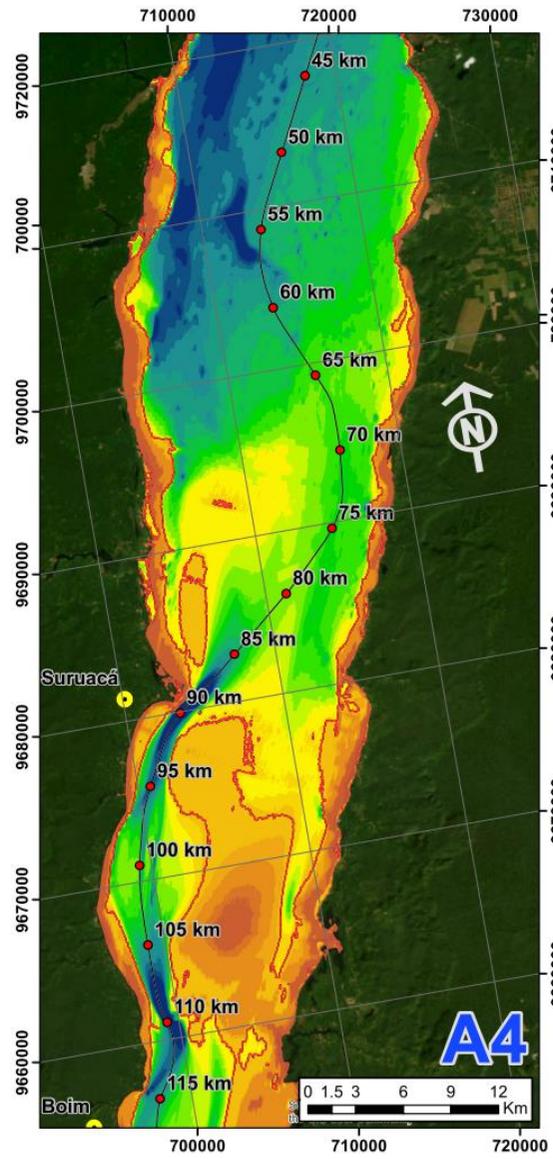
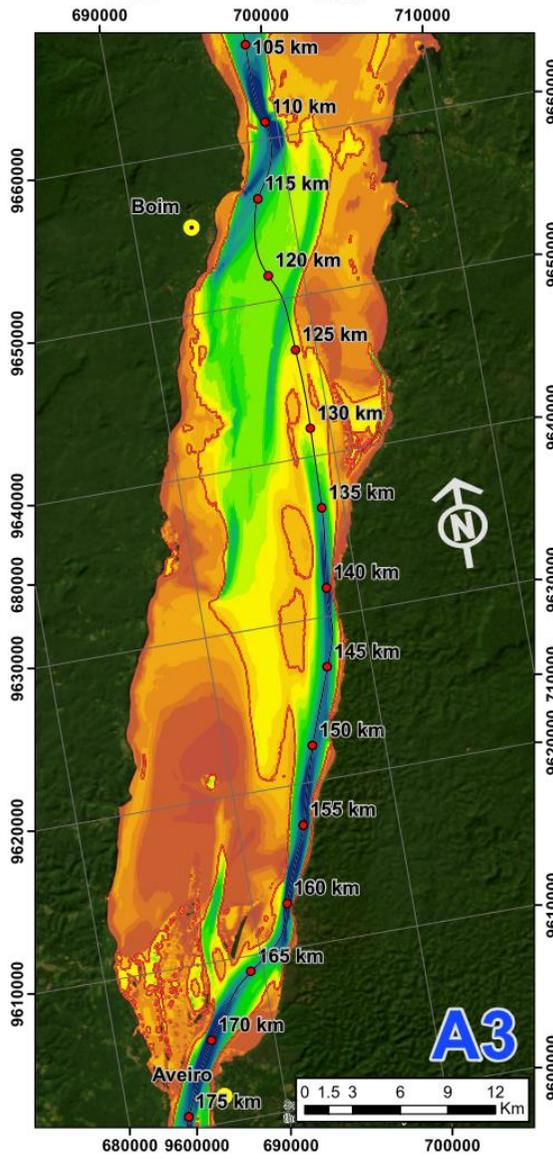
A Tabela 1, exhibe as profundidades mínimas nas áreas críticas do canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós, para cada uma das semanas do mês de novembro de 2023. Na simulação numérica da primeira semana, no mês de novembro se observa que na maioria das áreas críticas, as profundidades são inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura na hidrovia.

Entre a segunda e a quarta semana de novembro/2023, o nível d'água nas áreas críticas do canal de navegação no rio Tapajós, subiu por hipótese, como consequência da elevação do nível em Santarém, que é influenciado imediatamente pela subida no nível do rio Amazonas, como pode ser observado na Tabela 1. De acordo com os dados do monitoramento realizado pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB, o nível na estação fluviométrica de Santarém (Cod, ANA 17900000), no mês de novembro de 2023, oscilando entre as condições de seca e seca extrema (Figura 66).

Por outro lado, o nível na estação fluviométrica de Itaituba (Cod. ANA 17730000), no mês de novembro de 2023, desce e atinge a condição de seca extrema e nível mínimo histórico (Figura 67).

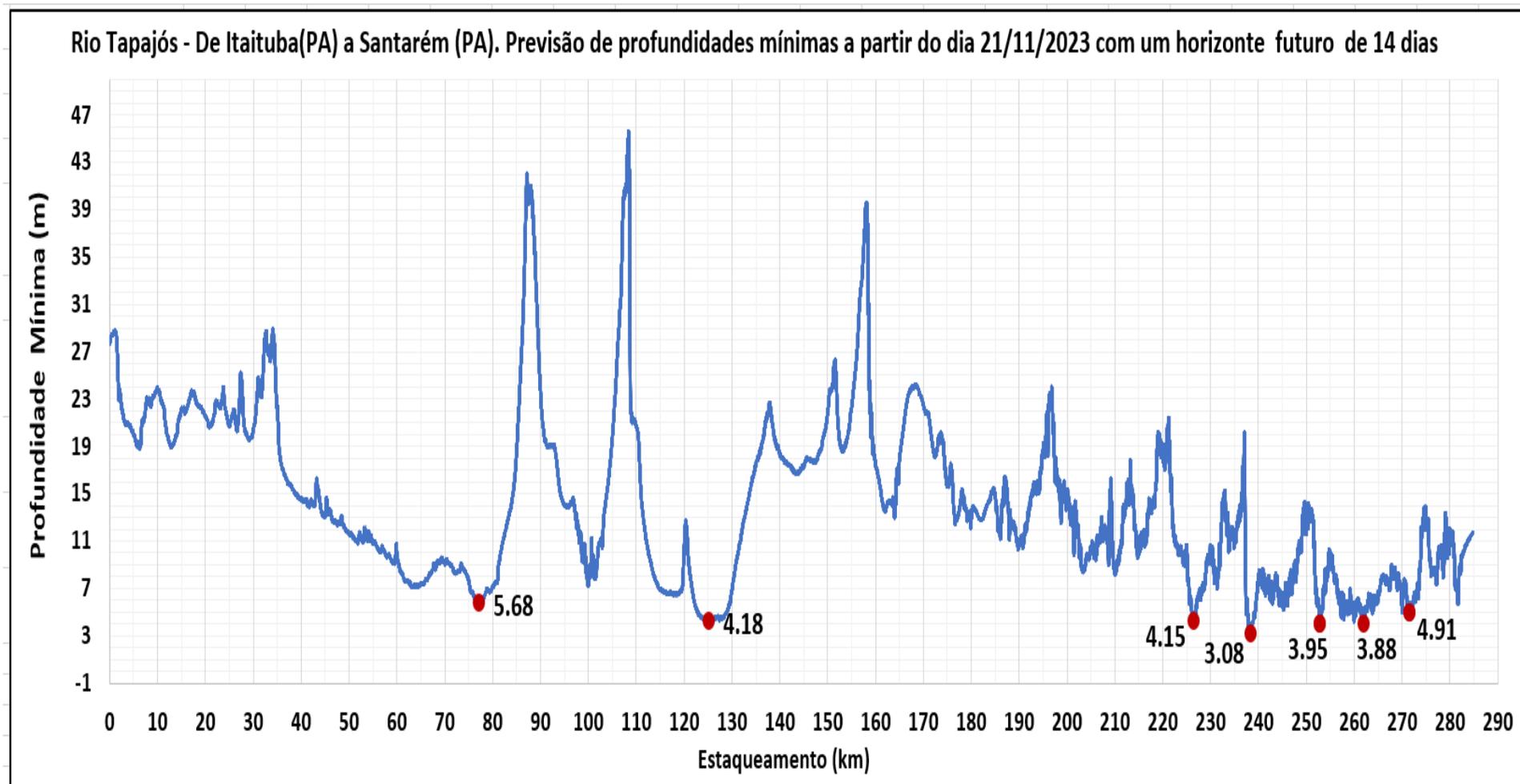
Figura 61: Mapas das profundidades mínimas, geradas na modelagem hidráulica no rio Tapajós, entre Itaituba e Santarém, no dia 21/11/2023, com um horizonte futuro de 14 dias. Os mapas A1 a A5, mostram em detalhe as profundidades mínimas, calculadas para o dia 27/11/2023.





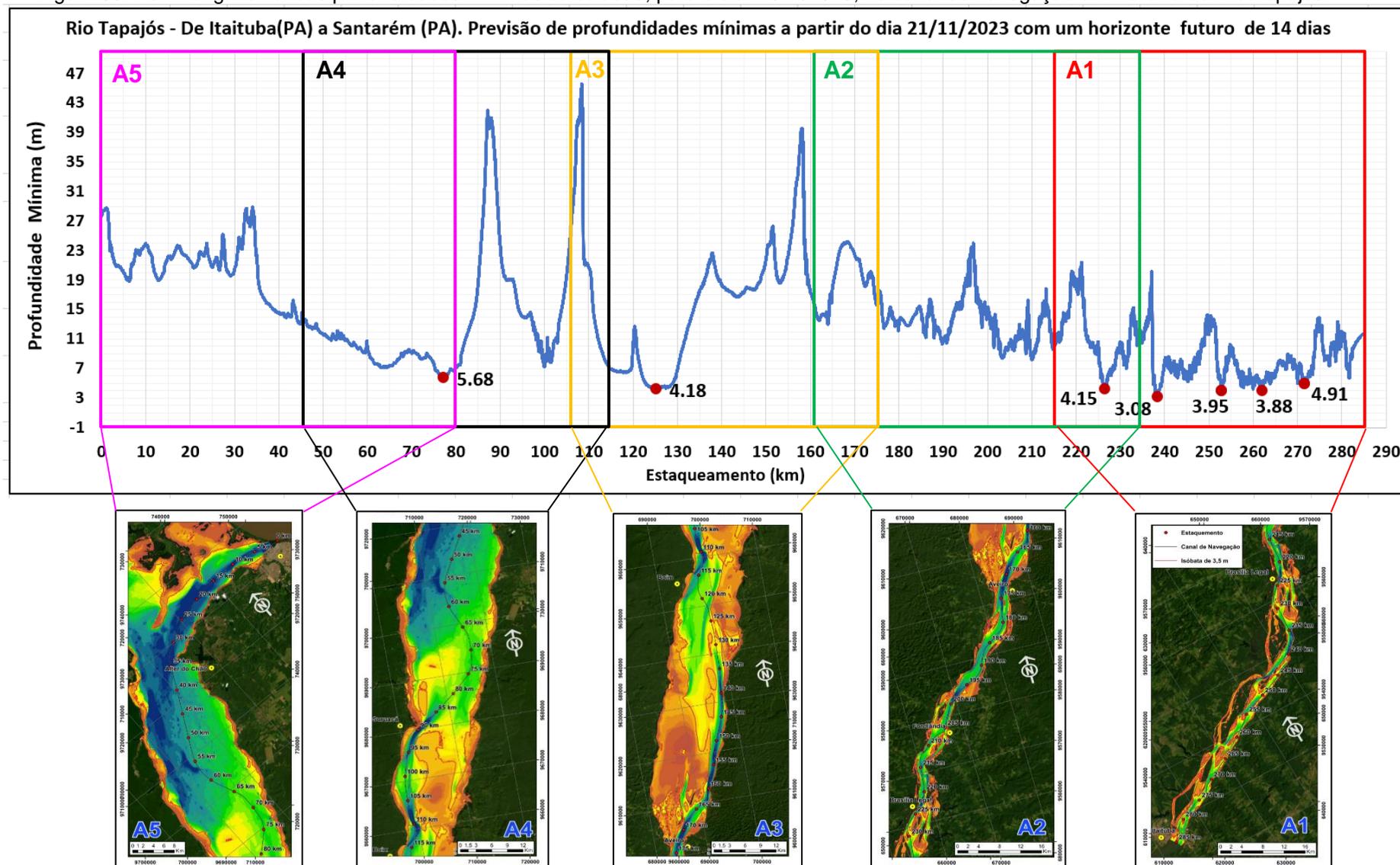
Fonte: O próprio autor.

Figura 62: Perfil longitudinal das profundidades mínimas calculadas, para o dia 27/11/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós.



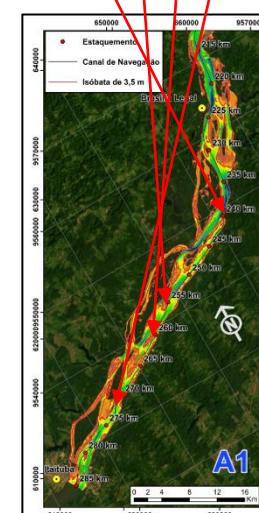
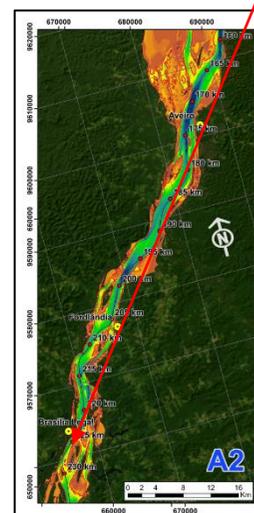
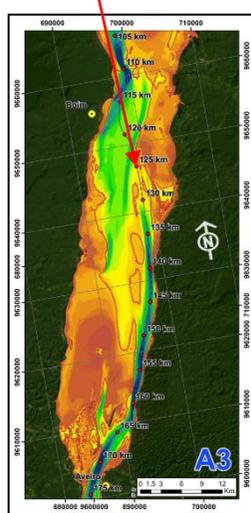
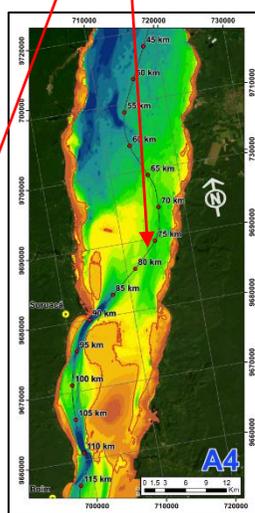
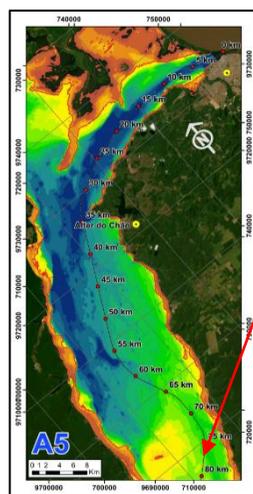
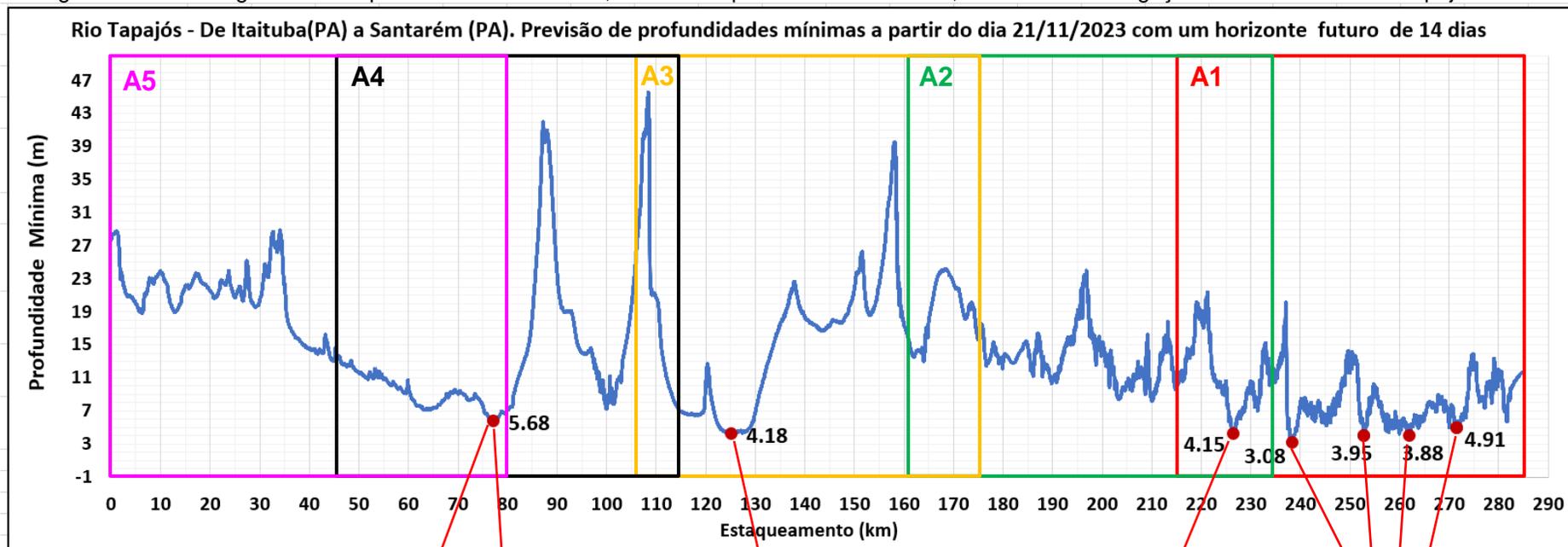
Fonte: O próprio autor.

Figura 63: Perfil longitudinal das profundidades mínimas calculadas, para o dia 27/11/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós.



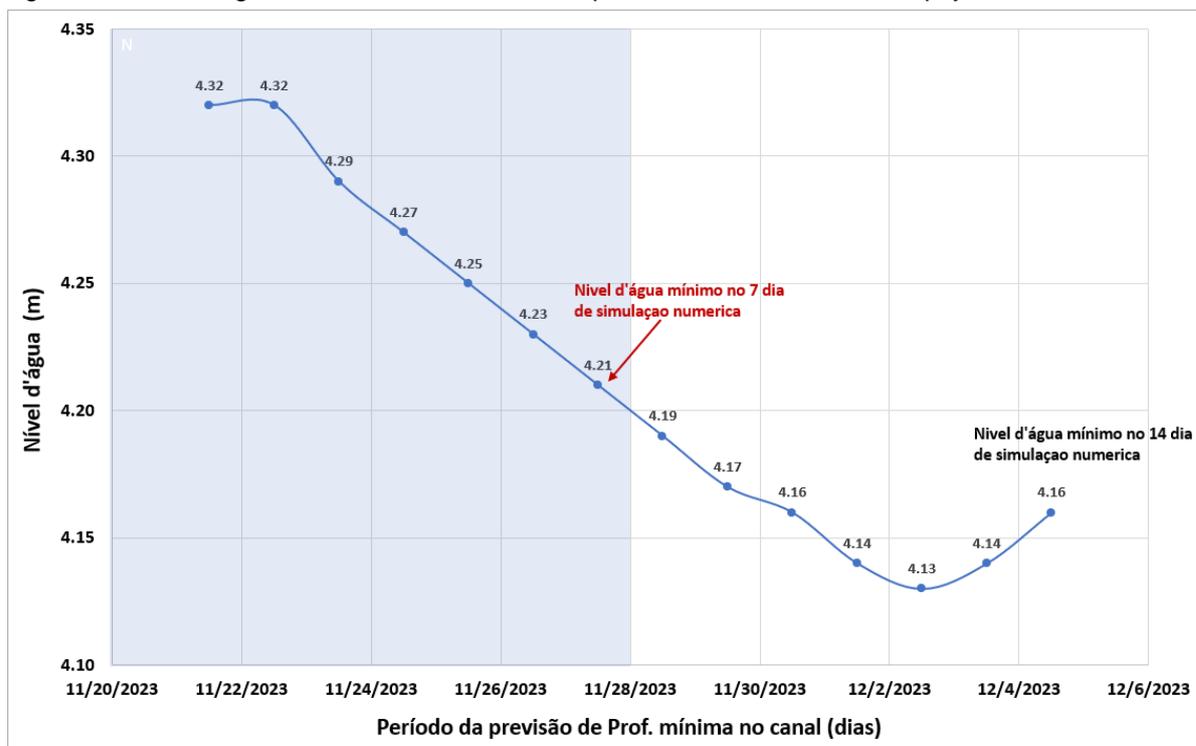
Fonte: O próprio autor.

Figura 64: Perfil longitudinal das profundidades mínimas, calculadas para o dia 27/1/2023, no canal de navegação da Hidrovia do Rio Tapajós.



Fonte: O próprio autor.

Figura 65: Nível d'água em Santarém, no final da previsão numérica do rio Tapajós.



Fonte: O próprio autor.

Tabela 1: Profundidades mínimas calculadas, pela modelagem hidráulica com o HEC-RAS, nas áreas críticas na Hidrovia do Rio Tapajós, nas 4 semanas do mês de novembro. Valores com profundidades inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura, foram pintadas com a cor amarela. A cor verde foi pintada para as células em que a profundidade obtida na simulação numérica, foi inferior a 4,0 m, cujo valor é próximo ao do limite de restrição de calado.

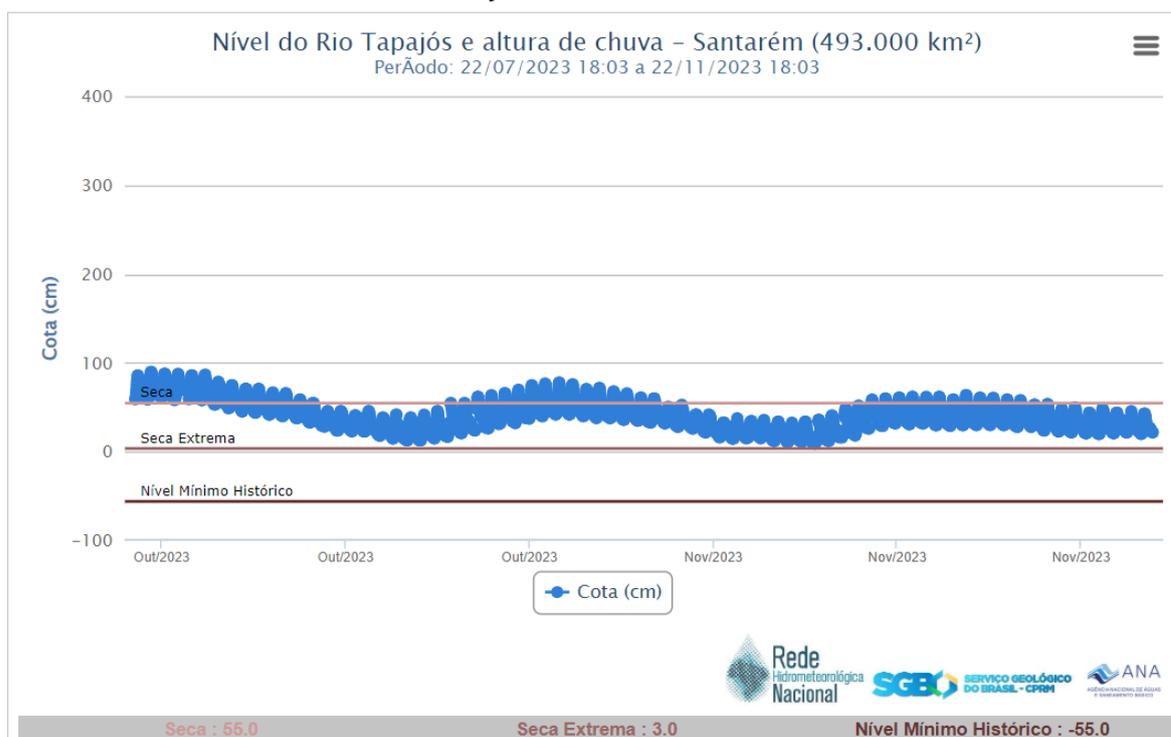
Área crítica	Localidade	Estaca (Km)	Prof. mínima (m) 1ª semana	Prof. mínima (m) 2ª semana	Prof. mínima (m) 3ª semana	Prof. mínima (m) 4ª semana
P01	São Tomé	77,3	4,62	5,82	6,55	5,68
P02	Itapaiuna	125,3	3,09	4,31	5,03	4,18
P03	Brasília Legal	226,65	2,84	4,27	4,93	4,15
P04	Barreiras	238,6	1,68	3,20	3,83	3,08
P05	Barreiras	253	2,43	4,07	4,66	3,95
P06	Goibal	262,1	2,28	4,01	4,56	3,88
P07	Itaituba	271,8	3,19	5,04	5,53	4,91
Prof. mínima calculada a cada semana			1,68	3,20	3,83	3,08

Fonte: O próprio autor.

#### NOTA:

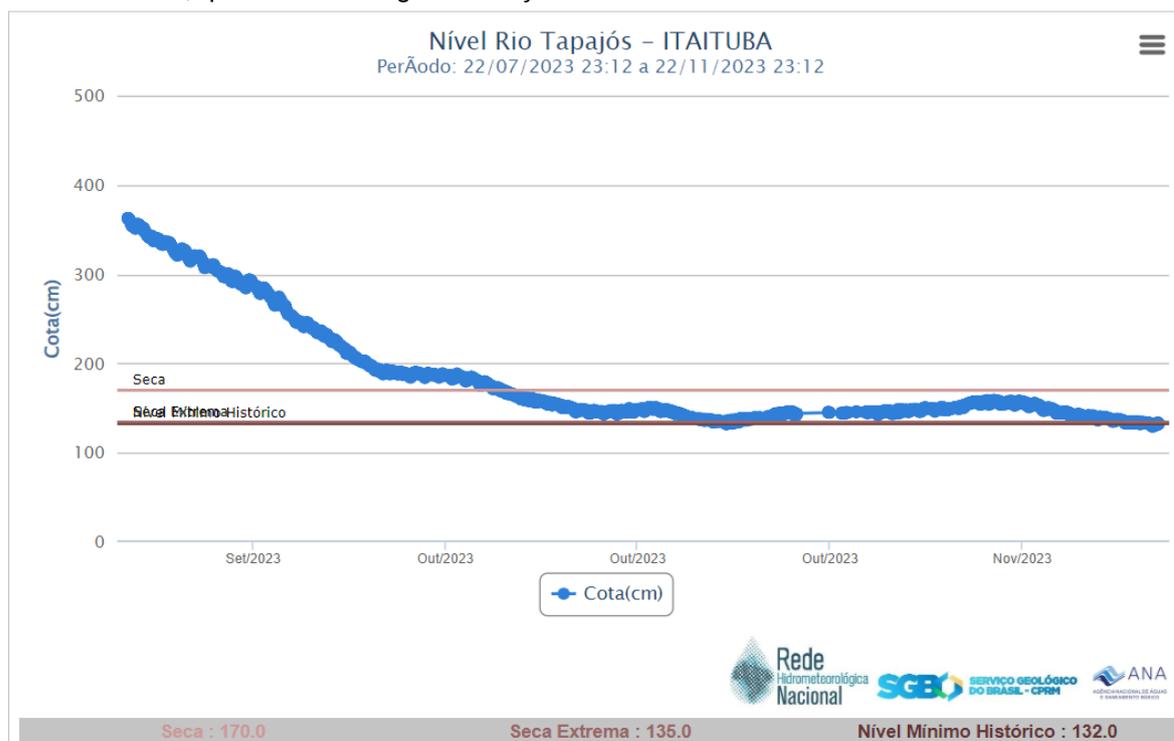
- Células com valores com profundidades inferiores a 3,50 m, restritivo a navegação segura, foram pintadas com a cor amarela.
- A cor verde foi pintada para as células com profundidades inferiores a 4,0 m, valor é próximo ao do limite de restrição de calado.

Figura 66: Nível na estação fluviométrica de Santarém (Cod. ANA 17900000), no mês de novembro de 2023, oscilando entre as condições de seca e seca extrema.



Fonte: SGB ([https://www.sgb.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php?getbacia#](https://www.sgb.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia#))

Figura 67: Nível na estação fluviométrica de Itaituba (Cod, ANA 17730000), no mês de novembro de 2023, que desce e atinge a condição de seca extrema e nível mínimo histórico.



Fonte: SGB ([https://www.sgb.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php?getbacia#](https://www.sgb.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia#))

## 8 CONCLUSÕES

No que diz respeito aos dados das estações intermediárias, Fordlândia (Cod. 17835600) e Aveiro (Cod. 17835400), foram analisados e passaram por uma filtragem e ajustes, de acordo com o padrão de descida e subida do nível d'água, observados nas estações dos extremos (Itaituba e Santarém).

Devido ao fato de se ter dados disponíveis de níveis d'água, desse período em Fordlândia (Cod. 17835600) e Aveiro (Cod. 17835400), foi considerado a série do período de 01/07/2021 a 01/01/2023, com valores de níveis d'água a cada 12 horas por dia, para a calibração e validação do modelo hidráulico HEC-RAS, desenvolvido para esse trecho do rio Tapajós.

As variáveis estudadas, apresentam sazonalidade bem definida. O nível do rio Tapajós, apresenta período de máximos, entre os meses de abril a junho. O mês de maio é o que apresenta maior flutuação (variabilidade), do período de cheia na região. Já o mês de nível mais baixo é novembro. De acordo com BENTES (2018), O pico de cheia, sempre se dá no mês de maio e o pico de seca, no mês de novembro no rio Tapajós em Santarém/PA.

No que diz respeito ao processo de calibração do modelo HEC-RAS, elaborado para este estudo. Inicialmente os hidrogramas, estavam com valores superestimados (vazões máximas da ordem de 50.000 m<sup>3</sup>), resultando em níveis maiores que os observados para todo o período simulado. Foi feita então uma redução do hidrograma inicial em 37%, utilizando um fator (*Multiplier*: 0,63) disponível no *software* HEC-RAS, resultando em um deslocamento do hidrograma inicial e fazendo com que as vazões máximas se igualem. Assim, foi feita uma análise de sensibilidade com os dados de entrada (hidrogramas), de forma a avaliar a sua influência nos resultados, para que então, se pudesse iniciar o processo de calibração. Para ambos os cenários simulados, foram obtidos coeficientes NSE da ordem de 0,99, tanto para o período de calibração (2022), quanto para o período de validação (2021). Os resultados obtidos, mostram que o modelo hidrodinâmico-computacional, utilizado nesse estudo representou o comportamento fluvial do rio Tapajós, com as curvas de N.A. modeladas, apresentando a mesma forma que a série história, com os picos coincidentes, além de valores de níveis simulados, muito próximos dos níveis observados, para os cenários analisados.

É importante ressaltar, que as profundidades mínimas previstas na simulação realizada (Figura 62 a Figura 64 e Tabela 1), se mostraram coerente com as cotas observadas nas estações fluviométricas/telemétricas de Santarém, Aveiro, Fordlândia e Itaituba, assim como também ao longo desse trecho de interesse. Se faz relevante mencionar, que entre setembro a novembro de 2023, a região Amazônica, passou por um período de estiagem, agravada pelo fenômeno El Niño, resultando em uma seca severa no rio Tapajós.

Portanto, a previsão de nível d'água, para auxílio a uma navegação econômica e segura, em época de seca, através da simulação numérica com o HEC-RAS®, mostrou ser uma ferramenta promissora. Com o resultado da simulação, obteve-se que em Santarém, os níveis d'água, descessem e sobem ligeiramente, entre o início e o fim da simulação numérica da previsão de profundidades mínimas, como é ilustrado na Figura 65. O que se mostrou, coerente com o observado na estação Santarém, nos dados observados.

## **8.1 RECOMENDAÇÕES**

Para a continuidade deste estudo, recomenda-se:

- Levantamentos batimétricos e conseqüentemente, a atualização das Cartas Náuticas;
- Como está constatado que a variação dos níveis d'água, provoca mudança no comportamento da navegação hidroviária interior. Recomenda-se estudos sobre impacto das variações da cota, no transporte hidroviário; e
- Aplicação na prática da modelagem hidrodinâmica, para previsão de profundidades mínimas, para auxílio a navegação, principalmente, no período de seca.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Agência Nacional de Águas. Água & Solo: estudos e projetos. Relatório de consistência de dados fluviométricos da Rh Amazônica - relatório técnico. Curitiba: ANA, 2015.

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Brasil): VEN 2020 Vias Economicamente Navegadas. Brasília, 2021.

BAUME, J.-P.; MALATERRE, P.-O.; GUILLES, B.; LE GUENNEC, B. 2005. SIC: A 1D Hydrodynamic Model for River and Irrigation Canal Modeling and Regulation. In. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 7. Baume, J.-P. et al. Porto Alegre: ABRH. 128 pp.

BAUTISTA, E.; CLEMMENS, A. J.; STRAND, R. J. 2006. Salt River Project Canal Automation Pilot Project: Simulation Tests. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(2), pp. 143–152.

BRUNNER, G. W., 2015. HEC-RAS River Analysis Systems 2D Modelling User's Manual. USACE: United States Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center (HEC), 609 Second Street. Davis, CA 95616-4687.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS River Analysis Systems 2D Modelling User's Manual. USACE: United States Corps of Engineers. Davis, CA. Fevereiro de 2016.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS River Analysis Systems Hydraulic Reference Manual. USACE: United States Corps of Engineers. Davis, CA. Fevereiro de 2016.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS River Analysis Systems User's Manual. USACE: United States Corps of Engineers. Davis, CA. Fevereiro de 2016.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. (1976) Time series analysis: forecasting and control, 2nd ed. San Francisco: Holden-Day;

BENTES, K. L. S.; OLIVEIRA, L. L.; ZACARDI, D. M.; BARRETO, N. J. C.. A relação entre a variação hidrológica e os recursos pesqueiros no baixo Amazonas, Santarém, Pará. Revista Brasileira de Geografia Física, v.11, p.234-238. 2018.

CABRAL, MARCELO MONTENEGRO, 2009. Desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico tridimensional de corpos de água naturais com discretização vertical arbitrária. Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CLEMMENS, A. J., BAUTISTA, E., WAHLIN, B. T., AND STRAND, R. J. 2005. Simulation of automatic canal control systems. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131(4), pp.324–335.

CALLÈDE, J.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J. et al. L'Amazone à Óbidos (Brésil): étude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrological Sciences Journal* 47:2, 321-333, 2002. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626660209492933> . Acesso em: 28 de outubro de 2023.

DNIT & USACE, 2020. Tapajós River Navigation Planning Study. Brasília, Brazil

EZZINE, A., SAIDI, S., HERMASSI, T., KAMMESSI, I., DARRAGI, F., RAJHI, H., 2023. Flood mapping using hydraulic modeling and Sentinel-1 image: Case study of Medjerda Basin, northern Tunisia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, (23): 303 – 310. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.03.001>

FERNANDES, R. D. (2008). Regimes de escoamentos. Universidade Regional do Cariri – URCA.

FIGUEIREDO, N. M., & BLANCO, C. J. C. (2014). Simulação de vazões e níveis de água médios mensais para o Rio Tapajós usando modelos ARIMA. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(3), 111-126.

FIGUEIREDO, N. M., & BLANCO, C. J. C. (2016). Modelos RNA como ferramentas de previsão de aflúências e de níveis de água em AHE. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, 2(9), 110-123.

GARCÍA, N; MECHOSO, C. R. Variability in the discharge of South American rivers and in climate. *Journal des Sciences Hydrologiques*. v. 50, n. 3, p. 459-478, jun 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1623/hysj.50.3.459.65030>>. Acesso em: 15 setembro de 2023.

HEC-RAS, 2015. River analysis system 2D modeling user's manual version 5.0. US Army Corps of Engineers.

ISAAC, V. J.; MILSTEIN, A.; RUFFINO, M. L.. A Pesca Artesanal no Baixo Amazonas: Análise Multivariada das Capturas por Espécie. Acta Amazônica, v.26, n.185-208, 1996.

LIAN, Y.; CHAN, I.-C.; SINGH, J.; DEMISSIE, M.; KNAPP., V.; XIE, H. 2007 Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. Journal of Hydrology, 344, pp. 210– 222.

LARA, P. G. Análise da variabilidade do coeficiente de Manning no rio Tapajós (2017). XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

MARENGO J. A. et al. Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. Journal of Climate, v. 14, p. 833-852, mar. 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0833:OAEOTR>2.0.CO;2)>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.

MOLINIER, M. et al. Les régimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. L'hydrology Tropical: géoscience et outillpourle développement. n. 238, p. 209-222, 1996.

MUNNA, MD.G., ALAM, BIN.J.MD., UDDIN, M. MD., ISLAM, N., ORTHEE, A.A., HASAN, K., (2021). Runoff prediction of Surma basin by curve number (CN) method using ARC-GIS and HEC-RAS. Environmental and Sustainability Indicators (11): 100129. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100129>

NAVEGAÇÃO: A CIÊNCIA E A ARTE (2019), Volume III. no site da Marinha do Brasil: <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/npublicacoes>. Acesso no dia 16/10/2023.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A; SALDANHA, D. L. Modelos de Previsão e Espacialização das Áreas Inundáveis em Montenegro, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 13, n. 4, p. 355-378, 2012.

OLIVEIRA, CLEOMAR MÁRCIO MARQUES DE. Cartas náuticas eletrônicas: operações e estruturas de dados. Campinas, [SP: s.n.], 1995.

PAIVA, R.C.D. 2009. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões. Dissertação de Mestrado, IPH-UFRGS. 182 pp.

PADOVEZI, Calos Daher: 2003. Conceito de Embarcações Adaptadas à Via Aplicado à Navegação Fluvial no Brasil / C. D. Padovezi. – ed. rev. – São Paulo. Tese de Doutorado, Escola Pirotécnica da USP. Departamento de Engenharia Naval e Oceania.

PAIN C.C. et al., 2005, Three-dimensional unstructured mesh ocean modeling, Ocean Modeling 10, 5-33, Elsevier

PINA, R.D.C.; NASCIMENTO, R.A.R. 2016. Sinalização náutica e a segurança no mar. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000019/0000194a.pdf>. Acesso em: 15 agosto de 2023.

PAZ, A.R. 2010. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. Tese de Doutorado, IPH-UFRGS. 242 pp.

REMO, J. W. F., AND PINTER, N. 2007. Retro-modeling the Middle Mississippi River. J. Hydrol., 337, pp. 421–435.

REVISTA PORTOS E HIDROVIAS (2015). <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/profundidade-do-canal-e-uma-informacao-estrategica-para-seguranca-do-navio>. Acesso em: 16 de setembro de 2023.

ROSMAN, P.C.C., 1987. Modeling shallow water bodies via filtering technics. Ph. D. Dissertation. Massachussets institute of Technology (MIT).

ROSSI, F. M. Uma análise da movimentação de grãos pelo rio Tapajós utilizando simulação / Fabio Macedo Rossi. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2020.

SANT'ANNA, J. A.: 1998. Rede Básica de Transporte da Amazônia. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada-IPEA. Brasília.

SAINT-VENANT, A. J. C. B., 1871. Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Edição 73: 147–154 and 237–240. Paris.

SATYAMURTY, P. et al. A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. Geophysical Research Letters, v. 40, p. 1396–1401, 2013. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/grl.50245>>. Acesso em: 07 outubro de 2023.

SOUZA, E. B. de et al. On the Influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998. Acta Amazônica, v. 30, p. 305-318. 2000. Acesso em: 07 outubro de 2023. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0044-5967200000200305](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-5967200000200305).

TAWFIK., M. A., 2023. River flood routing using artificial neural networks. Ain Shams Engineering Journal (14): 101904. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101904>

TOMASELLA, J. et al. The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: floodplain hydrology and its potential ecological and human impacts. Climatic Change, v. 116, Issue 3-4, p. 723-746, feb. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0508-3>>. Acesso em: 07 outubro de 2023.

TUCCI, 2005, Modelos Hidrológicos, Segunda Edição, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2005;

USACE, 2023. Manning's N Values. HEC-RAS River Analysis System.

VILLAR, J. C. E. et al. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). Journal of Hydrology, v. 375, p. 297–311. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940900153X>>. Acesso em: 27 setembro de 2023.