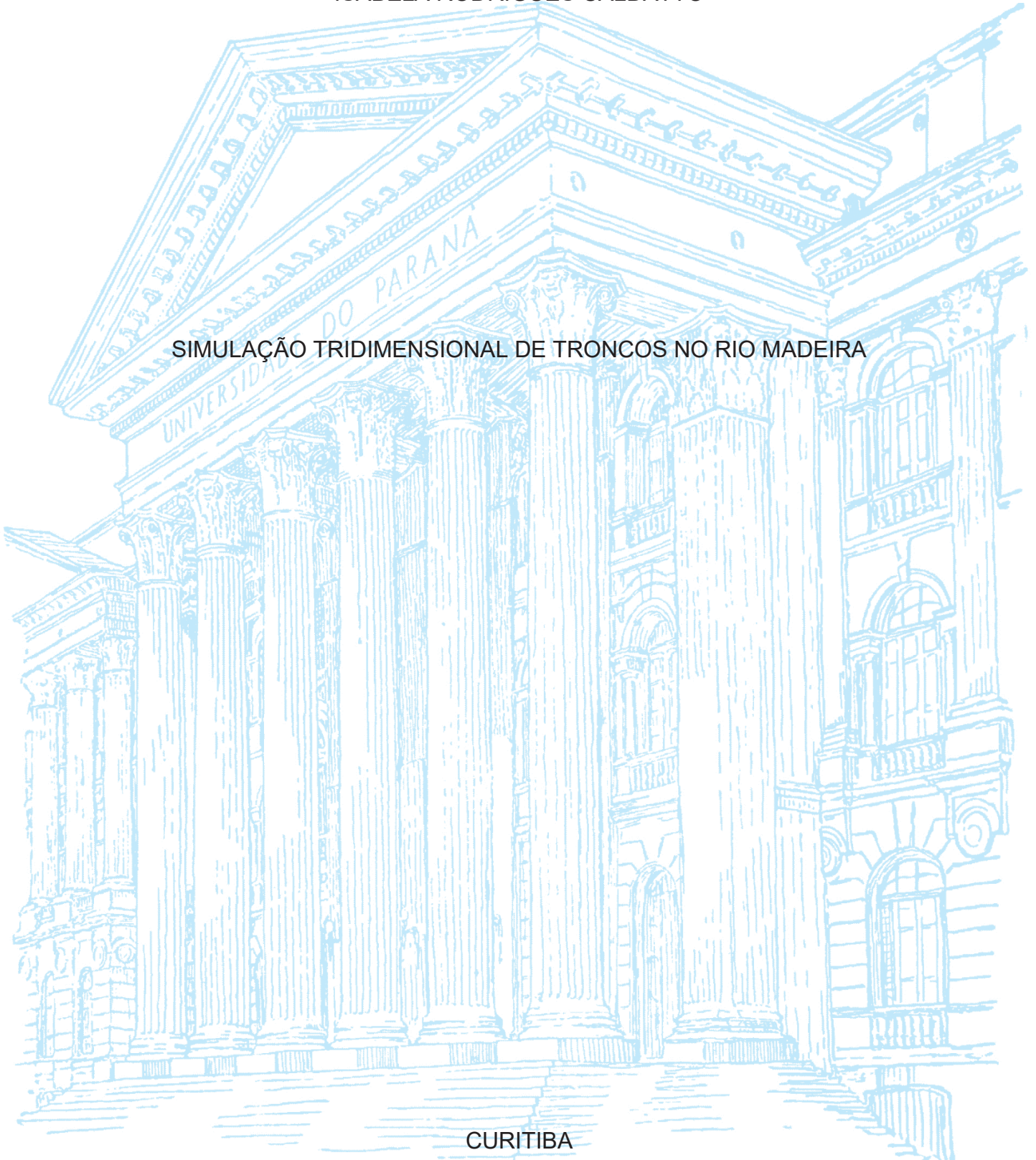


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABELA RODRIGUES CALDATTO

SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE TRONCOS NO RIO MADEIRA



CURITIBA

2023

ISABELA RODRIGUES CALDATTO

SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE TRONCOS NO RIO MADEIRA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger

Coorientador: Dr. Rubem Luiz Daru

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Caldatto, Isabela Rodrigues

Simulação tridimensional de troncos no Rio Madeira / Isabela Rodrigues
Caldatto. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Tobias Bernward Bleninger

Coorientador: Rubem Luiz Daru

1. Madeira aglomerada. 2. Madeira – Transporte. 3. Madeira - Transporte
por águas interiores. 4. Hidrodinâmica. 5. Madeira, Rio (RO e AM). I.
Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental. III. Bleninger, Tobias Bernward. IV. Daru, Rubem Luiz.
V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ISABELA RODRIGUES CALDATTO** intitulada: **Simulação tridimensional de troncos no Rio Madeira**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Maio de 2023.

Assinatura Eletrônica

22/05/2023 09:41:25.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/05/2023 09:05:10.0

MAURÍCIO FELGA GOBBI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/05/2023 09:00:22.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Avaliador Externo (DHS)

Aos meus pais, que desde sempre me instruíram a priorizar os estudos e deram tudo de si para proporcionar o conhecimento que tenho hoje.

AGRADECIMENTOS

Primeiro, o agradecimento mais importante para tudo sempre: Obrigada Deus.

Gratidão imensa e especial ao meu orientador Professor Dr. Tobias Bleninger que me acolheu com muita paciência. Agradeço por todo conhecimento que me proporcionou, por todas as reuniões, por ser sempre compreensivo, por ter acreditado em mim, enfim, por todo apoio e incentivo durante esses dois anos de mestrado.

Agradeço ao Rubem Daru, meu coorientador, por todos os ensinamentos na área da modelagem e toda colaboração para o trabalho. À Bruna Polli, coordenadora do projeto, que me acolheu desde o primeiro dia me dando suporte dentro do Lactec. Agradeço assim, ao Lactec pela incrível oportunidade da bolsa de mestrado nesse projeto importantíssimo e a todos os membros da equipe que de alguma forma contribuíram nessa jornada.

Agradeço à Jirau Energia, por financiar o excelente projeto P&D Aneel denominado “Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD”. O projeto me fez crescer como profissional e como pessoa, foi muito importante para mim.

Aos examinadores da banca de qualificação Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani e Prof. Dr. Maurício Felga Gobbi pelas sugestões que foram fundamentais para a conclusão dessa dissertação.

Ao Eng. Rafael Assumpção, que me apresentou a oportunidade do mestrado e me incentivou muito. Agradeço também por todos os ensinamentos prévios na área da modelagem.

Ao meu pai José Hamilton Caldato e minha mãe Cleia Temis Rodrigues de Souza que sempre me ensinaram desde pequena a dar prioridade nos estudos e fizeram o possível e impossível para que isso pudesse acontecer, e assim foi feito. Ao Caio Rodrigues Caldato, meu irmão, que mesmo longe sempre me deu forças. À minha prima Ana Flávia Caldato que esteve comigo desde o dia da entrevista com o Lactec, no dia que fui aceita na vaga e até hoje. Agradeço a toda a minha família, por tudo.

Ao amado Gabriel Stelutti, que abraçou o desafio do relacionamento a distância para realizar um sonho meu. Não mediu esforços para me ajudar, dar apoio e carinho em diversos aspectos e nunca deixou a desejar durante esse período.

Às minhas amigas queridas, em especial Bianca Bialon, Maria Eduarda Pascoletto e Natalia Matos que estiveram diretamente juntas comigo em meio ao mestrado, me ajudando em todos os âmbitos. Gratidão enorme por tudo que fizeram por mim. Aos amigos Antonio, Layra, Maria Carolina, Bruna e Monica, que também contribuíram indiretamente só pelo fato de serem meus amigos, meus sinceros agradecimentos por fazerem parte da minha vida.

Agradeço aos colegas que conheci no PPGEA que me ajudaram em disciplinas, trabalhos, conhecimentos sobre a Engenharia Ambiental e também pelo acolhimento em Curitiba.

Por fim, agradeço a mim mesma por todo esforço, por ter conseguido passar por todos os momentos difíceis, todos os obstáculos, desafios, inseguranças para chegar até aqui.

MUITO OBRIGADA a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esse título.

“Ser como o rio que deflui
Silencioso dentro da noite.
Não temer as trevas da noite.
Se há estrelas nos céus, refleti-las.
E se os céus se pejam de nuvens,
Como o rio as nuvens são água,
Refleti-las também sem mágoa
Nas profundidades tranquilas.”
(BANDEIRA, M. Belo, Belo. 1948)

PREFÁCIO

O presente trabalho apresenta parcialmente as atividades e resultados desenvolvidos para o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) 06631-0014/2020, denominado “Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos - DMIMMAD”. O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec é responsável pela coordenação geral do projeto e pela bolsa de mestrado ofertada.

O desenvolvimento do projeto (P&D) propôs estudos sobre o transporte de material lenhoso que auxiliará na elaboração de boas práticas de gestão destes materiais em reservatórios, evitando acúmulos próximos às estruturas físicas. O P&D teve como finalidade estudar a dinâmica do transporte de troncos superficiais e submersos, incluindo a caracterização volumétrica e de densidade dos troncos, sendo a compreensão desta dinâmica subsídio para a proposição do desenvolvimento (concepção) de um sistema de manejo de troncos submersos. Sendo assim, o projeto foi composto por onze etapas, e nesse trabalho será abordada a Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica.

O projeto teve início em dezembro de 2020 e foram apresentados relatórios técnicos quadrimestrais. Todos os relatórios foram utilizados nesse trabalho, com colaboração parcial ou total de minha parte. Capítulos como introdução, objetivos, construção do modelo e calibração tiveram parcialmente minha colaboração. O foco desse trabalho é a modelagem hidrodinâmica e modelagem de partículas e, nos relatórios, grande parte desses tópicos foram produzidos por mim com auxílio da equipe.

RESUMO

Os rios amazônicos possuem uma característica em comum, que é a elevada quantidade de material lenhoso que transportam, principalmente em períodos de cheia. A presença de troncos é importante para o ecossistema, mas também pode causar alguns problemas. Destaca-se as possíveis dificuldades na geração de energia quando o acúmulo se dá nas proximidades de uma usina hidrelétrica. A UHE Jirau está localizada no rio Madeira e essa problemática será abordada nesse trabalho. Estudos envolvendo a modelagem de transporte de troncos fluviais ainda são poucos e na complexidade do rio Madeira e de UHE Jirau não há nenhum. O trabalho tem como objetivo simular a hidrodinâmica do rio e representar o material lenhoso através do modelo Lagrangiano de partículas. Foi utilizado o Delft3D para a realização do estudo e a simulação de partículas é acoplada aos resultados hidrodinâmicos. Foram simulados alguns cenários de operação da usina e inseridas estruturas retentoras (*log booms* e retentores de meio água) para analisar o comportamento das partículas. O modelo hidrodinâmico foi validado a partir de estudos anteriores, medições em campo e modelo físico reduzido. Foi possível representar as principais variações de velocidades tridimensionais e níveis d'água. A simulação de partículas foi condizente com a distribuição de vazões e assim foi possível identificar, conforme a operação da usina, os destinos mais atrativos para os troncos.

Palavras-chave: material lenhoso; transporte de troncos; modelagem hidrodinâmica; transporte de partículas; modelo lagrangiano; *log boom*; Usina Hidrelétrica de Jirau; Delft3D; Rio Madeira.

ABSTRACT

The Amazonian rivers have a common characteristic, which is the high quantity of woody material they transport, especially in flooding periods. The presence of logs is important for the ecosystem, but can also cause some problems. We highlight the possible difficulties in power generation when the accumulation occurs near a hydroelectric power plant. HPP Jirau is located on the Madeira River and this problem will be approached in this work. Studies involving the modeling of river log transport are still few and in the complexity of the Madeira River and HPP Jirau there are none. This work aims to simulate the hydrodynamics of the river and represent the woody material through the Lagrangian particle model. Delft3D will be used to perform the study and the particle simulation is coupled to the hydrodynamic results. Some scenarios of plant operation were simulated and retainer structures (*log booms* and half-water retainers) were inserted to analyze the behavior of the particles. The hydrodynamic model was validated from previous studies, field measurements, and a reduced physical model. It was possible to represent the main variations of three-dimensional velocities and water levels. The particle simulation was consistent with the flow distribution and thus it was possible to identify, according to the power plant operation, the most attractive destinations for the logs.

Keywords: woody material; logs transport; hydrodynamic modeling; particle tracking; lagrangian model; *log boom*; Jirau Hidroeletric Power Plant; Delft3D; Madeira River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acúmulo de troncos nas linhas de log boom próximo as estruturas da UHE Jirau.....	21
Figura 2 - Localização do rio Madeira	37
Figura 3 – Bacia Hidrográfica do rio Madeira a partir da UHE Jirau.....	38
Figura 4 – Localização da Usina Hidrelétrica Jirau	39
Figura 5 –Dados batimétricos e topográficos obtidos pelo Lactec utilizados para obtenção da batimetria do modelo.....	40
Figura 6 – Dados batimétricos interpolados para a modelagem	41
Figura 7 - Canal da Ilha do Padre	42
Figura 8 – Cotogramas dos postos de controle de nível de água do rio Madeira..	43
Figura 9 - Mapa de localização dos postos de controle de nível d'água	44
Figura 10 – Seção das medições do ADCP	45
Figura 11 – Malha Computacional - visão geral	46
Figura 12 – Exemplo das camadas sigma em uma seção do reservatório	47
Figura 13 – Estruturas da barragem - zoom.....	48
Figura 14 - Localização dos pontos de observações (x azul claro), seções transversais (linha azul claro), locais das condições de contorno abertas (linha azul escuro) barragens (linha amarela), células secas (verde) – zoom.....	49
Figura 15 - Localização dos pontos de observações (x azul claro), seções transversais (linha azul claro), locais das condições de contorno abertas (linha azul escuro) barragens (linha amarela), células secas (verde) – visão geral.....	50
Figura 16 – Exemplo ilustrativo da estrutura “3D gate” em uma seção transversal.....	53
Figura 17 – Representação esquemática de <i>log booms</i> (preto) e retentor/desviador de troncos (azul).....	53
Figura 18 - Representação de comportas Clapet.....	55
Figura 19 – Diferentes configurações das estruturas no modelo. Em vermelho o <i>log boom</i> superficial e em azul o retentor/desviador de troncos de meia água.....	57
Figura 20 – Pontos de lançamentos das partículas.....	59

Figura 21 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 m ³ /s.....	60
Figura 22 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão alta: 41.589,86 m ³ /s – 25/02/2019	61
Figura 23 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão alta: 41.589,86 m ³ /s – 25/02/2019	61
Figura 24 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 m ³ /s – 25/02/2019	62
Figura 25 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 m ³ /s – 11/02/2017.....	62
Figura 26 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão intermediária: 20.071,94 m ³ /s – 11/02/2017.....	63
Figura 27 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão intermediária: 20.071,94 m ³ /s – 11/02/2017	63
Figura 28 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 m ³ /s – 11/02/2017	64
Figura 29 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 m ³ /s – 16/08/2018.....	64
Figura 30 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais médias ao longo da coluna da água - Vazão baixa: 6.808,17 m ³ /s – 16/08/2018	65
Figura 31 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) médias ao longo do transecto - Vazão baixa: 6.808,17 m ³ /s – 16/08/2018	65
Figura 32 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 m ³ /s – 16/08/2018	66
Figura 33 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão mais baixa: 3.598,66 m ³ /s – 09/08/2016	66
Figura 34 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão mais baixa: 3.598,66 m ³ /s – 09/08/2016.....	67
Figura 35 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão mais baixa: 3.598,66 m ³ /s – 09/08/2016	67

Figura 36 – Ângulo das velocidades horizontais – Vazão mais baixa: 3.598,66 m ³ /s – 09/08/2016	68
Figura 37 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021	69
Figura 38 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021	70
Figura 39 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021	70
Figura 40 – Ângulo das velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021	71
Figura 41 – Proporção da distribuição vazões entre as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário.....	72
Figura 42 – Seções para verificação de velocidades em seções transversais na margem direita, margem esquerda, seção que corta estruturas retentoras e seção longitudinal ao longo do reservatório.....	72
Figura 43 – Magnitude (cores na legenda) e direção (vetores em preto) das velocidades superficiais horizontais ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).	74
Figura 44 – Magnitude das velocidades horizontais em seção longitudinal ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).	75
Figura 45– Magnitude das velocidades em transecto na margem direita do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F). Percentuais correspondem à vazão que vai para o lado direito em relação ao total.	76
Figura 46 – Magnitude das velocidades em transecto na margem esquerda do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F). Percentuais correspondem à vazão que vai para o lado esquerdo em relação ao total.	77

Figura 47 – Magnitude das velocidades em transecto na seção denominada S11 que corta as estruturas de retenção do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).	78
Figura 48 - Simulações com drogas para cada cenário	80
Figura 49 – Trajetória e profundidade das partículas para cada cenário no reservatório da UHE Jirau	82
Figura 50 – Trajetória e destino das partículas para cada cenário no reservatório da UHE Jirau	83
Figura 51 – Cenário 1: sem estruturas retentoras – simulação com óleo	84
Figura 52 – Cenário 1: com log boom – simulação com óleo	85
Figura 53 - Comparação entre trajetórias de traçadores, óleo e drogas.	86
Figura 54 – Proporção de vazões cada cenário no reservatório da UHE Jirau	87
Figura 55 – Proporção do destino das partículas entre as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário	88
Figura 56 – Box plot do tempo de trajeto das partículas entre a região de lançamento até as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário. “n” representa a contagem das partículas destinadas a cada local	90
Figura 57 - Histograma de profundidades de partículas para cada cenário	91
Figura 58 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - sem estruturas de retenção	92
Figura 59 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - com <i>log boom</i>	93
Figura 60 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - com <i>log boom</i> e desviador/retentor	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão Bibliográfica: modelagem de troncos (continua).....	26
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários para comparação com o ADCP.....	45
Tabela 2 - Condições de contorno a jusante	51
Tabela 3 – Parâmetros físicos do modelo	52
Tabela 4 - Cenários Operacionais.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1 MODELO DELFT3D	29
3.2 MODELO DELFT3D-FLOW	30
3.3 MODELO DELFT3D-PART	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 ÁREA DE ESTUDO	36
4.2 DADOS DISPONÍVEIS	39
4.2.1 BATIMETRIA	40
4.2.2 VAZÃO	42
4.2.3 NÍVEIS DE ÁGUA	43
4.2.4 MEDIÇÕES ADCP	44
4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA	45
4.3.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO	46
4.3.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO	54
4.3.3 CENÁRIOS OPERACIONAIS	54
4.4 MODELAGEM LAGRANGIANA	58
5 DISCUSSÃO E RESULTADOS	60
5.1 CALIBRAÇÃO	60
5.2 CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA	71
5.2.1 SIMULAÇÃO DE DROGUES	79
5.3 PARTICLE TRACKING	81
5.3.1 SIMULAÇÃO COM “ÓLEO”	84
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	86
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE 1	102
APÊNDICE 2	125

1 INTRODUÇÃO

O material lenhoso no meio fluvial pode influenciar em diversos processos como o transporte de sedimentos, a vegetação ripária, a biodiversidade de organismos, o ciclo de nutrientes e a variação física destes habitats (LE LAY; MOULIN; PIÉGAY, 2013). A madeira fornece vários benefícios para o ecossistema por isso sua remoção deve ser limitada (SCHALKO, 2018).

Dentre as vantagens do acúmulo de madeira nos ecossistemas, Wohl et al. (2016) citam algumas, como por exemplo, podem proporcionar habitats para peixes ou outros organismos aquáticos, podem aumentar a erosão da margem criando canais capazes de armazenar sedimentos finos e matéria orgânica.

É muito comum ocorrer inundações causadas pela perda de capacidade de transporte, devido à diminuição da largura do curso da água pela deposição destes materiais. O acúmulo em estruturas hidráulicas, como pontes, pode causar remanso e erosão nos pilares de estruturas (SCHALKO, 2018). Em usinas hidrelétricas, é possível que comprometa a geração de energia elétrica ao acumular material lenhoso próximo as estruturas geradoras.

Em alguns países a prática de retirada de troncos tem sido aplicada para mitigação desses problemas, porém sua reintrodução tem sido utilizada em diversos programas de restauração, a fim de melhorar as condições hidrológicas, morfológicas e ecológicas dos rios (RUIZ-VILLANUEVA et al. 2016).

Manter a sustentabilidade dos ecossistemas é um desafio no manejo de troncos nas bacias hidrográficas, pois o excesso destes elementos pode causar perdas econômicas de forma direta em usinas hidrelétricas, reservatórios e à navegação. Já a falta destes pode causar problemas abrangendo aspectos ecológicos do rio como um todo: aumento da descarga sólida, perda de biodiversidade, ineficiência na ciclagem de nutrientes e até inundações, trazendo danos de forma indireta (RUIZ-VILLANUEVA et al. 2016).

Os rios amazônicos são conhecidos por transportar grandes quantidades de troncos e detritos flutuantes e submersos, especialmente em período de cheias. Este material desempenha um papel no ambiente aquático que está associado a dinâmica de colonização e reprodução de organismos aquáticos e exportação de carbono (ZUANON; VILLARA, 2005).

Nos sistemas terrestres, nas áreas de projeção de inundação, observa-se a dispersão de propágulos e servem como estrutura física para abrigo de fauna. A manutenção da dinâmica fluvial do material lenhoso em reservatórios artificiais está associada à manutenção da ordem ecológica, hidráulica e cultural (SEO et al., 2010; RUIZ-VILLANUEVA et al. 2016).

Com o aumento de empreendimentos hidráulicos, tornou-se fundamental estudar o manejo correto dos materiais lenhosos para que haja uma boa operação das estruturas (SEO et al., 2010; RUIZ-VILLANUEVA et al. 2016).

Dentro desse contexto, destaca-se alguns problemas envolvendo o grande transporte de troncos em períodos de cheia, como enchentes, danos a estruturas ou obstrução de estruturas de usinas hidrelétricas.

Há alguns estudos relacionados a essas problemáticas, porém no cenário das usinas hidrelétricas ainda precisam ser mais explorados. As limitações dessa temática abrangem a dificuldade no monitoramento de material lenhoso e na modelagem, principalmente tridimensional, de transporte de troncos.

Nesse caso será estudado a Usina Hidrelétrica de Jirau, que teve início em suas operações em 2013 e, desde então vem enfrentando, principalmente nos períodos de cheia, desafios no manejo da grande quantidade de troncos que são transportados pelo rio. Foram implantadas duas linhas de *log boom*, que são espécies de “bóias” interligadas por painéis metálicos, com a finalidade de proteger as estruturas e direcionar os troncos flutuantes até a estrutura vertedora projetada para o seu descarregamento para jusante da barragem. As dificuldades enfrentadas, em geral, estão associadas à pouca eficiência desse sistema (ESBR, 2019).

Estima-se que no período de cheias aproximadamente 30.000 troncos superficiais cheguem ao reservatório diariamente, os quais são parcialmente conduzidos por linhas de *log boom* para um vertedouro específico para descarregá-los para jusante da barragem, o vertedouro de troncos. Parte destes ficam retidos nas longas linhas de *log boom*, apresentando problemas de retenção de grande quantidade de troncos devido à formação de catenárias (LACTEC, 2021).

Observa-se que o *log boom* detém de um grande acúmulo de material lenhoso, favorecendo a passagem de troncos de forma submersa e conseqüentemente, acumulando nas tomadas d'água das usinas e fazendo-se necessária à sua retirada através de operações embarcadas complexas envolvendo a alocação de infraestrutura de navegação e içamento com auxílio de balsas,

guindastes, garras, rebocadores e escavadeiras. Neste contexto, existe o conhecimento pelas equipes das totalizações destes materiais (m^3 ou toneladas) nas proximidades das grades realizadas através de imageamentos subaquáticos para subsidiar a alocação de recursos para a limpeza (LACTEC, 2021).

Ainda não há estudos no rio Madeira frente a caracterização do material ou dos fenômenos que causam um maior ou menor transporte, como a densidade do material transportado, teor de umidade dos troncos, quantidade de material retido e influência das operações realizadas nas usinas.

Este trabalho visa caracterizar o transporte do material lenhoso através da modelagem hidrodinâmica do reservatório da UHE Jirau junto de uma modelagem Lagrangiana de partículas para que as trajetórias dos troncos possam ser analisadas. Também serão representadas as estruturas retentoras na modelagem e suas influências.

A partir desses fundamentos, foram elaboradas as seguintes hipóteses para o trabalho:

- a) A modelagem Lagrangiana poderá representar trajetórias fiéis a realidade?
- b) Diferentes cenários de operação podem evitar o acúmulo de troncos?
- c) As estruturas de retenção serão eficientes?

Figura 1 - Acúmulo de troncos nas linhas de log boom próximo as estruturas da UHE Jirau



FONTE: Acervo Lactec. (2022).

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral estudar a dinâmica do transporte de troncos superficiais e submersos através de um modelo tridimensional de partículas.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Caracterizar a hidrodinâmica do reservatório;
- Implementar um modelo tridimensional de partículas;
- Analisar a influência de cenários de operação da usina;
- Representar matematicamente estruturas retentoras de troncos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O transporte de material lenhoso tem sido objeto de vários estudos nos últimos anos, principalmente no âmbito ecológico e geomorfológico (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2013), porém a modelagem numérica do transporte de troncos nos rios ainda é um desafio e diferentes estratégias podem ser exploradas (BLADÉ; SANCHEZ-JUNY; RUIZ-VILLANUEVA, 2016). A maior parte da literatura refere-se à dinâmica de troncos em diversos contextos, porém, em reservatórios hidrelétricos essa temática específica ainda é escassa. Em reservatórios, foram avaliados artigos abrangendo a modelagem de estruturas de retenção de troncos e detritos (LACTEC, 2021).

No que abrange modelagens matemáticas englobando o transporte de troncos, foram avaliados alguns estudos, Ruiz-Villanueva et al. (2014a), Ruiz-Villanueva et al. (2014b), Ruiz-Villanueva et al. (2016), Bladé et al. (2016), Bladé; Sanchez-Juny; RuizVillanueva (2016), Schalko (2018), Schalko et al. (2019a), Schalko et al. (2019b) e Zischg et al. (2018).

Ruiz-Villanueva et al. (2014a) desenvolveram um modelo de transporte de troncos acoplado ao modelo hidrodinâmico 2D através do software 'Iber' com objetivo de simular a interação entre o transporte de troncos e o fluxo fluvial. O estudo se assemelha bastante ao modelo deste trabalho ao resolver no modelo hidrodinâmico a equação de águas rasas incluindo o modelo de turbulência $k-\epsilon$ e ao representar os troncos pelo modelo Lagrangiano, ou seja, calcula a posição do tronco para todos os passos temporais a partir dos dados obtidos na hidrodinâmica. As condições de fluxo afetam o movimento dos troncos, porém o movimento dos troncos também afeta o fluxo.

O modelo foi validado através de um experimento em um canal reto com alguns "obstáculos", foi verificado que o acúmulo de troncos pode causar remanso quando há estruturas muito próximas, como pilares de uma ponte. No geral, houve uma boa concordância dos resultados observados e simulados, apesar das simplificações.

Ruiz-Villanueva et al. (2014b) exploraram a obstrução de pontes devido ao transporte de madeira durante um evento de cheia. Reproduziram o tronco individualmente por meio do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico bidimensional, considerando-os como cilindros e desconsiderando raízes e galhos. Nesse estudo, é possível concluir que o impacto de uma inundação pode aumentar

devido à quantidade de madeira transportada pelo rio, principalmente em seções críticas, como pontes.

Ruiz-Villanueva et al. (2016) resumem qualitativa e quantitativamente os avanços recentes dos processos envolvidos na dinâmica de troncos em sistemas fluviais. Os autores apontam que a imprecisão nos cálculos de volumes de troncos é magnificada em virtude da dificuldade da mensuração dos detritos por conta do espaço entre eles. Nessas situações, a estimativa do volume é feita com base na área dos detritos. Além disso, a falta de imagens em alta definição também é um obstáculo para a mensuração. Os autores destacaram modelos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) já utilizados para representação de troncos e citam brevemente modelagens tridimensionais (3D), e concluem que a modelagem tridimensional de troncos é bastante rara pois a representação da geometria dos troncos é desafiadora e demanda altos esforços computacionais.

Bladé et al. (2016) apresentaram e discutiram detalhes das estratégias numéricas usadas na simulação do transporte de troncos com modelo hidrodinâmico 2D baseado no método dos volumes finitos. Os autores indicaram que a validação das modelagens com dados de campo é necessária. Eles destacam ainda o desafio ainda não resolvido de reproduzir a geometria dos troncos de forma mais precisa.

Bladé; Sanchez-Juny; Ruiz-Villanueva (2016) discutem detalhes dos métodos numéricos aplicados ao modelo 2D e destacam os principais desafios da modelagem de material lenhoso com base no método de volumes finitos. Fazem simplificações dos troncos desconsiderando galhos e raízes e relatam a dificuldade de reproduzir fielmente esse material. Propõem um monitoramento de troncos para coleta de dados mais precisos.

Schalko (2018), aborda em sua tese uma modelagem bidimensional de acúmulo de troncos em estruturas fluviais. Foram realizados experimentos em laboratórios simulando o efeito dos troncos nas estruturas de uma ponte. São desenvolvidas equações para estimar a probabilidade desse acúmulo e o efeito do remanso e erosão nos pilares das pontes devido ao transporte de madeira. Dando continuidade à pesquisa, Schalko et al. (2019a) tiveram como objetivo principal determinar os parâmetros que regem a probabilidade de acumulação e concluíram que estudar esse fenômeno pode contribuir para identificar seções críticas e evitar problemas como inundações. Em um outro artigo, Schalko et al. (2019b) também estudaram medidas para redução do risco de acúmulo de troncos em pontes,

propondo duas medidas principais: defletores de fundo instaladas a montante da estrutura para transportar paralelamente os troncos e estruturas triangulares, semelhantes a nadadeiras, instaladas a montante como uma extensão do pilar da ponte como objetivo similar aos defletores de fundo. Diversas configurações foram estudadas e por fim foi analisada qual medida propõe menor probabilidade de acúmulo de troncos em pontes.

Zischg et al. (2018) também estudaram a madeira desde suas origens em terra e acoplam com um modelo hidrodinâmico bidimensional para ter como resultado a localização de cada tronco em cada instante de tempo.

Em relação às estruturas de retenção de troncos, Kim et al. (2020) apresentaram modelagem 3D, realizada por meio do software de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) FLOW-3D, aplicada a fluxos de detritos e verificam a performance de barreiras contra esse fluxo. Seguindo a mesma tendência de enfoque na retenção dos troncos, Katsuno, Castro e Dantas (2017) e Katsuno et al. (2018) apresentaram modelagem das estruturas de *log boom*. Por conta da complexidade da estrutura do *log boom* e, portanto, alto custo computacional das modelagens, esta estrutura tende a ser simplificada, como por exemplo no estudo de Katsuno, Castro e Dantas (2017), que desenvolveram um modelo simplificado considerando apenas um módulo de *log boom* utilizado pela UHE Santo Antônio. As simulações também foram realizadas por meio de software CFD. Katsuno et al. (2018), por meio do mesmo software, implementam a formulação de porosidade para a simplificação da geometria.

O Quadro 1 apresenta resumidamente a literatura estudada para construir esse capítulo.

Quadro 1 - Revisão Bibliográfica: modelagem de troncos (continua)

Autoria	Título	Conteúdo	Abordagem	Principal limitação e/ou conclusões	Ambiente
Bladé et al. (2015)	Challenges of numerical modelling of flow, sediment and wood in rivers	Apresentam e discutem detalhes das estratégias numéricas usadas na simulação do transporte de troncos com modelo hidrodinâmico 2D baseado no método dos volumes finitos.	Modelagem 2D	A validação com dados de campo é necessária; desafio de reproduzir a geometria dos troncos de forma mais precisa	Rio
Bladé; SanchezJury; RuizVillanueva (2016)	Strategies in the 2D numerical modelling of wood transport in rivers	Discutem detalhes dos métodos numéricos aplicados ao modelo e destacam os principais desafios da modelagem de troncos.	Modelagem 2D	Simplificação dos troncos, sem considerar galhos e raízes. Falta de dados observados.	Rio
Katsuno; Castro; Dantas (2017)	Hydrodynamic analysis of debris containment grids in hydropower plant using porous media	Visando resolver o problema com troncos em reservatório, desenvolveram um modelo simplificado considerando apenas um módulo de <i>log boom</i> utilizado pela UHE Santo Antônio.	Modelagem 3D	Este artigo descreve os resultados de modelo físico de <i>log boom</i> da usina de Santo Antônio, no rio Madeira, onde troncos de grandes dimensões e correntes de alta velocidade levam à fadiga dos elementos mecânicos do <i>log boom</i> . São apresentados a concepção e montagem do modelo físico (escala 1:10), os ensaios realizados e os resultados obtidos, que servem para aplicação nas estruturas e na calibragem de modelos numéricos.	Reservatório

Quadro 1 - Revisão Bibliográfica: modelagem de troncos (continuação)

Autoria	Título	Conteúdo	Abordagem	Principal limitação e/ou conclusões	Ambiente
Katsuno et al. (2018)	Porous formulation for hydrodynamic simplification of debris containment grid	Apresentou modelo com simplificação da geometria do <i>log boom</i> , mais elaborada em relação ao trabalho anterior (KATSUNO; CASTRO; DANTAS, 2017).	Modelagem 3D	Complementa o estudo anterior ao representar o <i>log boom</i> .	Reservatório
Kim et al. (2020)	Sensitivity analysis of influencing parameters on slit-type barrier performance against debris flow using 3D-based numerical approach	Apresentam modelagem 3D, realizada por meio do software de CFD (Computational Fluid Dynamics) FLOW-3D, aplicada a fluxos de detritos e verificam a performance de barreiras contra esse fluxo.	Modelagem 3D	Foca na barreira para reter os detritos.	*
Ruiz-Villanueva et al. (2014a)	Two-dimensional numerical modeling of wood transport	Estudaram a dinâmica de transporte de madeira e desenvolveram modelo numérico para simular o transporte de madeira acoplado com um modelo hidrodinâmico 2D.	Modelagem 2D	Limitado a águas rasas.	Canal
Ruiz-Villanueva et al. (2014b)	Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village	Simula o bloqueio de ponte por troncos. O modelo teve sucesso em prever os padrões de deposição dos troncos e as áreas propensas à formação de depósito.	Modelagem 2D	Simplificação dos troncos como cilindros, desconsiderando galhos e raízes. Não considera o efeito do transporte de sedimentos.	Rio

Quadro 1 - Revisão Bibliográfica: modelagem de troncos (conclusão)

Autoria	Título	Conteúdo	Abordagem	Principal limitação e/ou conclusões	Ambiente
Ruiz-Villanueva et al. (2016)	Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges	Resumem qualitativa e quantitativamente os avanços recentes dos processos envolvidos na dinâmica de troncos em sistemas fluviais.	Revisão bibliográfica	Os autores apontam que a imprecisão nos cálculos de volumes de troncos é magnificada em virtude da dificuldade da mensuração dos detritos por conta do espaço entre eles. Nessas situações, a estimativa do volume é feita com base na área dos detritos. Além disso, a falta de imagens em alta definição também é um obstáculo para a mensuração.	Rio
Schalko (2018)	Modeling hazards related to large wood in rivers	Tese de doutorado que abrange o transporte de troncos em um estudo aprofundado sobre o acúmulo em pontes.	Modelagem 2D	Desenvolveu equações de probabilidade dentro dos cenários estudados, estudou erosão e remanso em pontes devido ao transporte de troncos.	Canal
Schalko et al. (2019a)	Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers.	Estudam e elaboram equações de probabilidade de acúmulo de madeira em pontes.	Modelagem 2D	Experimento laboratorial onde foi possível determinar os principais parâmetros para o cálculo de probabilidade.	Canal
Schalko et al. (2019b)	Risk reduction measures of large wood accumulations at bridges.	Estudam medidas para que seja possível reduzir o risco de acúmulo de troncos.	Modelagem 2D	Experimento laboratorial para mitigar o problema de acúmulo de madeira em estruturas fluviais.	Canal
Zischg et al. (2018)	Modelling Spatiotemporal Dynamics of Large Wood Recruitment, Transport, and Deposition at the River Reach Scale during Extreme Floods	Apresenta uma simulação da dinâmica de troncos acoplada a um modelo hidrodinâmico.	Modelagem 2D	O modelo pode superestimar o volume de troncos. Pode ser aplicado em rios de até 30 km de comprimento.	Bacia

FONTE: Lactec (2021) adaptado pela autora (2022).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização da modelagem matemática, tanto em reservatórios quanto em estuários ou rios, tem papel fundamental nos estudos ambientais (BAPTISTELLI, 2008). Analisar a hidrodinâmica do local se torna primordial quando se trata de estudos envolvendo, por exemplo, o transporte de sedimentos e dispersão de poluentes. Para estudar o transporte de madeira nos rios, não é diferente.

Nesse capítulo serão apresentadas as abordagens que foram empregadas nesse estudo (Euleriana e Lagrangiana) para a modelagem hidrodinâmica e modelagem de partículas. Também será apresentado como o modelo Delft3D-FLOW resolve o sistema.

3.1 MODELO DELFT3D

O pacote Delft3D foi desenvolvido pela Deltares na Holanda e é composto por diversos módulos e cada um tem focos distintos de simulação: hidrodinâmica (*FLOW*), ondas (*SWAN* ou *WAVE*), transporte de sedimentos (*SED*), transporte de partículas (*PART*), qualidade da água (*WAQ*), formações morfológicas (*MOR*) e processos ecológicos (*ECO*).

Em 2013, o módulo *FLOW* e os módulos *SED*, *MOR* e *WAQ* tiveram seu código-fonte liberado, o que aumentou a quantidade de usuários do modelo e proporcionou melhorias significativas no código, além de possibilitar a utilização dos modelos sem custos com licenças, melhorando a validação e transparência do modelo (DELTARES, 2023a).

Todos os módulos possuem ferramentas de pré-processamento (RGFGRID – gerador de grade e QUICKIN – gerador de batimetria), processamento e pós-processamento (QUICKPLOT), o que facilita o trabalho de implementação do modelo na região de interesse.

Nas análises deste trabalho serão utilizados o módulo relacionado aos processos hidrodinâmicos: *FLOW* (Delft3D-FLOW); e, o módulo referente ao transporte de partículas: *PART* (Delft3D-PART).

O modelo Euleriano (*FLOW*) é executado de forma independente e antecede a execução do modelo Lagrangiano (*PART*). Durante essa fase, são gerados arquivos de comunicação. Em seguida, o modelo *PART* é ativado sendo utilizados os arquivos

de comunicação e empregando o conjunto completo de dados de campo de velocidades e informações sobre turbulência obtidas da execução anterior do modelo Euleriano.

As formulações matemáticas do programa levam em consideração os seguintes fenômenos físicos que ocorrem em reservatórios (DELTARES, 2023a):

- Gradientes da superfície livre (efeitos barotrópicos);
- Efeitos da rotação da Terra;
- Variabilidade da densidade da água (equação de estado);
- Efeitos baroclínicos (estratificação e correntes de densidade);
- Turbulência induzida por introdução de fluxos de massa e quantidade de movimento;
- Transporte de sal, calor e outros constituintes;
- Variabilidade espacial e temporal da tensão de cisalhamento gerada pelo vento sobre a superfície da água modelada por uma lei de atrito quadrática;
- Variabilidade espacial da tensão de cisalhamento exercida pelo fluxo turbulento no fundo baseado em uma fórmula quadrática Chézy ou Manning no fundo;
- Variabilidade espacial e temporal da pressão atmosférica na superfície da água;
- Variação temporal de fontes e sumidouros;
- Troca de calor com a superfície;
- Evaporação e precipitação;
- Tensão de cisalhamento nas paredes laterais; e
- Troca vertical de quantidade de movimento devido a ondas internas.

O modelo foi validado por vários estudos, tanto em laboratório quanto em campo (GERRITSEN *et al.*, 2008).

3.2 MODELO DELFT3D-FLOW

Os modelos hidrodinâmicos geralmente são resolvidos a partir da abordagem Euleriana. Esse tipo de abordagem consiste em fixar um volume de controle e analisar

as propriedades do escoamento em função do espaço (pontos fixos) e do tempo (FIEDLER; ANA; ITAIPU, 2020).

O módulo hidrodinâmico no Delft3D resolve as equações de Navier-Stokes com a aproximação de águas rasas, ou seja, um sistema formado pelas **equações de continuidade (balanço de massa)** e de **quantidade de movimento** para escoamentos com superfície livre. Ele supõe distribuição hidrostática de pressões, isto é, desconsidera as acelerações na direção vertical.

As demais hipóteses adotadas na formulação matemática do modelo são: hipótese do contínuo; escoamento incompressível; e, a hipótese de Boussinesq que consiste em considerar a aceleração do fluxo menor que a da gravidade e, portanto, as variações da densidade só são importantes quando afetam os termos gravitacionais e não os termos de inércia.

O modelo utiliza, na horizontal, **coordenadas curvilíneas ortogonais** para suavizar os erros ao modelar a curvatura do leito do rio. Esse sistema suporta coordenadas cartesianas (ξ, η) e coordenadas esféricas (λ, ϕ) . A escala da velocidade está no espaço físico, mas os componentes são perpendiculares às faces da célula da grade (DELTARES, 2023a).

Na vertical o modelo pode utilizar o sistema de coordenadas sigma (σ -grid) ou cartesiano (z -grid). No trabalho apresentado, foi utilizado o **sistema de coordenadas sigma**, na qual o número de camadas é constante variando apenas sua espessura. A grade é delimitada pela topografia do fundo e pela superfície livre, matematicamente expressa pela equação (3.1):

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (3.1)$$

Onde:

z = coordenada vertical (m);

ζ = elevação acima do plano de referência (m);

d = profundidade abaixo do plano de referência (m); e

H = profundidade total da água (m).

Equação da Continuidade

A equação de continuidade leva em consideração os fluxos de entrada e de saída de um volume de controle, onde a massa é conservada, ou seja, não pode ser

produzida nem destruída. O escoamento geral dos fluidos é descrito pelas equações de Navier-Stokes e através destas pode ser determinado o campo de velocidade. (FIEDLER; ANA; ITAIPU, 2020).

Para fluidos incompressíveis, a equação da continuidade pode ser dada pela equação (3.2):

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3.2)$$

Em coordenadas cartesianas, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

Sendo u, v e w as componentes da velocidade nas direções x, y e z , respectivamente.

No modelo Delft3D, a **equação da continuidade** para a profundidade é representada pela equação (3.4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \\ = (d + \zeta)Q \end{aligned} \quad (3.4)$$

ξ, η são as coordenadas curvilíneas horizontais;

$\sqrt{G_{\xi\xi}}, \sqrt{G_{\eta\eta}}$ são os coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas em coordenadas retangulares (m);

Q são as contribuições, por unidade de área, de vazão de entrada (q_{in}) e saída (q_{out}), precipitação (P) e evaporação (E):

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out})d\sigma + P - E \quad (3.5)$$

Equação de conservação de quantidade de movimento:

A equação de quantidade de movimento é derivada da segunda lei de Newton. É levado em consideração três forças importantes para a hidrodinâmica (FIEDLER; ANA; ITAIPU, 2020):

- Forças gravitacionais (g);
- Força do gradiente de pressão da água (p); e
- Força de atrito por viscosidade (μ).

Então, considerando o escoamento incompressível e um fluido newtoniano a equação (3.6) representa a equação de Navier-Stokes para conservação de quantidade de movimento:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{g}\rho - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (3.6)$$

A equação de conservação de quantidade de movimento na horizontal, no modelo Delft3D, é dada pelas equações (3.7) e (3.8):

Direção ξ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3.7)$$

Direção η :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3.8)$$

Sendo:

v_V = coeficiente de viscosidade vertical (m^2/s)

P_ξ e P_η = gradiente de pressão (kg/m^2s^2)

F_ξ e F_η = forças dissipativas de energia devido a viscosidade na horizontal (m/s^2)

M_ξ e M_η = contribuições de fontes externas (m/s^2)

A aproximação de águas rasas (escala horizontal muito maior que a profundidade) assume uma distribuição hidrostática de pressões, anulando acelerações na vertical. Sendo assim, a **equação de conservação de quantidade de movimento na vertical** se reduz em:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (3.9)$$

P = pressão hidrostática (kg/ms²)

g = gravidade (m/s²)

ρ = densidade da água (kg/m³)

H = profundidade total da água (m)

A **velocidade vertical** (ω), adaptada para as coordenadas sigma, é obtida a partir da equação da continuidade:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \\ = (d + \zeta)(q_{in} - q_{out}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

A **turbulência** é resolvida através da decomposição de Reynolds e conta com quatro modelos de fechamento: coeficiente constante, método algébrico, modelo κ - L e modelo κ - ε . Este trabalho utilizará o modelo κ - ε , na qual κ é a energia cinética turbulenta e ε é a taxa de dissipação dessa energia. Na equação de transporte são feitas duas suposições:

- Os termos de produção, flutuação e dissipação são os termos dominantes;
- Aproximação de águas rasas.

3.3 MODELO DELFT3D-PART

Esse módulo utiliza a abordagem lagrangiana, que consiste em acompanhar o movimento de uma partícula em um intervalo de tempo para descrever suas propriedades, ou seja, as propriedades são monitoradas a cada passo de tempo ao longo de toda a trajetória (FRAGOSO; LINS; BLENINGER, 2021).

Para simulação de transporte de troncos foi utilizado a hipótese simplificadora do que a velocidade e deslocamento de troncos segue a velocidade do escoamento, ou seja, um modelo de partículas acoplado ao modelo hidrodinâmico. Esta hipótese já foi utilizada em outros métodos de modelagem de transporte de troncos com boa aproximação (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014a).

O *particle tracking* no Delft3D é um modelo de monitoramento de partículas baseadas no princípio de que o movimento das substâncias pode ser descrito por uma grande quantidade de partículas que estão sujeitas se locomover aleatoriamente através da **dispersão horizontal e vertical**. Esse princípio também é conhecido como “*random walk*” ou passeio aleatório. As partículas também estão sujeitas à advecção devido às tensões de cisalhamento (fundo) e do vento (superfície) (DELTARES, 2023b).

O **coeficiente de dispersão horizontal** é responsável pelas flutuações horizontais que não são resolvidas no modelo hidrodinâmico. A dispersão ocorre devido à turbulência e conforme o tempo vai passando as partículas vão se espalhando. O coeficiente de dispersão horizontal é definido como uma função do tempo igual a:

$$D_{x,y} = at^b \quad (3.11)$$

Seguindo o modelo (Bent et al. 1991 apud Deltares 2023b):

$$a = 1$$

$$b = 0,01$$

Para escoamentos misturados verticalmente, o **coeficiente de dispersão vertical** pode ser obtido pela equação (3.12):

$$D_z = \frac{c_\mu^{1/4} L \sqrt{k}}{\sigma_c} \quad (3.12)$$

Sendo:

$$c_\mu = 0,09 \text{ (Rodi, 1984);}$$

L = comprimento da mistura (m); (Bakhmetev, 1932)

k = energia cinética turbulenta (m²/s²);

σ_c = número de Prandtl-Schmidt.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver esse estudo foi necessário dividi-lo em algumas etapas. Primeiro analisar a problemática e a área de estudo, depois explorar os dados que foram disponibilizados para o projeto de pesquisa, como batimetria, série de vazões, níveis de água e estudos anteriores.

Com os dados analisados, o próximo passo foi criar a simulação, que foi realizada com o software Delft3D. Para a representação do reservatório e da UHE Jirau no Delft3D, primeiro é necessário criar a grade, depois os dados de batimetria são adicionados e interpolados na grade. Em seguida, é adicionada uma série de parâmetros para a simulação hidrodinâmica como condições iniciais, condições de contorno, turbulência. Assim é possível executar o programa e obter os resultados hidrodinâmicos.

Com a base hidrodinâmica pronta é possível calibrar o modelo. Foram diversas comparações (modelo Telemac, modelo River2D, HEC-RAS, modelo físico reduzido e medições ADCP). Nesse trabalho será apresentada a calibração feita a partir das medições de ADCP por apresentarem melhor consistência de resultados. As demais comparações serão representadas no APÊNDICE 1.

Por fim, após a calibração, pode-se dar início ao estudo do transporte de partículas. Todos os processos serão detalhados e descritos a seguir.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O rio Madeira está localizado na região norte do Brasil passando pelos estados de Rondônia e Amazonas, sua nascente está localizada na Cordilheiras dos Andes, na Bolívia, onde recebe o nome de rio Beni. Sendo o 17º maior rio do mundo, o Madeira possui uma bacia hidrográfica de 1.420.000 m² que drenam áreas do Brasil, Bolívia e Peru. Sua extensão é de 3.240 km e tem sua foz no rio Amazonas. O rio é caracterizado por transportar troncos da planície florestal para o seu leito, principalmente nos períodos de cheias (ESBR, 2019).

Figura 2 - Localização do rio Madeira



FONTE: Wikipédia. (2022).

A UHE Jirau está situada no rio Madeira, imediatamente a jusante da Cachoeira do Inferno, no local denominado Ilha do Padre, cerca de 127 km medidos ao longo do rio, a montante da cidade de Porto Velho, capital do estado de Rondônia. O rio Madeira, no local da UHE Jirau, apresenta uma área de drenagem de 974.244 km², correspondente a 69% da área total da bacia (ESBR, 2019).

Figura 3 – Bacia Hidrográfica do rio Madeira a partir da UHE Jirau



FONTE: ESBR (2018).

A usina entrou em operação em setembro de 2013 e possui 50 unidades geradoras com capacidade instalada de 3.750 MW de potência. Está localizada no rio Madeira, no município de Porto Velho – RO, situada nas seguintes coordenadas geográficas: 9°21'17" de Latitude Sul e 64°43'55" de Longitude Oeste. O nível de água normal (NA normal) de operação é na cota 90m e nível de água mínimo (NA mínimo) na cota 82,50m (Construserv, 2020). As principais estruturas que compõe a UHE Jirau são:

- Casas de forças margem direita – 28 unidades
- Casas de forças margem esquerda – 22 unidades
- Vertedouro – 18 vãos
- Vertedouro de troncos

Figura 4 – Localização da Usina Hidrelétrica Jirau



FONTE: A autora (2022).

4.2 DADOS DISPONÍVEIS

Dentre os dados existentes para o local de estudo, foram utilizados neste trabalho:

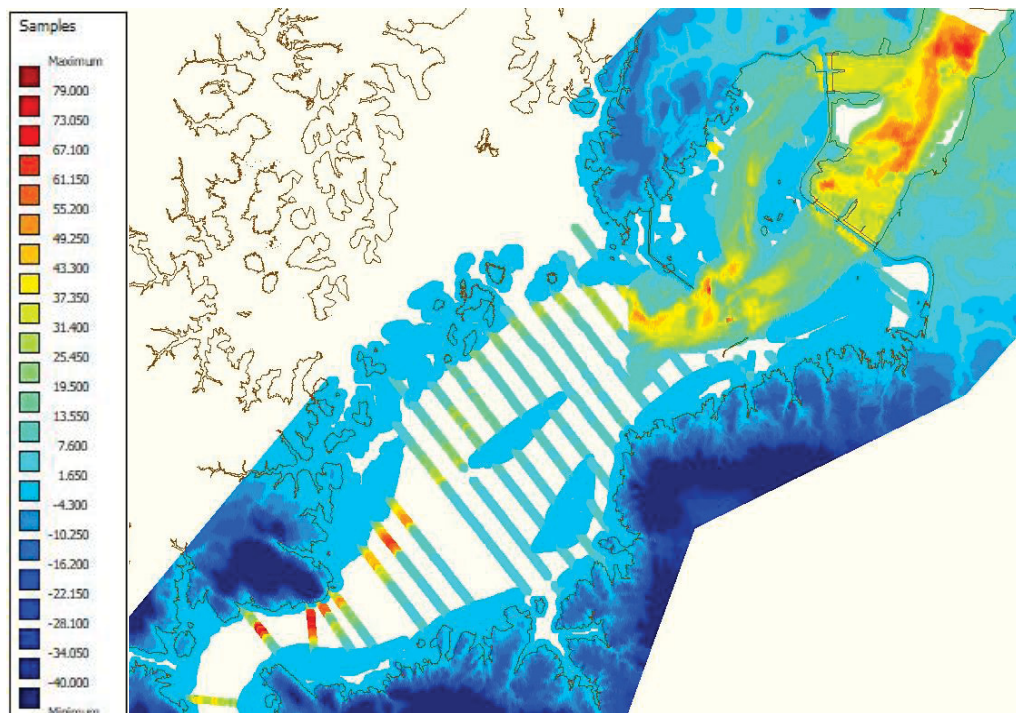
- Batimetria de anos de 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 (seção batimétrica);
- Batimetria atualizada 2021 (monofeixe e multifeixe);
- Dados operativos da barragem (série de vazões médias horárias);
- Séries diárias de níveis de água em diversos pontos;
- Relatório do estudo de modelagem hidrodinâmica ambiental realizado pela Coppetec (2011);
- Estudo de vazões máximas (ESBR, 2009);
- Medições ADCP.

4.2.1 BATIMETRIA

Em 2021 o Lactec realizou levantamento topográfico com equipamento a Laser (LIDAR) que sobrevoou o reservatório e áreas ribeirinhas proporcionando a obtenção de MDT (modelo digital de terreno) de áreas do fundo do reservatório expostas devido ao período seco. Também em 2021 o Lactec realizou a batimetria do reservatório com equipamento monofeixe e multifeixe proporcionando uma melhora substancial de toda condição de contorno física necessária para a modelagem. Estes dados levantados pelo Lactec em 2021 foram implantados no modelo hidrodinâmico Delft3D e utilizados nas simulações.

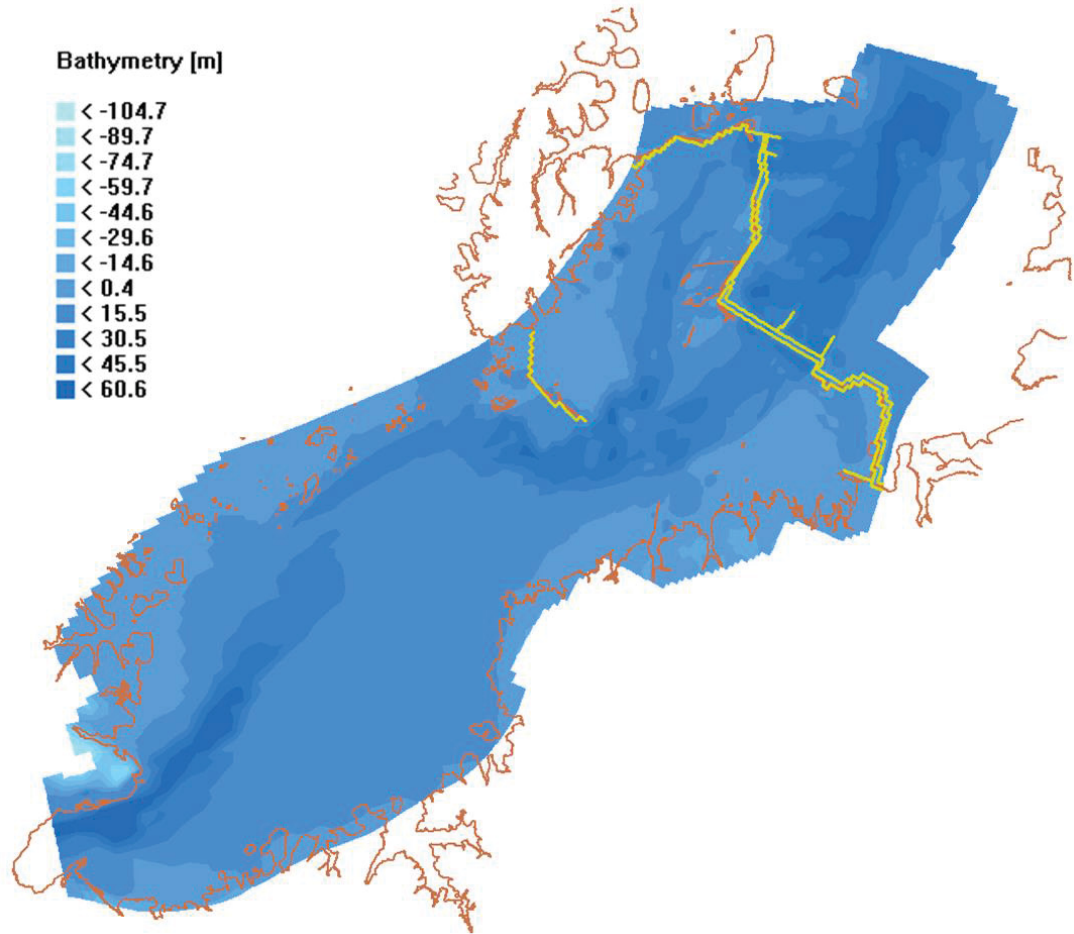
A Figura 5 apresenta os dados originais (MDT, batimetria monofeixe e multifeixe obtidos pelo Lactec) utilizados para a obtenção da condição de contorno física (batimetria) do modelo. Além destes dados foram utilizadas mais 3 seções batimétricas de levantamentos anteriores de 2019 e 2017 para preencher lacunas. A Figura 6 apresenta a batimetria implantada no modelo. As cotas próximas de zero das imagens equivalem à cota ortométrica 90m, ou seja, o NA normal.

Figura 5 –Dados batimétricos e topográficos obtidos pelo Lactec utilizados para obtenção da batimetria do modelo.



FONTE: A autora (2022).

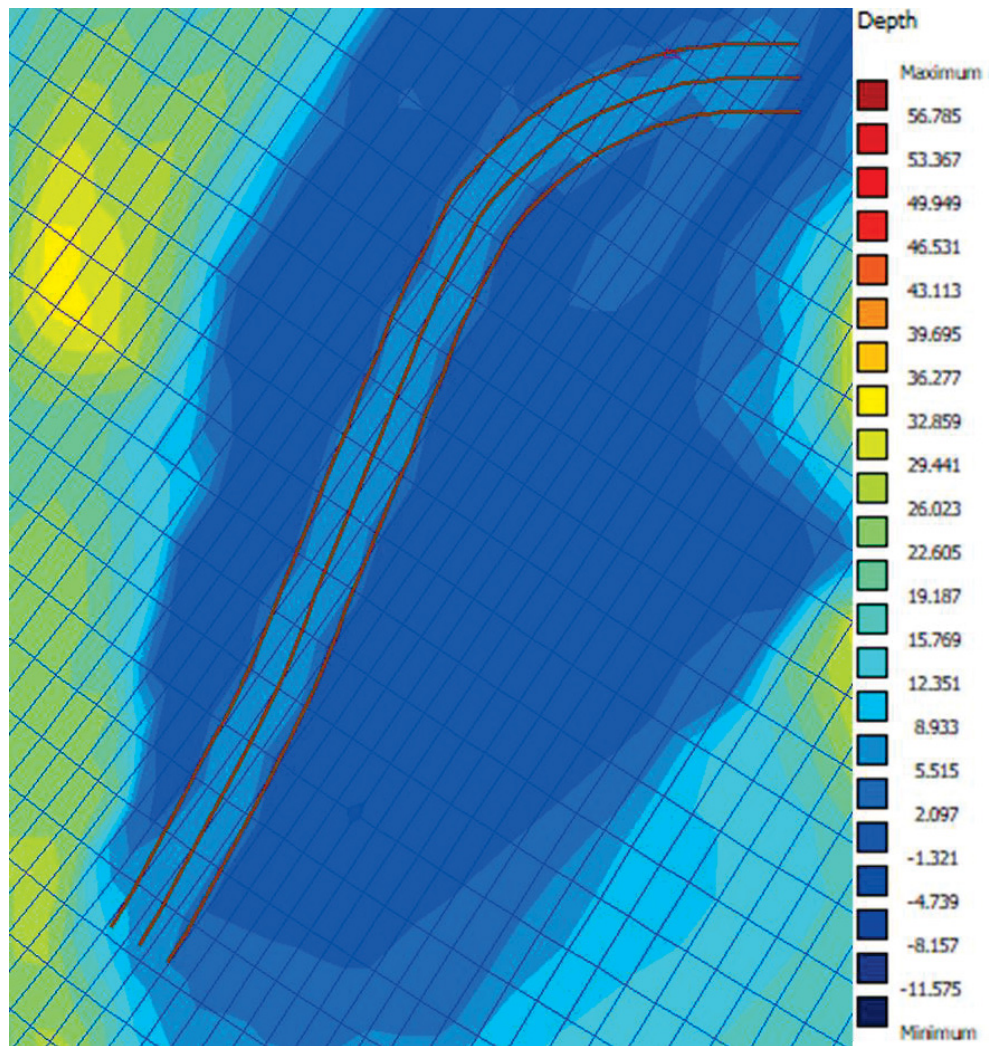
Figura 6 – Dados batimétricos interpolados para a modelagem



FONTE: A autora (2022).

Também foi inserido o canal da Ilha do Padre na cota 83 m, conforme indicado em Themag (2019) (Figura 7). Esse canal facilita o acesso da água até o vertedouro de troncos.

Figura 7 - Canal da Ilha do Padre



FONTE: A autora (2022).

4.2.2 VAZÃO

Os dados de vazões máximas que cada estrutura da UHE Jirau suporta foram fornecidos pela Jirau Energia para que fosse possível elaborar os cenários de operação visando obter resultados hidrodinâmicos para projeto de estruturas retentoras e manejo de troncos. As vazões foram monitoradas pelo posto fluviométrico de Porto Velho no período entre 1967 e 2019 (vazões médias diárias).

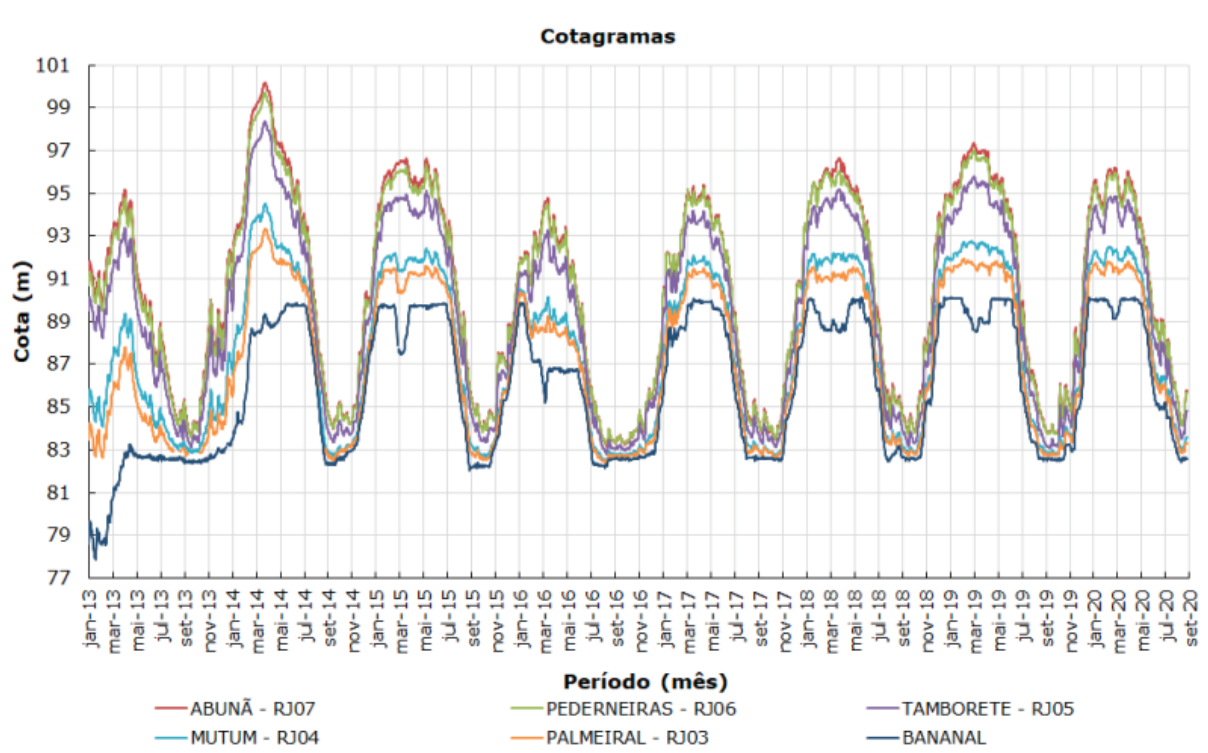
As casas de forças da margem direita têm uma capacidade máxima de turbinar até $15.400\text{m}^3/\text{s}$ e a da margem esquerda a vazão máxima é de $12.100\text{m}^3/\text{s}$. Cada unidade geradora pode suportar aproximadamente $550\text{m}^3/\text{s}$. O vertedouro de troncos é capaz de verter aproximadamente $300\text{m}^3/\text{s}$ (Cotrim e Friedrich, 2018). O

vertedouro com 18 vãos, foi projetado para um vertimento máximo de 81.899m³/s (ESBR, 2009).

4.2.3 NÍVEIS DE ÁGUA

Foram utilizadas informações existentes de medições de níveis de água médios diários nos postos Bananal, Palmeiral, Mutum, Tamborete, Pederneiras e Abunã no período de 01/01/2013 a 31/08/2020. Foi considerado o NA normal de operação é na cota 90m e NA mínimo na cota 82,50m. Os cotogramas estão representados na Figura 8 e o local das medições na Figura 9.

Figura 8 – Cotogramas dos postos de controle de nível de água do rio Madeira.



FONTE: ESBR (2020).

Figura 9 - Mapa de localização dos postos de controle de nível d'água



FONTE: ESBR (2020) adaptado pela autora (2022).

4.2.4 MEDIÇÕES ADCP

O ADCP é um equipamento acústico que utiliza o efeito Doppler transmitindo pulsos sonoros e captando o eco que retorna das partículas em suspensão. O resultado é apresentado em *pixels* onde cada *pixel*, numa seção transversal, tem o valor da intensidade e direção da velocidade de água. Por integração na seção obtém-se as vazões que passam numa seção.

Dentre as várias medições com ADCP, foram utilizadas as medições do posto de controle Bananal, representado na Figura 10, foram escolhidas 4 datas, apresentadas na Tabela 1, para representar cenários de vazões baixas, vazões altas e duas vazões intermediárias.

Figura 10 – Seção das medições do ADCP



FONTE: Lactec (2021).

Tabela 1 – Cenários para comparação com o ADCP

Cenário	Data	Vazão (m ³ /s)
Vazão alta	25/02/2019	41.589,86
Vazão intermediária	11/02/2017	20.071,94
Vazão baixa	16/08/2018	6.808,17
Vazão mais baixa	09/08/2016	3.598,66

FONTE: Lactec (2021).

4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

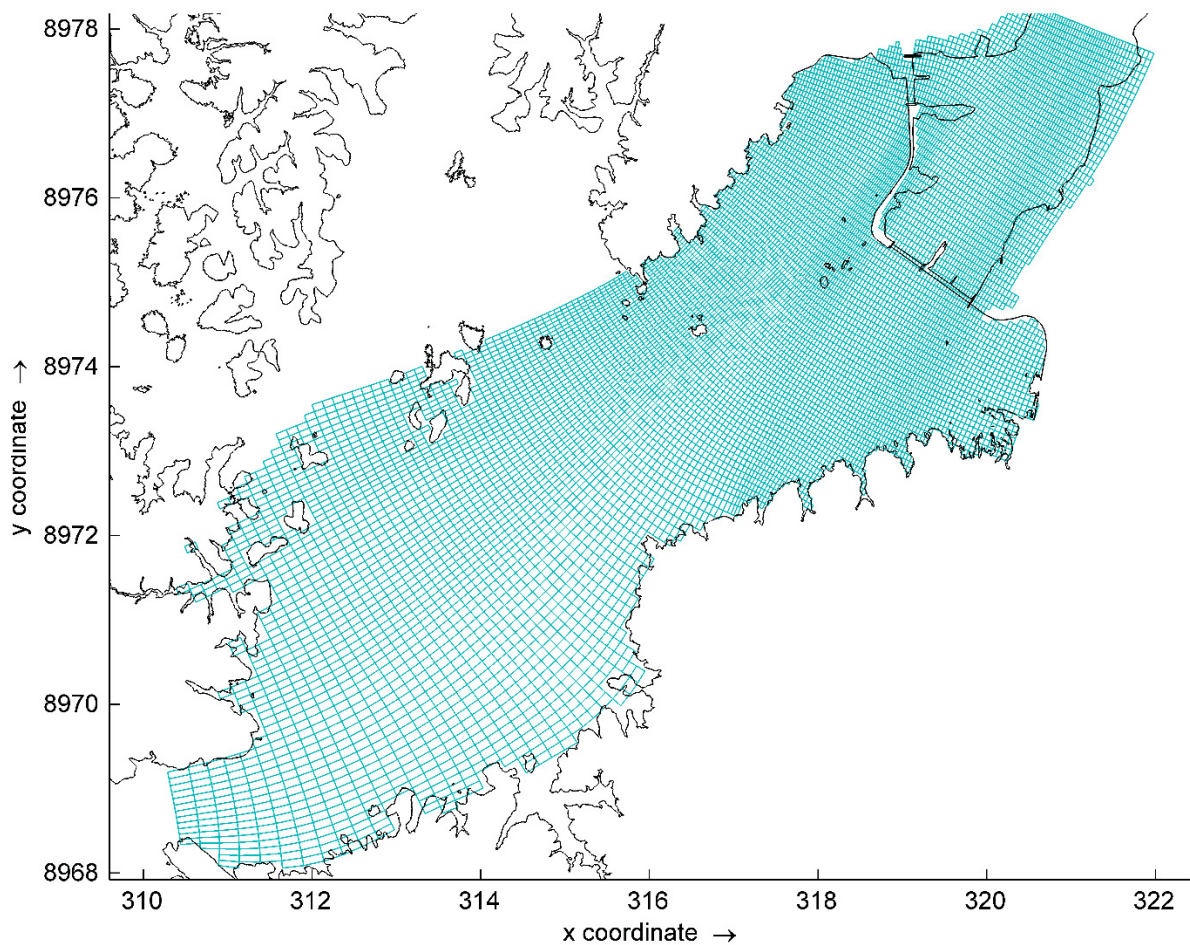
Para atingir os objetivos, os dados fornecidos foram analisados preliminarmente e foi observado que a simulação deve ser capaz de representar processos hidrodinâmicos em regime fluvial e com resolução tridimensional. Há diversos modelos disponíveis com estas características (Telemac, Delft3D, Mike3, etc.) do qual foi escolhido o modelo Delft3D, devido ao grande número de aplicações integradas (hidrodinâmica e transporte de partículas), sendo um modelo de código aberto.

4.3.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO

4.3.1.1 GRADE

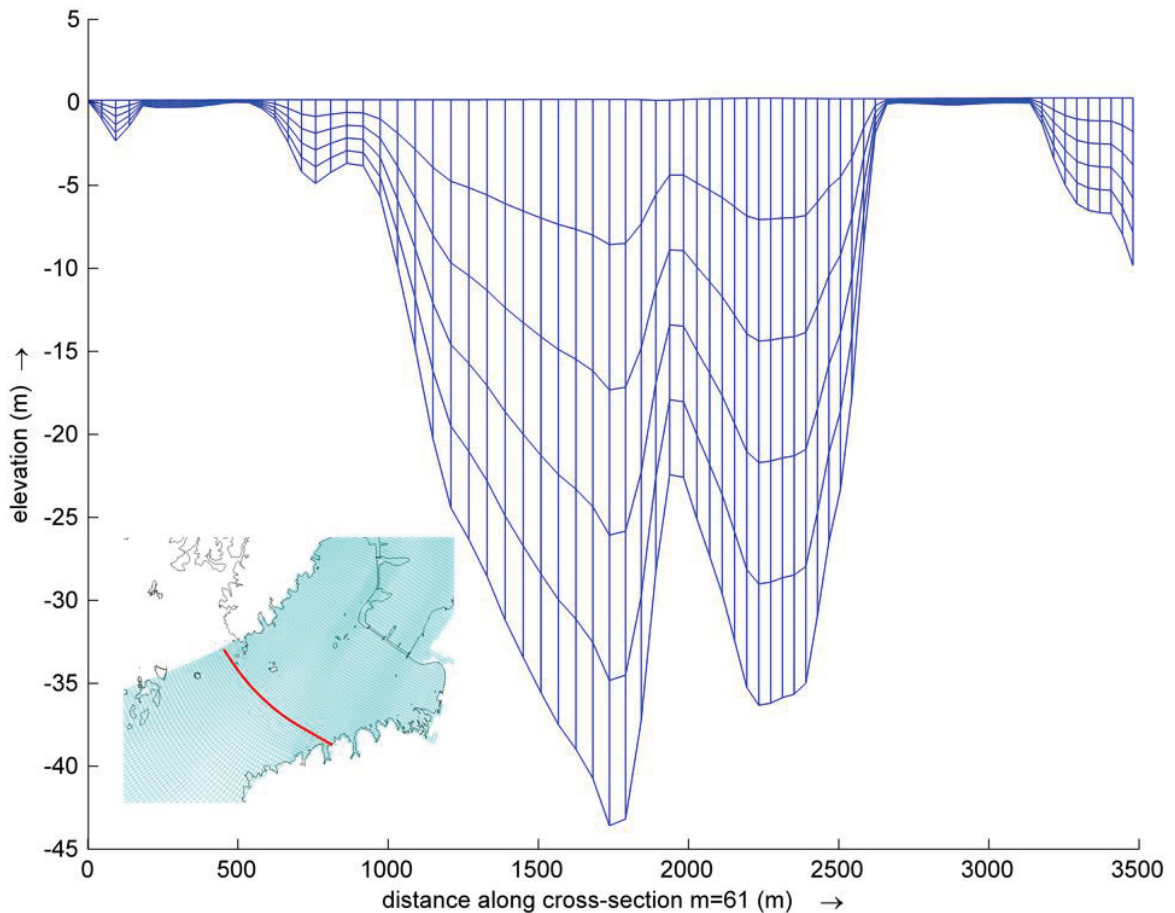
A malha computacional foi definida de maneira a ter um refinamento na região próxima das estruturas e mais grosseria na região a montante do reservatório (Figura 11). Trata-se de uma grade tridimensional e segue o sistema de coordenadas vertical do tipo sigma (modelo- σ). A malha possui 5 camadas de profundidade igualmente distribuídas, ou seja, o número de camadas é constante variando apenas sua espessura conforme a profundidade do reservatório (Figura 12).

Figura 11 – Malha Computacional - visão geral



FONTE: A autora (2022).

Figura 12 – Exemplo das camadas sigma em uma seção do reservatório



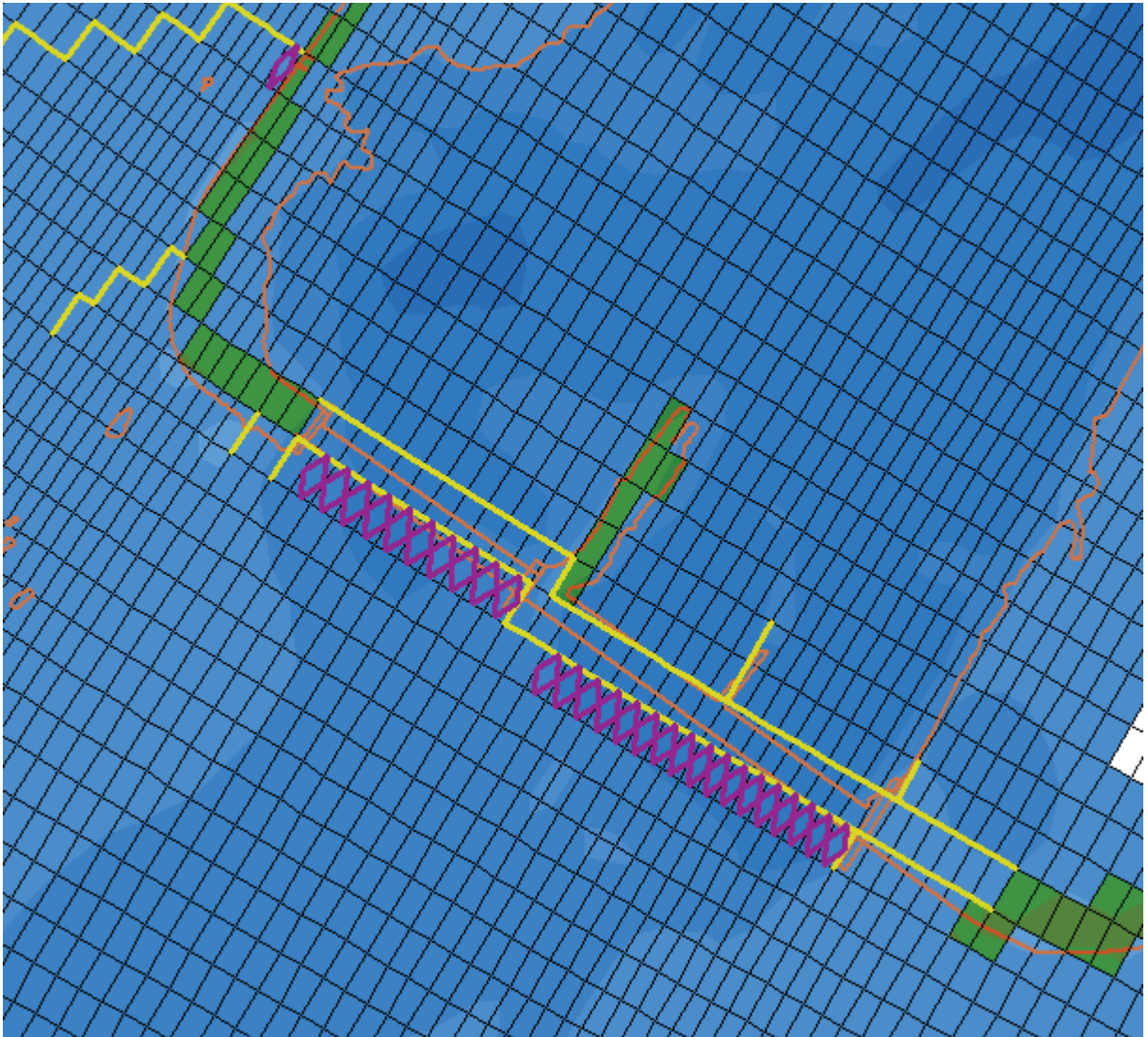
FONTE: A autora (2022).

4.3.1.2 ESTRUTURAS DA BARRAGEM

As estruturas da barragem foram representadas pela ferramenta “*Thin Dams*” do Delft, que impede o fluxo de água entre duas células.

Para a representação de vertedouro e fluxo nas casas de forças, foi utilizada a ferramenta “*discharges in-out*” que retira uma série de vazão de uma célula e coloca em outra. Esta ferramenta possibilita a distribuição uniforme da vazão (ao longo da extensão das casas de forças) e vazões diferentes para cada unidade das casas de forças. O programa também permite que sejam colocadas “células secas” para representar ilhas ou caminhos que não passam água. A Figura 13 apresenta um zoom nas casas de forças da margem direita (CFMD) e o vertedouro para ilustrar as ferramentas utilizadas. Em amarelo são as “*Thin Dams*” limitando as estruturas da barragem, as células em verde são as células secas e em roxo destaca-se as estruturas do vertedouro e da CFMD contendo as informações de série de vazões.

Figura 13 – Estruturas da barragem - zoom

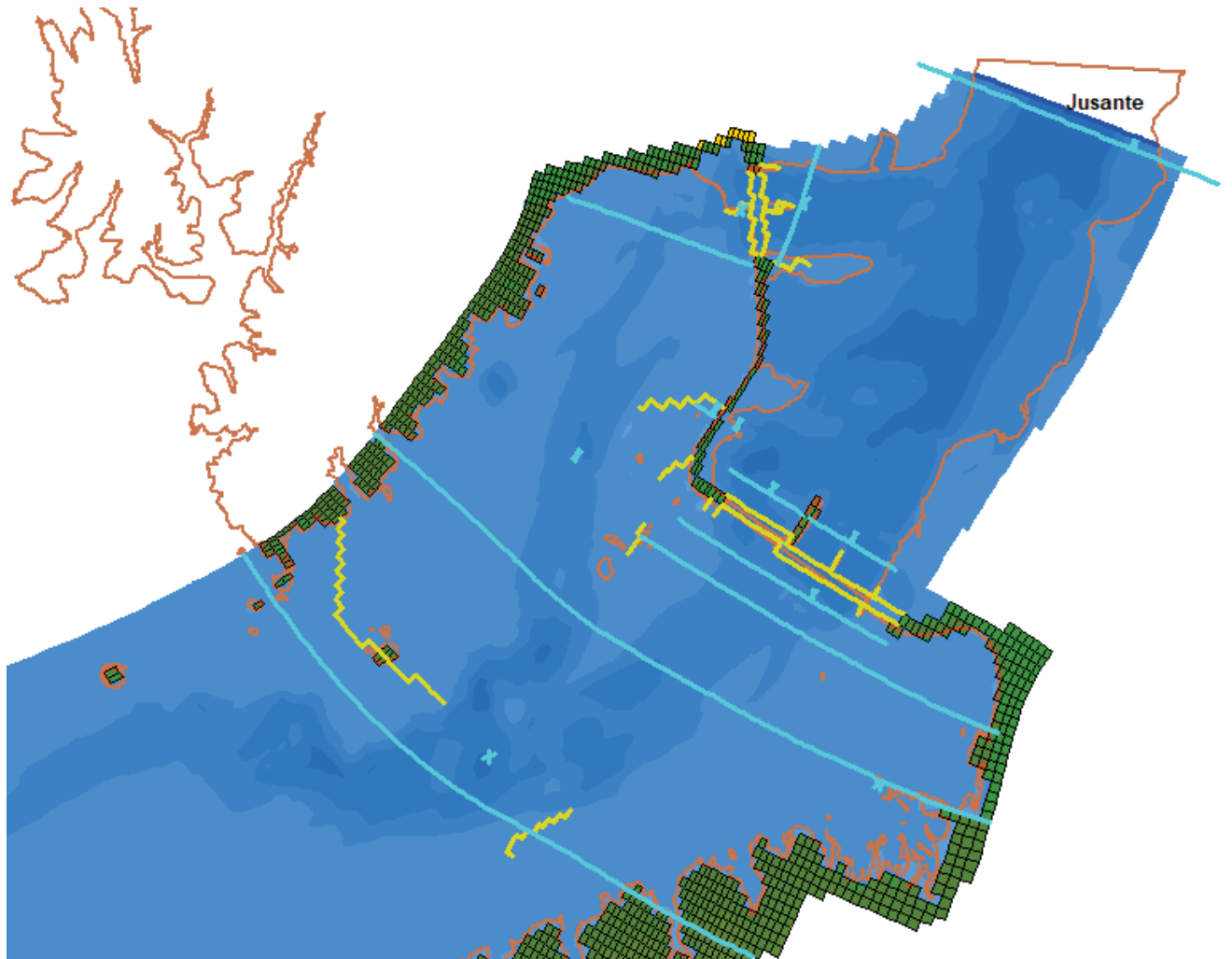


FONTE: A autora (2022).

4.3.1.3 PONTOS E SEÇÕES DE MONITORAMENTO

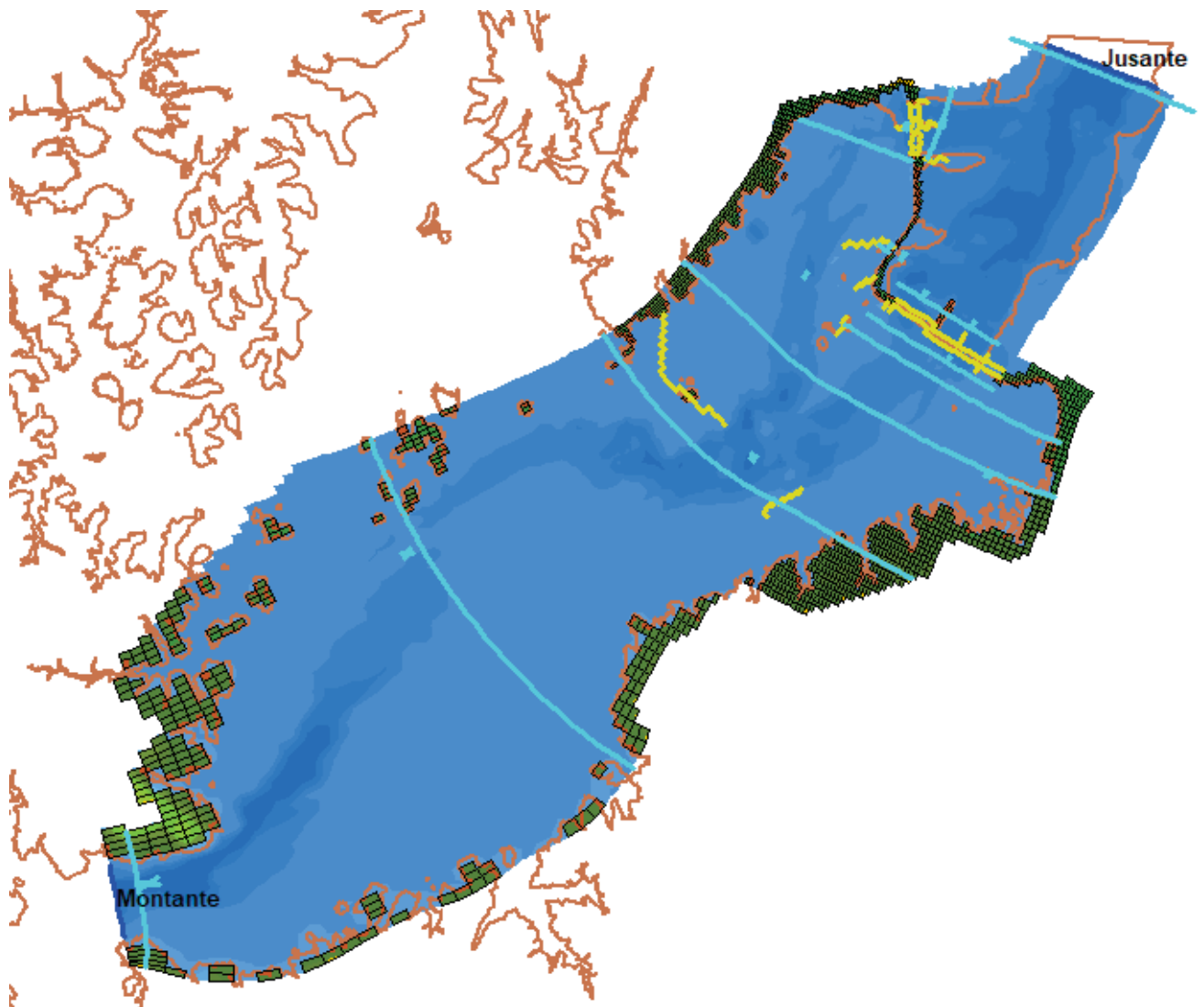
Foram inseridos no modelo pontos de observação e seções transversais onde foi possível extrair os resultados. Estes locais assim como os locais das condições de contorno abertas de jusante e de montante são mostrados na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Localização dos pontos de observações (x azul claro), seções transversais (linha azul claro), locais das condições de contorno abertas (linha azul escuro) barragens (linha amarela), células secas (verde) – zoom.



FONTE: A autora (2022).

Figura 15 - Localização dos pontos de observações (x azul claro), seções transversais (linha azul claro), locais das condições de contorno abertas (linha azul escuro) barragens (linha amarela), células secas (verde) – visão geral.



FONTE: A autora (2022).

4.3.1.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foram definidas duas condições de contorno abertas para o domínio do reservatório, a montante e a jusante como foi ilustrado na Figura 15.

Na condição a montante foi aplicada uma série temporal de vazões com valores constantes conforme os cenários definidos em 4.3.3.

Na seção a jusante foi aplicada a curva guia adaptada de Themag (2013), que relaciona a vazão de saída com o nível de água nessa seção, os valores inseridos no

modelo estão representados na Tabela 2. O nível de água normal no barramento é 90m e essa cota equivale a zero no Delft3D.

Tabela 2 - Condições de contorno a jusante

Vazão (m ³ /s)	Nível de água (m)
5.000	-19,36
10.000	-19,95
15.000	-18,38
20.000	-17,71
25.000	-16,98
30.000	-16,22
35.000	-15,46
40.000	-14,71
45.000	-14,01
50.000	-13,34
60.000	-12,11
70.000	-10,94
80.000	-9,63
85.000	-8,83

FONTE: A autora (2022).

4.3.1.5 PARÂMETROS DO MODELO

O modelo possui o mesmo domínio e mesmas configurações para todos os cenários que serão simulados. São 24h de simulação com passo temporal de 0,05 minuto. Não foi considerado processos físicos como vento, ou componentes de temperatura, sedimentos etc. Valores uniformes foram inseridos na condição inicial de nível de água, iguais a 0,34m, que significa nível de 90,34m no reservatório.

Os parâmetros físicos estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros físicos do modelo

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade da água	1000	kg/m ³
Rugosidade (Manning)	0,035	-
Viscosidade Horizontal	1	m ² /s
Viscosidade Vertical	Modelo de turbulência 3D - $k-\varepsilon$	-

FONTE: A autora (2022).

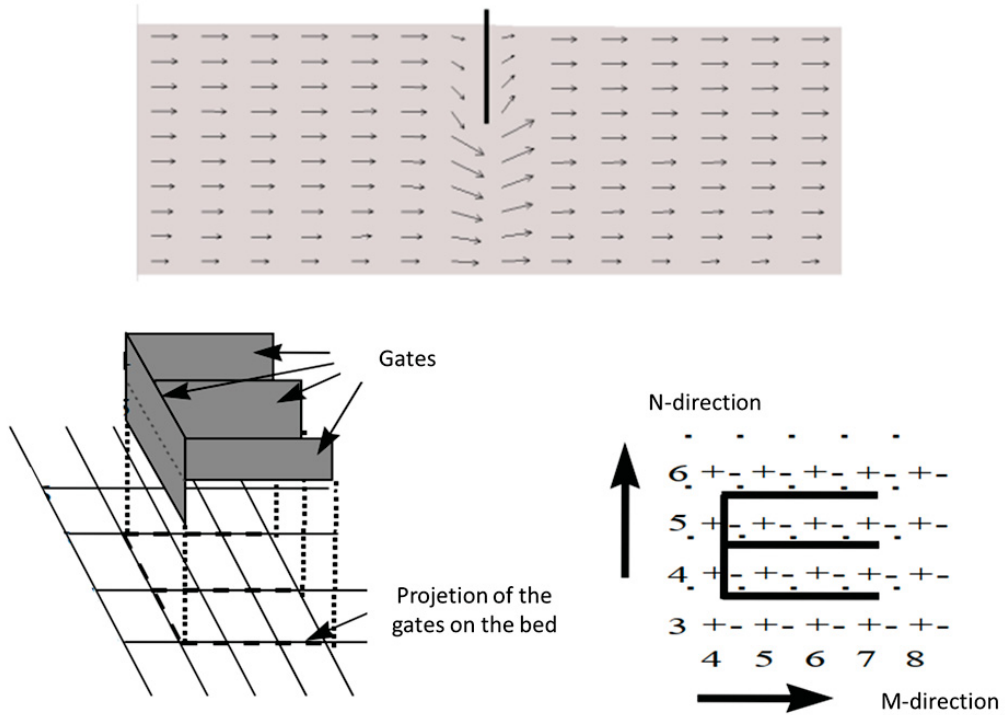
4.3.1.6 REPRESENTAÇÃO DE LOG BOOMS E RETENTOR/DESVIADOR DE TRONCOS

Os *log booms* são estruturas flutuantes com o objetivo de barrar e orientar o fluxo de madeira e detritos flutuantes de tal modo que estes não alcancem estruturas específicas da barragem como por exemplo comportas e, principalmente, as casas de forças, o que poderia danificá-las ou interromper a geração por obstrução das grades.

A localização dos *log booms* foi obtida de Themag (2019) e eles são representados como estruturas superficiais, ou seja, inseridos na primeira camada do modelo. Foram implantados no Delft3D através da ferramenta “3D gates” que é uma placa vertical ao longo de uma das faces da malha que pode cobrir o fluxo em um número prefixado de camadas na vertical a partir da superfície, conforme demonstrado no esquema ilustrativo da Figura 16. No caso, as quatro faces das células onde as estruturas estão localizadas foram bloqueadas por apresentar maior acurácia de resultados.

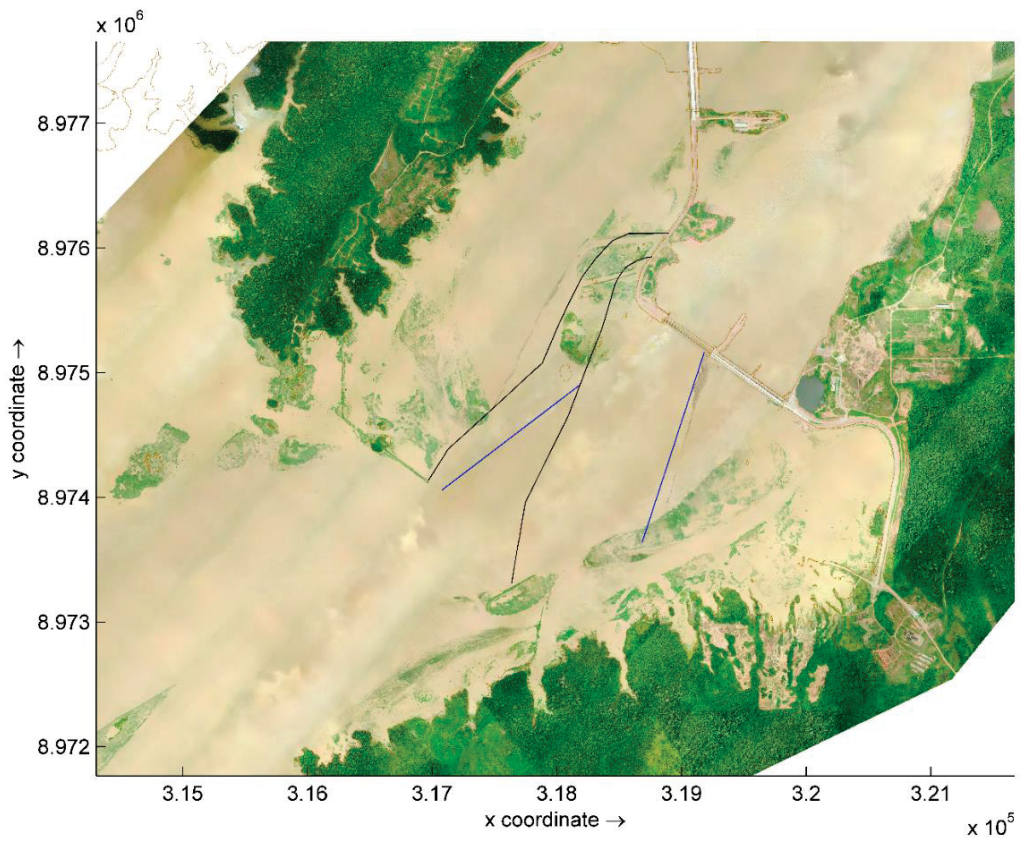
Da mesma forma, também foi representado um retentor/desviador de troncos, porém, na segunda camada próxima à superfície, conforme indicado em Themag (2022).

Figura 16 – Exemplo ilustrativo da estrutura “3D gate” em uma seção transversal.



FONTE: Deltares (2021).

Figura 17 – Representação esquemática de *log booms* (preto) e retentor/desviador de troncos (azul).



FONTE: A autora (2022).

4.3.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração consiste em comparar os dados existentes já medidos antes com as simulações realizadas e ajustar os parâmetros necessários.

O projeto P&D Jirau abordou comparações entre os resultados do modelo computacional com resultados de estudos anteriores:

- ADCP: vazão e velocidades;
- 3D (Telemac): circulação;
- 2D (River2D): circulação;
- 1D (HEC-RAS): níveis e velocidades; e
- Modelo físico reduzido: velocidades.

Existem várias medições com ADCP próximo ao local de estudo e assim foram escolhidas 4 datas para representar cenários de vazões baixas, vazões altas e duas vazões intermediárias. Os cenários escolhidos estão apresentados na Tabela 1 do item 4.2.4. O modelo Delft3D foi utilizado para simular a situação ocorrida nestas 4 medições, utilizando as informações operativas da usina (nível do reservatório, vazões afluentes, vazões vertidas em cada comporta do vertedouro e vertedouro de troncos e vazões turbinadas em cada unidade das duas casas de forças).

Nesse trabalho será apresentado a calibração feita a partir das medições de ADCP por apresentarem melhor consistência de resultados. As demais comparações serão representadas no APÊNDICE 1.

4.3.3 CENÁRIOS OPERACIONAIS

A hidrodinâmica do escoamento em si é dominada por forçantes hidrológicas e pela operação da usina. Em Lactec (2021) foi observado que as variações hidrodinâmicas causadas por forçantes hidrológicas (variações de vazão) não alteraram os padrões do escoamento, somente as intensidades das correntes. Entretanto, diferentes meios de operação (quantidade de vazão passando por casas de forças e vertedouro) mostraram ter influências significativas nos padrões do escoamento.

Para quantificar as influências de operação no padrão do escoamento, bem como a influência de estruturas retentoras de troncos, foram definidos oito cenários

hipotéticos com diferentes modos de operação e diferentes condições de vazão (Tabela 4), conforme indicado em Themag (2022). O cenário 1 considera carga máxima nas casas de forças, sem considerar vertimento. O cenário E considera operação normal com abertura total de comportas Clapet nas extremidades do vertedouro. Uma comporta Clapet totalmente aberta corresponde uma abertura parcial de uma comporta padrão na sua parte superior permitindo assim a passagem de material flutuante (Figura 18).

Figura 18 - Representação de comportas Clapet



FONTE: Themag (2022).

Tabela 4 - Cenários Operacionais

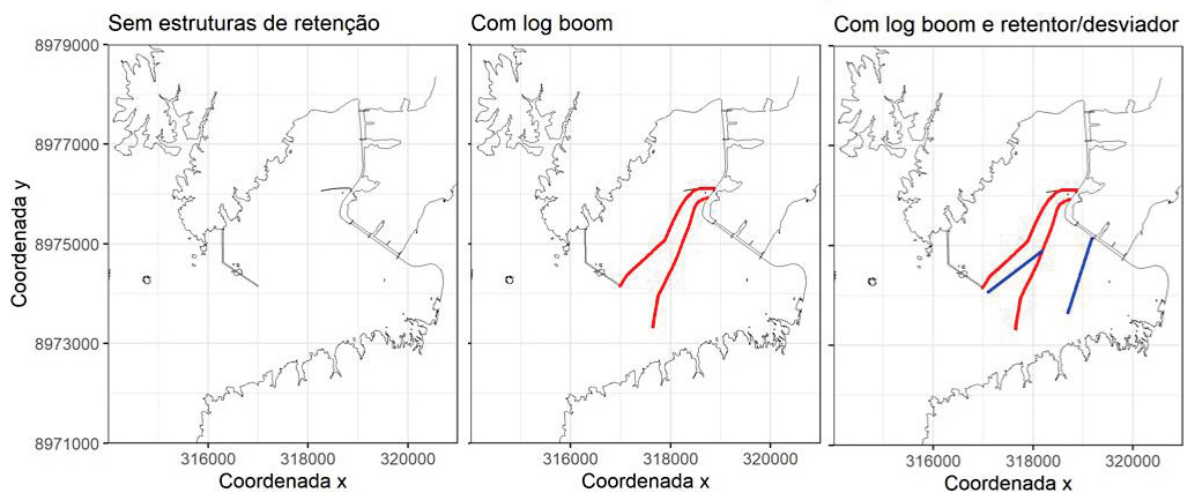
Estruturas	Cenário	Descrição	Nível (m)	Vazão Total (m³/s)	Vazão CFMD (m³/s)	Vazão CFME (m³/s)	Vazão Vertedouro (m³/s)	Vazão Vertedouro de Troncos (m³/s)
Sem estruturas de retenção	1	Operação plena das casas de forças sem vertimento	90	27.800	15.400	12.100	0	300
	E	Operação normal (vãos 2, 3, 4, 18, 17 e 16 do vertedouro com abertura total das comportas Clapet)	90	29.800	15.400	12.100	2000	300
Com <i>log boom</i> superficial	1	Operação plena das casas de forças sem vertimento	90	27.800	15.400	12.100	0	300
	E	Operação normal (vãos 2, 3, 4, 18, 17 e 16 do vertedouro com abertura total das comportas Clapet)	90	29.800	15.400	12.100	2000	300
Com <i>log boom</i> superficial e retentores/ desviadores de meia água	1	Operação plena das casas de forças sem vertimento	90	27.800	15.400	12.100	0	300
	B	Flushing (vãos 18,17 e 16 do vertedouro com abertura total das comportas)	90	27.280	15.400	0	11580	300
	E	Operação normal (vãos 2, 3, 4, 18, 17 e 16 do vertedouro com abertura total das comportas Clapet)	90	29.800	15.400	12.100	2000	300
	F	Flushing (vãos 18,17 e 16 do vertedouro com abertura total das comportas Clapet)	90	16.700	15.400	0	1.000	300

FONTE: Themag (2022) adaptado pela autora (2022).

Os cenários supracitados foram simulados em três situações de composição do modelo: “sem estruturas de retenção”, “com *log boom* superficial” e “com *log boom* superficial e retentores/desviadores de meia água”. Essas modalidades estão ilustradas na Figura 19, na qual o *log boom* superficial é representado em vermelho e o retentor/desviador de troncos de meia água é representado em azul. O modelo apresenta cinco camadas verticais, sendo que cada uma delas corresponde a 20% da profundidade do respectivo ponto do reservatório. O *log boom* foi inserido na camada superficial (camada 1) e o retentor/desviador de troncos foi representado na segunda camada próxima à superfície (camada 2), conforme indicado em Themag (2022).

Para complementar, apenas para a condição “com *log boom* superficial e retentores/desviadores de meia água” foram adicionados mais dois cenários (B e F) simulando situações de flushing, isto é, uma manobra já realizada pela usina em que os vãos 16, 17 e 18 do vertedouro são os mais atrativos para os troncos e assim são abertos por cerca de 40 minutos para passagem dos troncos. Para o cenário B a manobra foi realizada com abertura total das comportas e para o cenário F, a abertura das comportas Clapet.

Figura 19 – Diferentes configurações das estruturas no modelo. Em vermelho o *log boom* superficial e em azul o retentor/desviador de troncos de meia água.



FONTE: A autora (2022).

4.4 MODELAGEM LAGRANGIANA

A modelagem Lagrangiana, também conhecido como *particle-tracking*, é inicializada adicionando o arquivo gerado pela simulação hidrodinâmica e em seguida é selecionado a substância de interesse. Há duas opções:

- *Oil* – utilizado para estudos de dispersão superficial de substâncias como derrame de óleo.
- *Tracer* – utilizado para estudos de transporte advectivo, como o sal ou corantes e até mesmo crescimento ou decomposição de bactérias.

Foi utilizado o modelo com traçador (*Tracer*) e as partículas representam os troncos. Assim como na modelagem hidrodinâmica, serão 24h de simulação, porém com passo temporal de 30 segundos.

É possível lançar partículas de forma contínua num passo de tempo ou de forma instantânea. No caso atual foram lançadas partículas instantaneamente a montante da seção de estrangulamento, em 8 pontos ao longo da seção. Após verificar que a quantidade de partículas não altera as estatísticas (APÊNDICE 2), optou-se por lançar 20 partículas em cada ponto de lançamento.

Os principais parâmetros que podem influenciar a trajetória das partículas são a **dispersão vertical e horizontal** (Deltares, 2023b).

O valor adotado para a dispersão vertical também passou por testes e foi concluído que zero seria o valor que teria melhor validação ao se comparar com os dados medidos em campo. Assumir qualquer valor diferente de zero para o coeficiente de dispersão vertical faz as partículas afundarem e transitarem em meio água. Esse efeito não seria vantajoso para os resultados. E a dispersão horizontal foi calculada pelo modelo de Bent et al (1991), mostrada no item 3.3, para cada passo temporal.

Foram feitos testes para uma suposta **velocidade de flutuação**, porém o modelo funciona apenas com velocidade de sedimentação. Quando foi inserida uma velocidade positiva o modelo funcionou corretamente, levando as partículas para o fundo (sedimentação). Já para velocidade negativa (flutuação), as partículas oscilam periodicamente, quando chegam à superfície imediatamente afundam. O manual Delft3D-PART cita que se for adicionado um valor negativo de velocidade as partículas se movimentariam para a superfície, porém isso não ocorre.

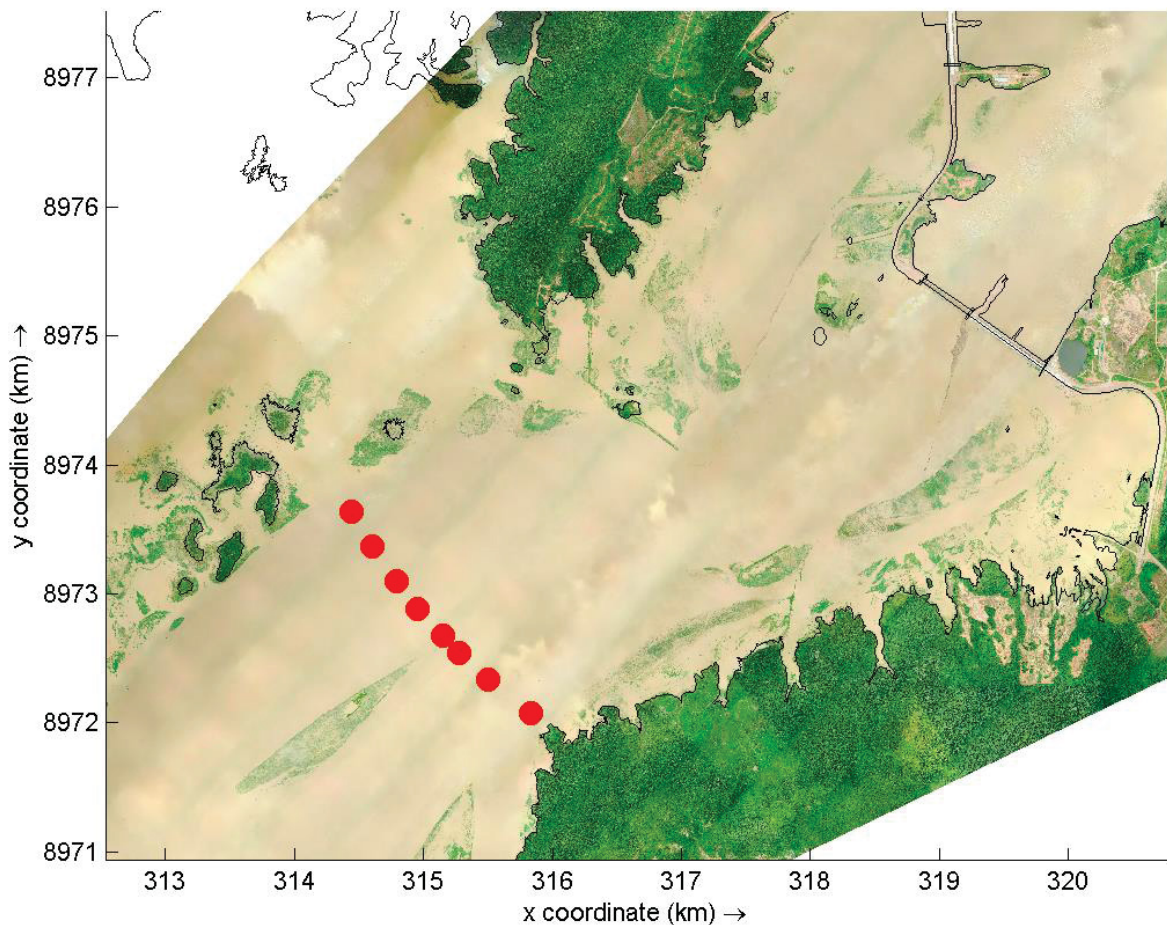
Os resultados que comprovam as verificações para essa calibração do modelo de partículas estão apresentados no APÊNDICE 2.

A movimentação das partículas é influenciada pelos dados hidrodinâmicos do Delft3D-FLOW seguindo a cada passo temporal as velocidades tridimensionais do local onde a partícula se encontra. Além disso, as partículas são dispersas proporcionalmente à turbulência simulada. As trajetórias são apresentadas em 3D, ou seja, as partículas podem mudar de camada.

Foi feita uma simulação para cada um dos cenários operacionais com o lançamento das partículas na superfície, nos locais indicados na Figura 20.

Seguindo essa configuração, realizou-se uma simulação com o modelo de derramamento de óleo (Oil), como **partículas superficiais**, para analisar seus efeitos. Esse modelo calcula o transporte, espalhamento, evaporação e dispersão de uma mancha superficial de óleo. Foram utilizados os parâmetros pré-definidos pelo modelo, visando analisar exclusivamente o efeito dos *log booms* nesse caso.

Figura 20 – Pontos de lançamentos das partículas



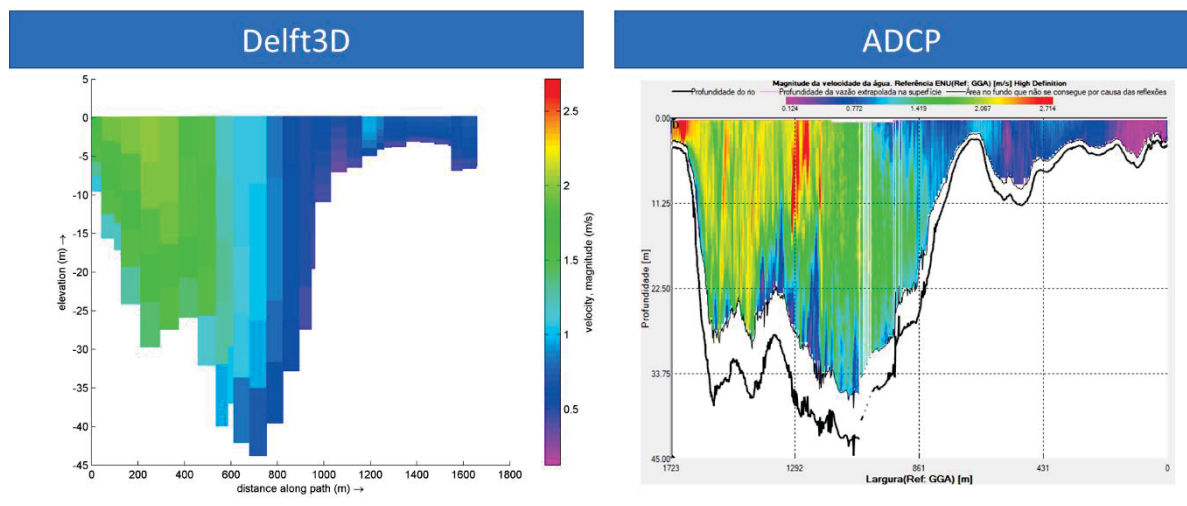
FONTE: A autora (2022).

5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

5.1 CALIBRAÇÃO

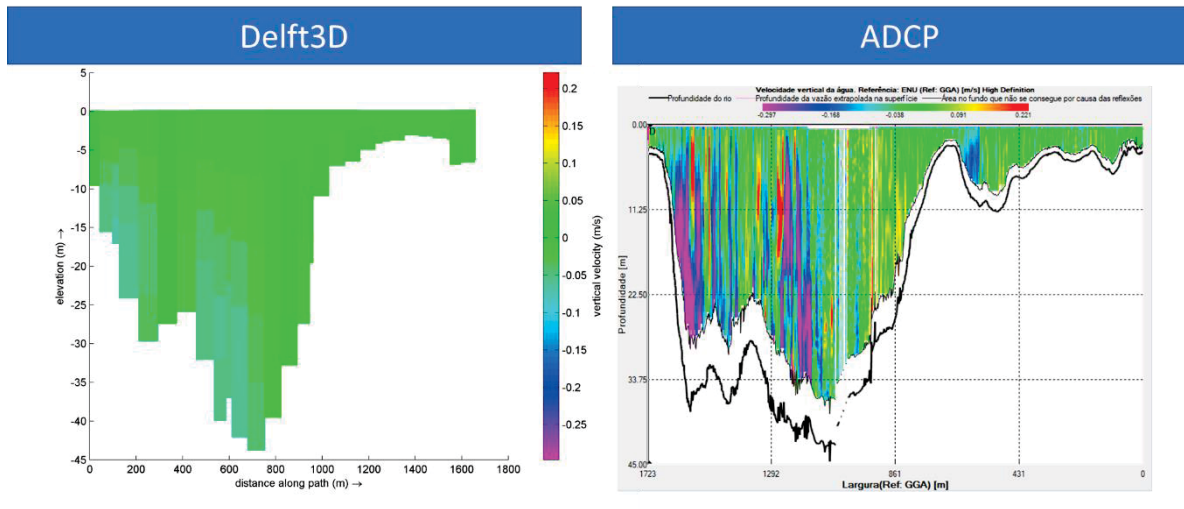
Com o objetivo de calibrar, verificar o modelo e entender o fluxo hidrodinâmico desta região, foi realizada a comparação das medições de ADCP com os resultados da simulação do Delft3D neste local. Da Figura 21 até a Figura 36 são apresentadas estas comparações. A magnitude das velocidades é representada pelas cores na seção transversal, sendo velocidades horizontais na Figura 21 e velocidades verticais na Figura 22. A direção do fluxo é apresentada na Figura 23 pelos vetores em planta e na Figura 24 pelo ângulo das velocidades horizontais em cores na seção transversal. As primeiras quatro figuras correspondem ao cenário de vazão alta, e as figuras subsequentes representam, na mesma ordem, as comparações realizadas para os outros três cenários.

Figura 21 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 m³/s
– 25/02/2019



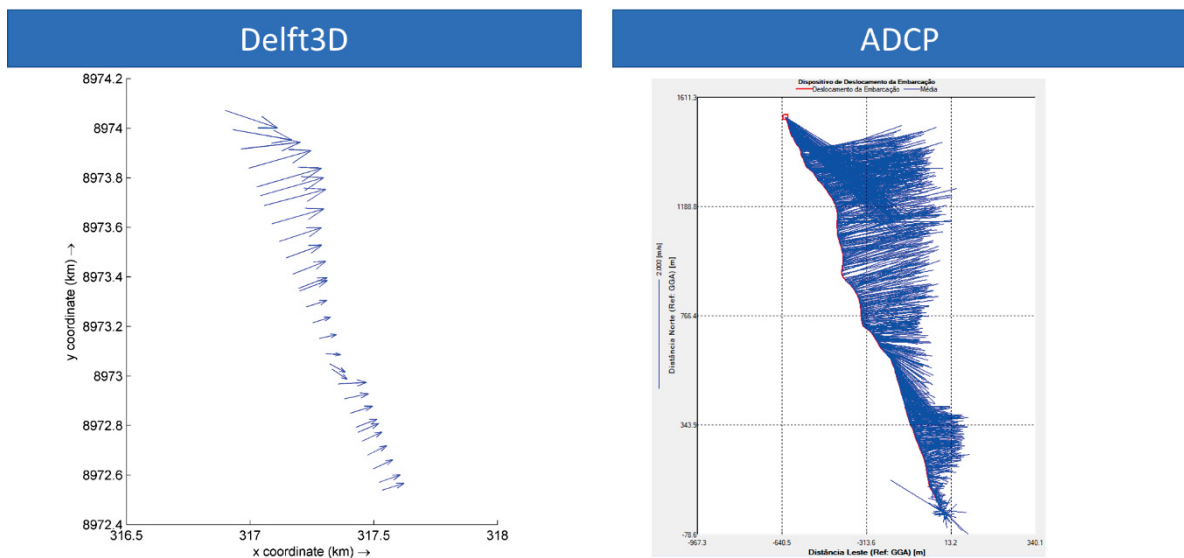
FONTE: A autora (2021).

Figura 22 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão alta: 41.589,86 m³/s – 25/02/2019



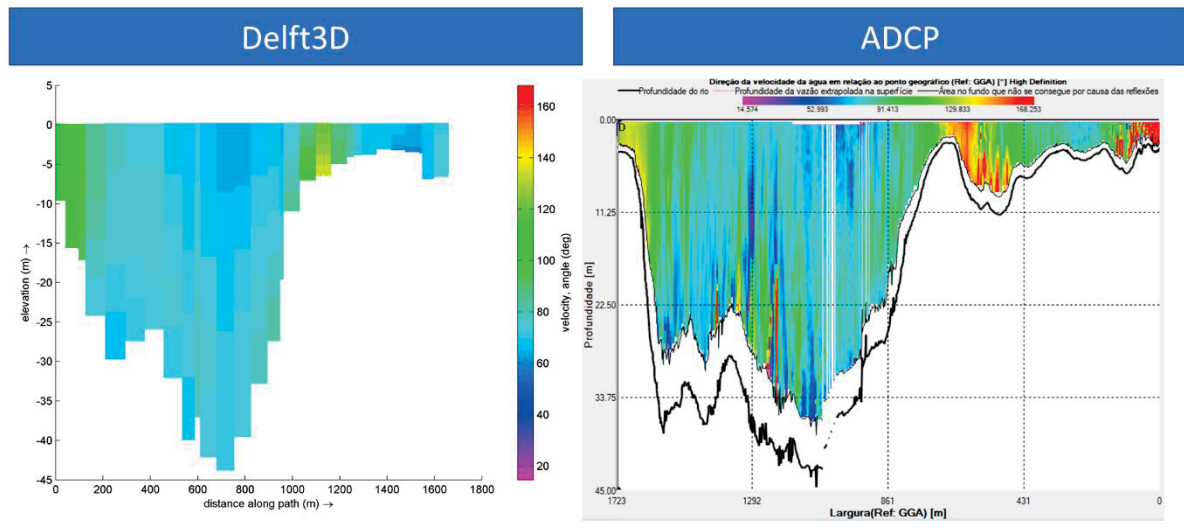
FONTE: A autora (2021).

Figura 23 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão alta: 41.589,86 m³/s – 25/02/2019



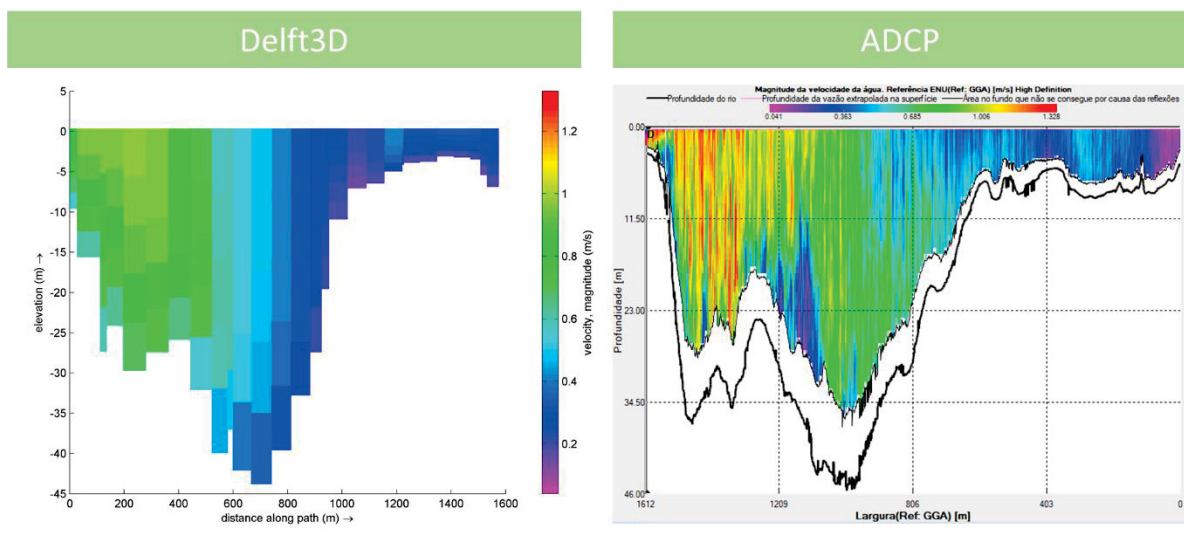
FONTE: A autora (2021).

Figura 24 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 m³/s – 25/02/2019



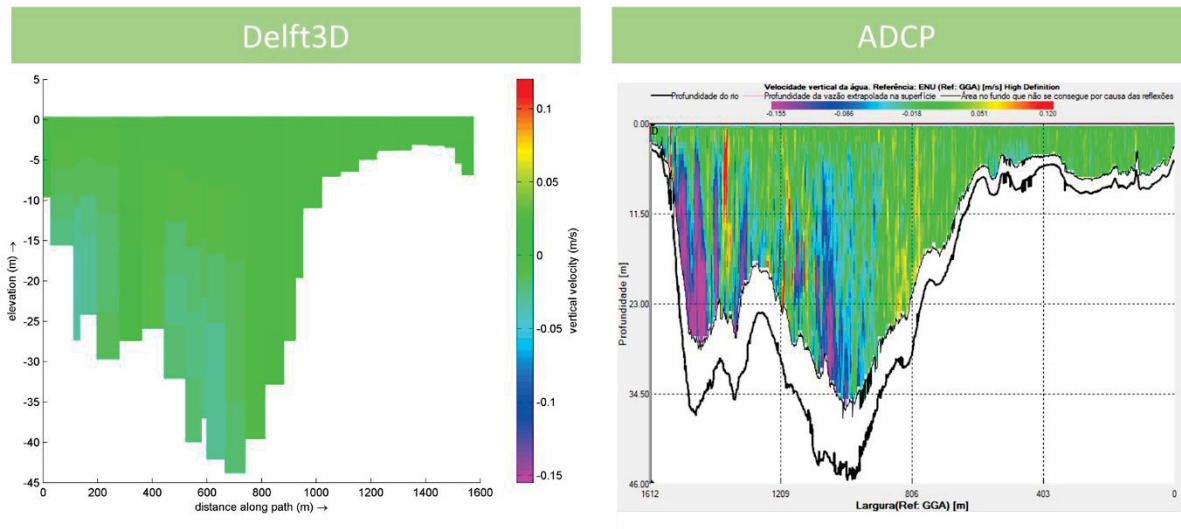
FONTE: A autora (2021).

Figura 25 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 m³/s – 11/02/2017



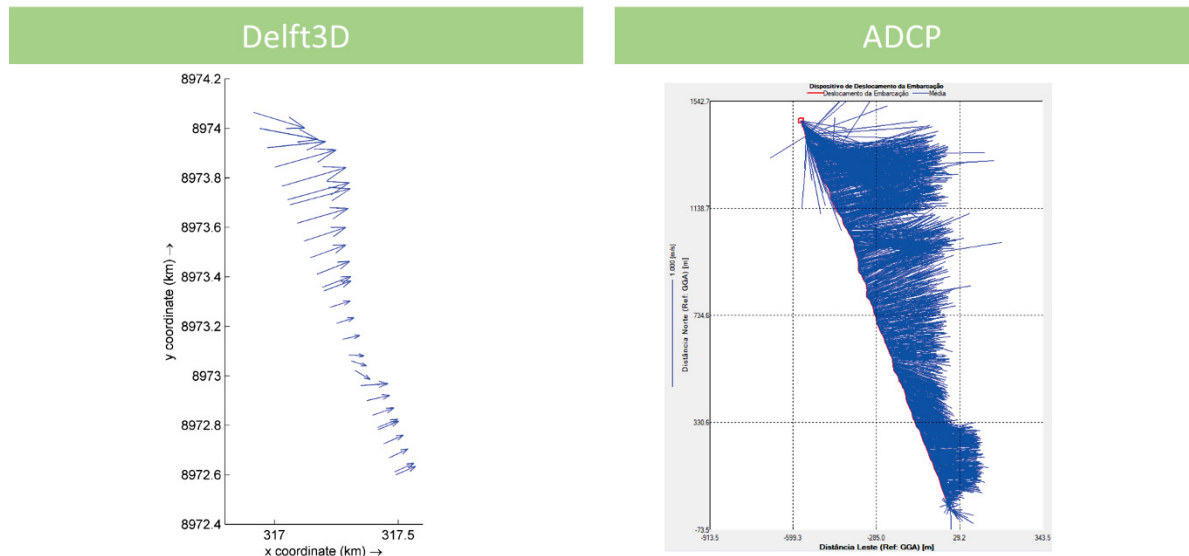
FONTE: A autora (2021).

Figura 26 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão intermediária: 20.071,94 m³/s – 11/02/2017



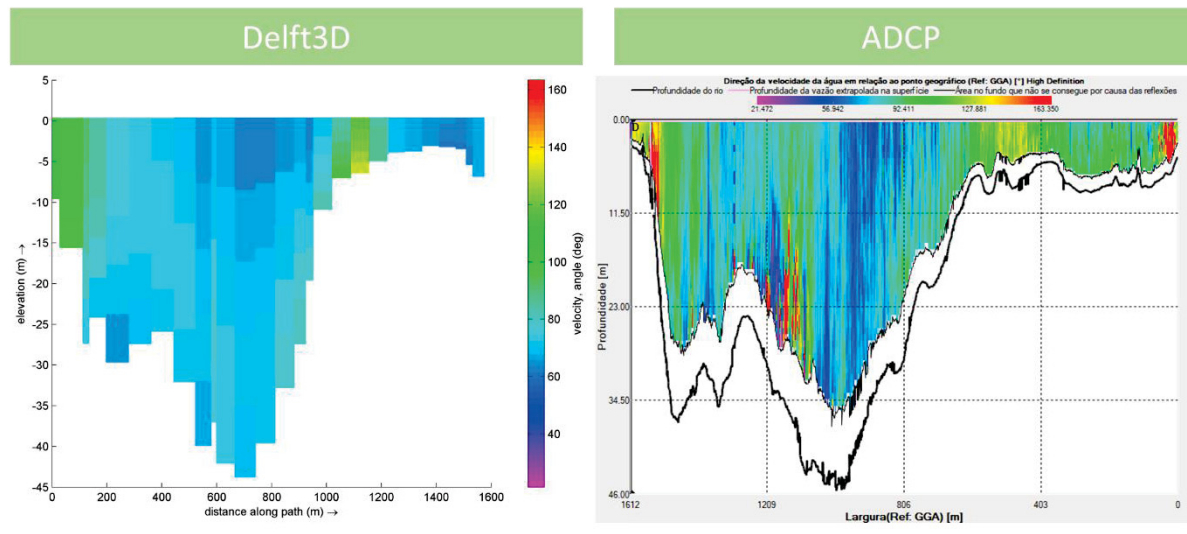
FONTE: A autora (2021).

Figura 27 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão intermediária: 20.071,94 m³/s – 11/02/2017



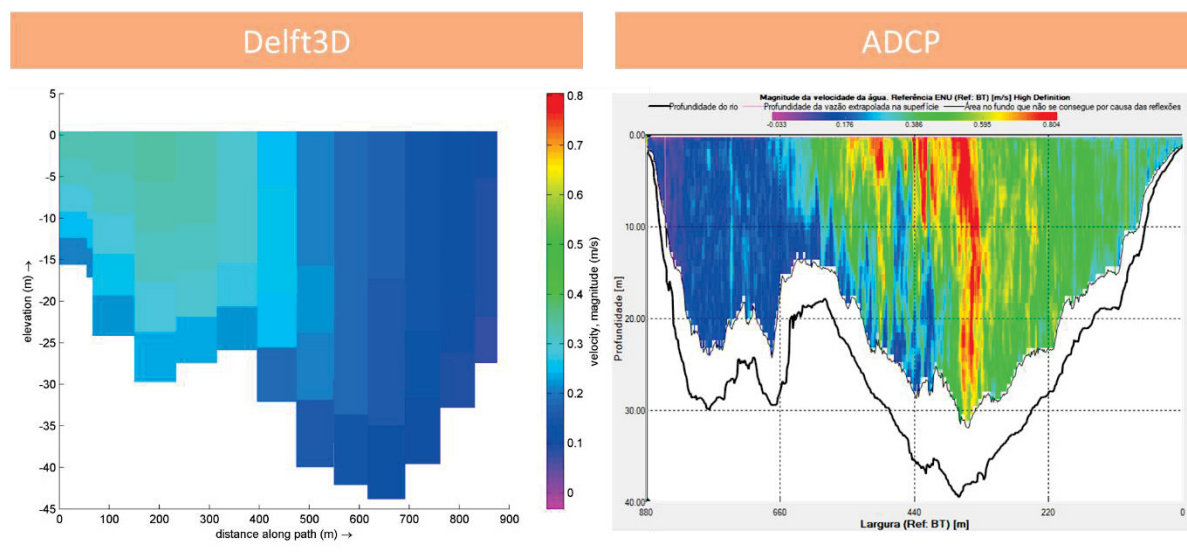
FONTE: A autora (2021).

Figura 28 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 m³/s – 11/02/2017



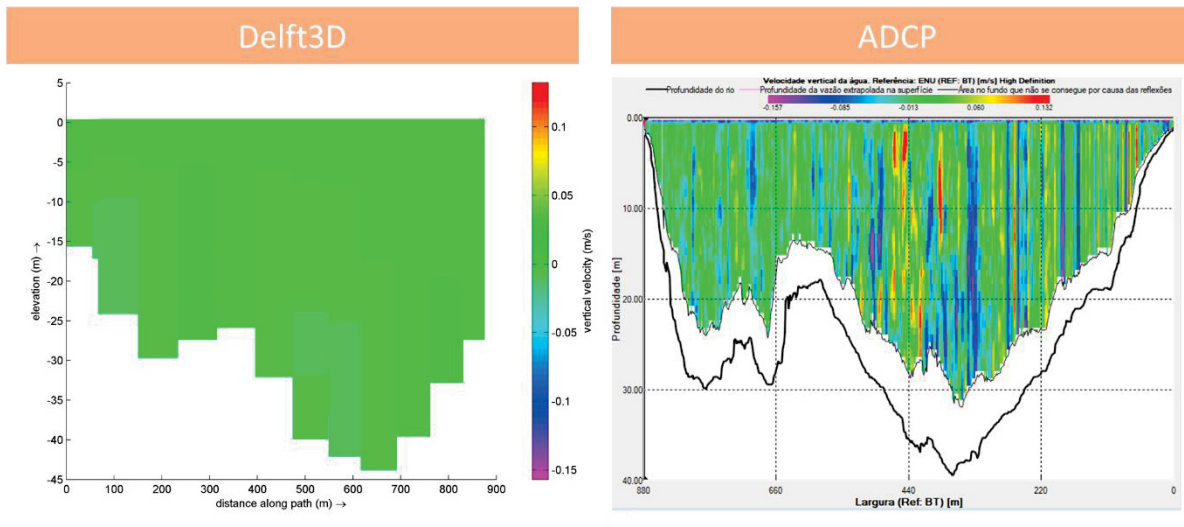
FONTE: A autora (2021).

Figura 29 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 m³/s – 16/08/2018



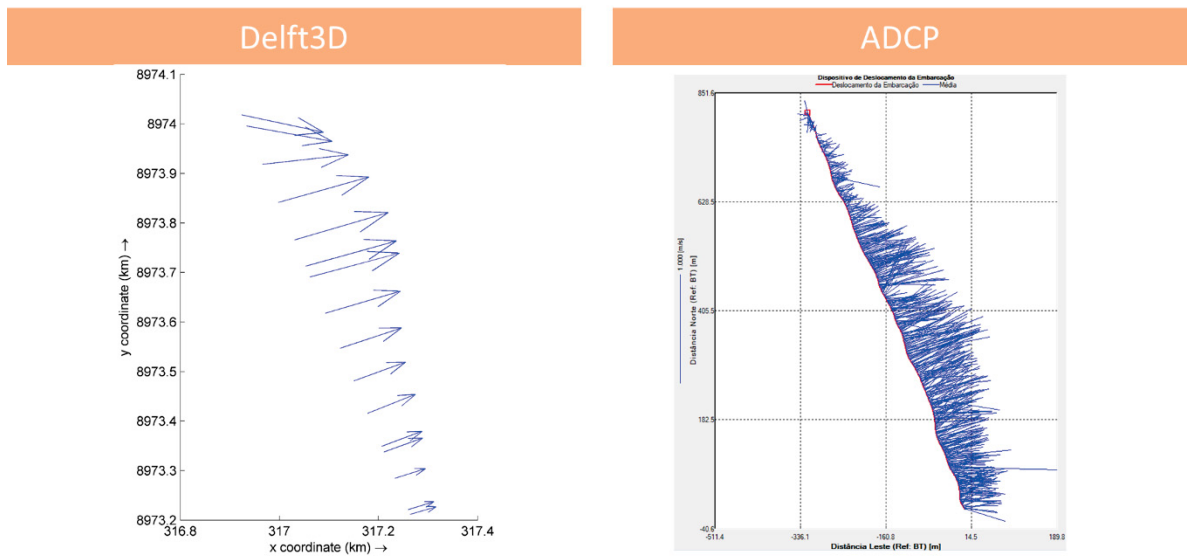
FONTE: A autora (2021).

Figura 30 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais médias ao longo da coluna da água - Vazão baixa: 6.808,17 m³/s – 16/08/2018



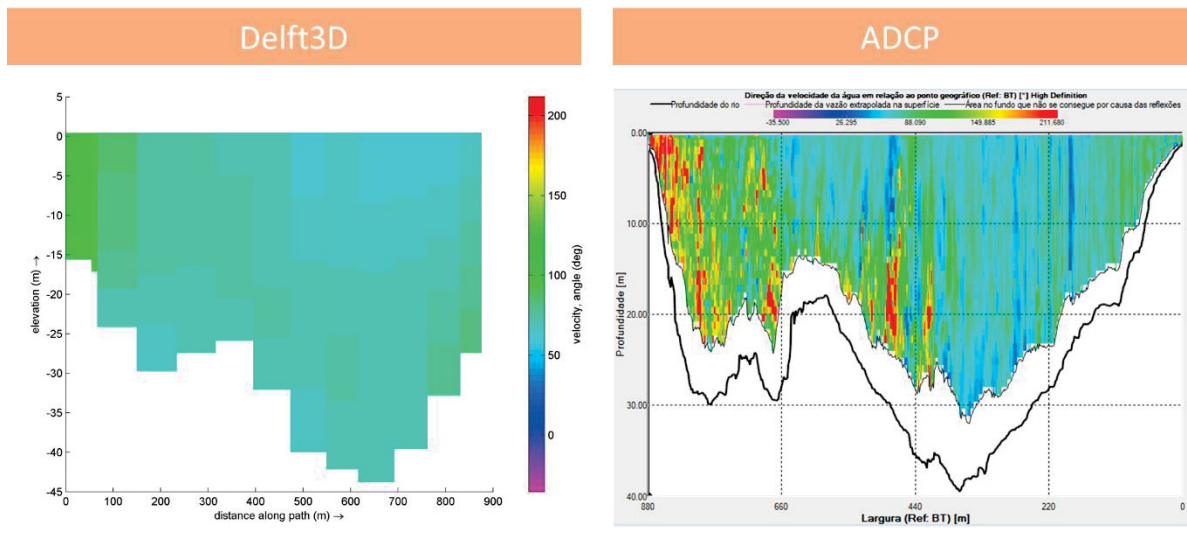
FONTE: A autora (2021).

Figura 31 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) médias ao longo do transecto - Vazão baixa: 6.808,17 m³/s – 16/08/2018



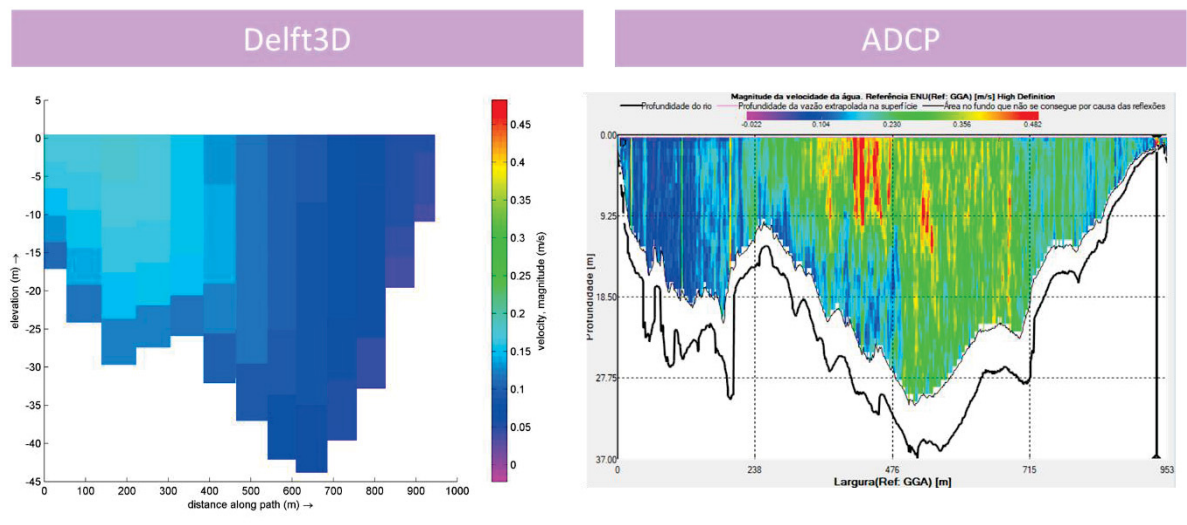
FONTE: A autora (2021).

Figura 32 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 m³/s – 16/08/2018



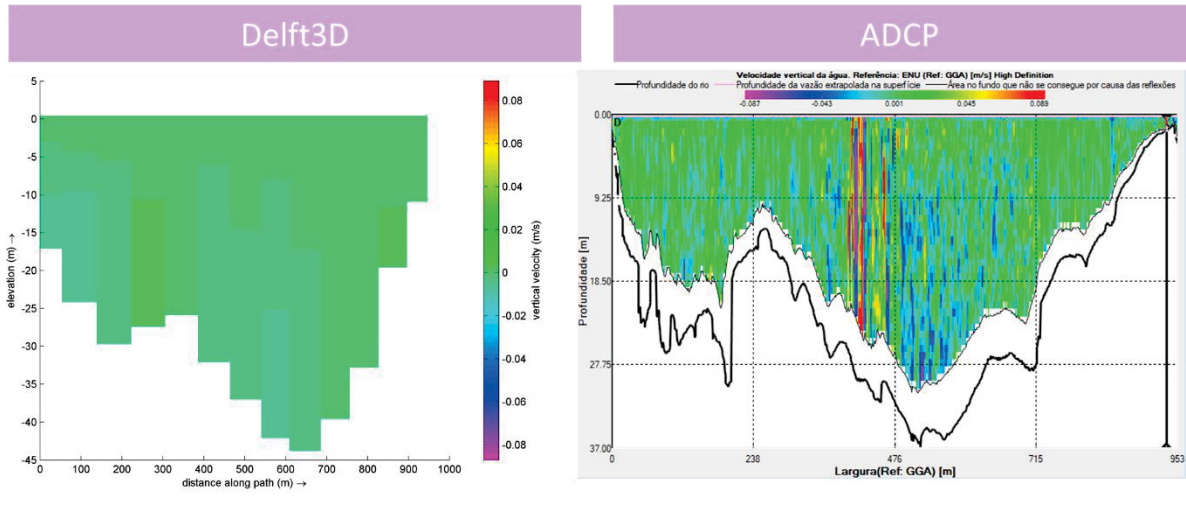
FONTE: A autora (2021).

Figura 33 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão mais baixa: 3.598,66 m³/s – 09/08/2016



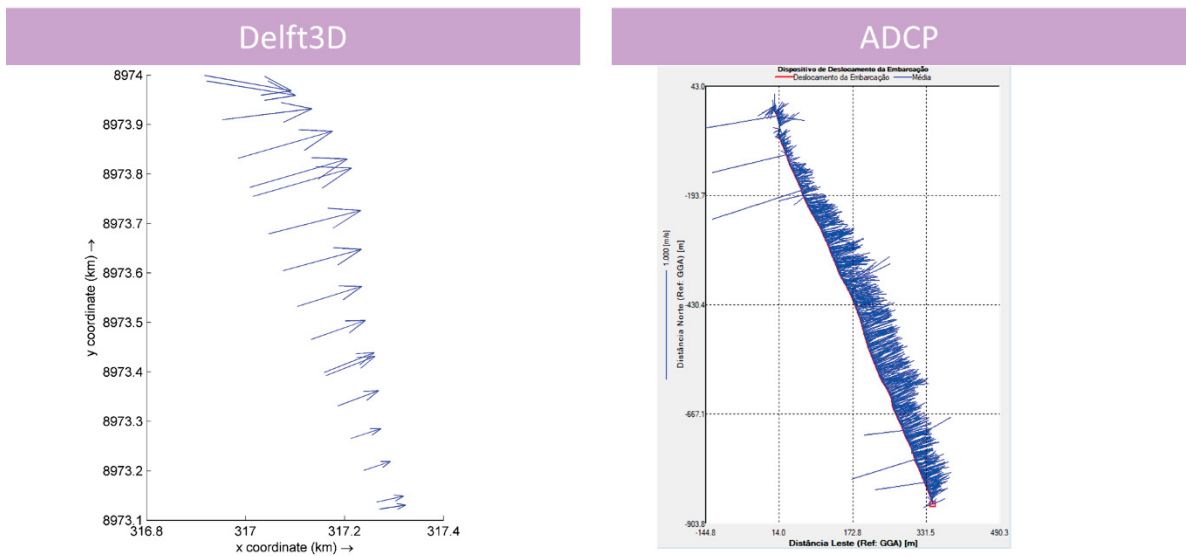
FONTE: A autora (2021).

Figura 34 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão mais baixa: 3.598,66 m³/s – 09/08/2016



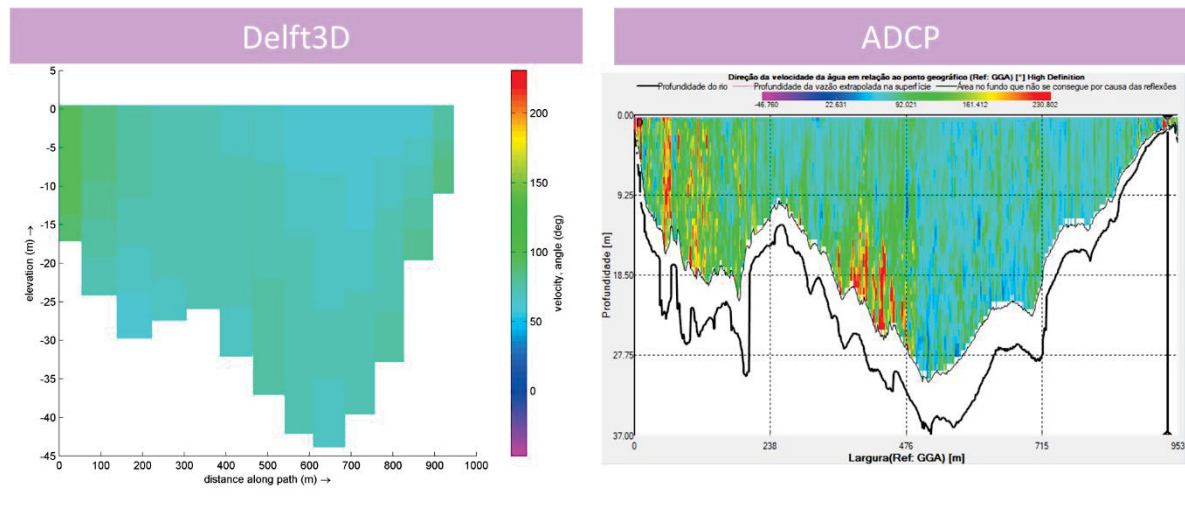
FONTE: A autora (2021).

Figura 35 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão mais baixa: 3.598,66 m³/s – 09/08/2016



FONTE: A autora (2021).

Figura 36 – Ângulo das velocidades horizontais – Vazão mais baixa: 3.598,66 m³/s – 09/08/2016



FONTE: A autora (2021).

Observou-se que o modelo Delft3D qualitativamente mostra campos de velocidades similares aos resultados medidos pelo ADCP nos cenários de vazões mais altas (vazões de 20.000m³/s e 40.000m³/s aproximadamente) tanto na magnitude como na direção das velocidades. Entretanto em vazões baixas, principalmente no cenário de vazão de 6.808 m³/s, o Delft3D não representou de maneira similar os resultados do ADCP. Nesta vazão, o Delft3D apresentou velocidades maiores no lado esquerdo da seção e o ADCP no lado direito da seção.

O Delft3D representou as velocidades verticais em uma menor magnitude do que foi medido no ADCP, conforme pode ser verificado na Figura 22, na Figura 26, na Figura 30 e na Figura 34, para cada um dos quatro cenários avaliados. Isso ocorre em virtude da medição do ADCP ser capaz de detectar pequenas variações e picos locais de velocidade, enquanto o modelo estima as tendências gerais da velocidade em cada célula.

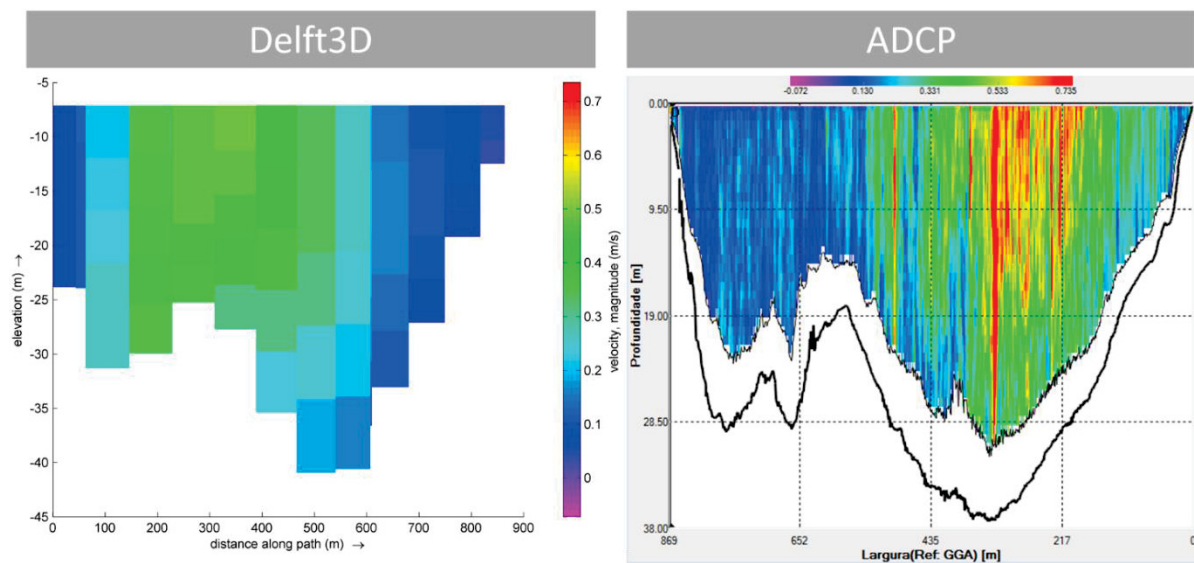
Nesse primeiro teste, a batimetria da região representada no modelo foi obtida de seções transversais batimétricas históricas espaçadas e interpoladas dos anos de 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021.

A batimetria mais recente (2021) utilizando ecobatímetro multifeixe foi realizada pelo Lactec e implantada no modelo. Este levantamento batimétrico percorreu grande parte da região de maneira contínua evitando assim muitas regiões de interpolação. Foi definido então, definitivamente, a batimetria a ser utilizada no modelo.

Como analisado, em vazões baixas, o Delft3D não reproduziu de maneira satisfatória os resultados do ADCP, apresentando velocidades maiores no lado esquerdo da seção enquanto que o ADCP no lado direito da seção. Por isso, foi verificado, com dados de 2021, se essa situação se manteria após a atualização da batimetria.

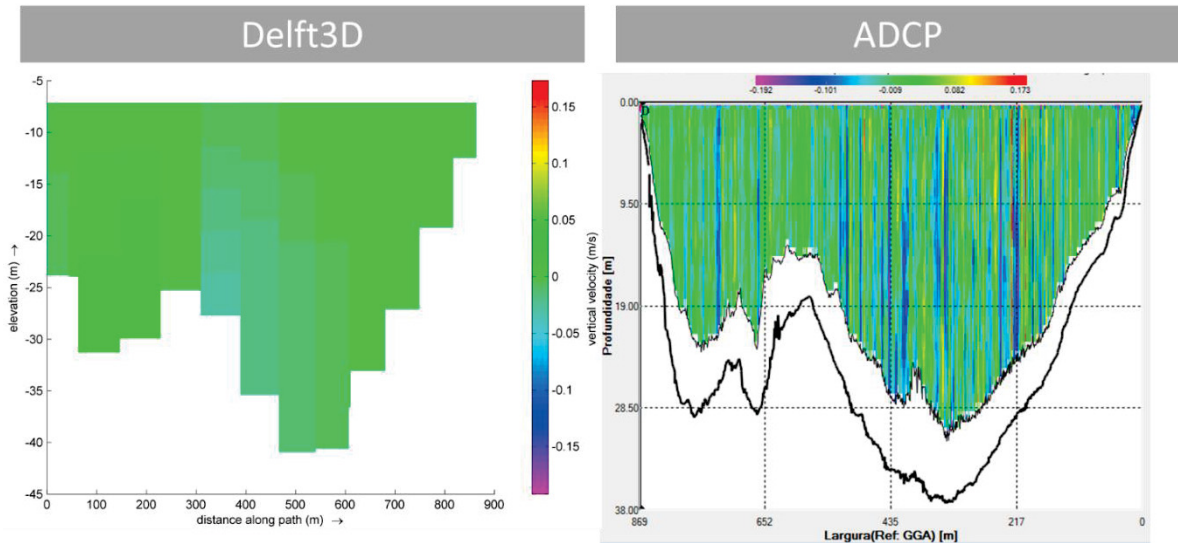
Dentre as várias medições com ADCP neste local no ano de 2021, escolheu-se a data do dia 03/11/2021, por ter apresentado menor vazão entre as medições do referido ano. Da Figura 37 até a Figura 40 são apresentadas estas comparações. A magnitude das velocidades é representada pelas cores na seção transversal, sendo velocidades horizontais na Figura 37 e velocidades verticais na Figura 38. A direção do escoamento é apresentada na Figura 39 pelos vetores em planta e na Figura 40 pelo ângulo das velocidades horizontais em cores na seção transversal.

Figura 37 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



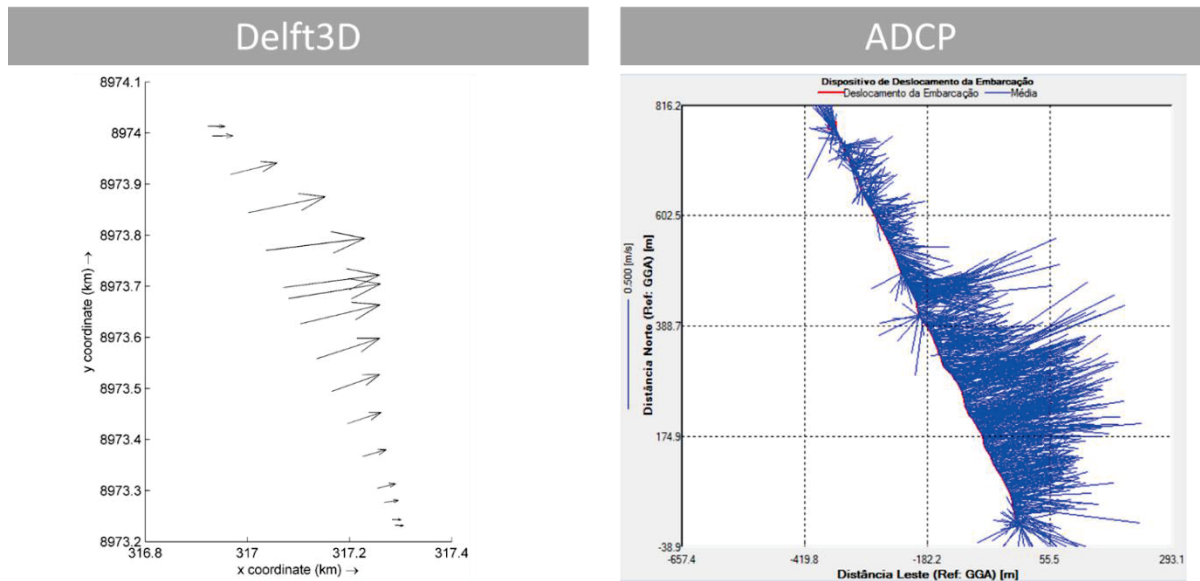
FONTE: A autora (2022).

Figura 38 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



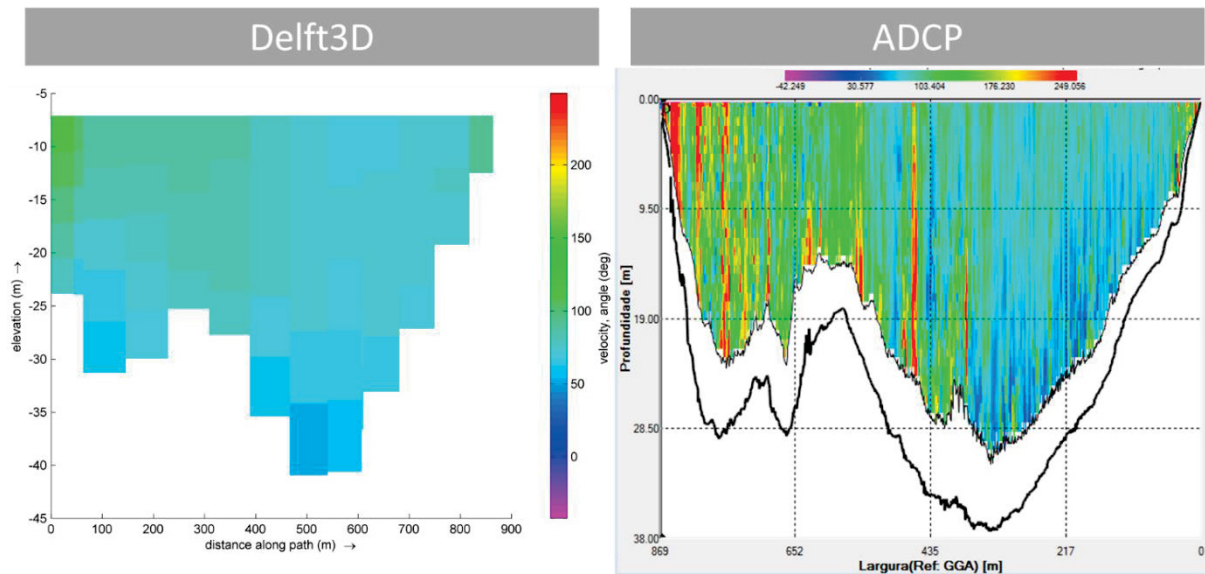
FONTE: A autora (2022).

Figura 39 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



FONTE: A autora (2022).

Figura 40 – Ângulo das velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



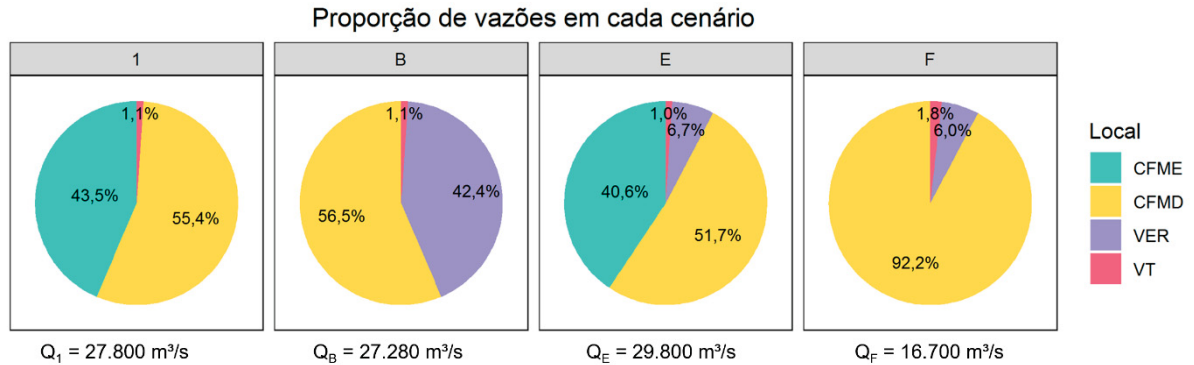
FONTE: A autora (2022).

Notou-se que, apesar da atualização da batimetria, a situação que estava ocorrendo em casos de vazões baixas se manteve: enquanto na medição do ADCP as velocidades maiores ficaram mais próximas da margem direita, no modelo computacional as velocidades maiores ficaram mais próximas da margem esquerda. As magnitudes das velocidades, entretanto, foram semelhantes. Conclui-se que o modelo é capaz de reproduzir a hidrodinâmica geral da região de interesse, mas apresenta limitação na representação das regiões com hidrodinâmica complexa como na região de convergência (seção do ADCP) e perfis verticais com possíveis correntes secundárias fortes.

5.2 CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA

Primeiramente, com a finalidade de facilitar a interpretação dos resultados, foi realizada uma representação gráfica dos percentuais de distribuição das vazões, citadas na Tabela 4, entre as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário (Figura 41). Essas proporções de vazões serviram como referência para a interpretação das proporções de destino das partículas (item 5.2.1).

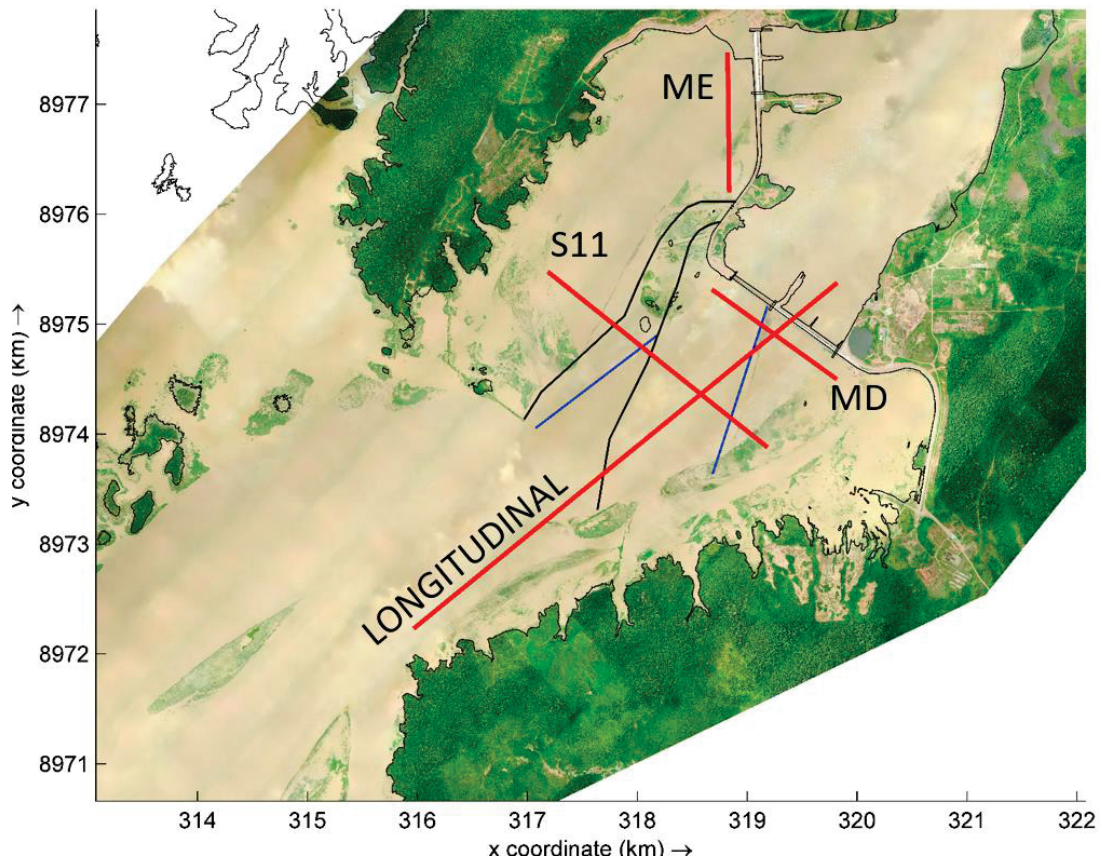
Figura 41 – Proporção da distribuição vazões entre as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário.



FONTE: A autora (2022).

A seguir, foram traçadas seções transversais e longitudinais ao reservatório (Figura 42), visando a representação dos resultados de velocidade da água para cada cenário na Figura 43 até Figura 47.

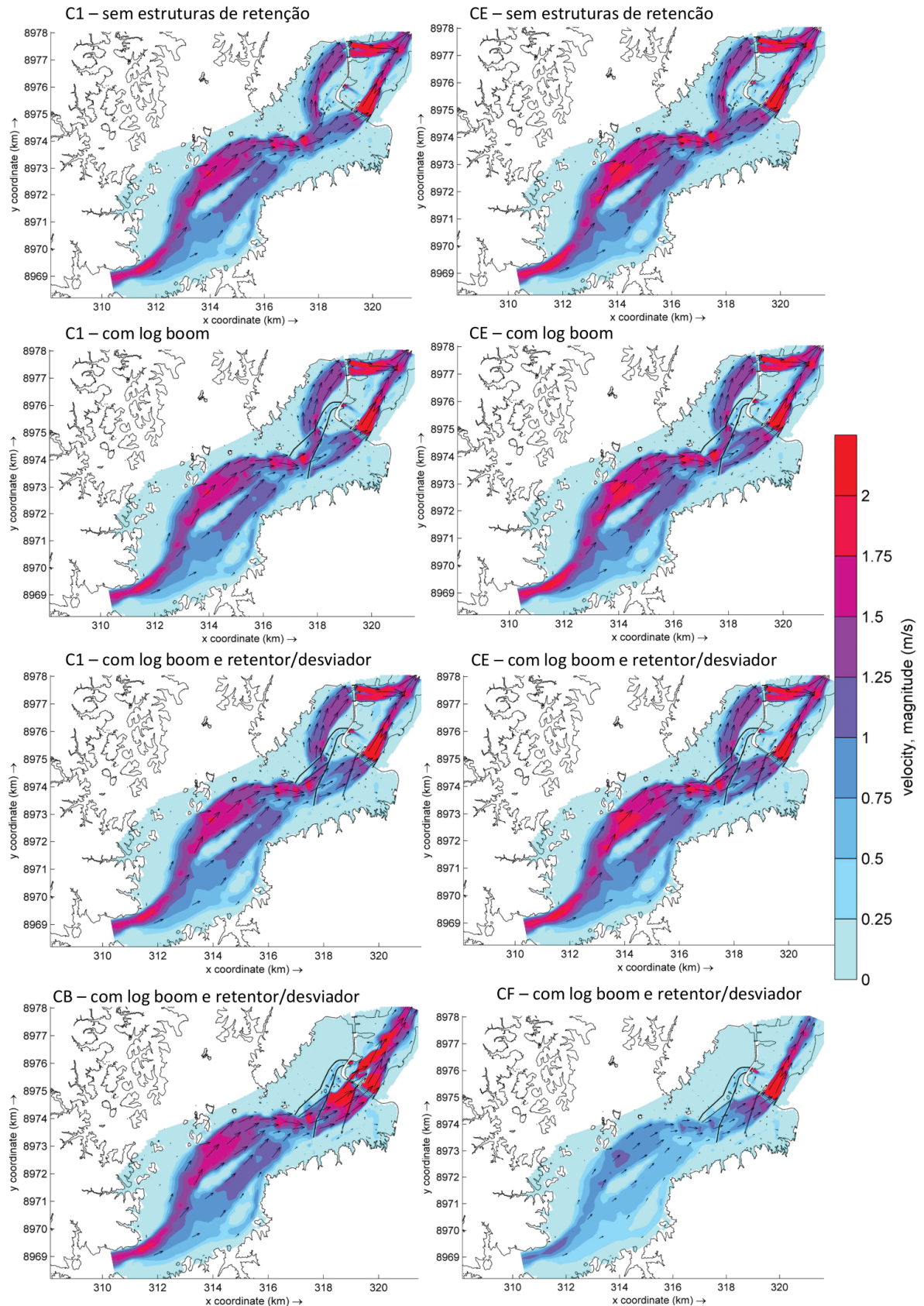
Figura 42 – Seções para verificação de velocidades em seções transversais na margem direita, margem esquerda, seção que corta estruturas retentoras e seção longitudinal ao longo do reservatório.



FONTE: A autora (2022).

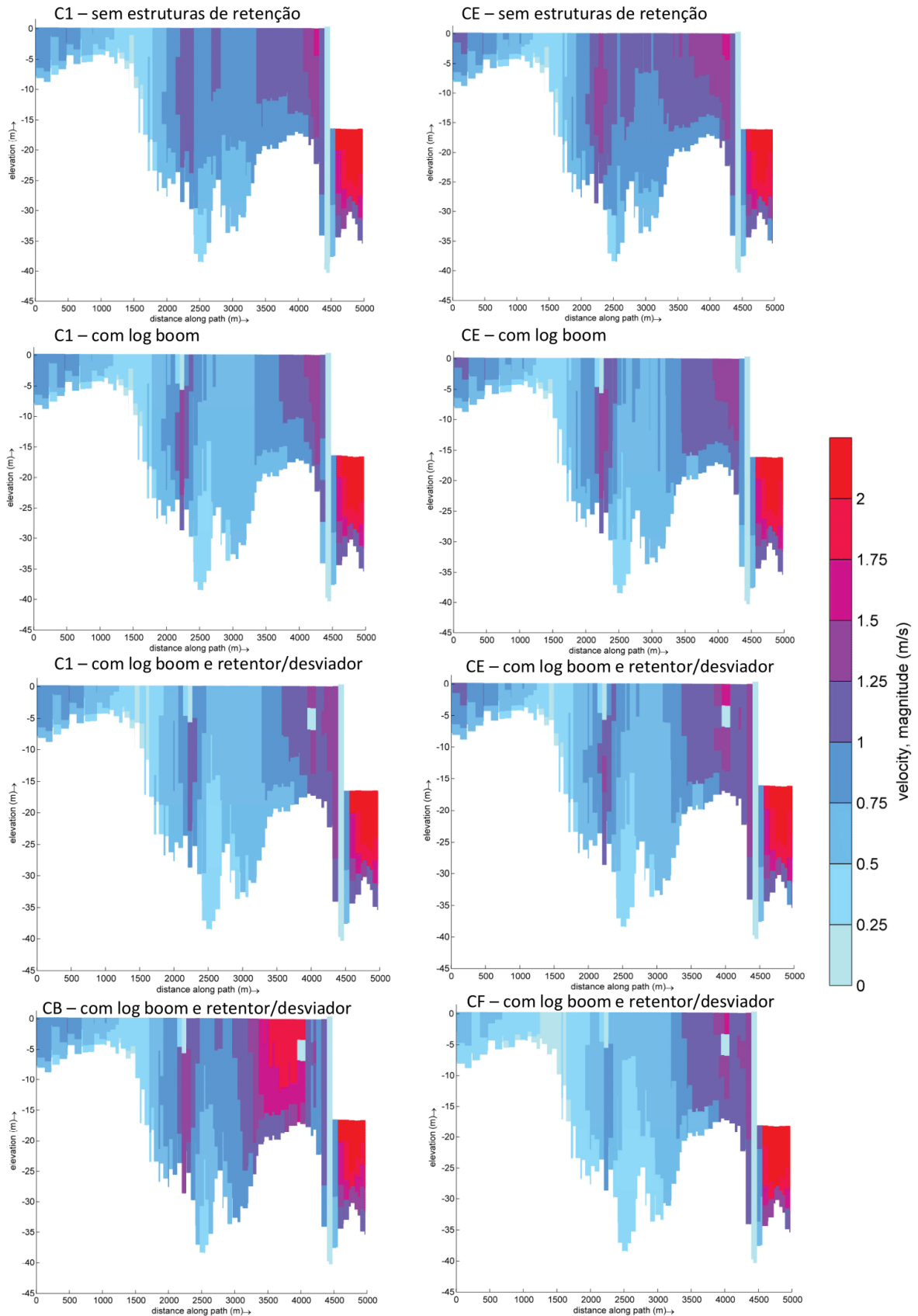
A Figura 43 mostra a magnitude e direções das velocidades superficiais horizontais ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada um dos cenários. A Figura 44 mostra essas velocidades em seção longitudinal de montante para jusante. A Figura 45 e Figura 46 mostram a magnitude das velocidades em seções transversais na margem direita (MD) e na margem esquerda (ME), respectivamente, para cada cenário. Na Figura 47 é representada a magnitude das velocidades na seção transversal que corta as estruturas de retenção, denominada S11. Nas referidas figuras foi possível notar os efeitos gerados pela magnitude das vazões nos diferentes cenários de operação.

Figura 43 – Magnitude (cores na legenda) e direção (vetores em preto) das velocidades superficiais horizontais ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).



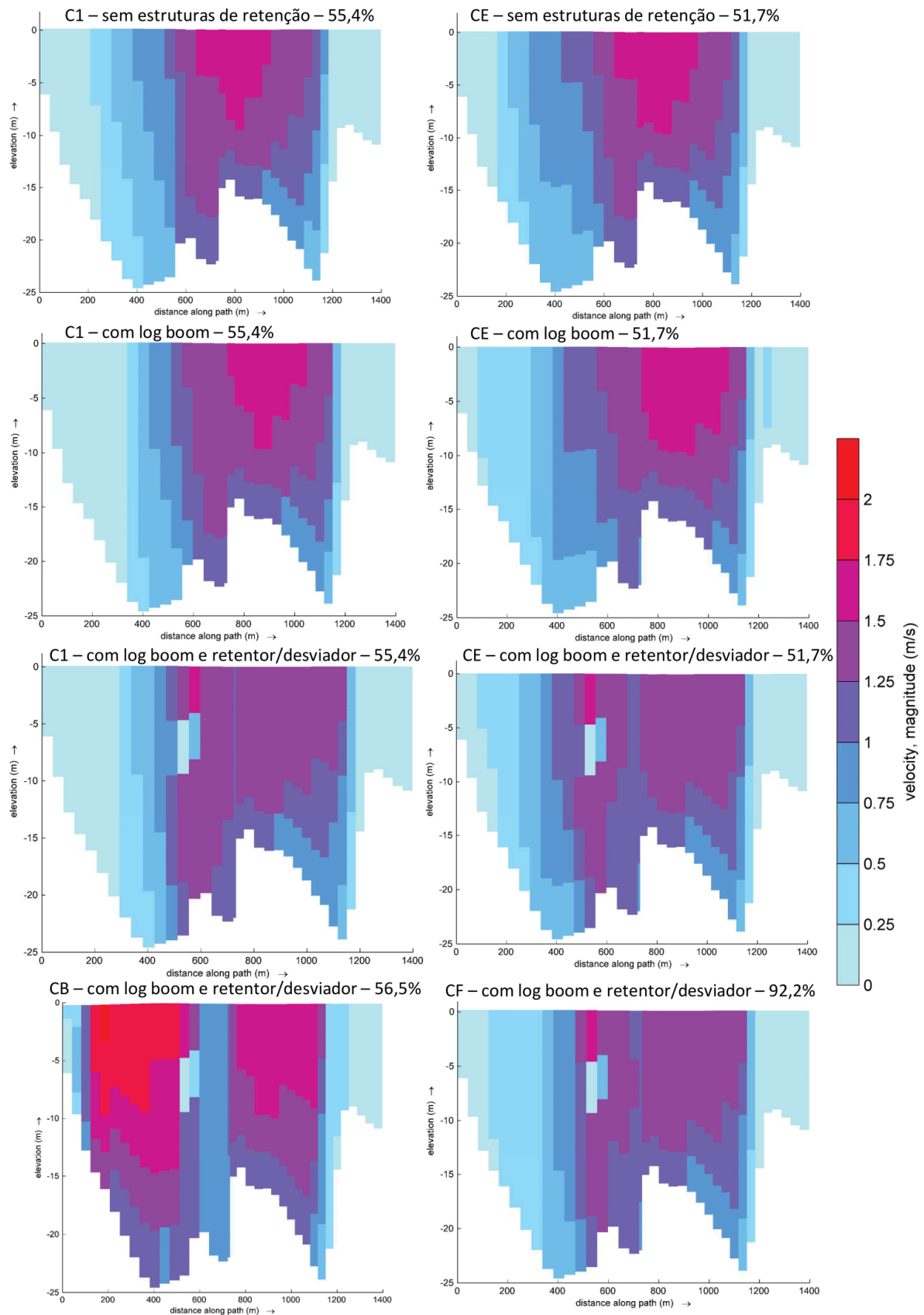
FONTE: A autora (2022).

Figura 44 – Magnitude das velocidades horizontais em seção longitudinal ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).



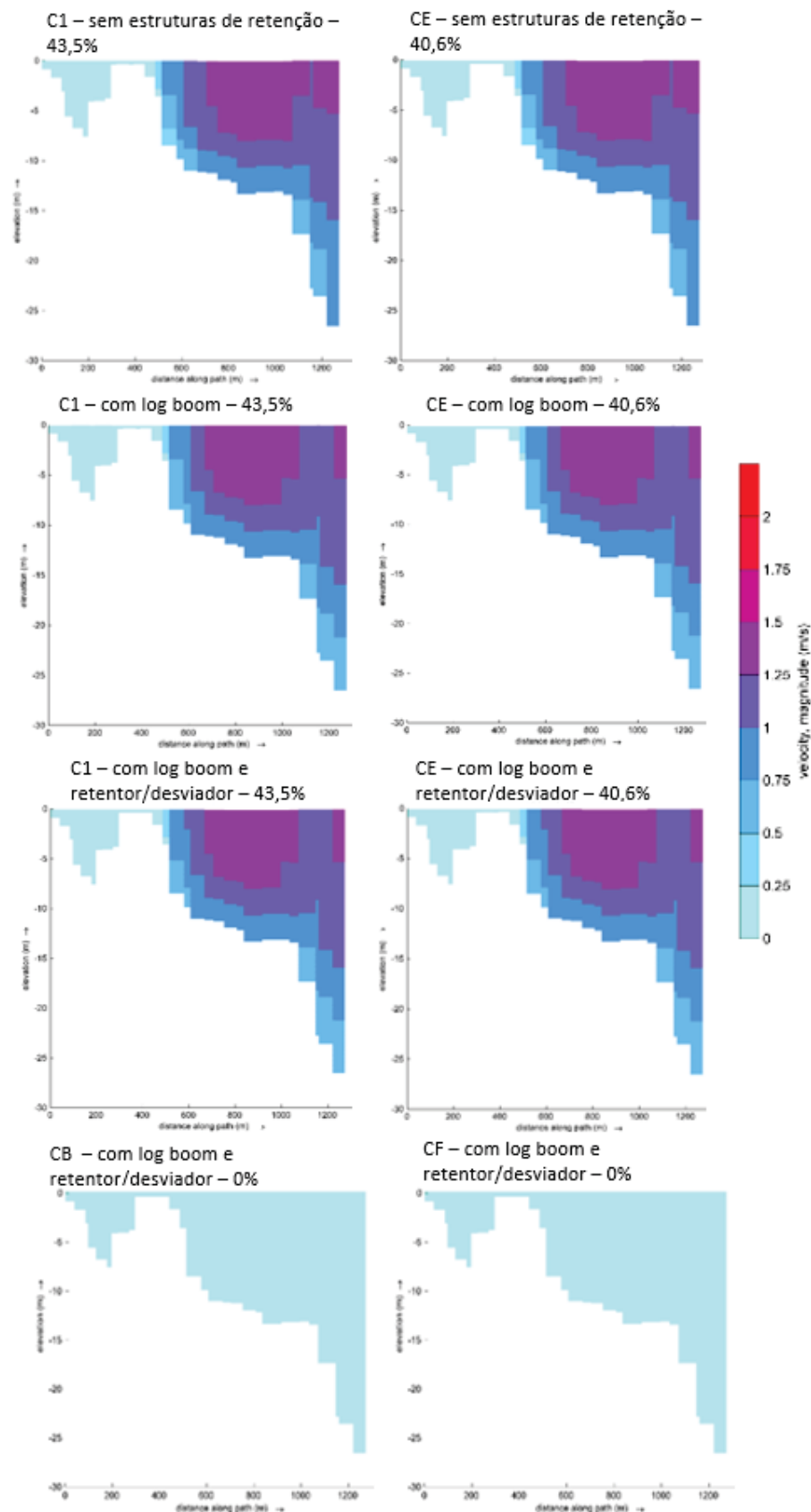
FONTE: A autora (2022).

Figura 45– Magnitude das velocidades em transecto na margem direita do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F). Percentuais correspondem à vazão que vai para o lado direito em relação ao total.



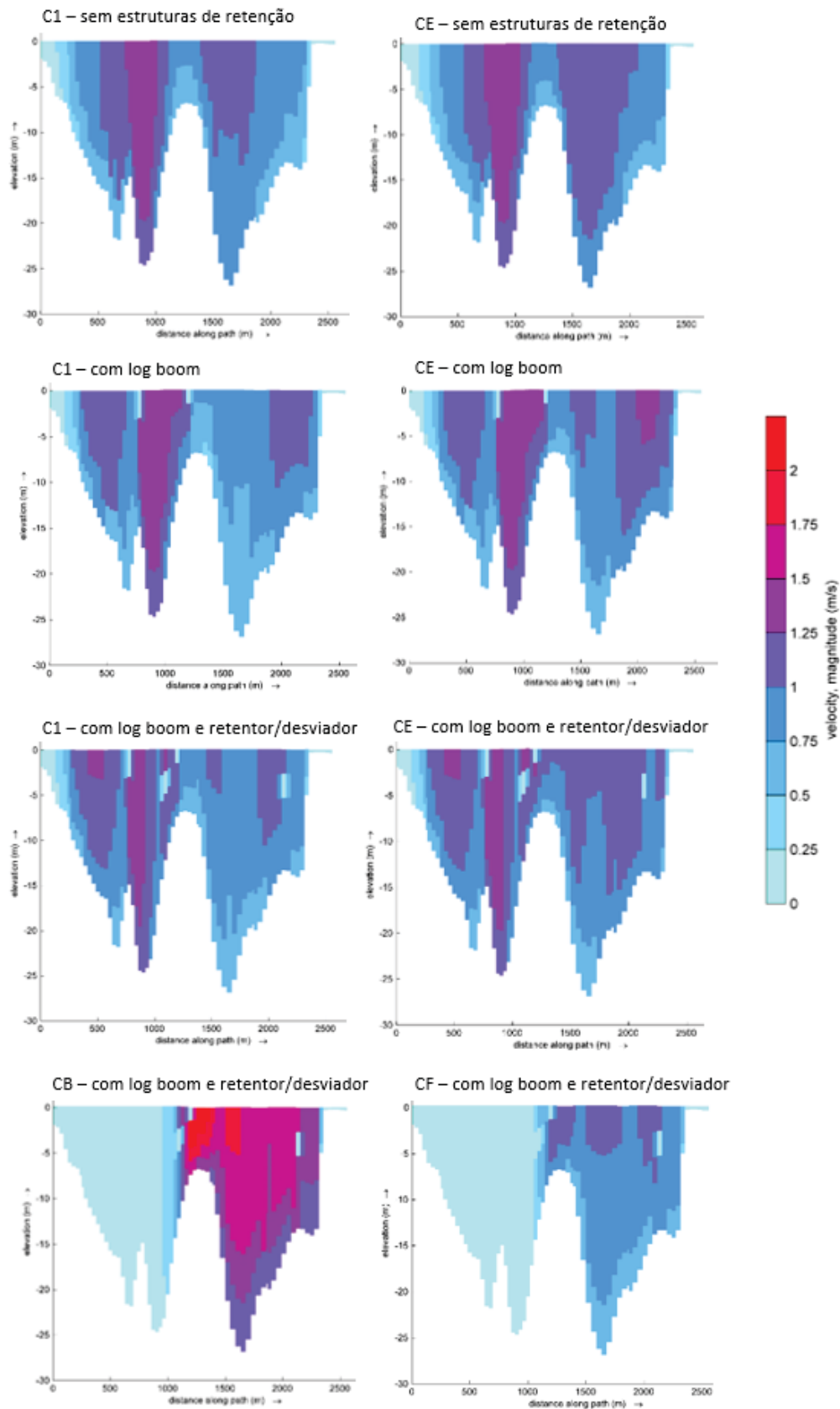
FONTE: A autora (2022).

Figura 46 – Magnitude das velocidades em transecto na margem esquerda do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F). Percentuais correspondem à vazão que vai para o lado esquerdo em relação ao total.



FONTE: A autora (2022).

Figura 47 – Magnitude das velocidades em transecto na seção denominada S11 que corta as estruturas de retenção do reservatório da UHE Jirau para cada cenário (C1- Cenário 1; CE- Cenário E; CB- Cenário B; CF- Cenário F).



FONTE: A autora (2022).

Comparando as imagens da Figura 45, verifica-se que as velocidades máximas se deslocam para a direita da CFMD e as velocidades no vertedouro diminuem com a introdução do *log boom*, para os cenários 1 e E. Este efeito foi também observado na S11 para os mesmos cenários (Figura 47), onde é verificado um deslocamento das velocidades para a esquerda e direita em relação às respectivas linhas de *log boom*. Nos cenários com *log boom* e retentor desviador as velocidades tendem a diminuir em relação aos outros.

Na margem esquerda (Figura 46), a vazão se manteve a mesma, e as velocidades também foram semelhantes entre todos os cenários, independentemente de estruturas retentoras.

As velocidades dos cenários B e F foram condizentes com a distribuição de vazões.

Foi possível notar o efeito das estruturas retentoras no escoamento: nas células onde os *log booms* estão posicionados (superfície), não há passagem de água por isso a velocidade é nula. O mesmo ocorre com os retentores/desviadores de meio água (segunda camada). Na Figura 47 é possível observar bem esse efeito através das células em azul claro em meio as outras.

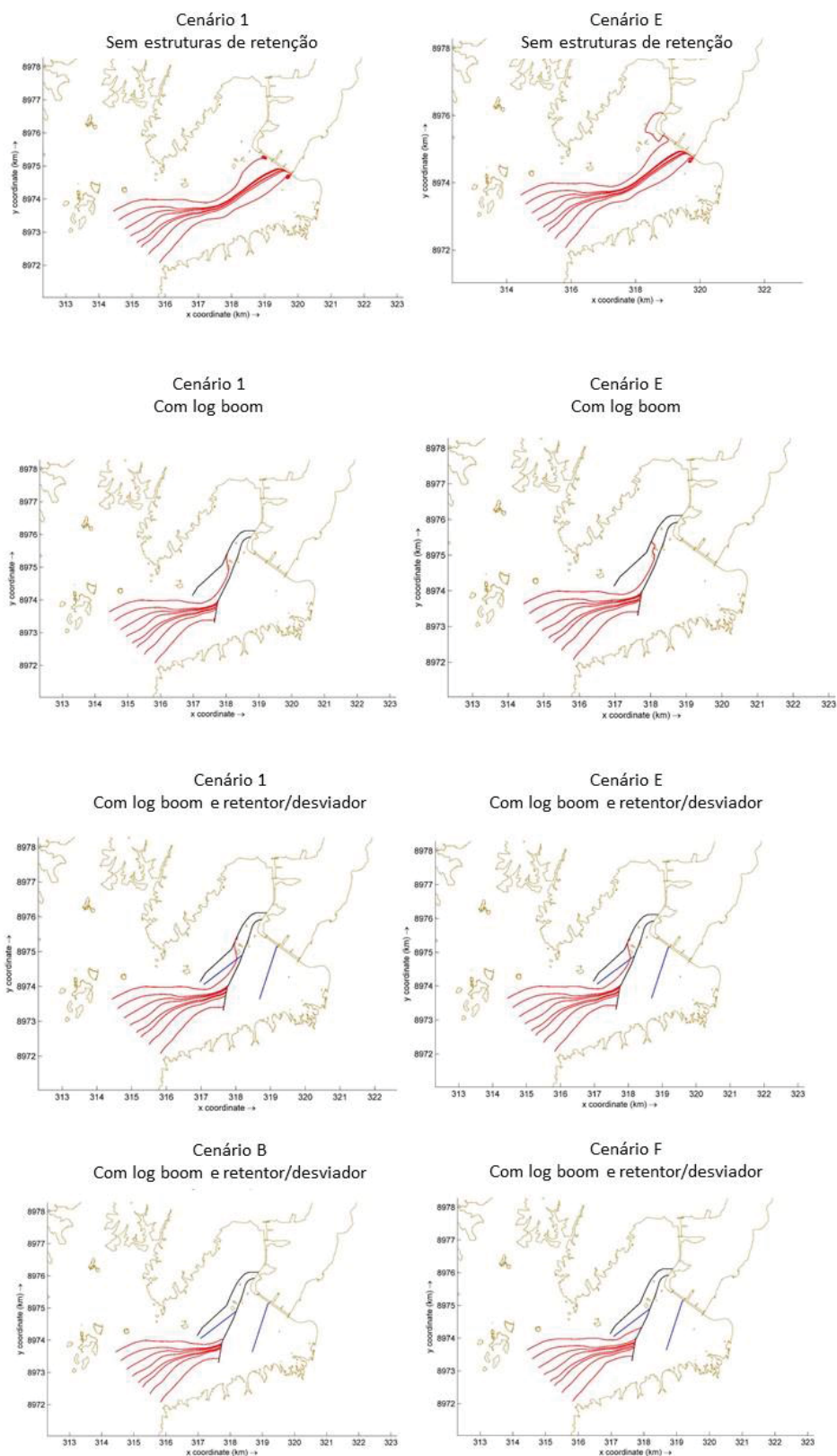
5.2.1 SIMULAÇÃO DE DROGUES

Drogues são partículas flutuantes lançadas na superfície com objetivo de monitorar sua trajetória, estes não possuem massa e não estão sujeitas à difusão, são transportados apenas seguindo o campo de velocidade na superfície (primeira camada). Essa ferramenta pode ser inserida no módulo FLOW da hidrodinâmica no Delft3D.

Foram lançados drogues em pontos a montante da barragem, semelhante à posição de lançamento das partículas (Figura 20) e foi observado seu comportamento em cenários sem e com estruturas retentoras (Figura 48). É possível observar o efeito dos *log booms* de superfície, tendo em vista que as partículas são completamente superficiais e a velocidade superficial nas células contendo *log boom* é zero. Nos casos sem estruturas retentoras, os drogues seguem a velocidade chegando até as estruturas da barragem. E para cenários com estruturas retentoras de meio água, os drogues também ficam retidos nos *log booms*

de superfície, pois as demais camadas não interferem no movimento de drogas, logo, estruturas de meio água não atuam nesses cenários.

Figura 48 - Simulações com drogas para cada cenário



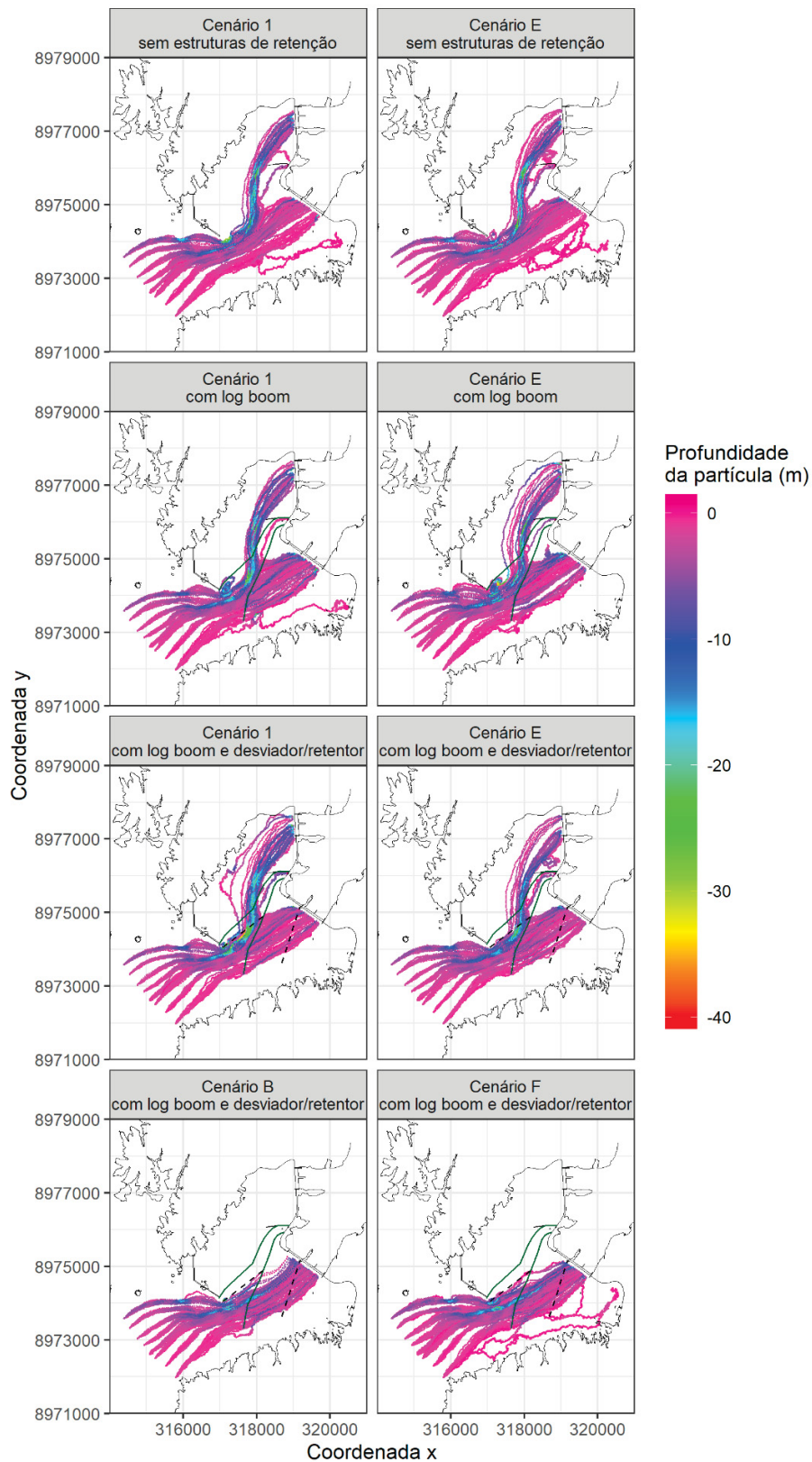
FONTE: A autora (2022).

5.3 PARTICLE TRACKING

Foi analisado o comportamento tridimensional das trajetórias das partículas de cada cenário com base na proporção da vazão distribuída e as estruturas de retenção inseridas.

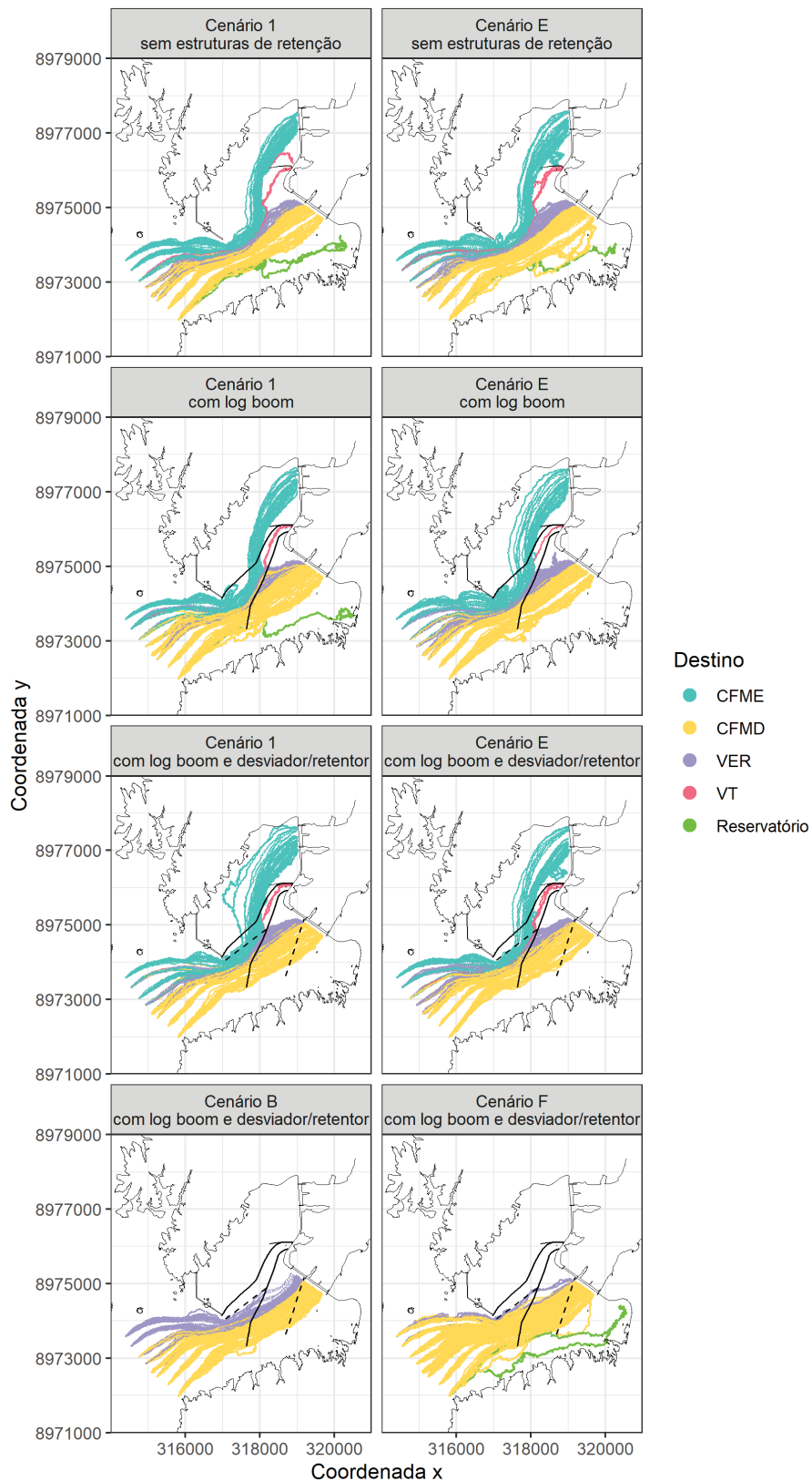
A Figura 49 mostra a trajetória realizada pelas partículas em cada cenário, sendo que a cor representa a profundidade da partícula, as linhas pretas contínuas representam o *log boom* e as linhas pretas tracejadas representam os retentores/desviadores de troncos. As partículas, que foram lançadas na superfície, permaneceram em regiões mais rasas (menores que 10 metros), até chegar à região de estrangulamento, onde as profundidades tenderam a ser maiores. Após passar por essa região, as profundidades das partículas voltam a diminuir, em virtude da variação da batimetria. A Figura 50 mostra as trajetórias para cada cenário com a cor representando o destino da partícula.

Figura 49 – Trajetória e profundidade das partículas para cada cenário no reservatório da UHE Jirau



FONTE: A autora (2022).

Figura 50 – Trajetória e destino das partículas para cada cenário no reservatório da UHE Jirau

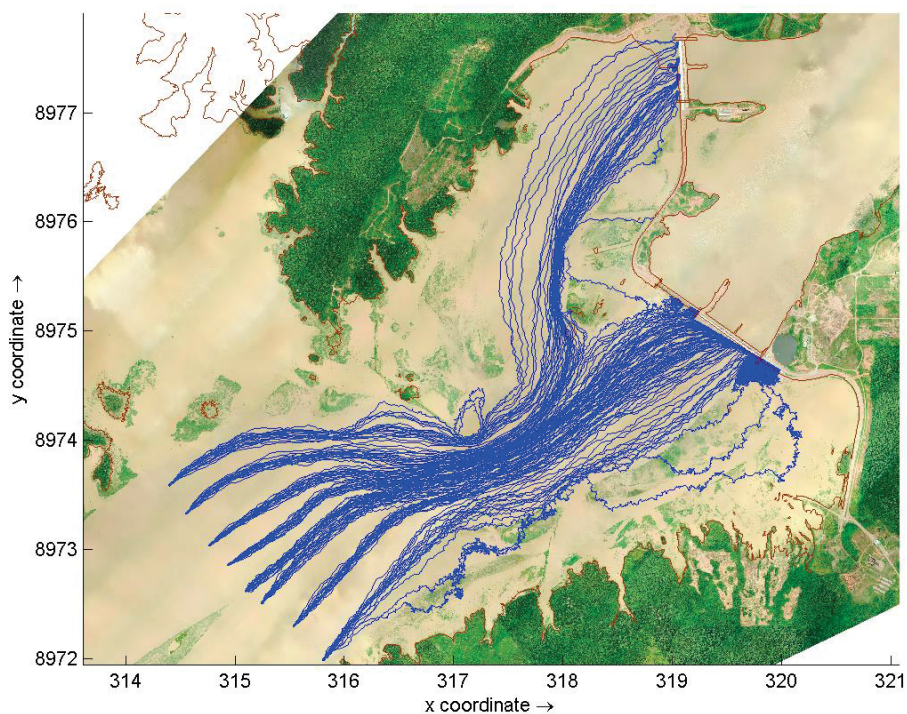


FONTE: A autora (2022).

5.3.1 SIMULAÇÃO COM “ÓLEO”

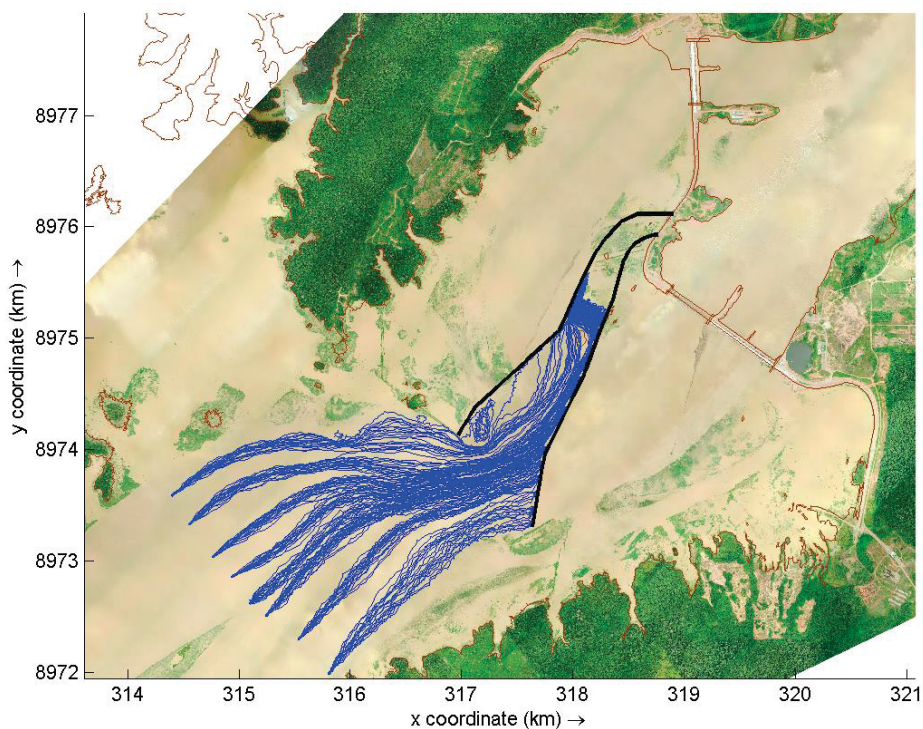
Para o modelo de derramamento de óleo foi simulado o cenário 1 com e sem log boom verificou-se que 100% das partículas são de fato superficiais e o que as diferem dos drogues, são os efeitos difusivos sobre as partículas. Foi observado que as estruturas de log boom conseguiram reter essas partículas flutuantes, porém nenhuma delas chegou ao vertedouro de troncos. As Figura 51 e Figura 52 ilustram as duas simulações.

Figura 51 – Cenário 1: sem estruturas retentoras – simulação com óleo



FONTE: A autora (2022).

Figura 52 – Cenário 1: com log boom – simulação com óleo

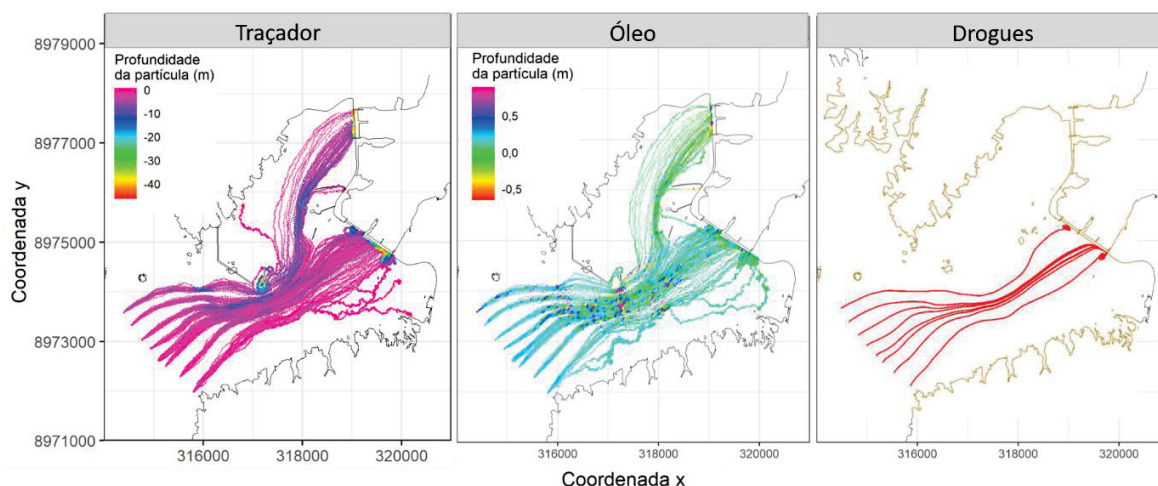


FONTE: A autora (2022).

Ao comparar simulação com drogas, simulação de partículas com traçador e com óleo, foi possível observar mudanças nas trajetórias. Isso ocorre devido à turbulência do modelo hidrodinâmico que influencia na velocidade dos troncos. Então, ao lançar 20 partículas no mesmo ponto, todas chegarão a uma posição diferente, nenhuma trajetória será idêntica devido aos efeitos da turbulência (RUIZ-VILLANUEVA et al. 2014a).

Os drogas não sofrem esses efeitos pois são transportados apenas pela velocidade da superfície (DELTARES, 2023a). Ao lançar 20 drogas na mesma célula ao mesmo tempo, as trajetórias serão exatamente as mesmas. No APÊNDICE 2, onde constam alguns testes realizados e que foram aqui citados, é possível observar um exemplo com 5 trajetórias de drogas sobrepostas, confirmando o que foi dito nos últimos parágrafos.

Figura 53 - Comparação entre trajetórias de traçadores, óleo e drogas.



FONTE: A autora (2023).

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

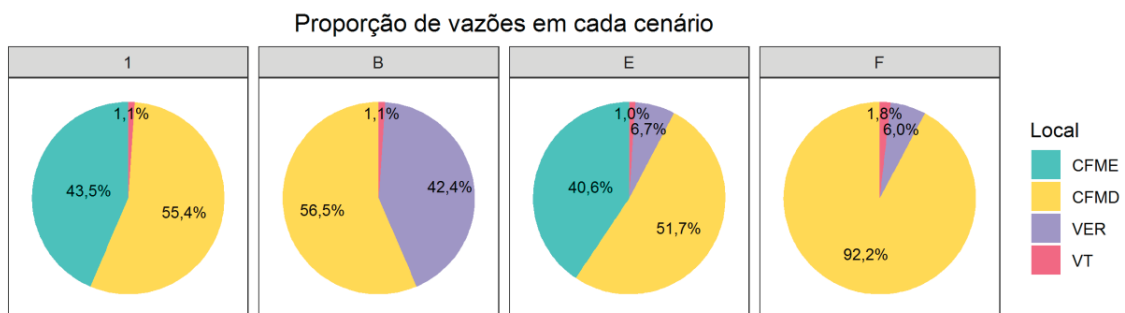
A Figura 54 representa os percentuais de distribuição das vazões entre cada um dos destinos, a fim de auxiliar a interpretação das proporções de destino das partículas. A Figura 55 mostra a proporção do destino das partículas em cada um dos cenários, sendo eles: CFME (Casas de Forças da Margem Esquerda), CFMD (Casas de Forças da Margem Direita), VER (Vertedouro), VT (Vertedouro de Troncos) e Reservatório (partículas que não chegaram em nenhum desses locais).

Nos cenários operacionais 1 e E, a distribuição das partículas foi condizente com a distribuição da vazão. Para todas as situações de presença ou ausência de estruturas retentoras, com pequenas variações nos percentuais. Essas variações indicam que a inserção do *log boom* diminuiu a incidência de partículas na CFME para o cenário E e aumentou para o cenário 1. Entretanto, o retentor/desviador de troncos associado ao *log boom* não teve efeito no percentual de partículas que se dirigem à CFME, mas diminuiu a incidência na CFMD para ambos os cenários.

O percentual de partículas que se dirigem ao vertedouro aumentou com a inserção das estruturas retentoras. O vertedouro de troncos se mostrou pouco atrativo devido a sua baixa vazão em relação as outras estruturas.

Nos cenários B e F, ambos com o *log boom* e o desviador/retentor de troncos, os percentuais de distribuição das partículas também se assemelharam à distribuição de vazões.

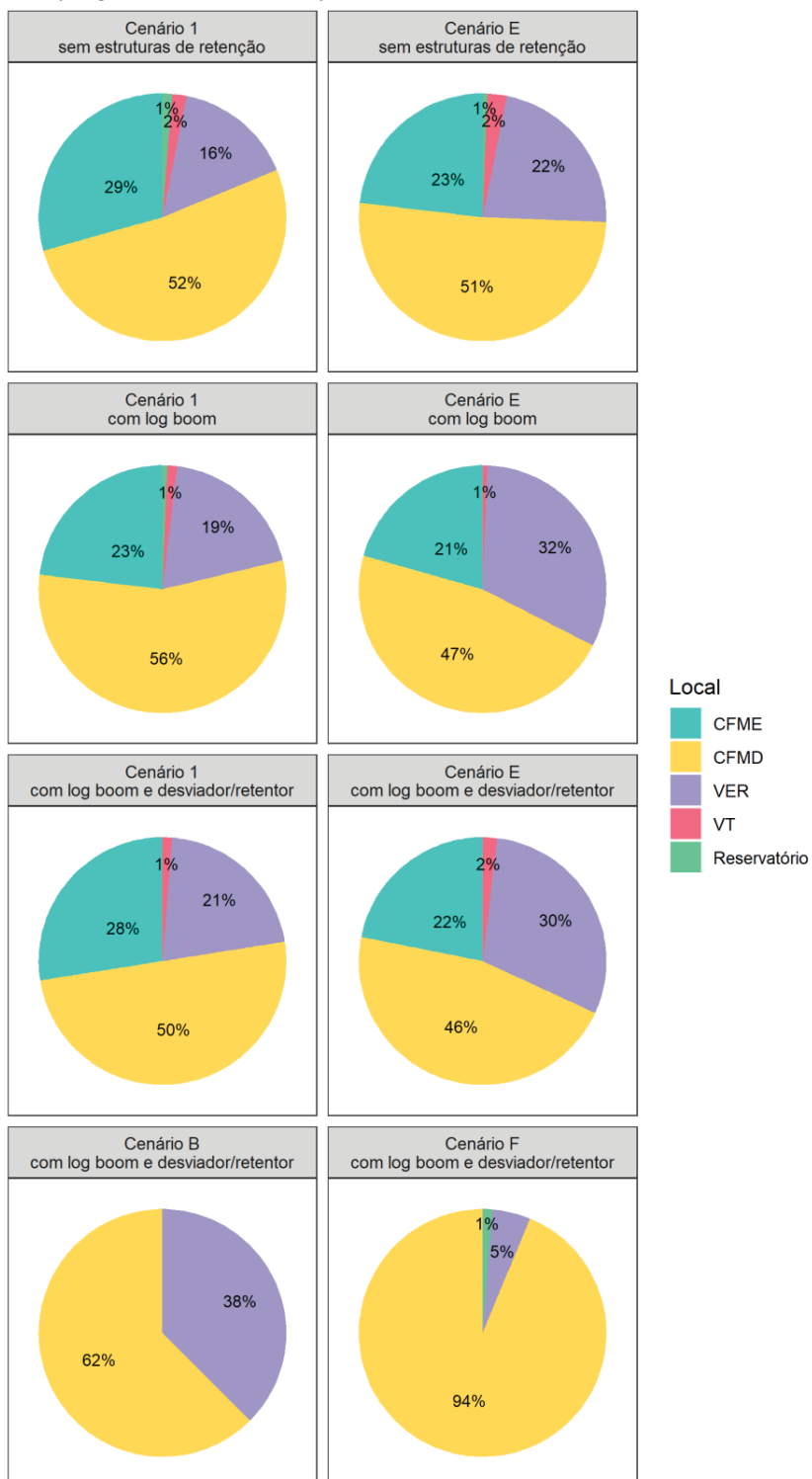
Figura 54 – Proporção de vazões cada cenário no reservatório da UHE Jirau



FONTE: A autora (2022).

Figura 55 – Proporção do destino das partículas entre as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário

Proporção do destino das partículas em cada cenário

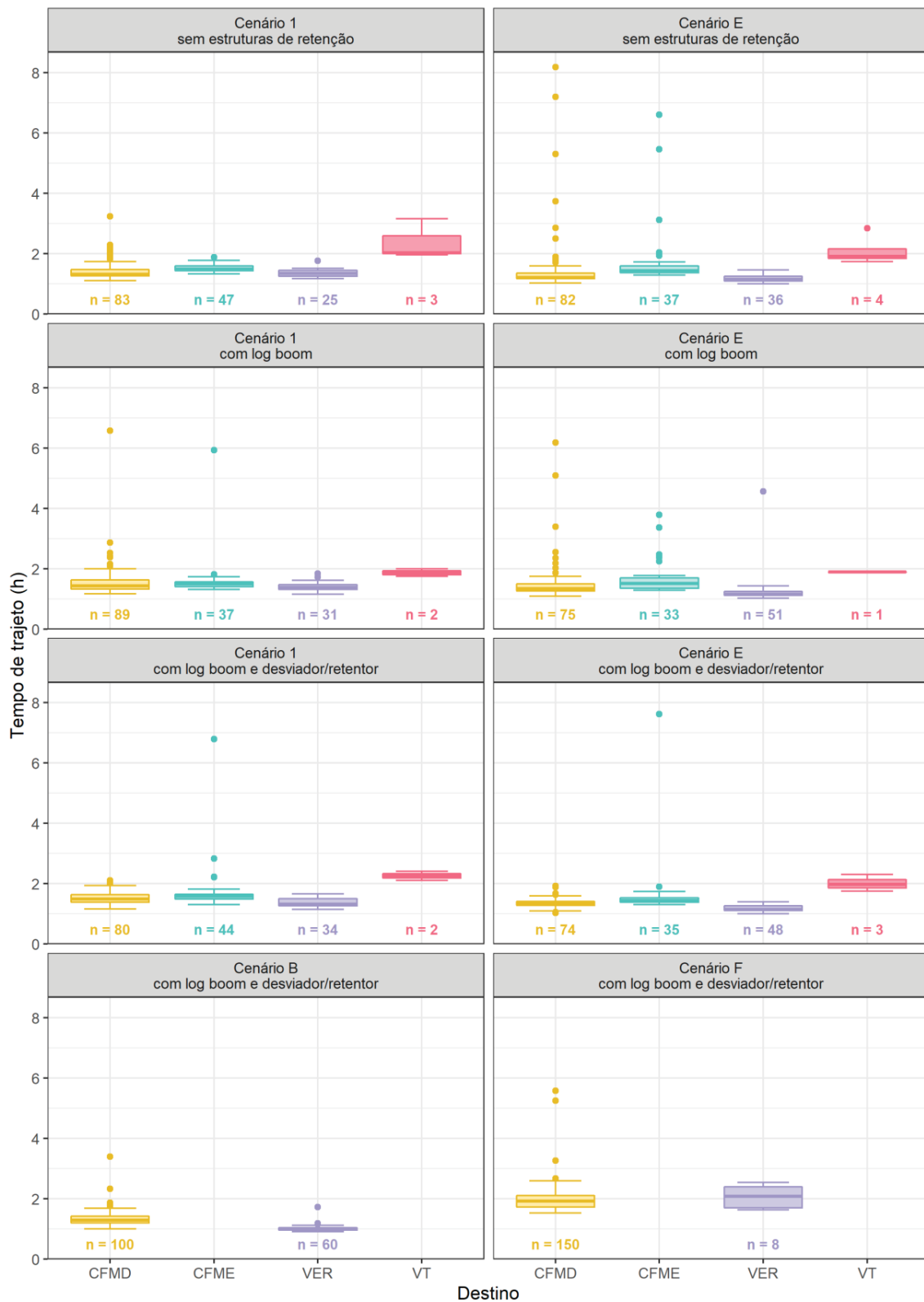


FONTE: A autora (2022).

Os tempos de trajeto (duração desde o lançamento da partícula até chegar no destino) foram mostrados por gráficos do tipo *box plot*, agrupados pelo destino das partículas e pelos cenários (Figura 56). Em geral, os tempos de trajeto permaneceram entre uma e duas horas. Valores mais elevados de até 8h, como os obtidos no cenário E (sem estruturas de retenção), ocorreram em função de velocidades mais baixas terem ocorrido em determinada região para esse cenário, o que acabou atrasando algumas partículas consideravelmente.

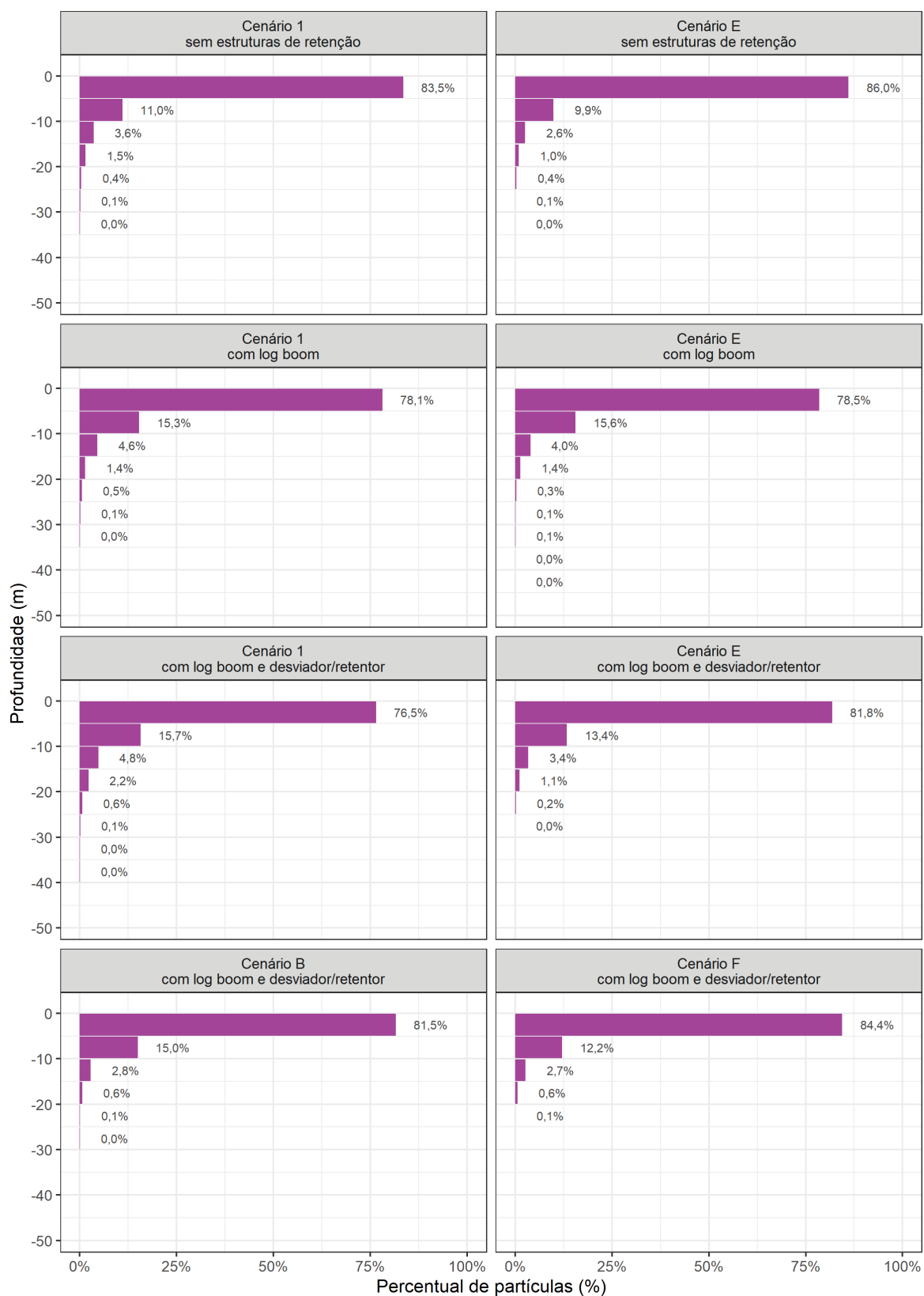
É possível observar uma maior concentração de partículas em superfície em todos os cenários através dos histogramas da Figura 57. Após a calibração do modelo de partículas e o teste de simulação, esta distribuição aproximou-se dos dados de monitoramento dos troncos em campo. A presença de estruturas retentoras reduz a porcentagem de partículas em superfície.

Figura 56 – Box plot do tempo de trajeto das partículas entre a região de lançamento até as casas de forças esquerda (CFME), direita (CFMD), vertedouro (VER) e vertedouro de troncos (VT) em cada cenário. “n” representa a contagem das partículas destinadas a cada local



FONTE: A autora (2022).

Figura 57 - Histograma de profundidades de partículas para cada cenário

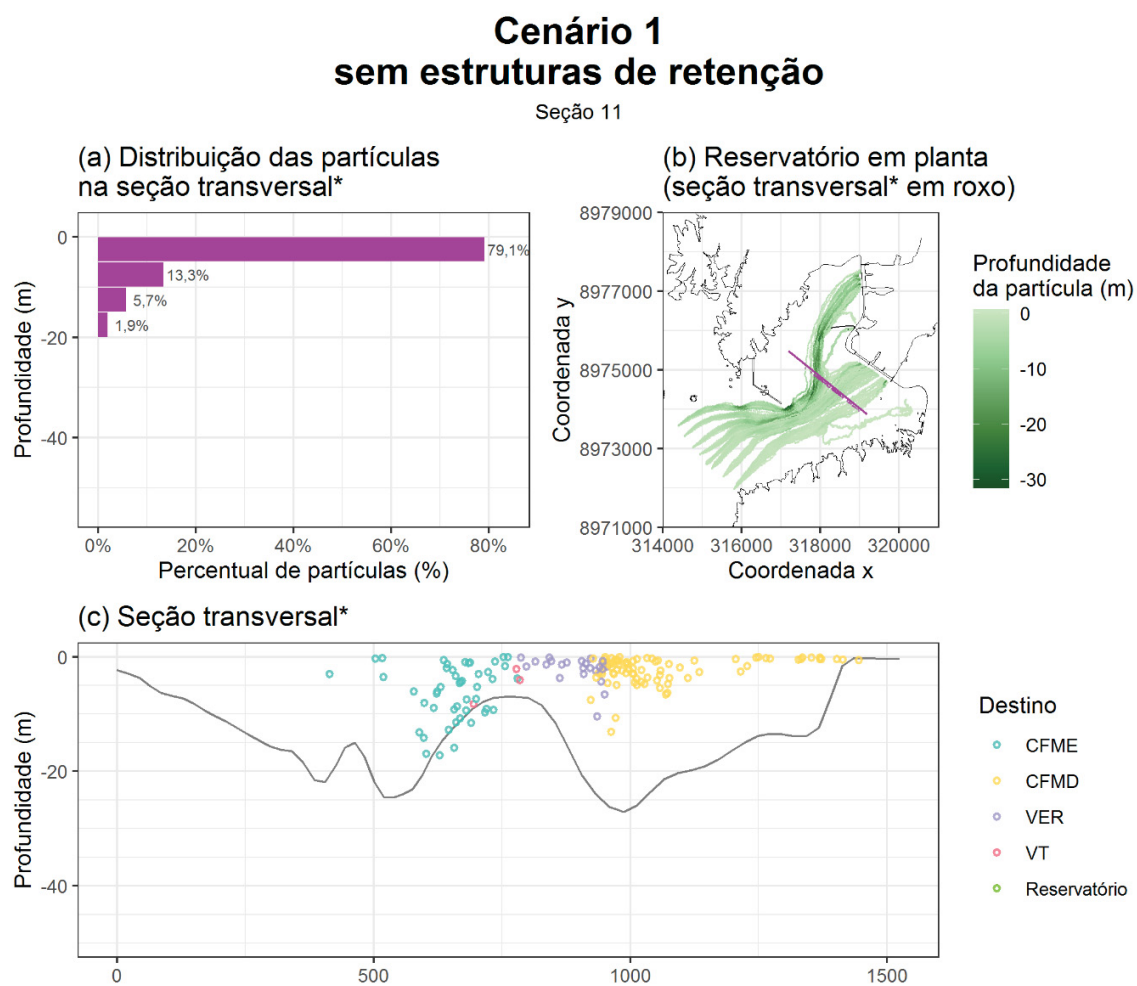


FONTE: A autora (2022).

Da Figura 58 até a Figura 60 são representadas a influência das estruturas de retenção na distribuição vertical das partículas para o cenário 1 de operação nas três situações, respectivamente (“sem estruturas de retenção”, “com *log boom* superficial” e “com *log boom* superficial e retentores/desviadores de meia água”).

É possível observar as partículas desviando das estruturas de retenção, passando por baixo. Por isso a porcentagem de partículas na superfície é menor quando há presença de estruturas de retenção.

Figura 58 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - sem estruturas de retenção



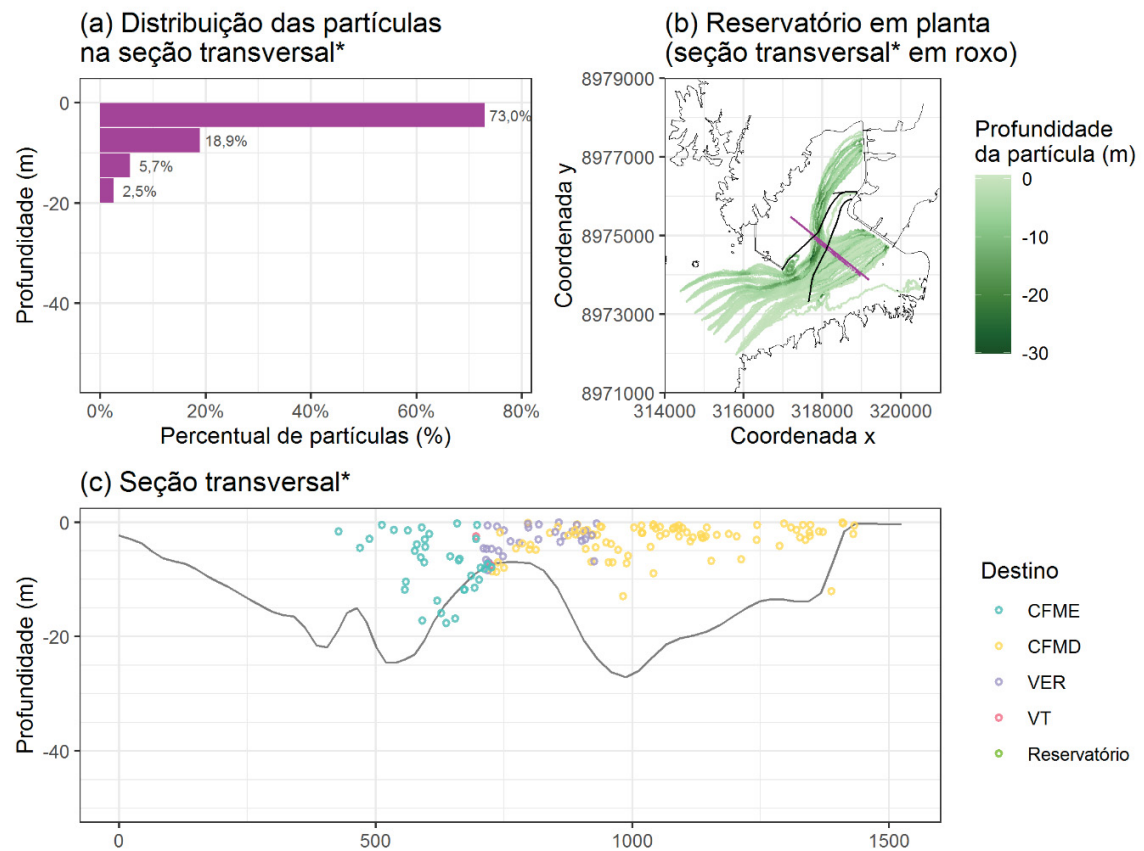
*Seção transversal entre as coordenadas UTM: (317186, 8975477) e (319181, 8973881)

FONTE: A autora (2022).

Figura 59 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - com *log boom*

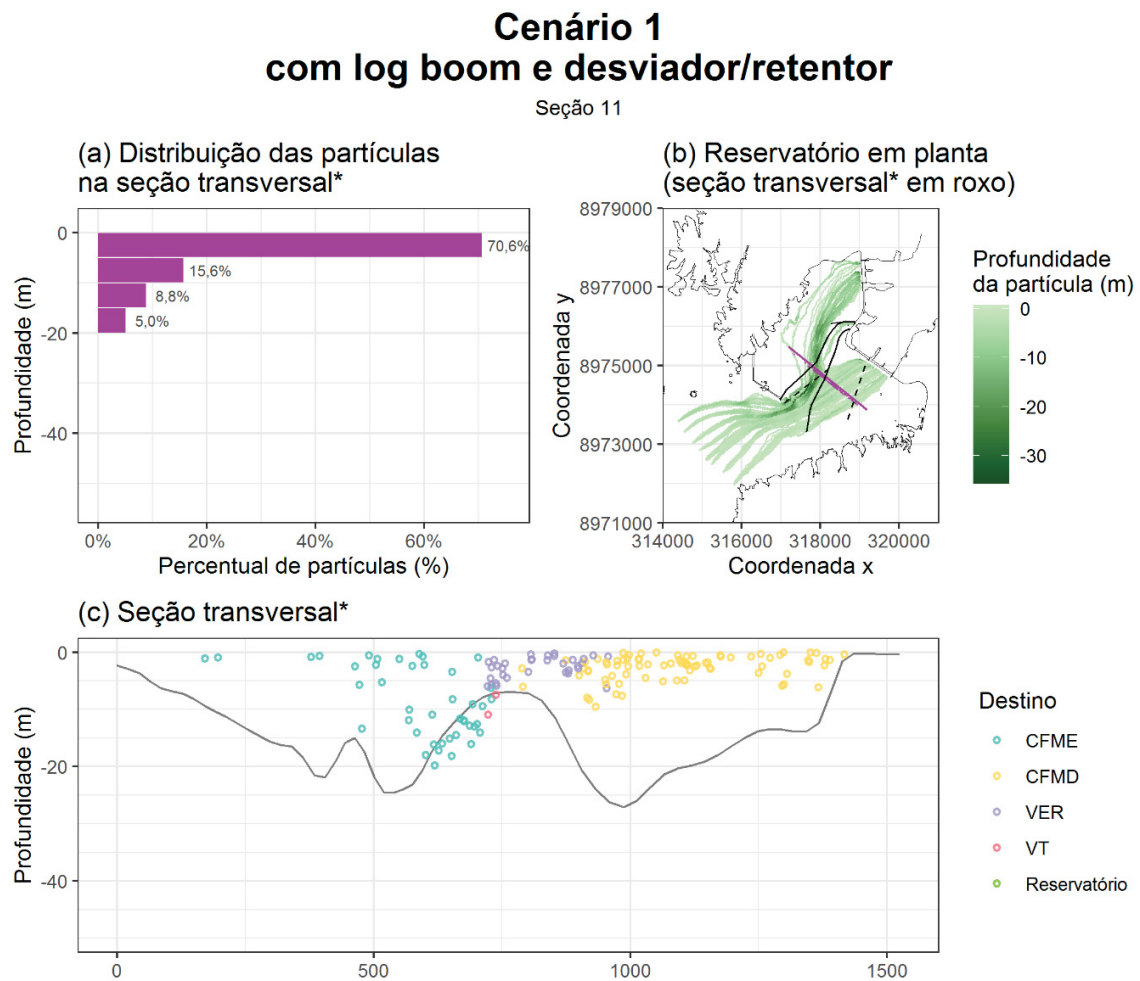
Cenário 1 com log boom

Seção 11



*Seção transversal entre as coordenadas UTM: (317186, 8975477) e (319181, 8973881)

FONTE: A autora (2022).

Figura 60 – Distribuição vertical de partículas para o cenário 1 - com *log boom* e desviador/retentor

*Seção transversal entre as coordenadas UTM: (317186, 8975477) e (319181, 8973881)

FONTE: A autora (2022).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo estudar a dinâmica do transporte de troncos através de um modelo tridimensional de partículas no rio Madeira, caracterizar a hidrodinâmica do reservatório onde está localizada a UHE Jirau, analisar a influência de diversos cenários de operação da usina e representar matematicamente estruturas retentoras de troncos, como os *log booms* superficiais e retentores/desviadores de meio água.

Os resultados apresentados mostraram que foi possível calibrar o modelo hidrodinâmico para representar as principais variações do ambiente físico da região, sendo abordadas as variações de nível, velocidades médias na vertical e campos de velocidades tridimensionais.

A modelagem hidrodinâmica teve como objetivo um melhor entendimento da dinâmica das águas em diferentes cenários incluindo as variáveis hidrológicas, estruturas retentoras e operação do reservatório, o que proporcionou representar o transporte de troncos, que por sua vez subsidiará a UHE Jirau nas suas operações e projetos de melhorias nos *log booms*, por exemplo.

As trajetórias das partículas foram condizentes com a distribuição de vazões e com a inserção das estruturas de retenção de troncos. Foi verificada facilidade de chegada na região da CFMD após a passagem pelo estrangulamento, mesmo quando inseridas as estruturas de retenção de troncos. Nos cenários B e F, casos em que não houve o funcionamento da CFME, nenhuma partícula se dirigiu ao lado esquerdo do reservatório, nem mesmo ao vertedouro de troncos. O vertedouro de troncos se mostrou pouco atrativo nessa modelagem, devido à corrente principal seguir em direção as estruturas com maior vazão.

As partículas não possuem massa nem forças atuantes, apenas seguem o escoamento com componentes difusivos, por isso ao encontrar alguma estrutura retentora elas tendem a desviar passando por baixo.

A simulação de partículas pode ser reproduzida de duas formas extremas. Uma delas é seguindo o escoamento tridimensional, assim passando por baixo das estruturas sem aglomerar. Outra maneira é através de partículas que seguem apenas em superfície. Esse efeito pode ser representado por partículas sem características submergentes, como o exemplo de partículas de óleo e a modelagem com drogas. Ambos representam partículas completamente

superficiais que seguem o escoamento, porém drogues não sofrem efeitos turbulentos, apenas efeitos de velocidades na primeira camada do modelo. Nesses casos as estruturas retentoras se mostraram eficientes.

Foi possível representar os troncos através de partículas no modelo tridimensional. Essa simulação não permite que sejam atribuídas formas, volume ou massa às partículas o que acaba distanciando os resultados da realidade, pois os troncos se aglomeram entre si e tendem a ficarem presos em obstáculos. Assim, não houve influência significativa das estruturas para reter esse material lenhoso através dessa simulação. O software FLOW-3D também é capaz de modelar o transporte de troncos em rios, porém ele permite simulações detalhadas de interações fluido-objeto, incluindo a representação tridimensional de troncos atribuindo volume e formas a este objeto.

A operação da usina foi modificada com base nos resultados apresentados em Caldatto et al. (2022) e foi possível concluir que há uma necessidade de operação conjunta entre o vertedouro principal e o vertedouro de troncos visando obter uma vazão adequada ao material lenhoso. Um novo projeto de *log boom* foi instalado recentemente, e essas novas alterações da usina tem gerado efeitos positivos e importantes para o manejo de troncos.

Com relação ao contexto de reservatórios hidrelétricos, a pesquisa na literatura demonstrou que ainda faltam estudos nesse aspecto. São poucos casos que foram validados em campos e os parâmetros para modelagem ainda não foram totalmente esclarecidos. Alguns modelos foram aplicados para situações simplificadas de canais retangulares, porém não são aplicáveis para as dimensões e complexidade de Jirau e sua quantidade de troncos.

A simulação tridimensional de troncos é uma obra inédita na literatura, ainda com algumas limitações e desafios para serem aprofundados. Essa pesquisa abre portas para possíveis estudos futuros que podem aprofundar ainda mais o entendimento sobre o assunto, como por exemplo:

- Modelo Reduzido: Futuras pesquisas podem se concentrar na realização de experimentos em modelo reduzido para coletar dados detalhados sobre a interação entre troncos e fluxo de água.
- Modelagem Numérica Avançada: Utilizar modelos de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) avançados e precisos para representar tridimensionalmente os troncos e sua influência no escoamento.

- Impacto Ecológico: Investigar o impacto dos troncos no ecossistema aquático em níveis mais amplos. Estudos futuros podem abordar a influência dos troncos na biodiversidade, habitat de espécies aquáticas e o papel dos troncos como substrato para organismos.

Estudos futuros contribuirão para ampliar o conhecimento sobre a interação entre troncos e escoamento em rios e poderão fornecer informações práticas e teóricas para orientar as decisões de gestão e preservação dos ecossistemas fluviais.

REFERÊNCIAS

- BACIA DO RIO AMAZONAS. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Bacia_do_rio_Amazonas&oldid=63707515>. Acesso em: 1 out. 2022.
- BAPTISTELLI, S. C. Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da baixada santista (estado de São Paulo). Tese de Doutorado. Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- BARGHOUTH, M. R. et al. Transporte de material lenhoso em ambientes fluviais: proposta de monitoramento como ferramenta de manejo no contexto de usinas hidrelétricas. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, 26, Rio de Janeiro. 2022.
- BLADÉ, E.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; RUIZ-VILLANUEVA, V. Strategies in the 2D numerical modelling of wood transport in rivers. **River Flow**. Londres. 2016.
- BLADÉ, E.; RUIZ-VILLANUEVA, V.; STOFFEL, M.; CORESTEIN, G. Challenges of numerical modelling of flow, sediment and wood in rivers. **Proceedings of the third International Conference of Wood in World Rivers**. 2016.
- CALDATTO, I. R.; BECKER, A. C. C.; DARU, R. L.; BLENINGER, T. B.; POLLI, B. A.; PENTEADO, R. A.; FREITAS, C.; SILVA, D.; PINTO, V. Simulação tridimensional de transporte de troncos no rio Madeira. **XXX Congresso Latinoamericano de Hidráulica**. Agua, Ambiente y Sociedad del Conocimiento, v. 6a, p. 613-623, 2022.
- CONSTRUSERV SERVIÇOS GERAIS LTDA. Plano de trabalho para a campanha de batimetria do reservatório da UHE Jirau – Rio Madeira. Janeiro 2020.
- COPPETEC. Modelagem de hidrodinâmica ambiental, qualidade de água e processos sedimentológicos em rios conexos ao aproveitamento hidroelétrico Jirau. R5 Relatório de modelagem de processos sedimentológicos no reservatório de AHE Jirau. Rosman, P.C.C. Rio de Janeiro. 2011.
- COTRIM, J. R. K.; FRIEDRICH, M. F. Estimativas de velocidades nos *Log Booms* em modelo computacional. AHE Jirau. Relatório 1, revisão 0. Maio 2018.
- DELTARES. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, **User Manual Hydro-Morphodynamics**, Version: 4.05.78229, 2023a. Disponível em: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>
- DELTARES. D-Waq Part, Simulation of mid-field water quality and oil spills, using, particle tracking, **User Manual D-Water Quality**, Version: 2.15.77723, 2023b. Disponível em: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>

ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (ESBR). Nota técnica - Anexo 1 - Revisão do Estudo de Vazão máxima de dimensionamento de vertedouro para a UHE Jirau. 110-JI-CEP-0024-09. LEME Engenharia Ltda. Novembro 2009.

ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (ESBR). Nota técnica - Diretrizes Operativas do Reservatório da UHE Jirau na Cheia de 2019. NT-GHID-RS-010-00. Setembro 2018.

ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (ESBR). PSB – Plano de Segurança de Barragem UHE Jirau. PL-CIVI-US-001. Janeiro 2019.

ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (ESBR). Relatório Técnico - UHE Jirau - Estudo de Remanso 2020 - Atualização do Modelo Hidráulico do Reservatório. RT-CHID-RS-001-20-00. Dezembro 2020.

FIEDLER, M.F.M.; ANA; ITAIPU. Modelagem da qualidade da água em reservatórios. Unidade 2: Fundamentos da teoria da dinâmica dos fluidos.

Agência Nacional de Águas. 2020. Disponível em:
<https://dspace.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/2187>

FRAGOSO JUNIOR, C. R.; LINS, R. C.; BLENINGER, T. B. Mecânica dos Fluidos para Engenharia e Ciências Ambientais. **ABRHidro**, v. 1, 458p, 2021.

GERRITSEN, H., GOEDE, E.D., PLATZEK, F.W., VAN KESTER, J.A. Th.M., GENSEBERGER, M., Uittenbogaard, Validation Document Delft3D-Flow, A software system for 3D flow simulations, Deltares, 2008.

KATSUNO, E. T.; CASTRO, F. S.; DANTAS, J. L. D. Hydrodynamic analysis of debris containment grids in hydropower plant using porous media. **4th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. Curitiba. 2017.

KATSUNO, E. T.; ESTEVES, F. R.; GOMES, G. G.; DANTAS, J. L. D. Porous formulation for hydrodynamic simplification of debris containment grid. **27º Congresso Internacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore**. Rio de Janeiro. 2018.

KIM, M.; LEE, S.; KWON, T.; CHOI, S.; JEON, J. Sensitivity analysis of influencing parameters on slit-type barrier performance against debris flow using 3D-based numerical approach. **International Journal of Sediment Research**, 2020.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 3: Revisão Bibliográfica. Abril 2021.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica. Abril 2021.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica. Agosto 2021.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica. Dezembro 2021.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica. Abril 2022.

Lactec. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Relatório Técnico – Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica. Agosto 2022.

LE LAY, Y. F.; PIÉGAY, H.; MOULIN, B. Wood entrance, deposition, transfer and effects on fluvial forms and processes, problem statements and challenging issues. In: SHRODER (ed). **Treatise on Geomorphology**, vol. 12. Academic Press. San Diego, California. 2013.

RUIZ-VILLANUEVA, V.; CASTELLET, E. B. ; DíEZ-HERRERO, A.; BODOQUE, J. M. SÁNCHEZ-JUNY, M.; Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. **Earth Surface Processes And Landforms**, Espanha, v. 39, p. 438-449, 2013.

RUIZ-VILLANUEVA, V.; BLADÉ, E.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; MARTI-CARDONA, B.; DíEZ-HERRERO, A.; BODOQUE, J. M. Two dimensional modelling of large wood transport. **Journal of Hydroinformatics**, IWA Publishing, p. 1077- 1096, 2014a.

RUIZ-VILLANUEVA, V.; BLADÉ, E.; DíEZ-HERRERO, A.; BODOQUE, J. M. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. **Natural Hazards**, v. 74, p. 967- 987, 2014b.

RUIZ-VILLANUEVA, V.; PIÉGAY, H.; GURNELL, A. M.; MARSTON, R. A.; STOFFEL, M. Recent Advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 54, n. 3, p. 611-652, 2016.

SCHALKO, Isabela. Modeling hazards related to large wood in rivers. Tese de Doutorado. ETH Zurich. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000293084>.

SCHALKO, Isabella; SCHMOCKER, Lukas; WEITBRECHT, Volker; BOES, Robert M. Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers. **Journal Of Hydraulic Research**, [S.L.], v. 58, n. 4, p. 566-581, 18 jul. 2019. Informa UK Limited.

SCHALKO, Isabella; SCHMOCKER, Lukas; WEITBRECHT, Volker; BOES, Robert M. Risk reduction measures of large wood accumulations at bridges. **Environmental Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 485-502, 19 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

SEO, J. I.; NAKAMURA, F.; CHUN, K. W. Dynamics of large wood at the watershed scale: A perspective on current research limits and future directions. **Landscape Ecology Engineering**, n. 6, p. 271–287. 2010.

THEMAG. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau: Projeto Executivo. Vertedouro Curvas Cota x Vazão. N° Themag: 6828-50-VE-810-DE-35882, N° ESBR: 1020-JI2-DE-VTC/HH-00041-0A. 2013.

THEMAG. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau: Projeto do Log Boom. Especificação de simulações hidrodinâmicas no modelo matemático TELEMAT 3D. N° Themag: 7419-01-GL-810-RT-00010, N° ESBR: 1020-JI2-TR-LOC/HH-00002-0C. 2018.

THEMAG. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau: Projeto do Log Boom. Canal de adução Ilha do Padre – Estimativa das escavações – Planta de localização das seções. N° Themag: 7419-01-GL-810-DE-00024, N° ESBR: 1020-JI2-DE-LOC-HH-00002-0A. 2019.

THEMAG. Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD. Cenários para Modelagens no Modelo Matemático. N° Themag: 7481-01-GL-810-ET-00018-0A. 2022.

WOHL E., BLEDSOE B. P., FAUSCH K. D., KRAMER N., BESTGEN K. R., GOOSEFF M. N. Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**. v. 52, n. 2, p. 315–335, 2016.

ZISCHG. A. P.; GALATIOTO, N.; DEPLAZES, S.; WEINGARTNER, R.; MAZZORANA, B. Modelling Spatiotemporal Dynamics of Large Wood Recruitment, Transport, and Deposition at the River Reach Scale during Extreme Floods. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1134, 2018.

ZUANON, J., & VILARA, G. T. Associação entre peixes e raízes adventícias de plantas epífitas em afluentes do alto rio Madeira. IN: VII Congresso de Ecologia do Brasil. Caxambu – MG. 2005.

APÊNDICE 1

CALIBRAÇÃO

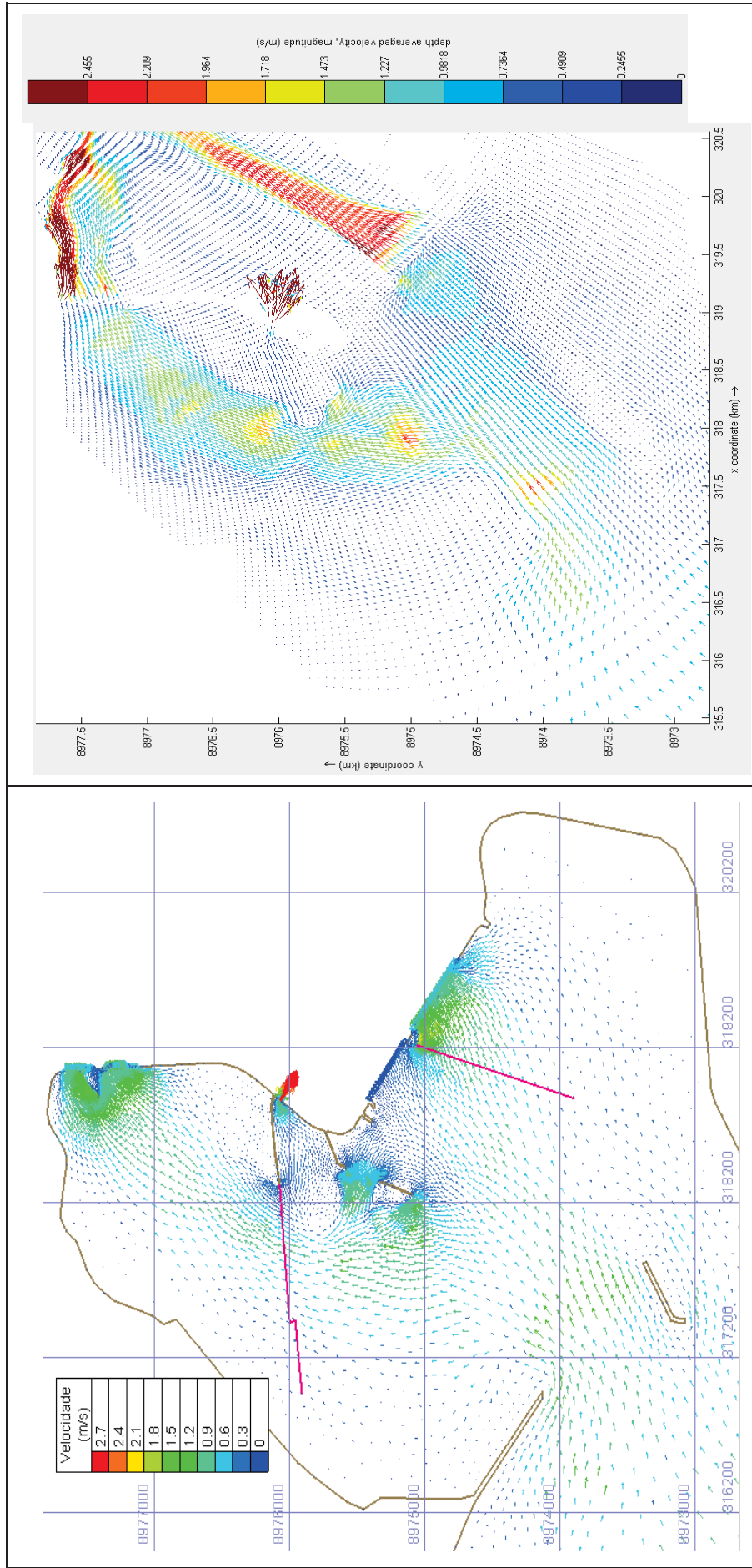
Neste apêndice estão representados todos os métodos para verificação e calibração do modelo. Esta seção foi extraída do Relatório Técnico Lactec – novembro 2021.

COMPARAÇÃO DA MODELAGEM EM DELFT3D COM A MODELAGEM NO TELEMAC

O modelo Telemac é um modelo 3D (tridimensional) de elementos finitos que foi utilizado por Cotrim e Friedrich (2018) na modelagem do reservatório de Jirau no qual utilizaram elementos da malha triangulares.

O resultado do campo de velocidades deste estudo foi comparado com os resultados da modelagem em Delft3D e são apresentados na Figura 1.1 sendo a imagem da esquerda o Telemac e o da direita o Delft3D. As simulações foram feitas para as mesmas situações de vazão afluyente e operação das casas de forças e vertedouros. Nota-se, de maneira geral, a mesma magnitude das velocidades e a mesma tendência de direção do fluxo.

Figura 1.1 – Comparação dos resultados do Telemac (esquerda) e Delft3D (direita).



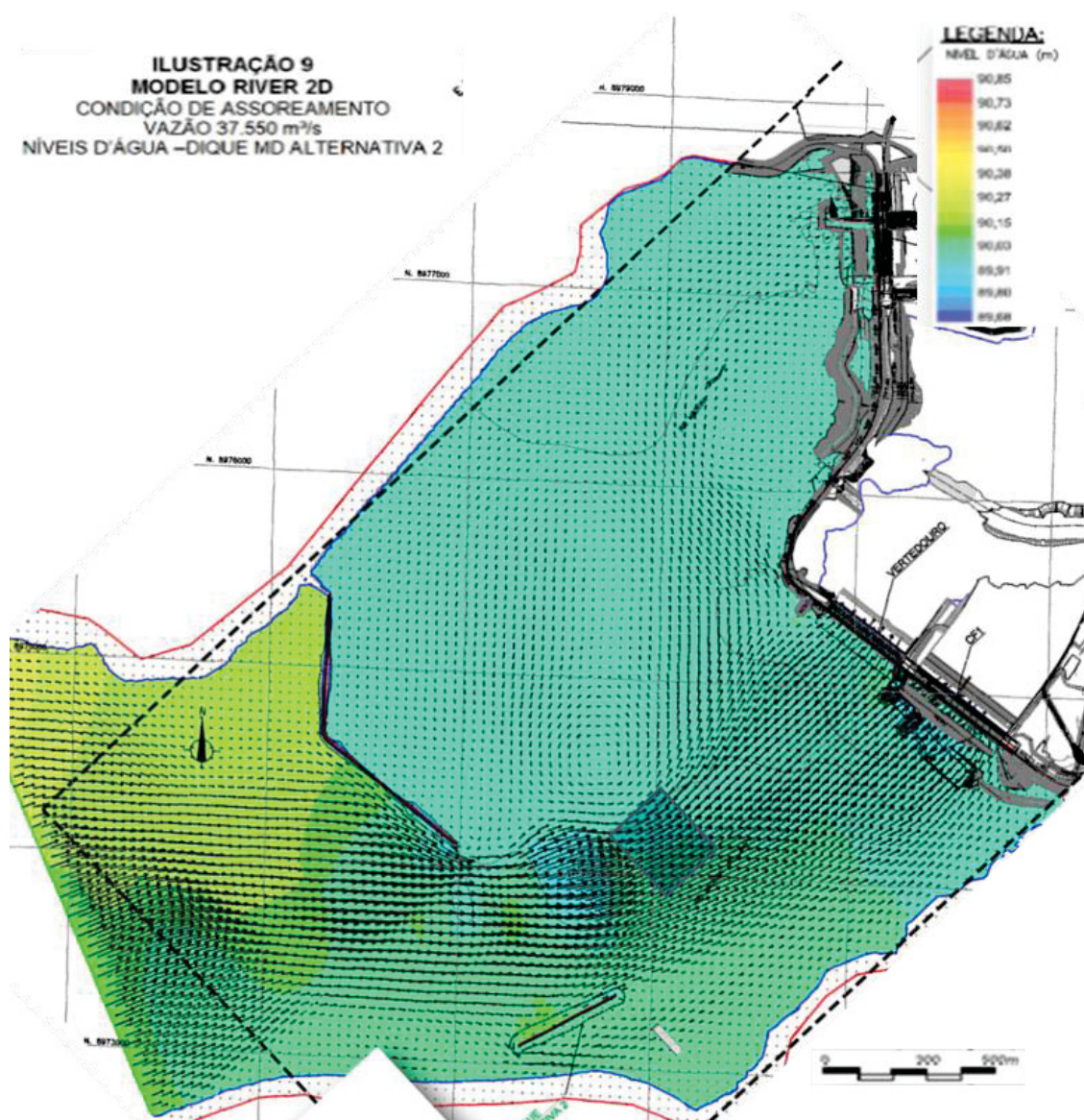
Fonte: Lactec (2021).

COMPARAÇÃO DA MODELAGEM NO DELFT3D COM A MODELAGEM NO RIVER2D

Os resultados dos níveis de água da modelagem em Delft3D foram comparados como os resultados utilizando o River 2D (Themag, 2021), e são apresentados na Figura 1.2 e Figura 1.3. No Delft3D, o nível zero corresponde a cota ortométrica de 90 metros. Nota-se, de maneira geral, a mesma tendência nas cotas ao longo do reservatório. É importante destacar que:

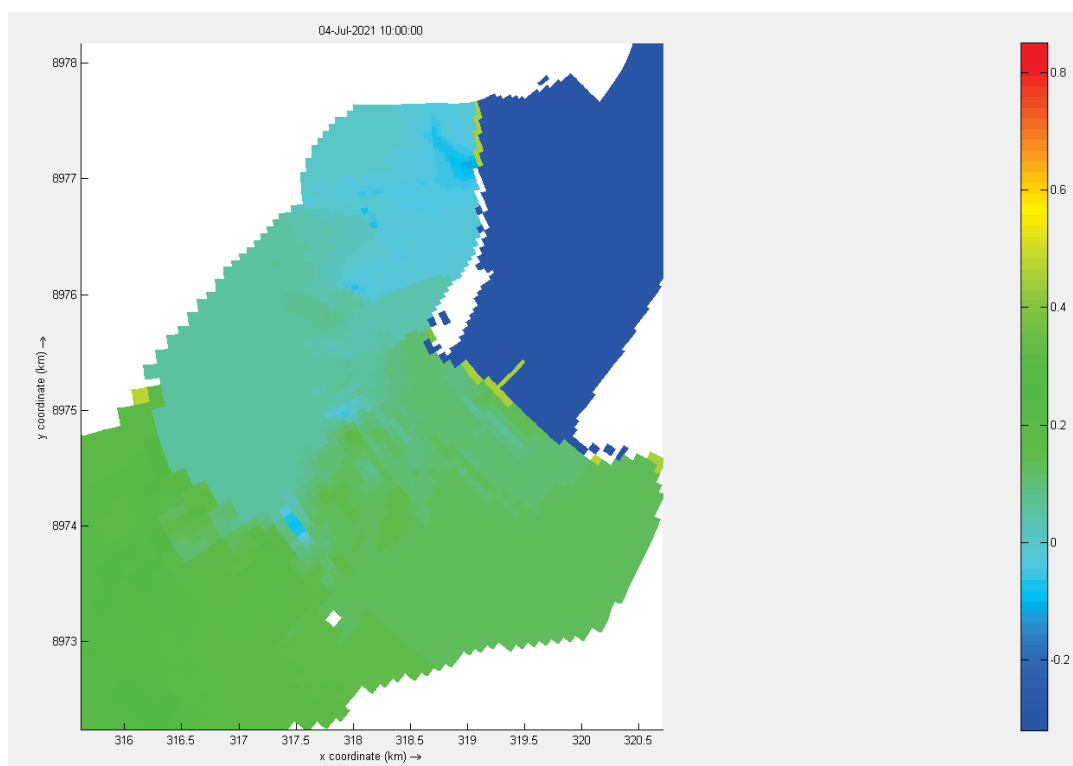
- Ambos modelos mostraram que o nível do reservatório é praticamente constante a montante da barragem;
- Há diferença de nível entre as regiões a montante e a jusante dos diques, devido à presença dos diques;
- Há uma pequena diferença de nível entre a região mais próxima da margem esquerda com a região mais próxima da margem direita.

Figura 1.2 – Resultados de nível de água do River2D.



Fonte: Themag (2021)

Figura 1.3 – Resultados de nível de água do Delft3D



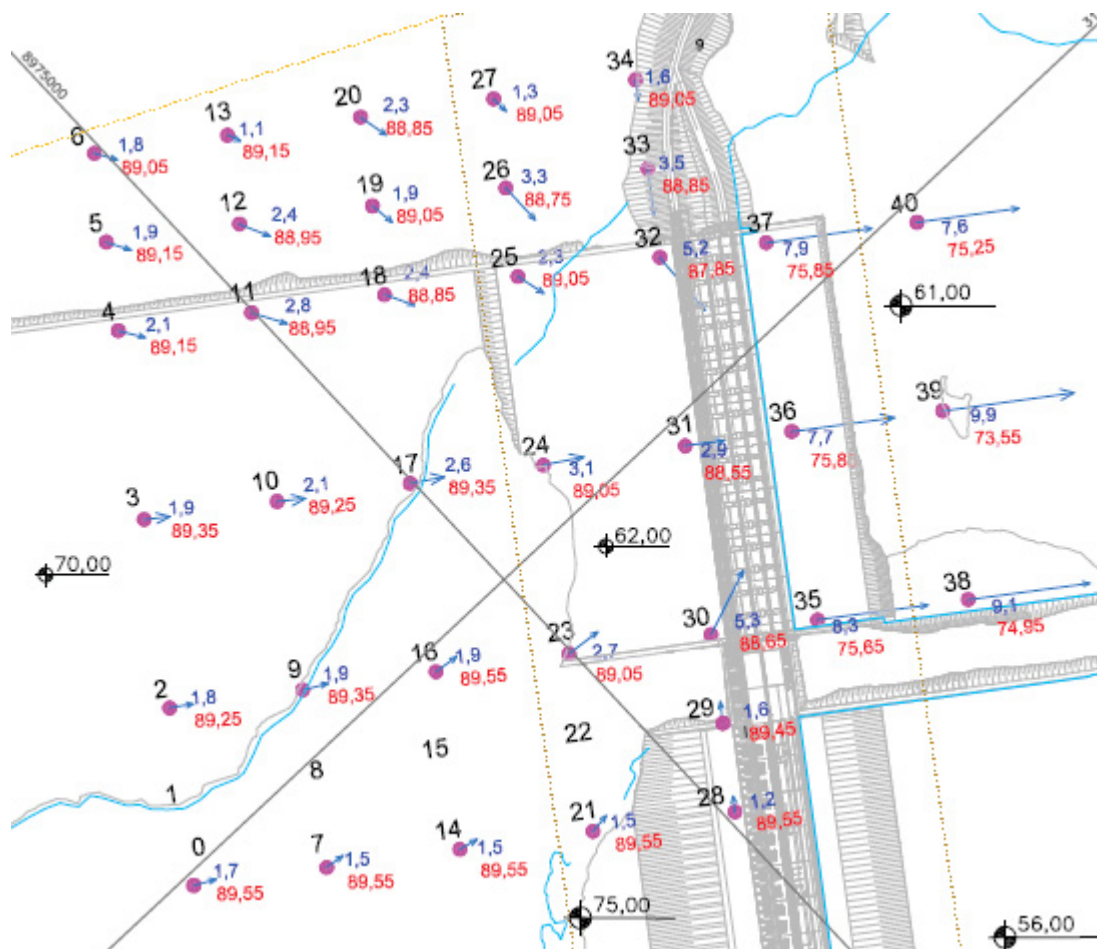
Fonte: Lactec (2021).

COMPARAÇÃO DA MODELAGEM NO DELFT3D COM O MODELO FÍSICO REDUZIDO

Realizou-se uma simulação no Delft3D correspondente ao ensaio 3 realizado no modelo físico reduzido (MFR) (Sogreah, 2011) que corresponde à uma vazão de $52.927 \text{ m}^3/\text{s}$ e também para uma vazão total de $37.800 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 1.4 apresenta o resultado do ensaio 3 no MFR e a Figura 1.5 apresenta um gráfico comparativo dos níveis de água na aproximação do vertedouro (pontos 3, 10, 17 e 24) para as condições de vazão deste ensaio 3 e a Figura 1.6 apresenta a comparação das velocidades. A Figura 1.7 e a Figura 1.8 apresentam os resultados para a vazão de $37.800 \text{ m}^3/\text{s}$.

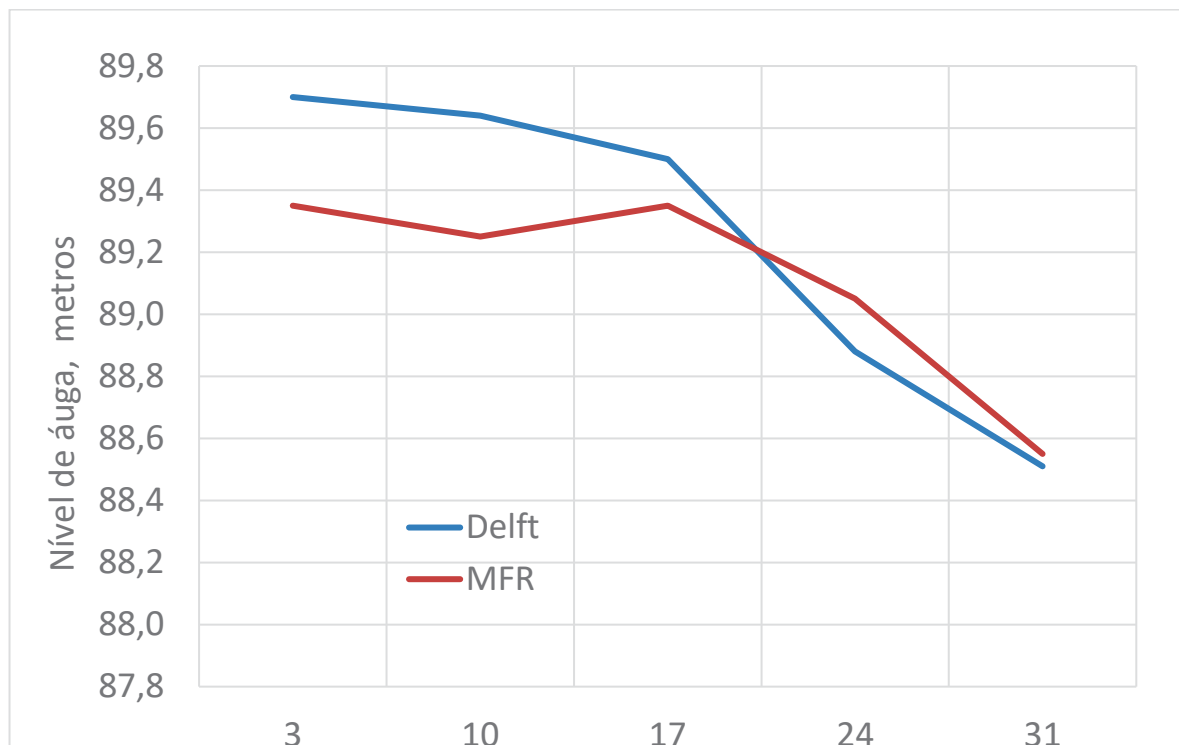
A velocidade do MFR e do Delft3D são similares como se observa na Figura 1.7 e na Figura 1.8, em torno de $1,5 \text{ m/s}$ no ponto 8. No local da aproximação do vertedouro os valores de níveis e velocidades tem a mesma tendência. A diferença nos valores pode ser explicada pela diferença de batimetria do MFR (batimetria de projeto) e do Delft3D (batimetria de 2020 e 2021).

Figura 1.4 – Resultado do MFR para vazão de 52.957 m³/s (ensaio 3). Níveis em cor vermelha, velocidades em cor azul.



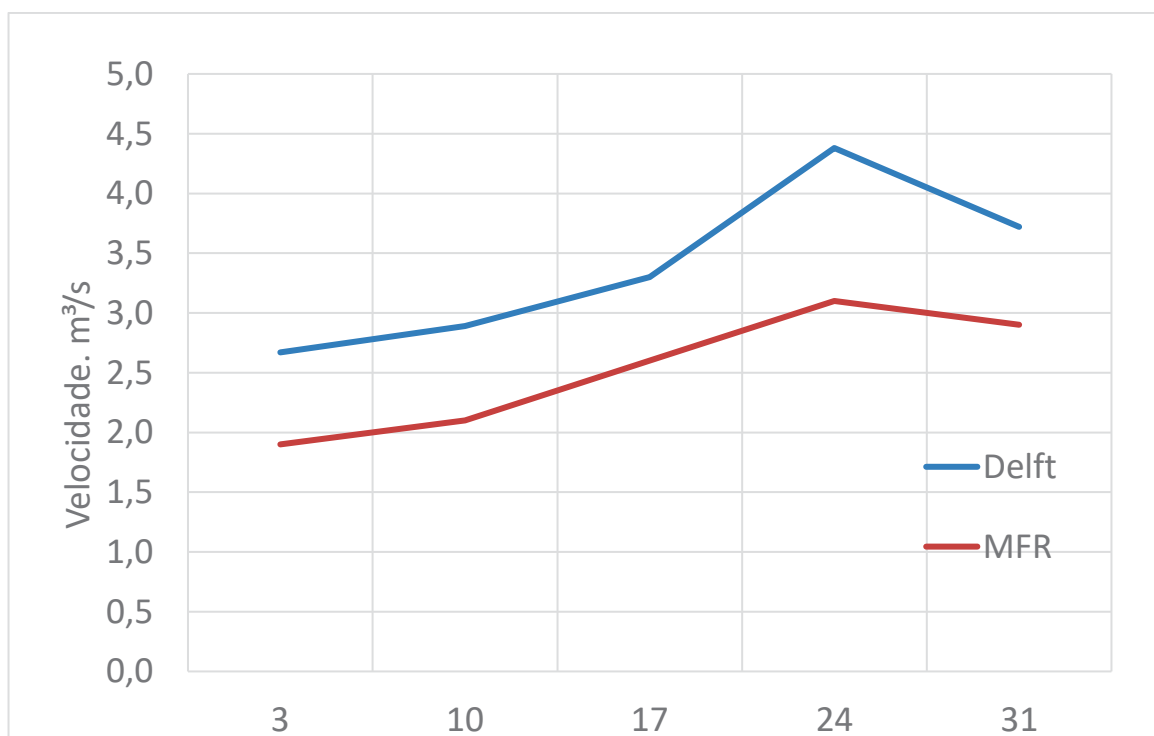
Fonte: Sogreah (2011).

Figura 1.5 – Comparação dos níveis de água entre Delft e MFR nos pontos 3,10,17,24 e 3, aproximação do vertedouro.



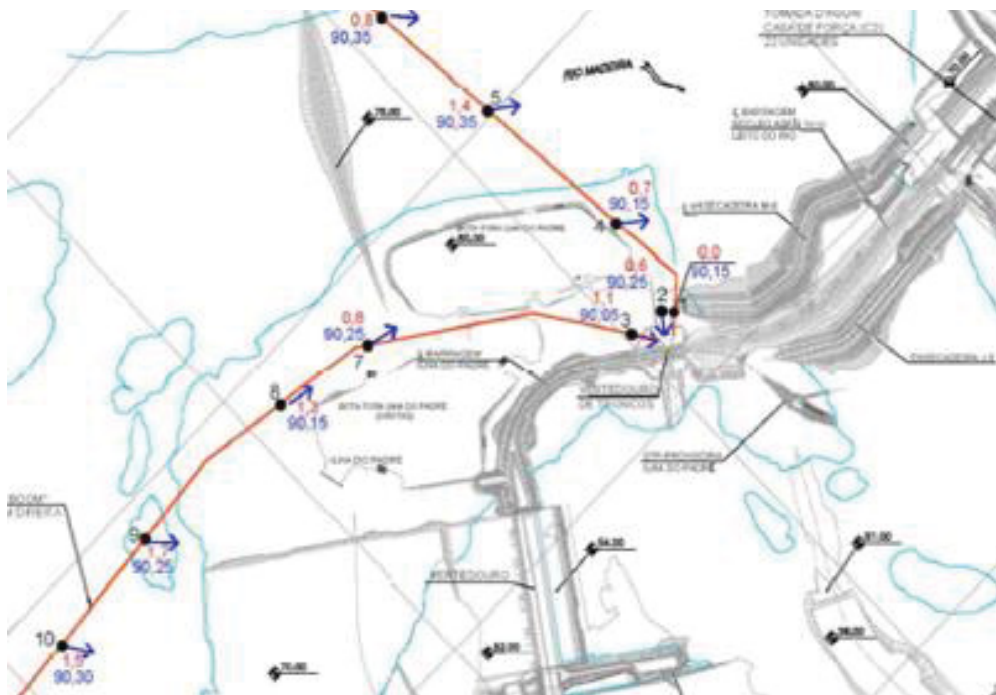
Fonte: Lactec (2021).

Figura 1.6 – Comparação das velocidades Delft e MFR nos pontos 3,10,17,24 e 3, aproximação do vertedouro.



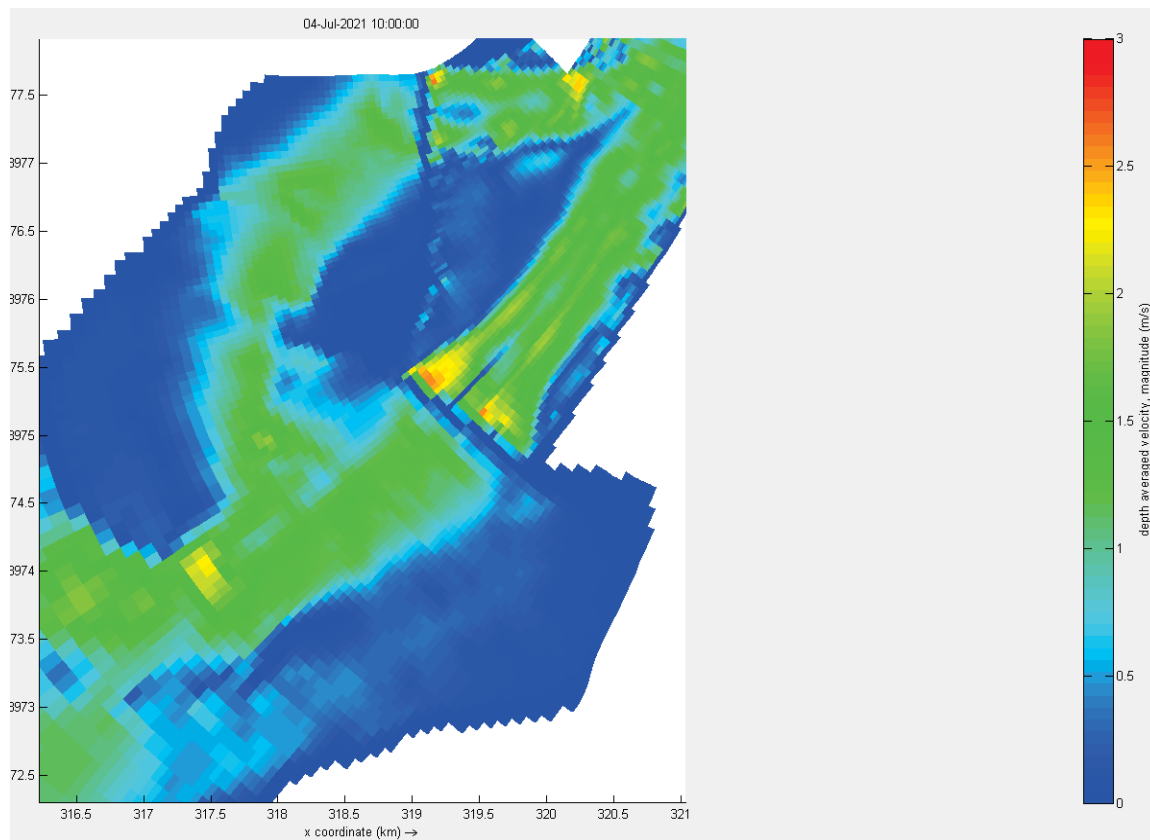
Fonte: Lactec (2021).

Figura 1.7 – Resultados do MFR para vazão de 37.800 m³/s.



Fonte: Sogreah (2011).

Figura 1.8 – Velocidades (magnitude) obtidas do Delft para vazão total de 37.800 m³/s.

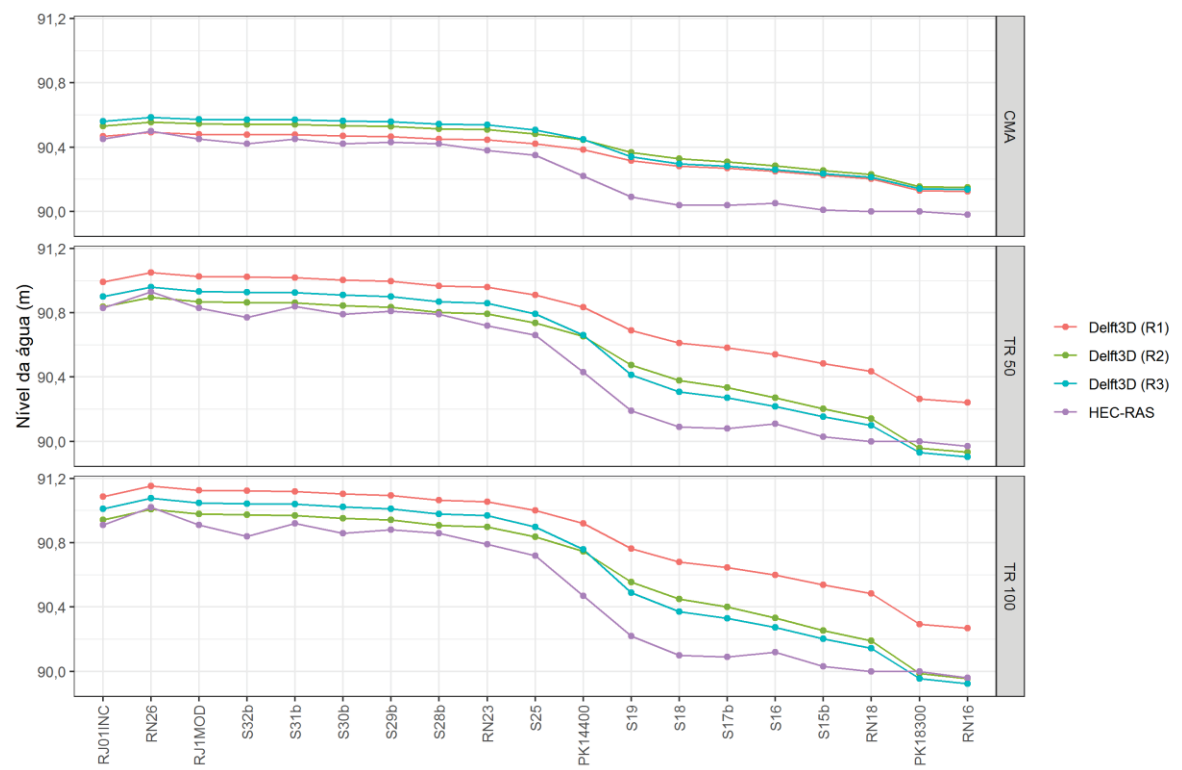


Fonte: Lactec (2021).

COMPARAÇÃO DO MODELO DELFT3D COM O MODELO HEC-RAS

A Figura 1.9 apresenta a comparação do perfil longitudinal, de montante (esquerda) para jusante (direita), do nível de água no reservatório obtido pelo modelo Delft3D e pelo modelo HEC-RAS (1D). No eixo X, são apresentados os nomes das seções transversais ao rio com a mesma nomenclatura implantada no HEC-RAS (ESBR, 2020). Na Figura 1.9, CMA é a cheia média anual e TR50 e TR100 são cheias para tempos de recorrência de 50 e 100 anos, respectivamente. As linhas R1, R2 e R3 correspondem a três diferentes rugosidades simuladas pelo modelo. Adotou-se a rugosidade R3 que corresponde a Manning igual a 0,045 entre 2 a 4,5 km a montante do dique e 0,036 no restante da área modelada. A diferença no nível de água foi inferior a 20 cm aproximadamente. A rugosidade R1 corresponde a Manning de 0,035 em toda a região, e R2 com Manning de 0,040 e 0,036 nas mesmas regiões já citadas para o R3.

Figura 1.9 – Comparação do Modelo Delft3D com o modelo HEC-RAS



Fonte: Lactec (2021).

COMPARAÇÃO DO MODELO DELFT3D COM AS MEDIÇÕES DO ADCP

O ADCP é um equipamento acústico que utiliza o efeito Doppler transmitindo pulsos sonoros e captando o eco que retorna das partículas em suspensão. O resultado é apresentado em *pixels* onde cada *pixel*, numa seção transversal, tem o valor da intensidade e direção da velocidade de água. Por integração na seção obtém-se as vazões que passam numa seção. A Figura 1.10 apresenta a localização da seção onde ocorre regularmente medições de vazões e velocidades por ADCP, cujos dados foram fornecidos pela Jirau Energia.

Dentre as várias medições com ADCP neste local escolheu-se 4 datas, apresentadas na Tabela 1.1, para representar cenários de vazões baixas, vazões altas e duas vazões intermediárias. Foi utilizado o modelo Delft3D para simular a situação ocorrida nestas 4 datas, utilizando as informações operativas da usina (nível do reservatório, vazões afluentes, vazões vertidas em cada comporta do vertedouro e vertedouro de troncos e vazões turbinadas em cada unidade das duas casas de forças).

Com o objetivo de calibrar, verificar o modelo e entender o fluxo hidrodinâmico desta região, foi realizada a comparação das medições de ADCP com os resultados da simulação do Delft3D neste local. Da Figura 1.11 até a Figura 1.26 são apresentadas estas comparações. A magnitude das velocidades é representada pelas cores na seção transversal, sendo velocidades horizontais na Figura 1.11 e velocidades verticais na Figura 1.12. A direção do fluxo é apresentada na Figura 1.13 pelos vetores em planta e na Figura 1.14 pelo ângulo das velocidades horizontais em cores na seção transversal. As primeiras quatro figuras correspondem ao cenário de vazão alta, e as figuras subsequentes representam, na mesma ordem, as comparações realizadas para os outros três cenários.

Figura 1.10 – Seção das medições do ADCP

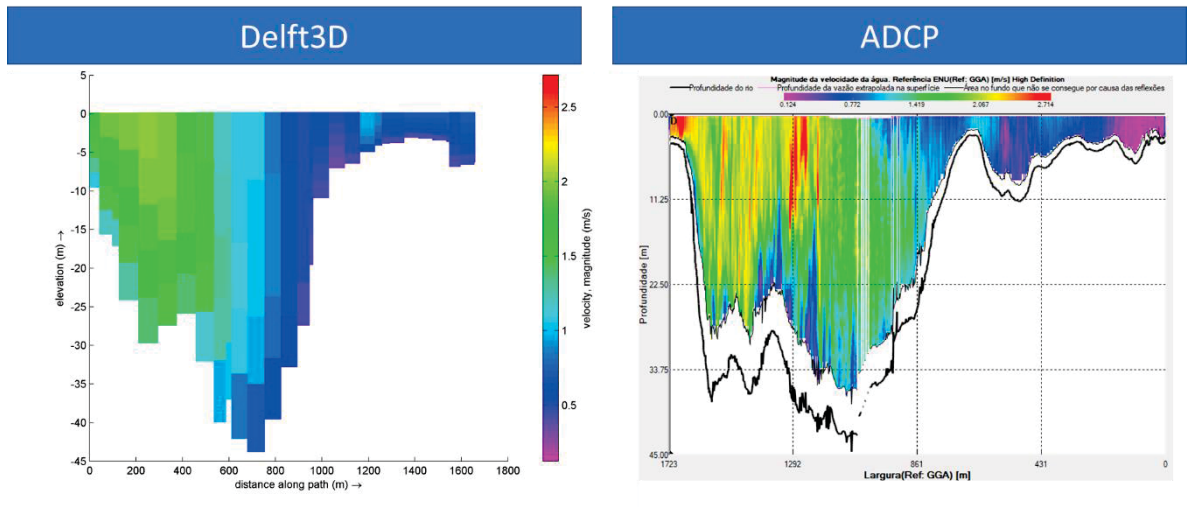


Fonte: A autora (2021).

Tabela 1.1 – Cenários para comparação com o ADCP

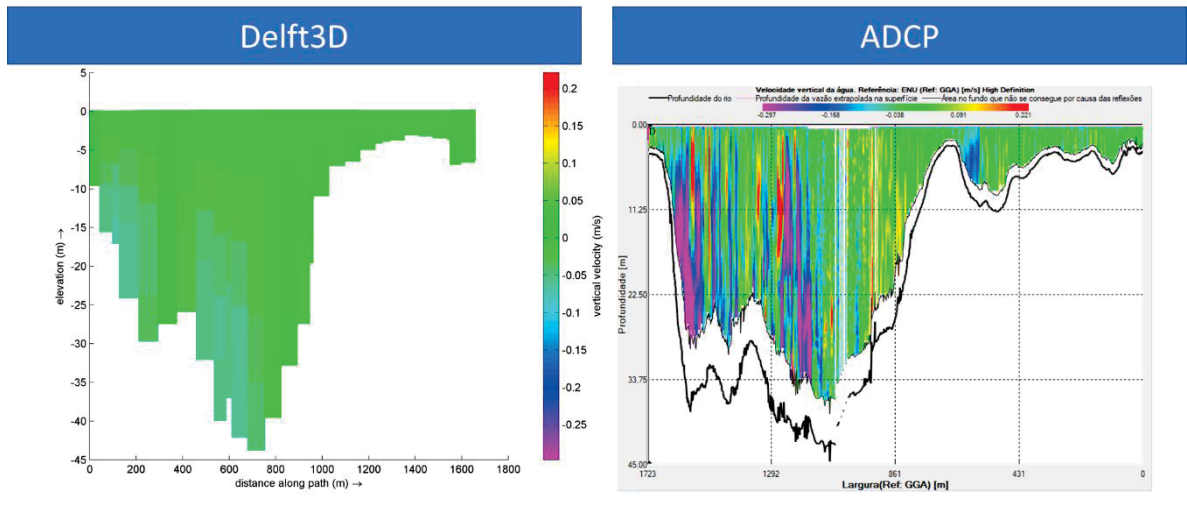
Cenário	Data	Vazão (m³/s)
Vazão alta	25/02/2019	41.589,86
Vazão intermediária	11/02/2017	20.071,94
Vazão baixa	16/08/2018	6.808,17
Vazão mais baixa	09/08/2016	3.598,66

Figura 1.11 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 m³/s – 25/02/2019



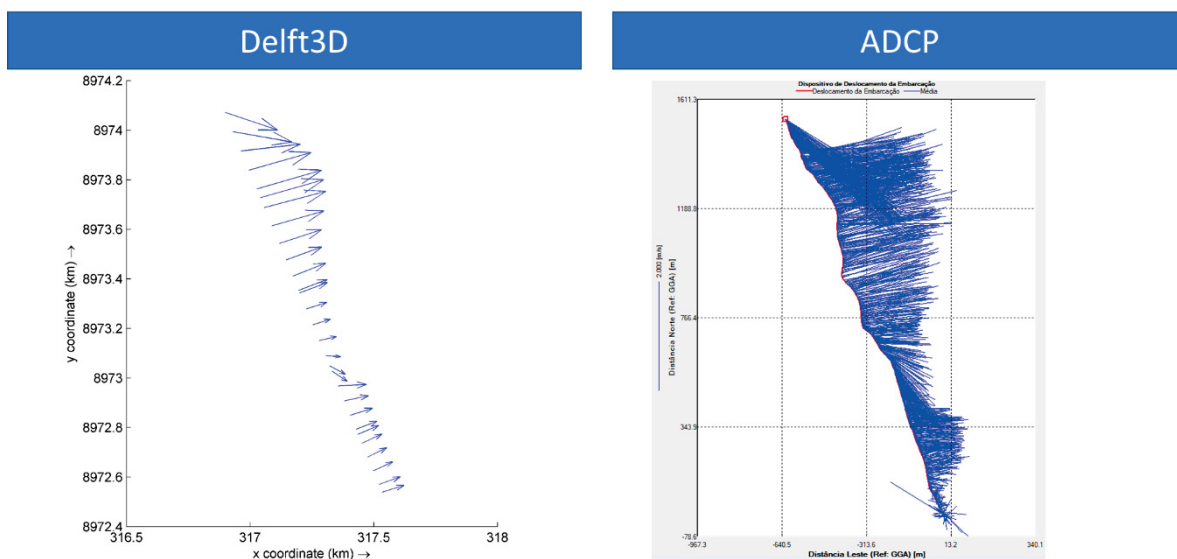
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.12 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão alta: 41.589,86 – 25/02/2019



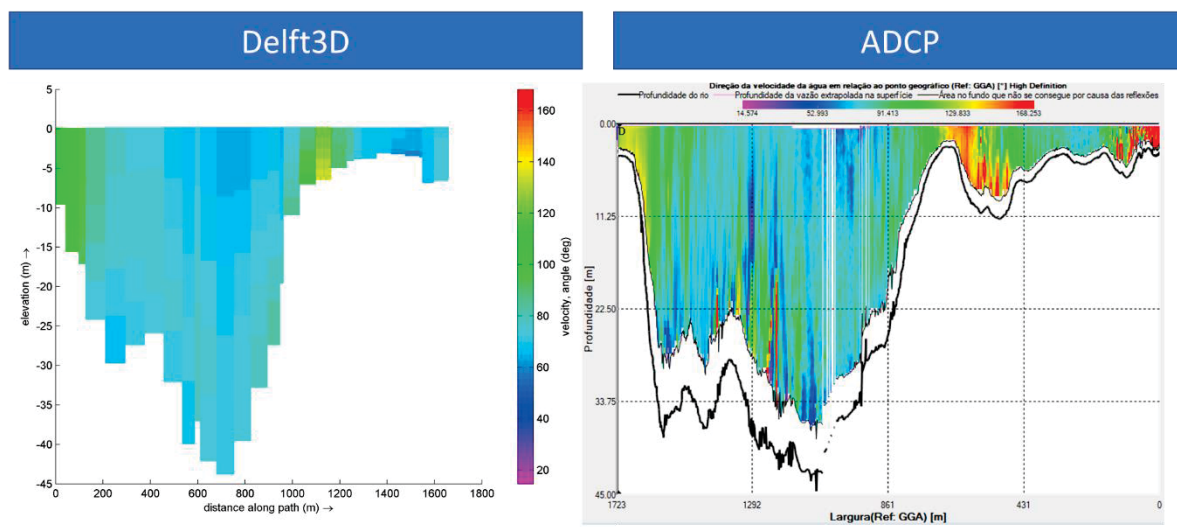
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.13 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão alta: 41.589,86 – 25/02/2019



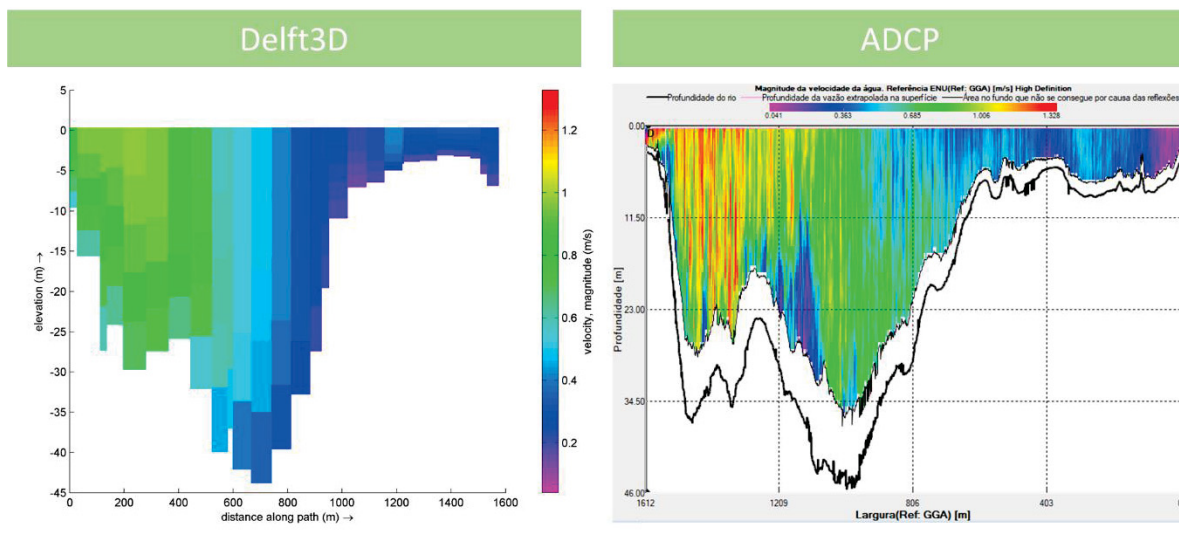
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.14 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão alta: 41.589,86 – 25/02/2019



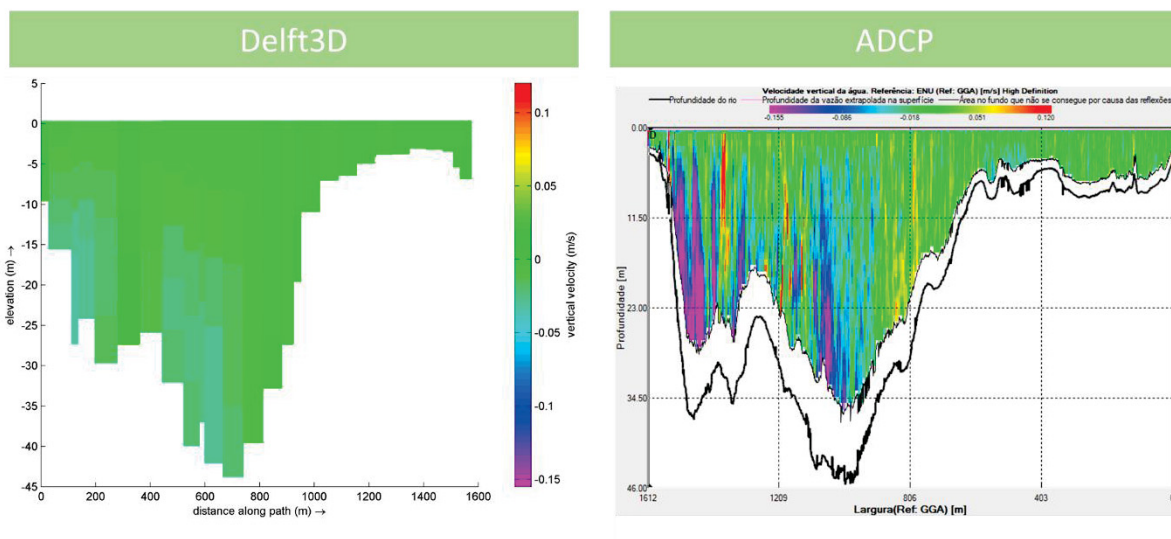
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.15 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 – 11/02/2017



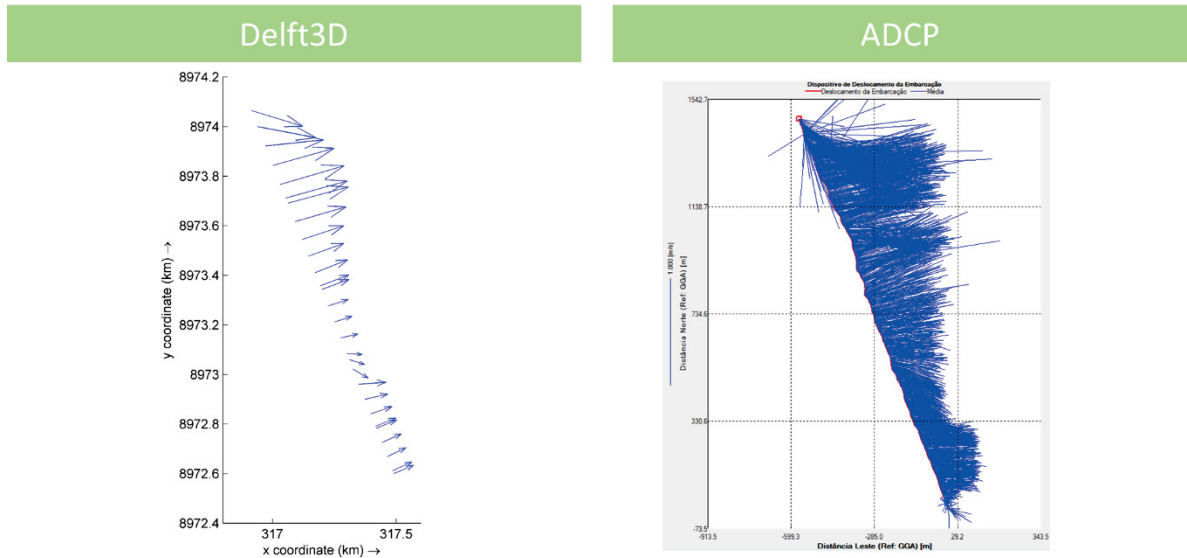
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.16– Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão intermediária: 20.071,94 – 11/02/2017



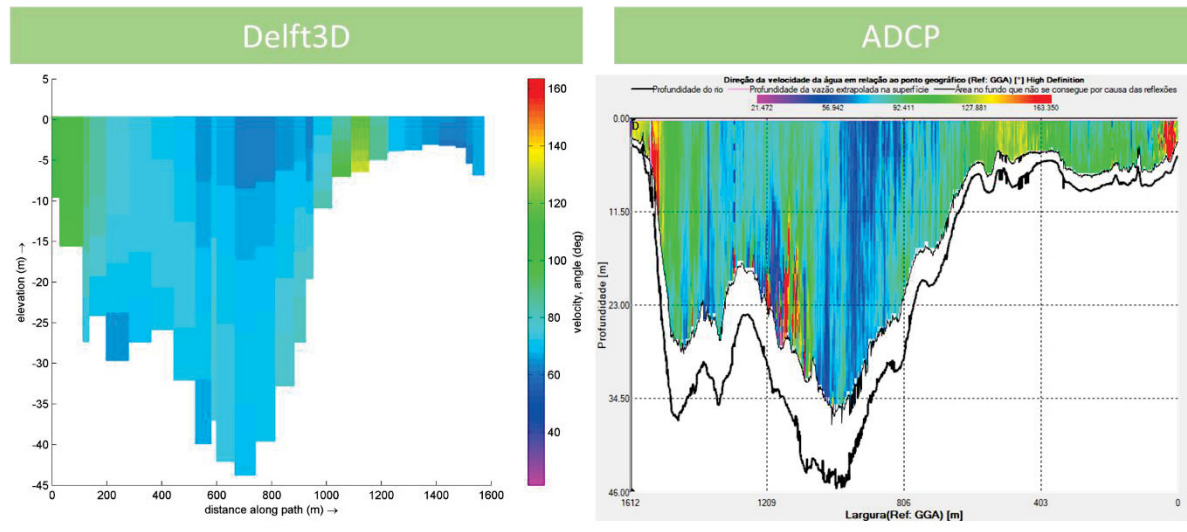
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.17 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão intermediária: 20.071,94 – 11/02/2017



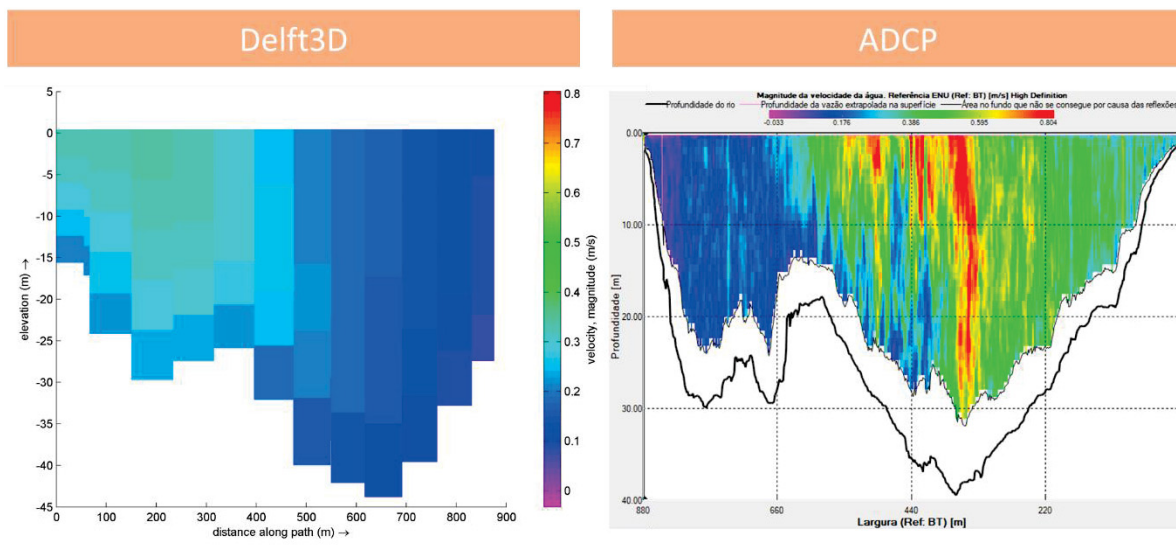
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.18 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão intermediária: 20.071,94 – 11/02/2017



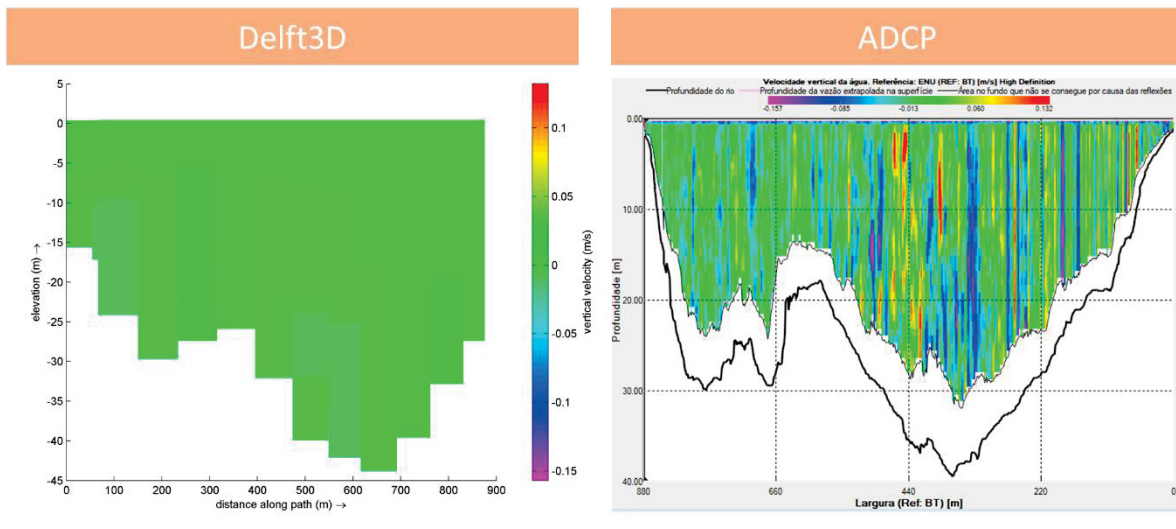
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.19 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 – 16/08/2018



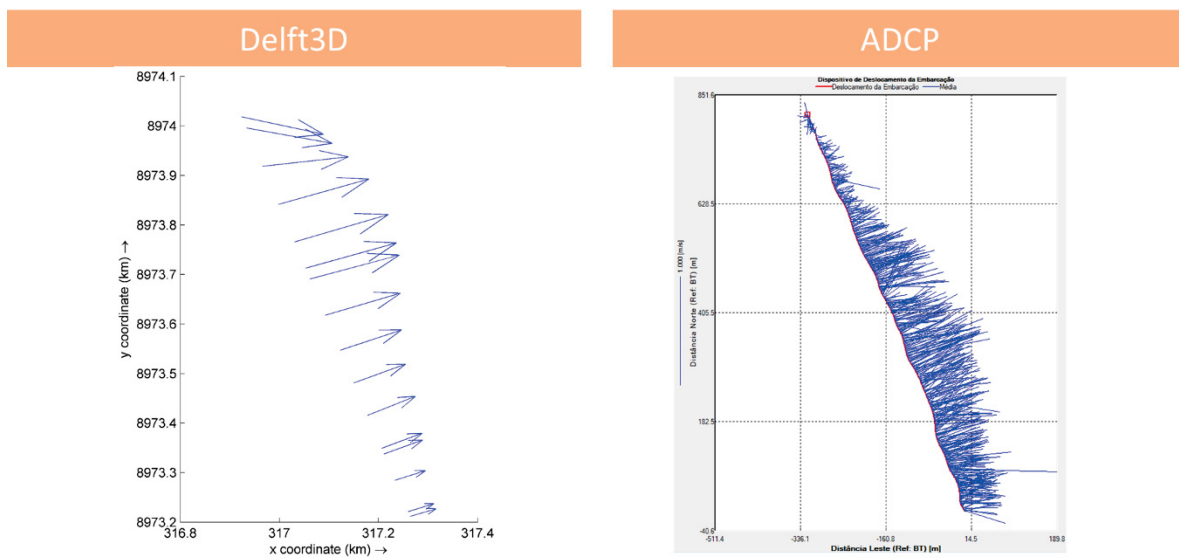
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.20 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais médias ao longo da coluna da água - Vazão baixa: 6.808,17 – 16/08/2018



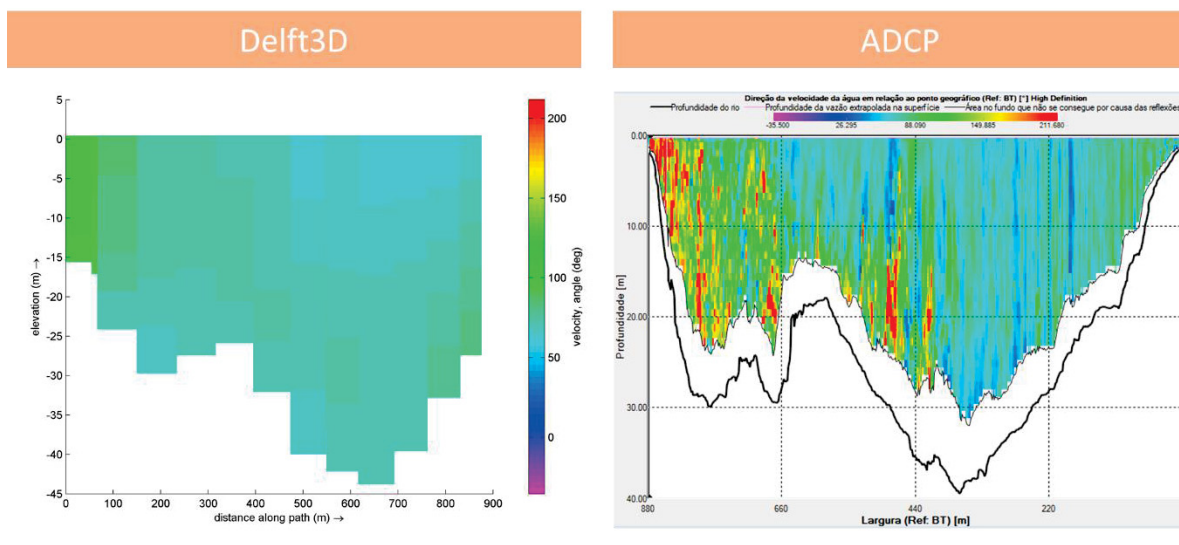
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.21 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) médias ao longo do transecto - Vazão baixa: 6.808,17 – 16/08/2018



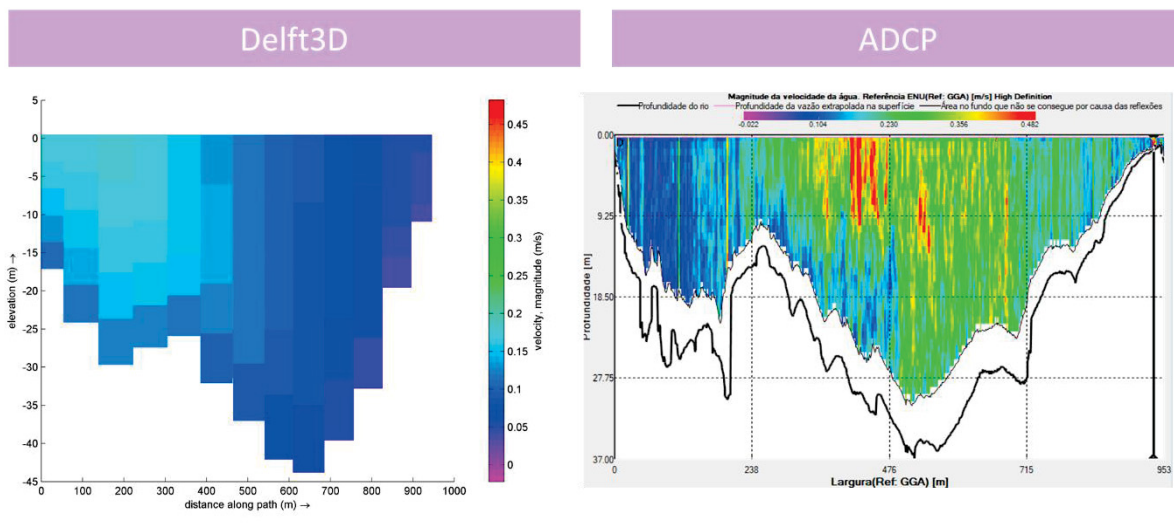
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.22 – Ângulo das velocidades horizontais - Vazão baixa: 6.808,17 – 16/08/2018



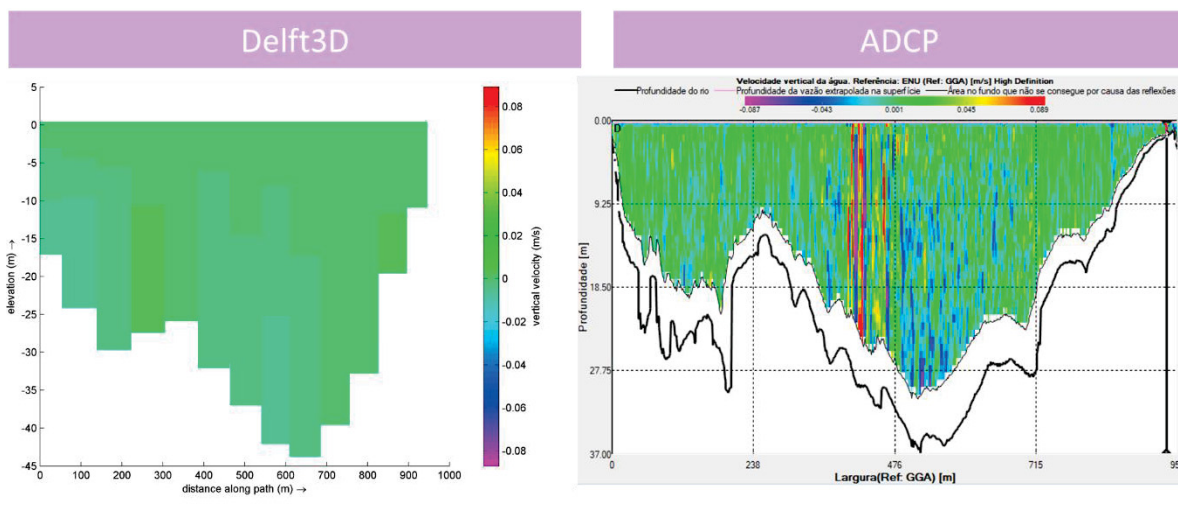
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.23 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais - Vazão mais baixa: 3.598,66 – 09/08/2016



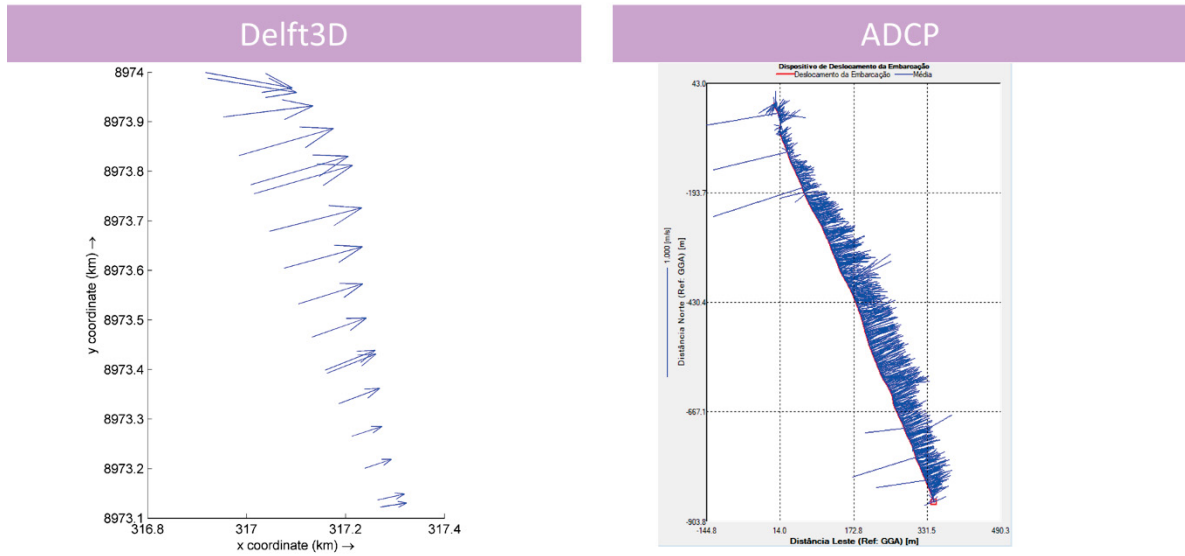
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.24 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais - Vazão mais baixa: 3.598,66 – 09/08/2016



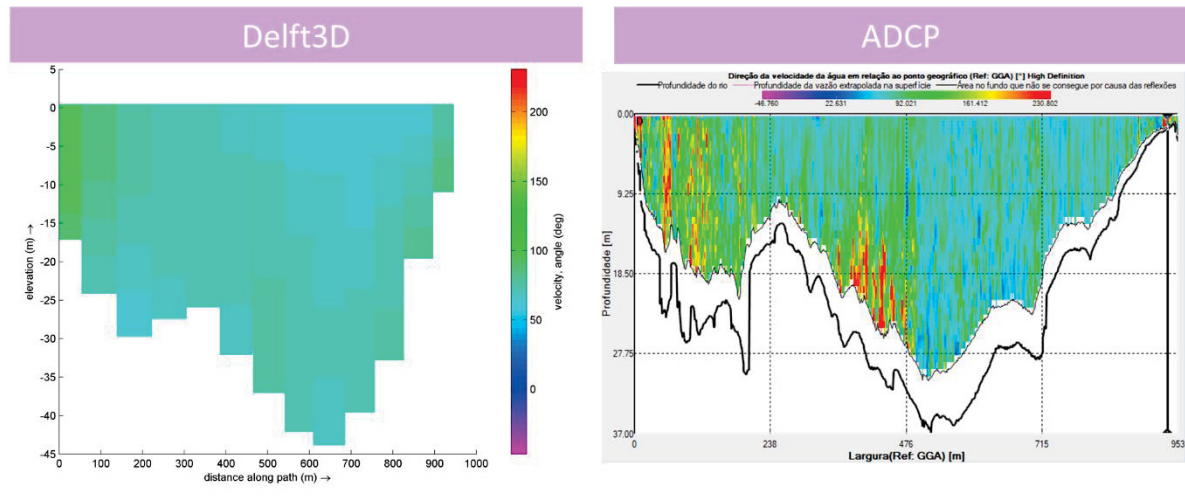
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.25 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto - Vazão mais baixa: 3.598,66 – 09/08/2016



Fonte: A autora (2021).

Figura 1.26 – Ângulo das velocidades horizontais – Vazão mais baixa: 3.598,66 – 09/08/2016



Fonte: A autora (2021).

Observou-se que o modelo Delft3D qualitativamente mostra campos de velocidades similares aos resultados medidos pelo ADCP nos cenários de vazões mais altas (vazões de 20.000m³/s e 40.000m³/s aproximadamente) tanto na magnitude como na direção das velocidades. Entretanto em vazões baixas, principalmente no cenário de vazão de 6.808 m³/s, o Delft3D não representou de maneira similar os resultados do ADCP. Nesta vazão, o Delft3D apresentou velocidades maiores no lado esquerdo da seção e no ADCP no lado direito da seção.

O Delft3D representou as velocidades verticais em uma menor magnitude do que foi medido no ADCP, conforme pode ser verificado na Figura 1.12, na Figura 1.16, na Figura 1.20 e na Figura 1.24, para cada um dos quatro cenários avaliados. Isso ocorre em virtude da medição do ADCP ser capaz de detectar pequenas variações e picos locais de velocidade, enquanto o modelo estima as tendências gerais da velocidade em cada célula.

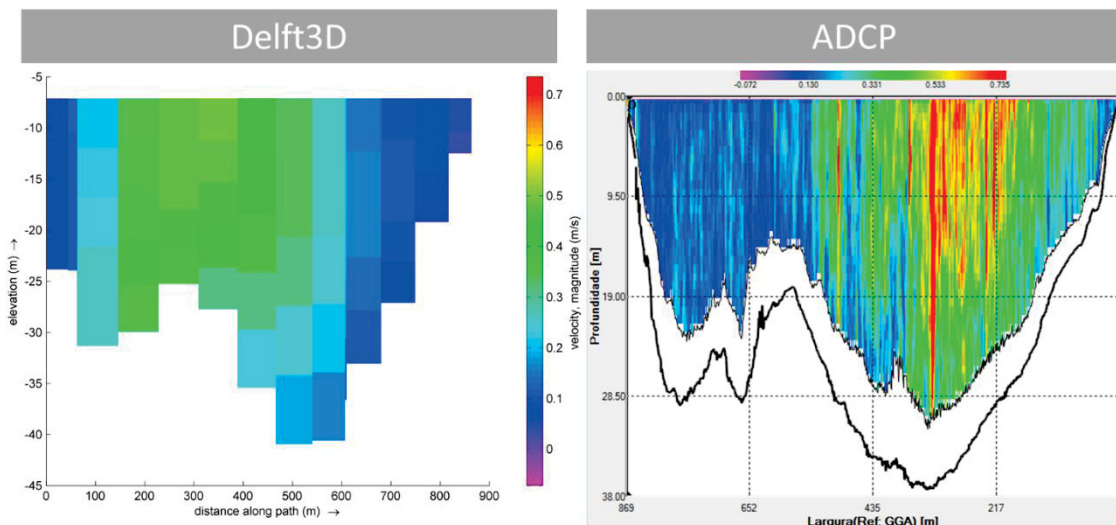
O ADCP é uma representação do instante em que o equipamento realizou a medição. Nesse primeiro teste, a batimetria da região representada no modelo foi obtida de seções transversais batimétricas históricas espaçadas e interpoladas dos anos de 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021.

A batimetria mais recente (2021) utilizando ecobatímetro multifeixe foi realizada pelo Lactec e implantada no modelo. Este levantamento batimétrico percorreu grande parte da região de maneira contínua evitando assim muitas regiões de interpolação. Foi determinada então, definitivamente, a batimetria a ser utilizada no modelo computacional.

Como analisado, em vazões baixas, o Delft3D não representou de maneira similar os resultados do ADCP, apresentando velocidades maiores no lado esquerdo da seção e no ADCP no lado direito da seção. Por isso, foi verificado, com dados de 2021, se essa situação se manteria após a atualização da batimetria.

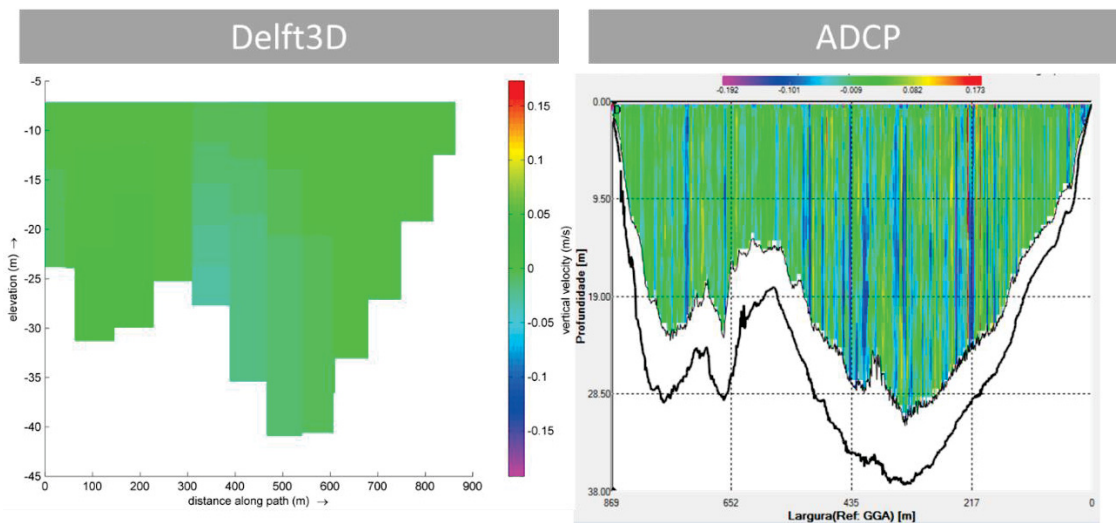
Dentre as várias medições com ADCP neste local no ano de 2021, escolheu-se a data do dia 03/11/2021, por ter apresentado menor vazão entre as medições do referido ano. Da Figura 1.27 até a Figura 1.30 são apresentadas estas comparações. A magnitude das velocidades é representada pelas cores na seção transversal, sendo velocidades horizontais na Figura 1.27 e velocidades verticais na Figura 1.28. A direção do escoamento é apresentada na Figura 1.29 pelos vetores em planta e na Figura 1.30 pelo ângulo das velocidades horizontais em cores na seção transversal.

Figura 1.27 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



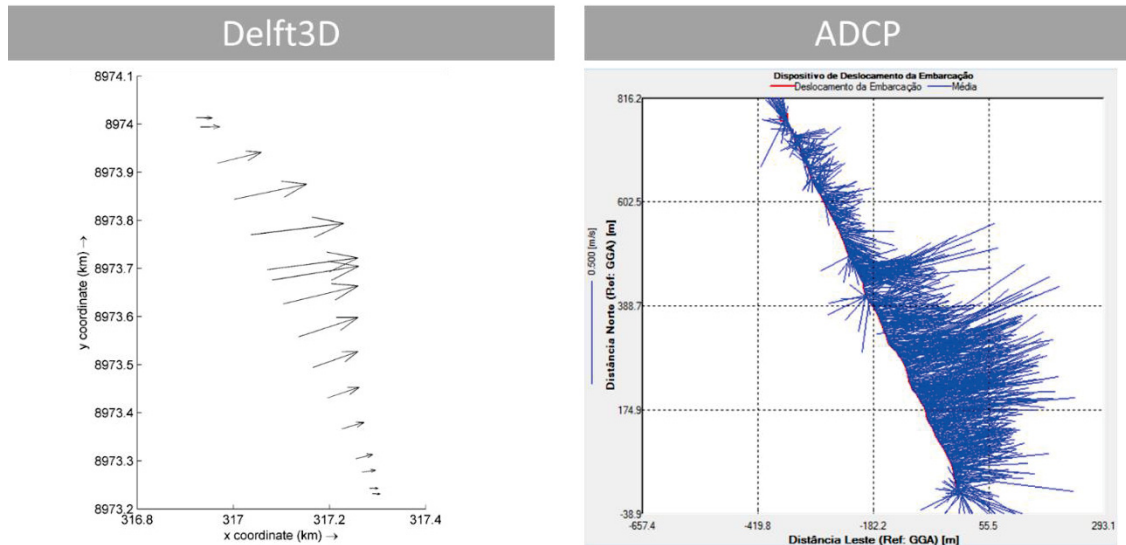
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.28 – Transecto ilustrando magnitude de velocidades verticais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



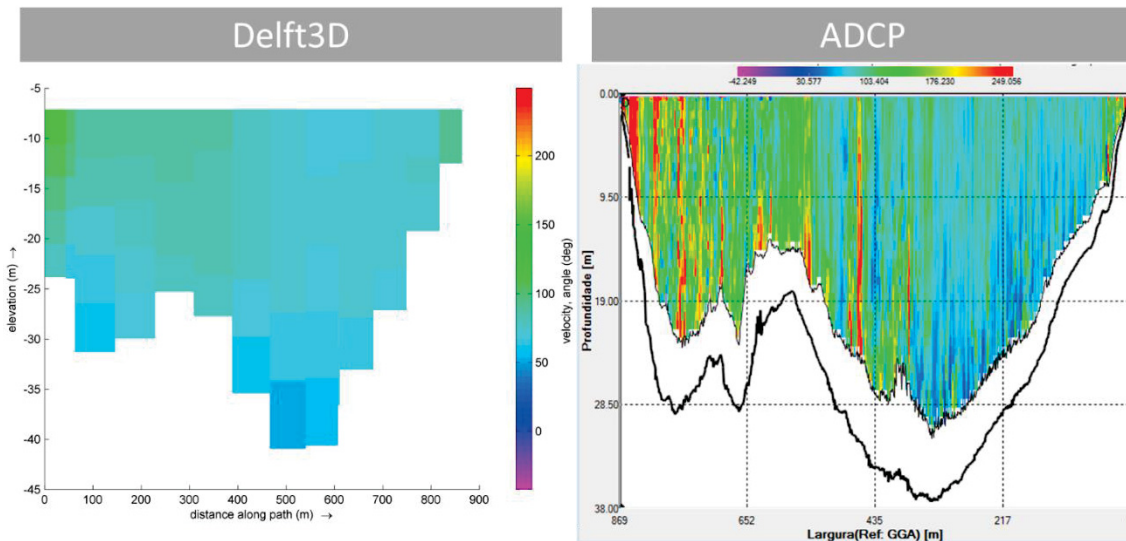
Fonte: A autora (2021).

Figura 1.29 – Direção e intensidade das velocidades horizontais (médias verticais) ao longo do transecto no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



Fonte: A autora (2021).

Figura 1.30 – Ângulo das velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita) – 03/11/2021



Fonte: A autora (2021).

Notou-se que, apesar da atualização da batimetria, a situação que estava ocorrendo em casos de vazões baixas se manteve: enquanto na medição do ADCP as velocidades maiores ficaram mais próximas da margem direita, no modelo as velocidades maiores ficaram mais próximas da margem esquerda. As magnitudes das velocidades, entretanto, foram semelhantes. Conclui-se que o modelo é capaz de reproduzir a hidrodinâmica geral da região de interesse, mas apresenta limitação na

representação das regiões com hidrodinâmica complexa como na região de convergência (seção do ADCP) e perfis verticais com correntes secundárias fortes.

RESUMO CALIBRAÇÃO

Os resultados apresentados mostraram que foi possível calibrar o modelo hidrodinâmico para representar as principais variações do ambiente físico da região, sendo abordadas as variações de nível, velocidades médias na vertical e campos de velocidades tridimensionais.

A calibração seguiu a premissa de tentar obter um modelo que representasse as variações principais, considerando a análise de uma região de reservatório montante às estruturas hidráulicas, de grande extensão e com foco na representação da circulação geral.

Existem limitações próximas às estruturas hidráulicas onde o escoamento mais complexo exigiria uma modelagem e resoluções muito distintos (usando modelos CFD). Mas como o objetivo da modelagem aqui apresentada não é a análise das estruturas hidráulicas, mas da circulação do escoamento e efeito do mesmo ao transporte de troncos, foi considerado que a modelagem atual serve tais objetivos suficientemente.

REFERÊNCIAS

COTRIM, J. R. K.; FRIEDRICH, M. F. Estimativas de velocidades nos *Log Booms* em modelo computacional. AHE Jirau. Relatório 1, revisão 0. Maio 2018.

ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (ESBR). Relatório Técnico - UHE Jirau - Estudo de Remanso 2020 - Atualização do Modelo Hidráulico do Reservatório. RT-CHID-RS-001-20-00. Dezembro 2020.

SOGREAH. Modelo reduzido tridimensional do AHE Jirau: Transporte de sedimentos, material flutuante e ovos, larvas e juvenis de ictiofauna. Relatório Final nº 1 36 0682. 2011.

THEMAG. P&D Jirau: Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos. Projeto executivo de Jirau. Área Hidráulica, Exemplos de modelagem física e matemática. Relatório 7481-01-GL-810-RT-00005 Rev A0. Maio 2021.

APÊNDICE 2

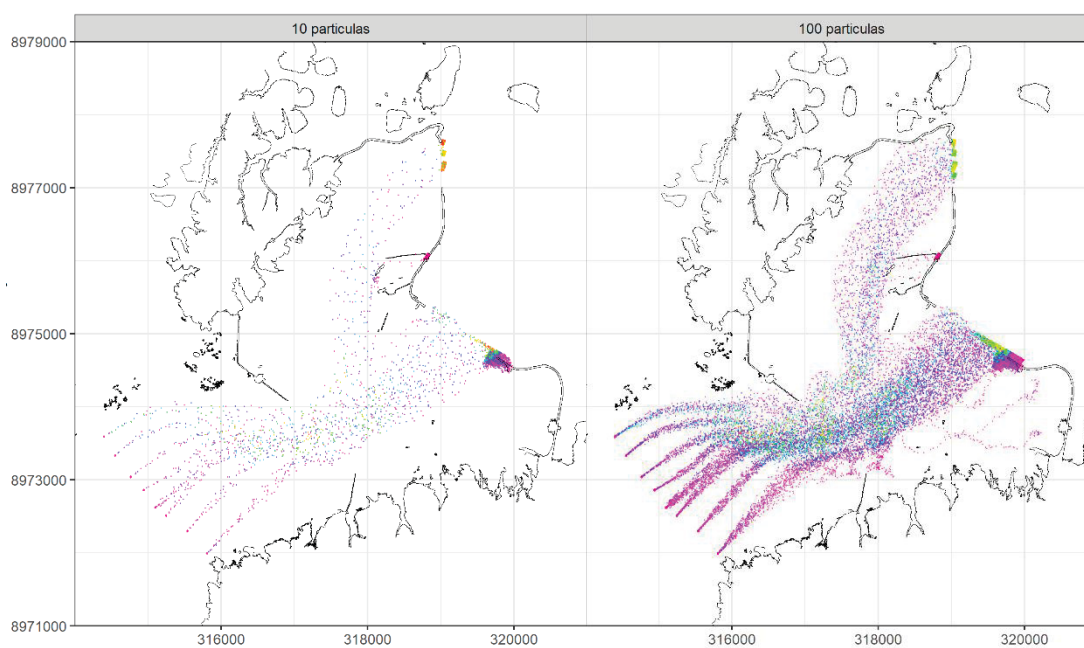
TESTES PARTÍCULAS

Esse apêndice apresenta os testes efetuados para a configuração da simulação de partículas.

Quantidade de partículas:

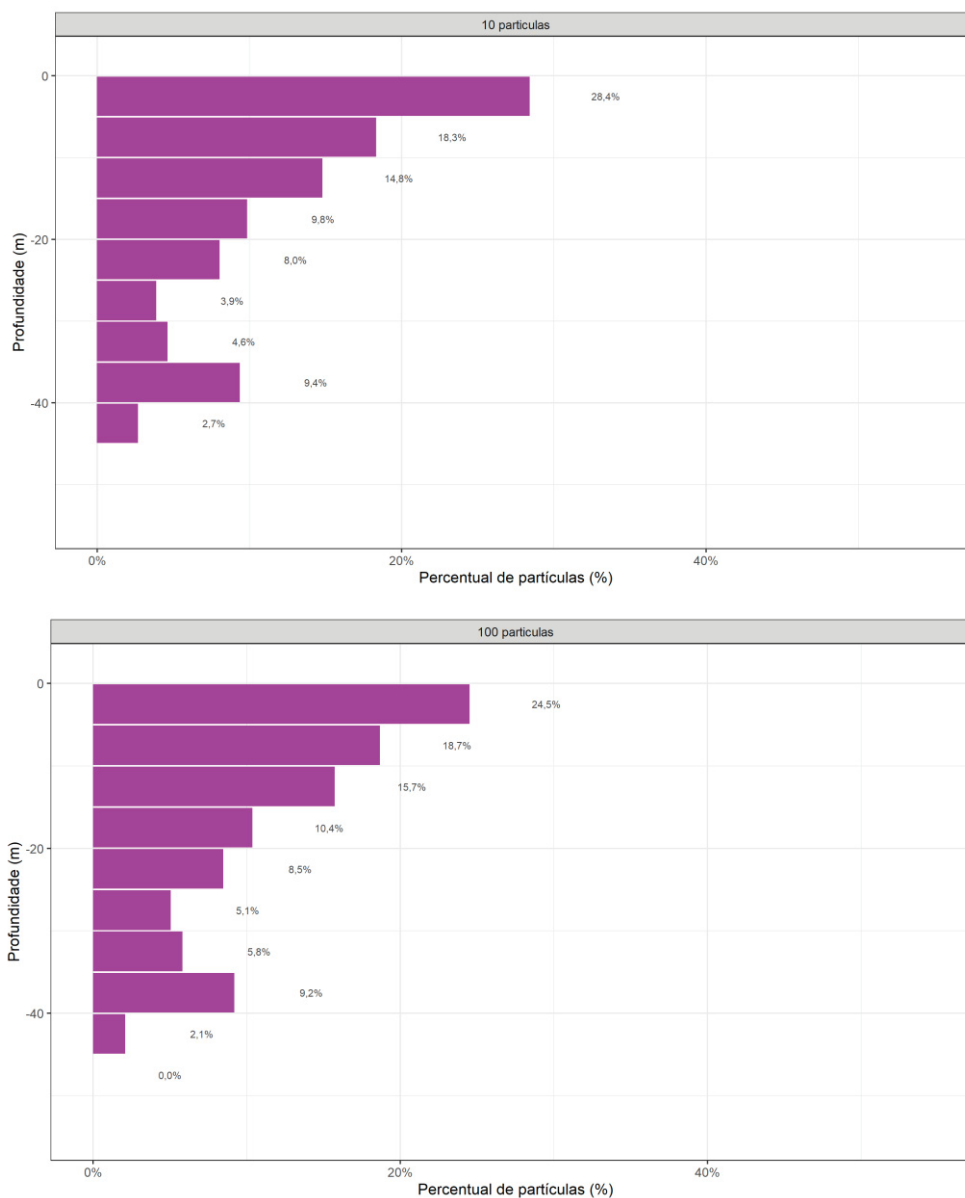
Ao lançar 10 e 100 partículas a cada ponto, os resultados estatísticos foram parecidos. Com uma quantidade superior a 100 partículas o tempo computacional se apresentou muito lento e inviável.

Figura 2.1 - Quantidade de partículas – visualização geral em planta



Fonte: A autora (2022)

Figura 2.2 - Histograma de quantidade de partículas (10 e 100 respectivamente)

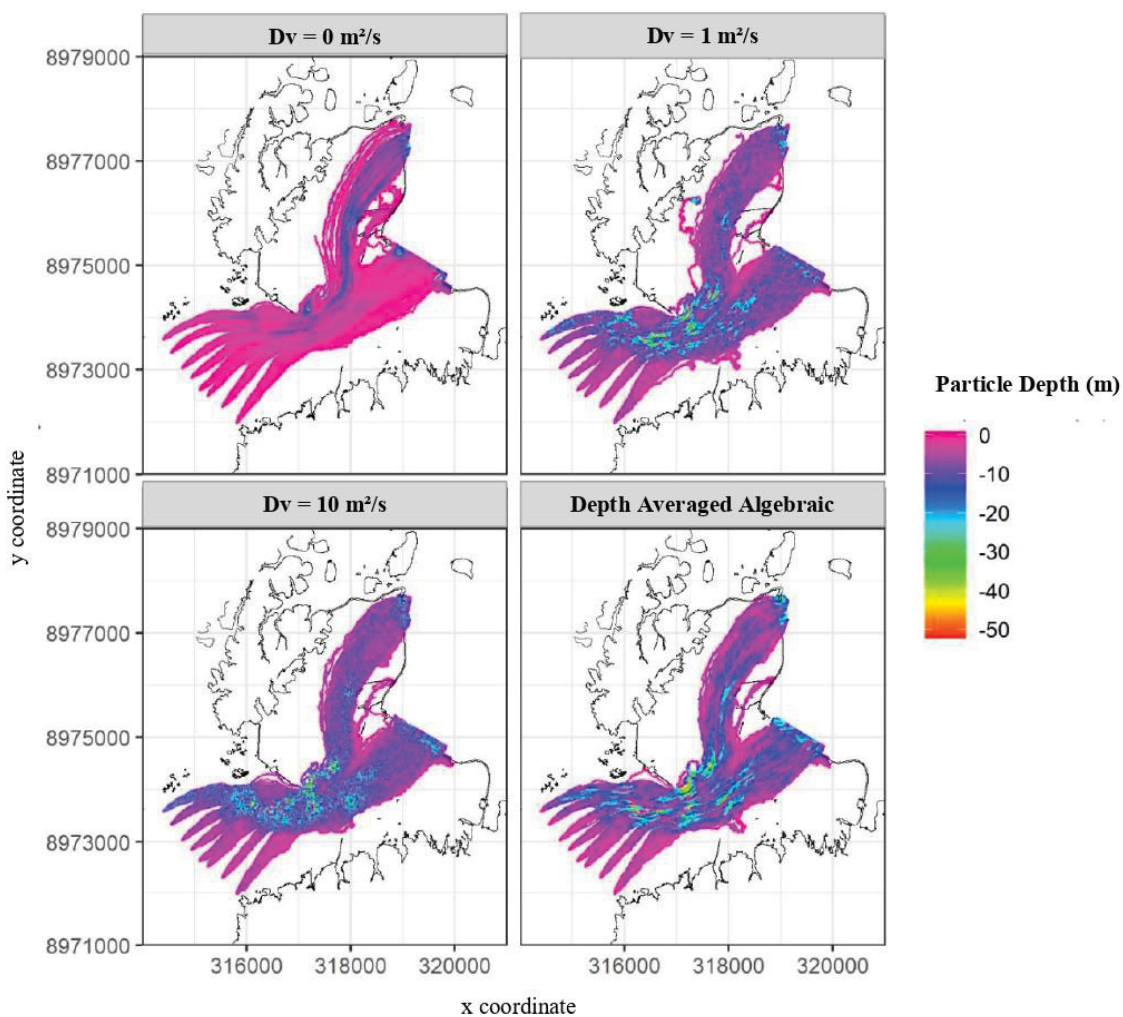


Fonte: A autora (2022)

Dispersão vertical:

Partículas ficam muito dispersas e alterando sua profundidade quando adicionado um valor para dispersão vertical. Isso foge da realidade e prejudicaria os resultados, por isso foi adotado valor igual a 0, assim a maioria das partículas são transportadas em superfície.

Figura 2.3 - Comparação das profundidades das partículas quando inserido diversos valores para dispersão vertical.

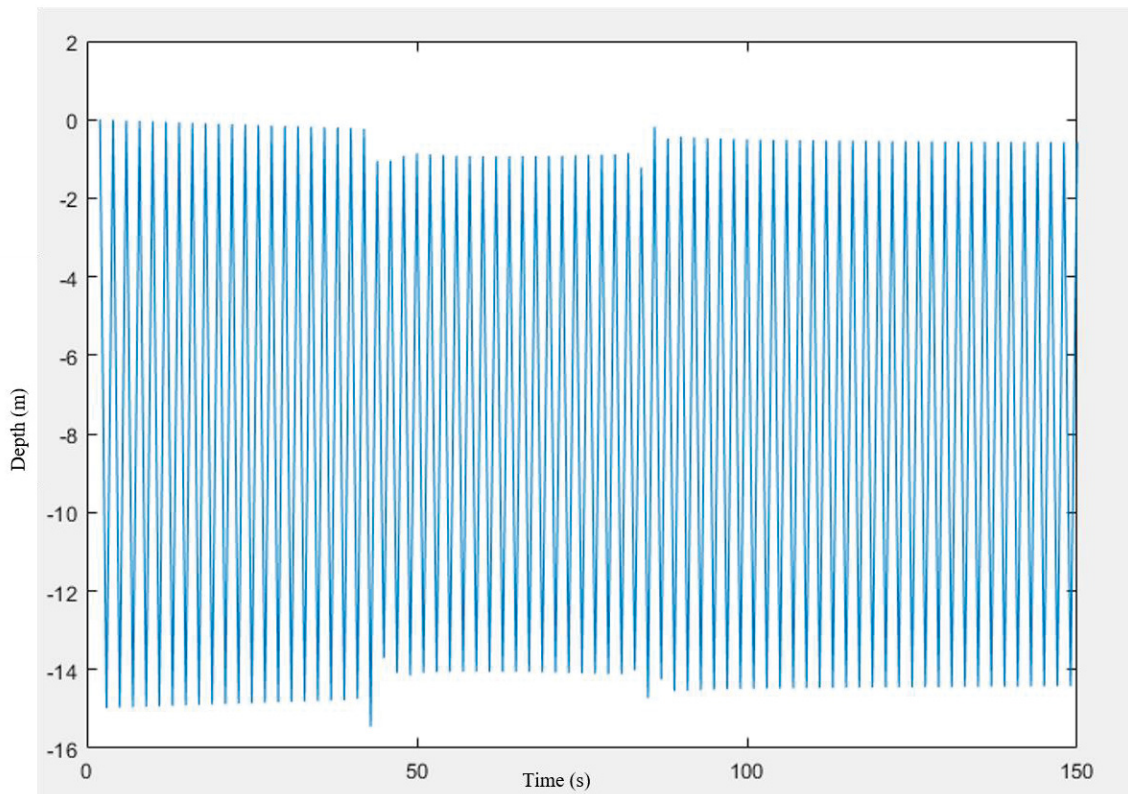


Fonte: A autora (2022)

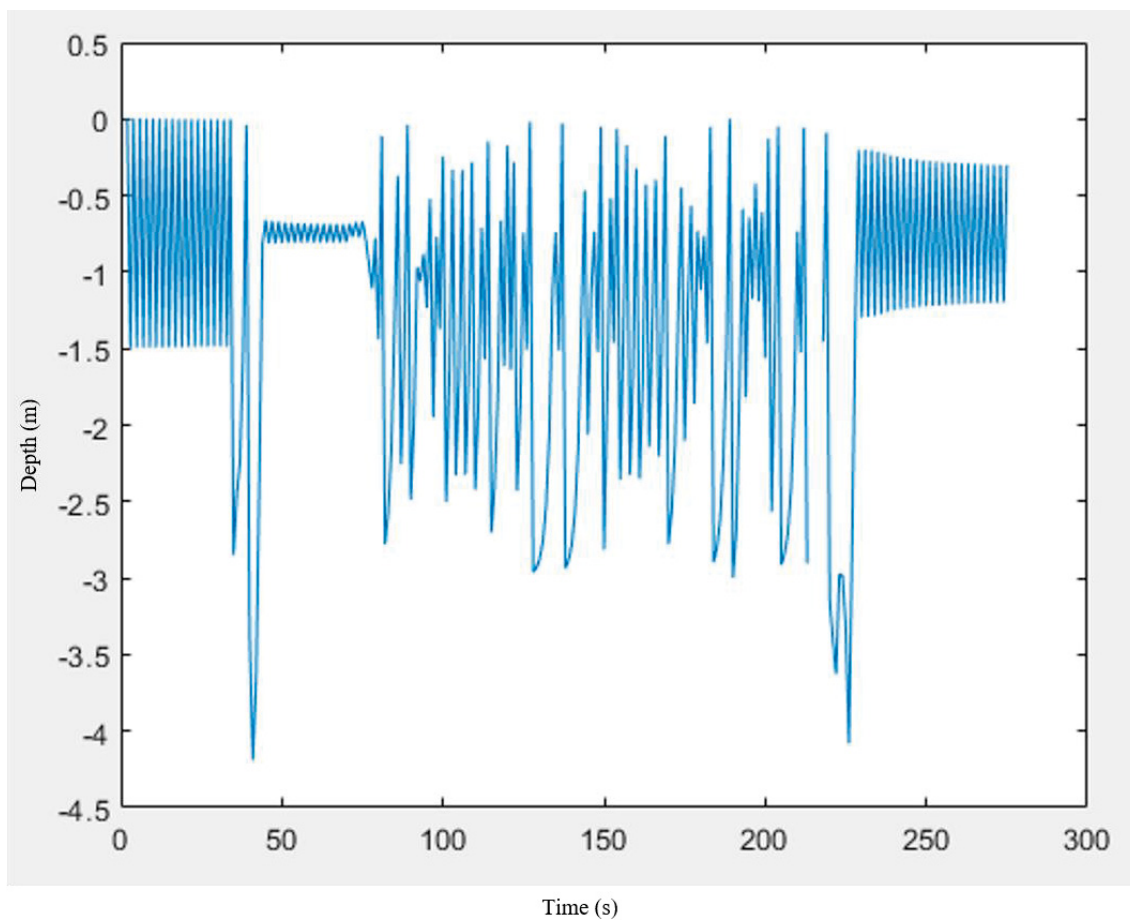
Velocidade de flutuação e sedimentação:

A Figura 2.4 e Figura 2.5 mostram o comportamento de uma partícula em relação a profundidade ao longo do tempo quando inserida uma velocidade de flutuação (velocidade de sedimentação negativa). É possível notar um comportamento instável da partícula subindo e descendo quando o esperado era que ela flutuasse.

Figura 2.4 - Comportamento de uma partícula com velocidade de flutuação igual a -1m/s .



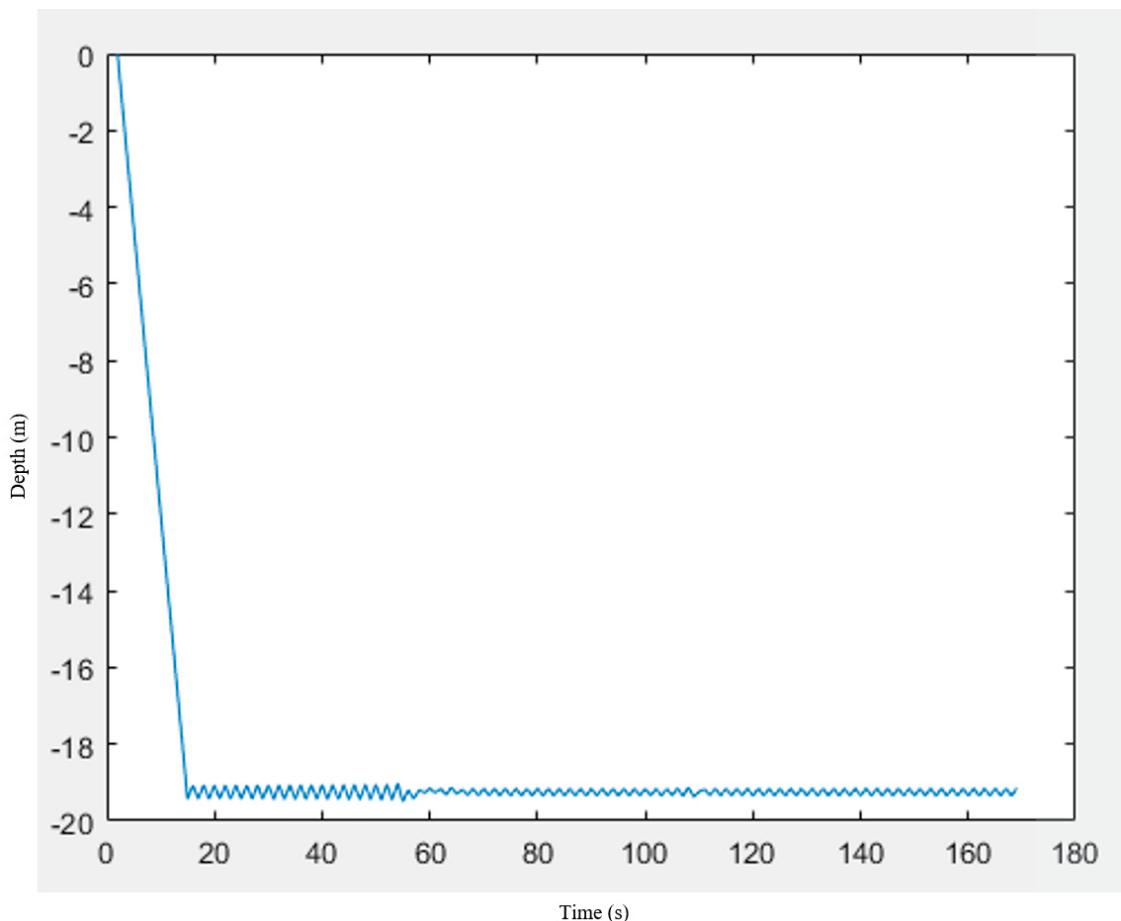
Fonte: A autora (2022)

Figura 2.5 - Comportamento de uma partícula com velocidade de flutuação igual a $-0,1\text{m/s}$.

Fonte: A autora (2022)

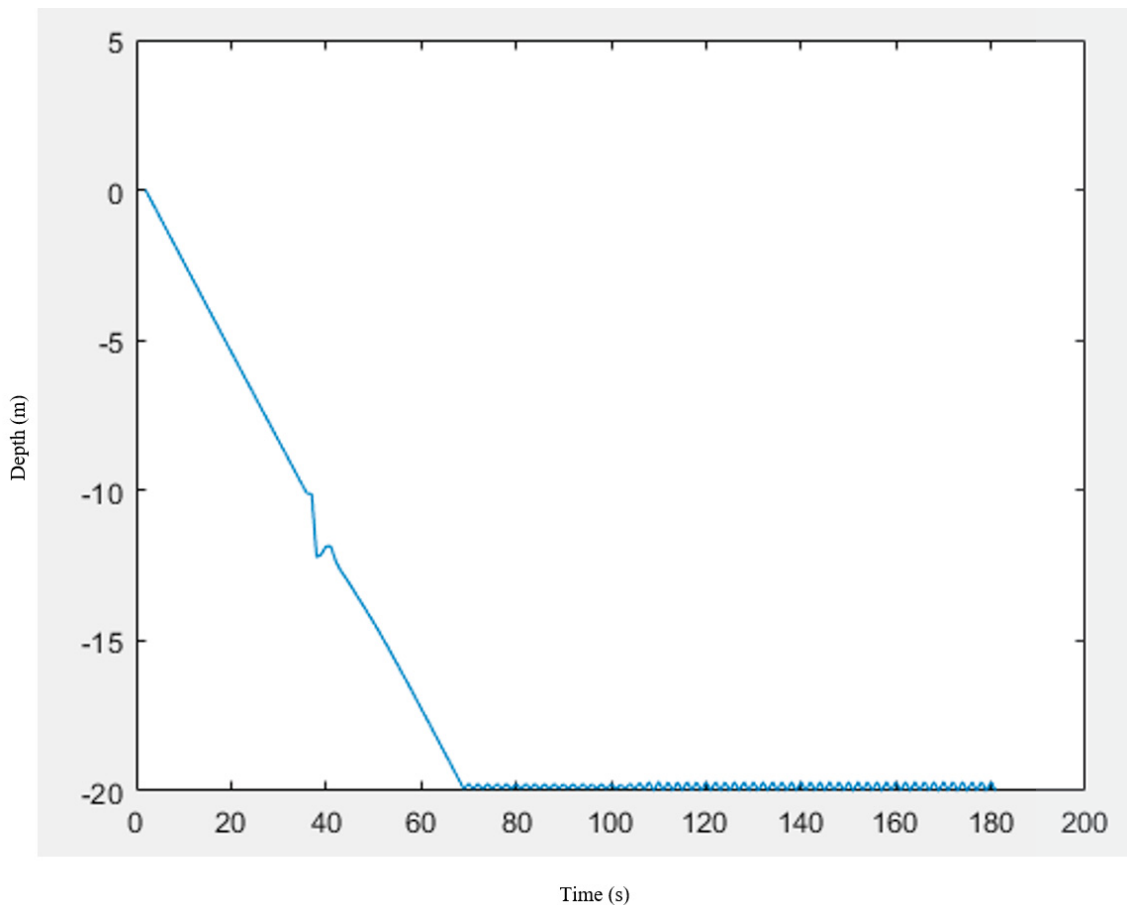
As Figura 2.6 e Figura 2.7 apresentam o comportamento de uma partícula em relação a profundidade ao longo do tempo quando inserida uma velocidade de sedimentação (positiva). É esperado que a partícula vá para o fundo, logo a velocidade de sedimentação funciona corretamente.

Figura 2.6 - Comportamento de uma partícula com velocidade de sedimentação igual a +0,1m/s.



Fonte: A autora (2022)

Figura 2.7 - Comportamento de uma partícula com velocidade de sedimentação igual a $+0,02\text{m/s}$.



Fonte: A autora (2022)

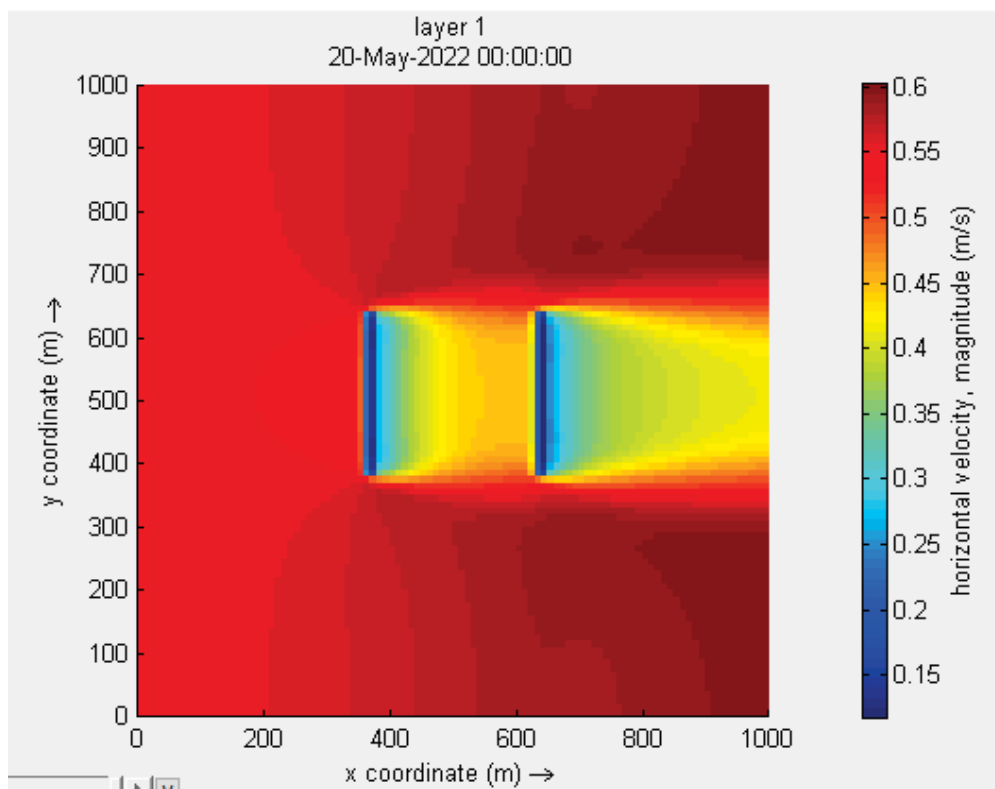
Com isso foi possível concluir que o modelo possui uma instabilidade no código, portanto essa ferramenta não foi utilizada.

Efeito de barreiras:

Foi realizado um teste simplificado no Delft3D de uma malha quadrada 1000×1000 e inserido uma barreira para visualizar os efeitos hidrodinâmicos e de partículas. A barreira foi inserida no meio da malha através da ferramenta "3D gates". Essa ferramenta representa uma placa vertical ao longo de uma das faces da malha que pode cobrir o fluxo das camadas.

Os efeitos observados se mostraram adequados para representar as estruturas retentoras no modelo.

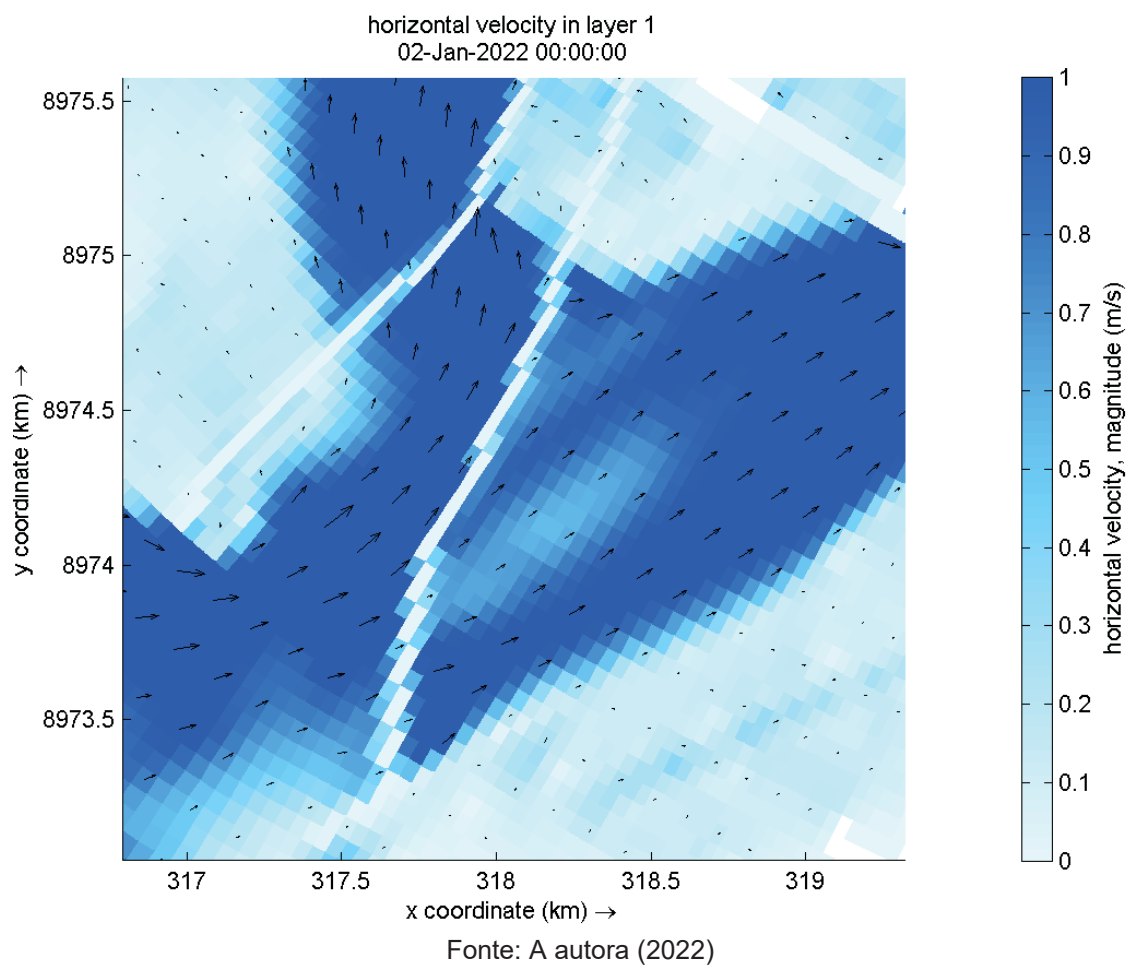
Figura 2.8 - Ilustração da velocidade igual a zero nas células com barreiras



Fonte: A autora (2022)

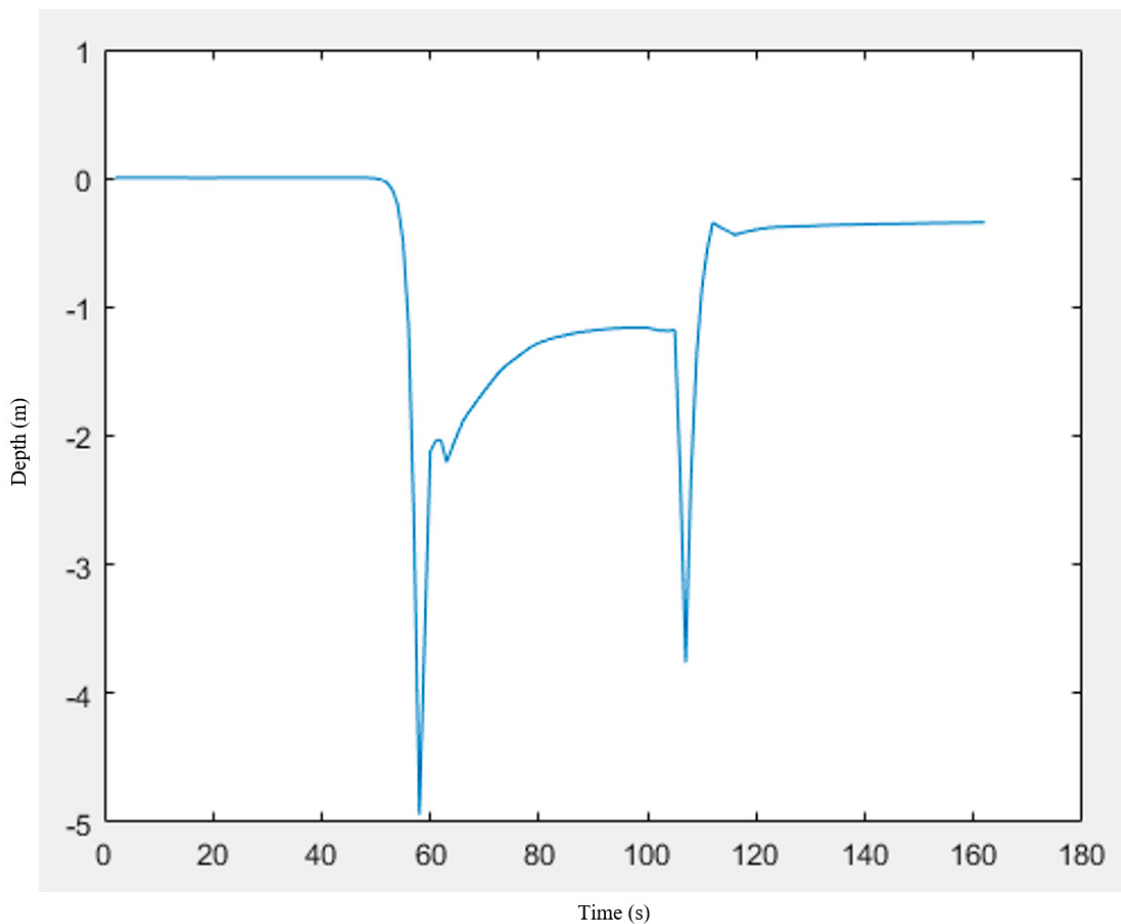
O mesmo ocorre em Jirau:

Figura 2.9 - Ilustração da velocidade igual a zero nas células com barreiras que representam os *log booms* do modelo de Jirau.



A Figura 2.10 mostra o comportamento de uma partícula para uma simulação simples no Delft3D. Ao encontrar a barreira, a partícula afunda e passa por baixo.

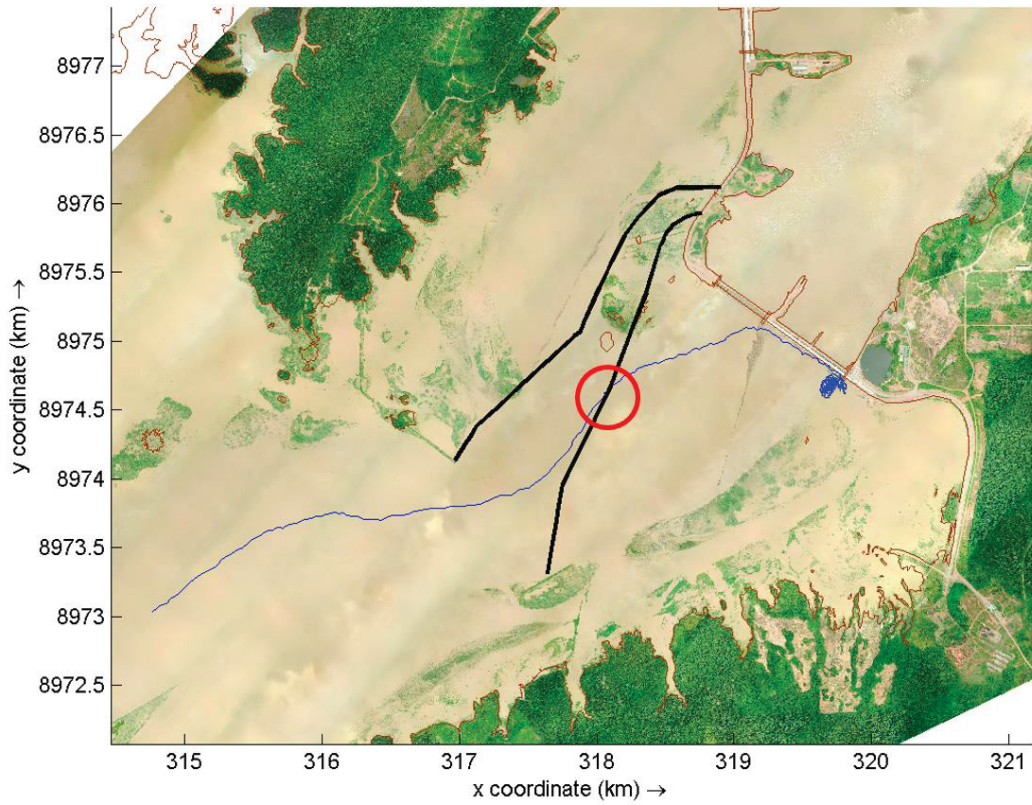
Figura 2.10 - Comportamento de uma partícula ao encontrar a barreira



Fonte: A autora (2022)

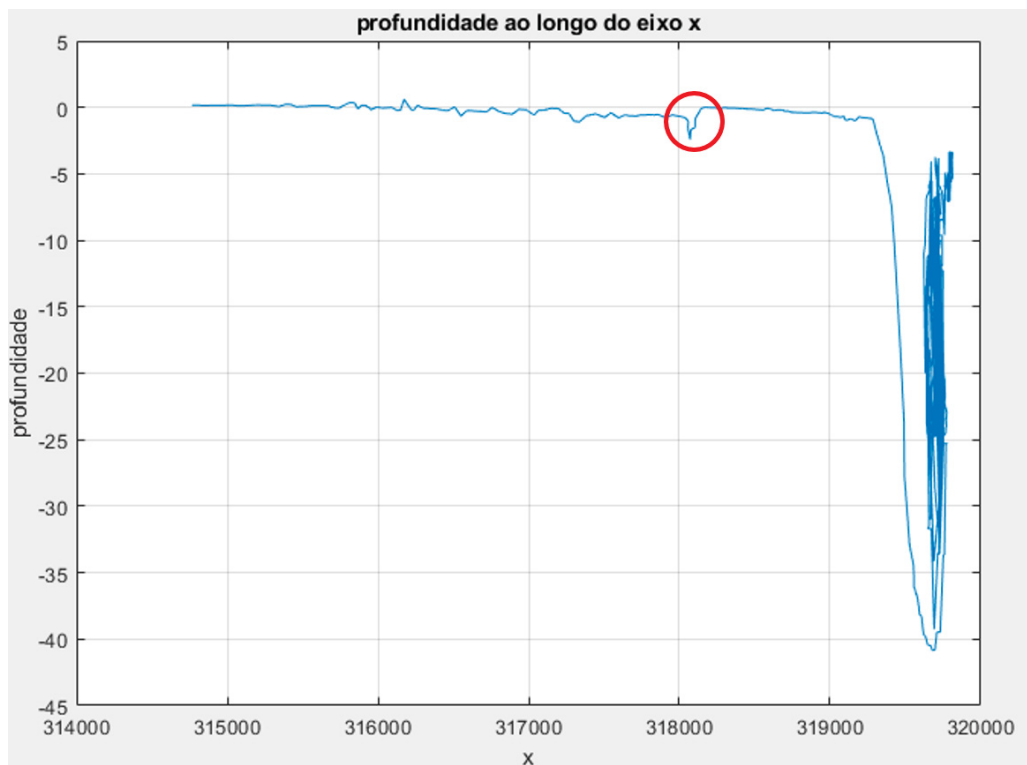
O mesmo ocorre em Jirau, onde os *log booms* representados pelas barreiras não conseguem reter as partículas. Os círculos em vermelho apresentam a localização do *log boom* e é possível observar a partícula passando por baixo:

Figura 2.11 - Comportamento de uma partícula no eixo (x, y).



Fonte: A autora (2022)

Figura 2.12- Comportamento de uma partícula no eixo (x, z).

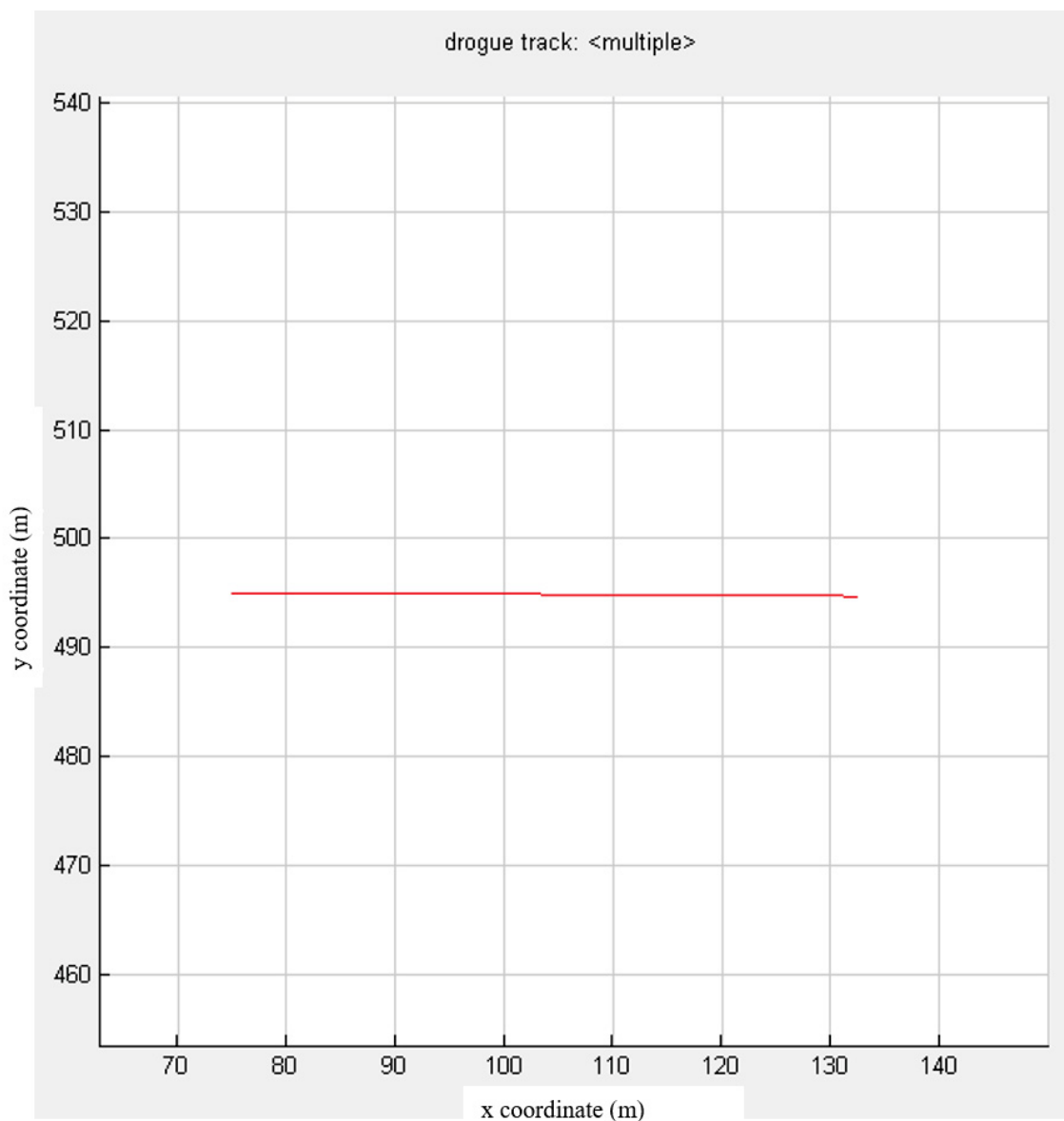


Fonte: A autora (2022)

Drogues:

A Figura 2.13 apresenta 5 trajetórias de drogas lançadas na mesma célula pelo mesmo período de tempo. É verificado que possuem trajetórias idênticas por não possuírem efeitos difusivos.

Figura 2.13 - Trajetória de 5 drogas lançados na mesma posição e ao mesmo tempo.



Fonte: A autora (2023)