



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Débora Mattos de Oliveira

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM
RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE
ESGOTAMENTO SANITÁRIO: Estudo de caso UHE Itapebi**

Rio de Janeiro

2024



UFRJ

Débora Mattos de Oliveira

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM
RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE ESGOTAMENTO
SANITÁRIO: Estudo de caso UHE Itapebi**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental com área de concentração em Saneamento Ambiental.

Orientadora: Monica Pertel, D.Sc

Co-orientador: D.Sc. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Rio de Janeiro

2024

Oliveira, Débora.

Análise hidrodinâmica ambiental e de qualidade da água em reservatório de usina hidrelétrica sob influência de esgotamento sanitário: Estudo de caso UHE Itapebi / Débora Mattos de Oliveira. – 2024.

f. : 91:il. ;47

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2024.

Orientador: Monica Pertel e Celso Bandeira de Melo Ribeiro

1. Análise hidrodinâmica. 2. Esgotamento sanitário. 3. Eutrofização. 4. Recursos hídricos. 5. Renovação das águas. 6. Reservatório. I. Pertel, Monica; e Ribeiro, Celso Bandeira de Melo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Análise hidrodinâmica ambiental e de qualidade da água em reservatório de usina hidrelétrica sob influência de esgotamento sanitário: Estudo de caso UHE Itapebi.



UFRJ

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM
RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE
ESGOTAMENTO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO UHE ITAPEBI**

Débora Mattos de Oliveira

Orientadora: D.Sc. Monica Pertel
Co-orientador: D.Sc. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

*Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Engenharia Ambiental,
Escola Politécnica & Escola de Química,
da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Ambiental com área de
concentração em Saneamento Ambiental.*

Aprovada pela Banca:

gov.br MONICA PERTEL
Data: 28/02/2024 22:19:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente, Prof.^a Monica Pertel, D.Sc., UFRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
CELSO BANDEIRA DE MELO RIBEIRO
Data: 06/03/2024 12:28:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Celso Bandeira de Melo Ribeiro, D.Sc., UFJF

gov.br Documento assinado digitalmente
CRISTINA APARECIDA GOMES NASSAR
Data: 05/03/2024 14:59:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Cristina Aparecida Gomes Nassar, DSc, UFRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
FELIPE SOMBRA DOS SANTOS
Data: 05/03/2024 16:09:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Felipe Sombra dos Santos, D.Sc., UFRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
RODRIGO AMADO GARCIA SILVA
Data: 01/03/2024 16:57:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Rodrigo Amado Garcia Silva, D.Sc., UFF

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, sabedoria, saúde e todas as oportunidades que me são dadas a cada dia na minha vida acadêmica e profissional.

Aos meus professores, grandes mestres, pela dedicação, ensinamentos e diretrizes ao longo do meu Mestrado em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Em especial à minha orientadora Monica Pertel, meu co-orientador Celso Bandeira da Universidade Federal de Juiz de Fora, pela confiança, por todo apoio, paciência e orientação.

Ao Professor Paulo Rosman, pela excelente ferramenta de modelagem hidrodinâmica e ambiental, SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, bem como sua paciência, disponibilidade e boa vontade em ensinar e auxiliar o uso da mesma.

Ao Projeto Automon pela oportunidade de contribuir com meus estudos para a pesquisa de futuras tecnologias que agregarão no monitoramento hidrológico.

À Neoenergia pela confiança e disponibilização de dados a serem utilizados nessa dissertação de Mestrado.

Por fim, e não menos importante, aos meus amigos e familiares por tanto me apoiarem e incentivarem o meu crescimento e aprendizado. Pelo suporte e carinho de sempre. Bem como todos os que me acompanharam ao longo desse Mestrado compartilhando momentos de tensão, estresse, alegrias e aprendizados, tornando esta caminhada muito mais leve e prazerosa.

RESUMO

DE OLIVEIRA, Débora. **ANÁLISE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO: Estudo de Caso UHE Itapebi.** Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Na gestão de recursos hídricos, o monitoramento hidrológico e da qualidade da água pode subsidiar usos futuros ou apontar necessidades de medidas para controle da degradação das águas. A presente dissertação de Mestrado apresenta um estudo de caso que teve como objetivo simular, avaliar e discutir a hidrodinâmica ao longo do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itapebi - BA, considerando sua variação espacial e temporal, bem como seus aspectos relacionados. Foram utilizadas na análise ferramentas de modelagem hidrodinâmica e modelagem Euleriana de tempos hidráulicos característicos, para análise de taxa de renovação da água e idade da água. A fim de avaliar as tendências em diferentes regiões do reservatório, considerando seu eixo longitudinal. Para este estudo de caso foram utilizados dados consistidos de medição de vazão, referentes ao ano de 2019, e teve o município de Salto da Divisa - MG, como principal fonte poluidora das águas deste reservatório, característico pela sua falta de saneamento básico, e atividade pecuária e agrícola. No geral, as simulações permitiram concluir que: i) quanto maior a renovação da água, melhor será o cenário; ii) em períodos chuvosos, o aumento do volume de água, bem como sua vazão, faz com que haja maior renovação da água no reservatório, podendo diluir e amenizar a concentração de poluentes presentes na água; iii) o reservatório apresenta alguns pontos críticos que são mais susceptíveis à proliferação de algas e plantas macrófitas, que podem estar associados a não renovação da água e/ou contribuição mais próxima de contaminantes.

Palavras-chave: Análise hidrodinâmica; esgotamento sanitário; eutrofização; recursos hídricos; renovação das águas; reservatório.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA, Débora. **ANÁLISE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO: Estudo de Caso UHE Itapebi.** Rio de Janeiro, 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

In water resource management, the hydrological and water quality monitoring can support future uses or indicate the need for measures to control water degradation. This Master's thesis presents a case study which aims to simulate, evaluate and discuss the hydrodynamics along the Itapebi Hydropower Plant reservoir, considering its spatial and temporal variation, as well as its related aspects. The analysis used hydrodynamic modeling tools and Eulerian modeling of characteristic hydraulic times to analyze the rate of water renewal and water age. In order to evaluate trends in different regions of the reservoir, considering its longitudinal axis. For this case study, consistent flow measurement data was used for the year 2019, with the municipality of Salto da Divisa - MG, as the main source of water pollution in this reservoir, characterized by its lack of basic sanitation and livestock and agricultural activity. Overall, the simulations allowed us to conclude that: i) the higher the water renewal, the better the scenario; ii) in rainy periods, the increase in the volume of water, as well as its flow, means that there is greater water renewal in the reservoir, which can dilute and mitigate the concentration of pollutants present in the water; iii) the reservoir has some critical points that are more susceptible to the proliferation of algae and macrophytic plants, which may be associated with non-renewal of the water and/or closer contribution of contaminants.

Keywords: Hydrodynamic analysis; wastewater discharges; eutrophication; water resources; water renewal; reservoir.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa – Histórico e Relevância	2
1.2. Objetivo Geral	3
1.3. Objetivos Específicos	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1. Qualidade da Água em Reservatórios de Hidrelétrica	4
2.2. Modelos Computacionais no Estudo Ambiental	5
2.3. Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHiA®	8
2.3.1. Modelo Hidrodinâmico	8
2.3.2. Modelo de Transporte Euleriano	12
2.4. Legislação para Usinas Hidrelétricas	16
2.4.1. Resolução Conjunta ANA/ANEEL 003/2010	17
2.4.2. Atendimento as Condicionantes do Processo de Licenciamento Ambiental..	17
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	20
3.1. Usina Hidrelétrica Itapebi	20
3.2. Localização	21
3.3. Clima	22
3.4. Recursos Hídricos	23
3.5. Uso e Ocupação do Solo	24
3.6. Saneamento	26
4. METODOLOGIA	28
4.1. Modelo Digital de Terreno	28
4.1.1. Malha de discretização e Domínio de Modelagem	29
4.1.2. Batimetria	30
4.1.3. Rugosidade equivalente de fundo	31
4.2. Modelagem Hidrodinâmica	32
4.2.1. Dados Meteorológicos	33
4.3. Modelo de Transporte Euleriano - Tempos Hidráulicos Característicos	42
4.3.1. Taxa de Renovação da Água.....	43
4.3.2. Idade da Água (Tempo de residência da água).....	44
4.3.3. Taxa de diluição do efluente	46

4.3.4. Dados de Esgotamento Sanitário	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1. Análise da Modelagem Hidrodinâmica	48
5.1.1. Velocidade e Vazão	48
5.2. Análise da Modelagem de Transporte Euleriano	58
5.2.1. Taxa de Renovação da Água.....	58
5.2.2. Idade da Água (Tempo de residência da água).....	63
5.2.3. Taxa de Diluição do Efluente	67
6. CONCLUSÕES	73
7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

Lista de Siglas

ANA - Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

UHE - Usina Hidrelétrica

Lista de Figuras

Figura 1: Classes de enquadramento das Águas Doces e seus respectivos usos	5
Figura 2: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH).....	9
Figura 3: Regiões Hidrográficas Brasileiras	21
Figura 4: Fluxogramas da Modelagem	28
Figura 5: Mapa base do reservatório da UHE Itapebi.....	29
Figura 6: Malha de elementos finitos utilizada na discretização do domínio de modelagem da UHE Itapebi	30
Figura 7: Batimetria do domínio de modelagem	31
Figura 8: Localização das estações inseridas no SisBaHiA® para avaliações.	33
Figura 9: Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico ERA5 do ECMWF.	34
Figura 10: Rosa dos ventos.	36
Figura 11: Dados de ventos representativos do mês de fevereiro de 2019, obtidos com dados da Est2.....	37
Figura 12: Dados de ventos representativos do mês de maio de 2019, obtidos com dados da Est2.	37
Figura 13: Dados de ventos representativos do mês de agosto de 2019, obtidos com dados da Est2	38
Figura 14: Dados de ventos representativos do mês de novembro de 2019, obtidos com dados da Est2.....	38
Figura 15: Representação de ventos no dia 01 de fevereiro de 2019.....	39
Figura 16: Série temporal de evaporação diária (mm/h) de 2019.....	40
Figura 17: Série temporal de precipitação diária (mm/h) de 2019.	40
Figura 18: Precipitação Mensal (Est3 e Est2).....	41
Figura 19: Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo.....	42
Figura 20: Segundo dia após a condição inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para o cálculo da Taxa de Renovação.....	44
Figura 21: Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Idade da Água	45
Figura 22: Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Taxa de diluição do efluente.	46
Figura 23: Séries Temporais do módulo de Velocidades e Vazões nodais na entrada do reservatório.	48
Figura 24: Séries temporais de velocidade em alguns pontos do reservatório	49

Figura 25: Séries temporais de velocidade em córregos afluentes e alguns pontos do reservatório.	49
Figura 26: Mapa de intensidade e direção da velocidade média anual.....	51
Figura 27: Séries Temporais do módulo de vazão em três pontos do reservatório da UHE Itapebi	52
Figura 28: Séries Temporais de Vazão Nodal na entrada e saída do reservatório.....	53
Figura 29: Mapa de vazão média por metro linear no verão em todo o reservatório da UHE Itapebi.	54
Figura 30: Mapa de vazão média por metro linear no outono em todo o reservatório da UHE Itapebi.	55
Figura 31: Mapa de vazão média por metro linear no inverno em todo o reservatório da UHE Itapebi.	56
Figura 32: Mapa de vazão média por metro linear na primavera no reservatório da UHE Itapebi	57
Figura 33: Taxa de Renovação da água no início e no final do reservatório da UHE Itapebi.	59
Figura 34: Mapa da Média anual (2019) de Taxa de Renovação da Água no reservatório da UHE Itapebi.	60
Figura 35: Mapa de Taxa de Renovação da Água média no verão de 2019 no reservatório da UHE Itapebi	61
Figura 36: Mapa de Taxa de Renovação da água média no outono de 2019, considerando o verão como condição inicial	61
Figura 37: Mapa de Taxa de Renovação da água média no inverno de 2019, considerando o verão como condição inicial	62
Figura 38: Mapa de Taxa de Renovação da água média na primavera de 2019, considerando o verão como condição inicial	62
Figura 39: Média temporal da idade da água no verão de 2019 no reservatório da UHE Itapebi	64
Figura 40: Média temporal da idade da água no outono de 2019 no reservatório da UHE Itapebi	64
Figura 41: Média temporal da idade da água no inverno de 2019 no reservatório da UHE Itapebi	65
Figura 42: Média temporal da idade da água na primavera de 2019 no reservatório da UHE Itapebi	65
Figura 43: Séries temporais de idade da água no reservatório da UHE Itapebi	66

Figura 44: Mapa de diluição do efluente no verão no reservatório da UHE Itapebi	67
Figura 45: Mapa de diluição do efluente no outono no reservatório da UHE Itapebi	68
Figura 46: Mapa de diluição do efluente no inverno no reservatório da UHE Itapebi	69
Figura 47: Mapa de diluição do efluente na primavera no reservatório da UHE Itapebi	70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Cenários utilizados na modelagem de acordo com a sazonalidade.	32
Tabela 2: Coordenadas das Estações de dados meteorológicos.....	33
Tabela 3: Precipitação total das estações do ano.	41

1. INTRODUÇÃO

A Lei Nº 9.433 de 1997, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, objetiva assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável; a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997).

De acordo com Von Sperling (2014), a qualidade da água resulta de fenômenos da natureza e ações antrópicas. Sendo assim, pode-se dizer que esta é função das condições naturais e do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica. A qualidade da água é afetada pelo escoamento superficial e pela infiltração no solo, resultantes da precipitação atmosférica, e pela ação antrópica, como lançamento de efluentes domésticos ou industriais, aplicação de defensivos agrícolas no solo.

No entanto, nesse comprometimento com o monitoramento da qualidade da água deve-se preservar os corpos hídricos, reservatórios e mananciais, garantindo a presença das matas ciliares e fiscalização do lançamento de esgoto doméstico, agrícola e industrial, para se garantir água potável e saneamento básico à população.

O conhecimento dos mecanismos envolvidos na preservação desta qualidade é essencial para que o planejamento dos recursos hídricos possa ser feito com mínimo dano ao meio ambiente, tornando-se necessário o desenvolvimento de instrumentos tecnológicos capazes de conhecer o sistema hídrico e criar condições técnicas que possam apoiar as decisões relacionadas à gestão dos recursos hídricos. O conhecimento dos usos atuais e potenciais de cada trecho de um corpo de água permite que seja realizada a identificação e o diagnóstico dos fatores que afetam a qualidade da água (HESPANHOL, 2009).

Gerenciar adequadamente os recursos hídricos de uma região demanda conhecimento quantitativo e qualitativo. Muitas vezes tais conhecimentos não existem devido à escassez de dados ambientais na região. Utilizar modelos computacionais para simular tais ambientes é uma metodologia que permite a obtenção de resultados coerentes à realidade local, além de simular a complexidade hidrodinâmica quanto às forças que atuam nele. A possibilidade de interpolar e extrapolar dados por meio de modelagem computacional é um benefício para a

gestão hídrica. Entender o sistema hídrico de forma global e, conseqüentemente, conhecer os processos químicos, físicos e biológicos do ecossistema, é essencial para criar alternativas sustentáveis de desenvolvimento.

Um dos principais problemas ambientais relacionado ao sistema hídrico é decorrente do excesso da carga poluidora, doméstica ou industrial, lançada no meio hídrico, bem como do aumento da demanda de água, que reduz as vazões e favorece as contaminações. Neste contexto, o controle da poluição dos recursos hídricos é um importante aliado para a implementação de ações de prevenção da saúde da população e do meio ambiente, tendo em vista a importância desses sistemas para a vida humana. Nota-se que a poluição hídrica de origem química afeta a saúde da população, além de dificultar ações para mitigação de ecossistemas degradados.

1.1. Justificativa – Histórico e Relevância

Há diversas lacunas a respeito da discussão sobre a qualidade de água e capacidade de depuração de corpos hídricos, e qual o real impacto causado pelos diversos agentes poluidores. O número de estações fluviométricas ou hidrométricas, com dados de vazão e de qualidade de água, ainda é muito reduzido e sua distribuição geográfica no reservatório é bastante limitada, ainda que esforços estejam sendo feitos por alguns agentes públicos. Por outro lado, a modelagem matemática possibilita o estudo contínuo no espaço e tempo.

Sendo assim, pode-se observar a importância em realizar estudos sobre a qualidade da água em diversos cenários de poluição hídrica com o principal intuito de utilizar as informações como subsídio para a tomada de decisão em programas de gestão de recursos hídricos conforme regula a lei nº 9.433 de 1997, mais conhecida como lei das águas.

Assim como, no caso dos empreendimentos de geração de energia hidrelétrica, onde a Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 003 de 2010 visa balizar as condições e os procedimentos para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos.

Tais atividades são de extrema importância para o levantamento de dados e o conhecimento dos regimes hidrológicos da bacia onde está inserido o empreendimento e, assim, permitir definir as regras de operação visando o aproveitamento ótimo do potencial

hidráulico dos reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos. Vale destacar a obrigatoriedade dos concessionários e autorizados em atenderem a Resolução Conjunta ANA/ANEEL 003 de 2010, devendo inclusive, as declarações de reserva de disponibilidade hídrica e as outorgas de direito de uso dos recursos hídricos para fins de aproveitamento de potenciais hidrelétricos, emitidas pela ANA, incluir uma condicionante específica para este cumprimento.

Os aspectos e impactos ambientais associados ao problema da degradação da qualidade da água de rios e reservatórios são variados e complexos. As discussões e conceitos relacionados ao tema passam por questões políticas, culturais, técnicas e econômicas. Esta dissertação buscou contribuir e refletir sobre o tema, utilizando a modelagem computacional como ferramenta de diagnóstico e apoio científico ao gerenciamento da qualidade da água. Nesse sentido, objetivou-se estimar o impacto causado pelo lançamento de esgoto sanitário proveniente do município de Salto da Divisa ao longo do reservatório da UHE Itapebi e visualização dos principais pontos com possível maior proliferação de macrófitas, o que atualmente gera custos de retirada e eventuais manutenções e limpezas de turbinas.

1.2. Objetivo Geral

A presente dissertação tem como objetivo principal avaliar a qualidade ambiental no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itapebi, com foco na circulação hidrodinâmica e suas influências na qualidade da água.

1.3. Objetivos Específicos

- a. Analisar os padrões de circulação hidrodinâmica, considerando sazonalidades de período seco e chuvoso;
- b. Analisar a Taxa de Renovação e a Idade da Água ao longo do reservatório;
- c. Identificar o alcance e diluição de plumas hipotéticas de lançamento de efluentes sanitários e avaliar o impacto causado ao longo do reservatório, em locais que recebem ou não lançamento de efluente;
- d. Identificação de áreas no reservatório da UHE Itapebi com maior grau de poluição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são abordados os conceitos gerais sobre a hidrodinâmica e qualidade das águas em reservatórios e legislação, como também uma breve descrição matemática dos modelos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

2.1. Qualidade da Água em Reservatórios de Hidrelétrica

Atualmente um dos fenômenos que vem interferindo em reservatórios são as alterações climáticas. A ocorrência de secas prolongadas e chuvas extremas interferem diretamente na dinâmica de renovação da água e no aporte de sedimentos, devido às mudanças no balanço hídrico. Em busca de melhorar a qualidade das águas é preciso expandir o olhar para os problemas enfrentados na região, com o intuito de melhorar as condições sanitárias e ambientais da região do reservatório, recuperando os ecossistemas.

O grau de variabilidade espaço-temporal dos recursos hídricos é bastante elevado. Esta mudança se dá tanto de maneira qualitativa quanto quantitativa em função da origem e a variação do escoamento superficial assim como das mudanças nas vazões dos rios e do uso e ocupação do solo. O acompanhamento da evolução dos parâmetros em um corpo hídrico permite identificar possíveis fontes de poluição e variações fora das condições normais para aquele ambiente (FINOTTI, 2009).

Visto que as atividades realizadas no entorno do corpo hídrico influenciam na sua qualidade, a legislação ambiental aplicada a estes ambientes condiz com as atividades exercidas no local. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA nº 357 de 2005 e seu complemento nº 410 de 2011 dispõem sobre a classificação dos corpos de água e sobre as diretrizes ambientais necessárias para o seu enquadramento.

Os padrões de qualidade de um corpo hídrico são classificados quanto à sua salinidade e quanto aos usos previstos. A classificação quanto a qualidade necessária, varia de acordo com os usos preponderantes, conforme a Figura 1.

USOS DAS ÁGUAS DOÇES		CLASSES DE ENQUADRAMENTO DOS CORPOS D'ÁGUA				
		ESPECIAL	1	2	3	4
PRESERVAÇÃO DO EQUILÍBRIO NATURAL DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS		Mandatório em UC de Proteção Integral				
PROTEÇÃO DAS COMUNIDADES AQUÁTICAS			Mandatório em Terras Indígenas			
RECREAÇÃO DE CONTATO PRIMÁRIO						
AQUICULTURA						
ABASTECIMENTO PARA CONSUMO HUMANO		Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento conv. ou avançado	
RECREAÇÃO DE CONTATO SECUNDÁRIO						
PESCA						
IRRIGAÇÃO			Hortalças consumidas cruas ou frutas ingeridas com película	Hortalças, frutíferas, parques, jardins e campos de esporte	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
DESSEDENTAÇÃO DE ANIMAIS						
NAVEGAÇÃO						
HARMONIA PAISAGÍSTICA						

Figura 1: Classes de enquadramento das Águas Doças e seus respectivos usos. (Resolução CONAMA n°357/2005, adaptado de ANA, 2013)

2.2. Modelos Computacionais no Estudo Ambiental

Em geral, os corpos d'água naturais apresentam certa complexidade. Para melhor entendimento do corpo hídrico a aplicação de modelos computacionais é uma excelente opção, pois são ferramentas integradoras capazes de permitir uma visão dinâmica de processos em sistemas ambientais complexos. Em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como em aplicações visando à gestão e ao gerenciamento ambiental, a utilização de modelos tem se tornado cada vez mais presente.

Rosman (2010) destaca que o modelo matemático funciona como uma ferramenta, que auxilia no diagnóstico de processos ambientais, no prognóstico de cenários, na interpolação e extrapolação de dados, normalmente escassos tanto no espaço quanto no tempo, no auxílio ao planejamento de campanhas de amostragem, dentre outras aplicações.

Segundo Von Sperling (2014), modelos ambientais objetivam representar a realidade tal como é observada ou medida, e por isto, dificilmente podem representar toda a complexidade das múltiplas interações nos sistemas ambientais, várias delas não mensuráveis ou quantificáveis. Modelos matemáticos são compostos por uma estrutura teórica, representada por equações matemáticas, valores numéricos dos parâmetros das equações e dados de entrada

e de saída, frequentemente compreendendo observações/medições de campo ou de laboratório e relacionando fatores externos com a resposta do sistema.

Os modelos matemáticos objetivam representar a natureza dos sistemas através de equações matemáticas, enquanto a simulação é o processo de utilização do modelo. O modelo hidrológico, por sua vez, consiste em uma ferramenta que permite analisar e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas, como avaliado em Tucci (2005).

A utilização de modelos para análises de diagnósticos permite a otimização de custos de monitoramento e medição através da integração de informações espacialmente dispersas, que geralmente são obtidas pontualmente em estações de medição. Também permitem ampliar o conhecimento para regiões onde não existem dados medidos e, assim, contribuir na compreensão de processos dinâmicos, além de auxiliar na interpretação de medições realizadas em estações fixas. Destaca-se que apenas modelos baseados em princípios de conservação podem, de maneira consistente, interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento mais amplo da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais (ROSMAN; ROSMAN & SOUZA, 2016).

Já nas análises de prognóstico, os modelos computacionais também podem fornecer grande contribuição. Com eles, é possível simular cenários para estudos e projetos, mapear áreas de risco e determinar prováveis destinos de contaminantes. Modelos também podem ser aplicados à Planos de Emergência, por exemplo, na definição de estratégias de ações em casos de derrames de contaminantes, além de fundamentar a elaboração de planos de mitigação e prever a evolução de eventos em tempo real ROSMAN; ROSMAN & SOUZA, 2016).

Uma grande limitação dos modelos com base física mais consistente é a grande quantidade de informação requerida. São necessárias informações sobre características físicas, valores de cargas pontuais de poluição além de uma série de dados climáticos. A discretização temporal e/ou espacial disponível dessas informações nem sempre é a mais adequada, representando uma importante fonte de incertezas nos resultados de qualidade de água (CHAUBEY; COSTELLO; COTTER; NELSON & SOERENS, 2003).

Os dados ambientais são em geral escassos e, paradoxalmente, imprescindíveis para estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento de corpos de águas naturais. A escassez decorre do alto custo envolvido no levantamento de dados. Através de modelos pode-se

interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos, para toda a área de interesse (ROSMAN, 2021).

A escolha do modelo mais adequado aos objetivos de um determinado estudo ou projeto é uma tarefa de otimização entre o nível de precisão desejado para os resultados e a complexidade e quantidade dos parâmetros envolvidos (ALBANO, 2004). Espera-se que os resultados sejam próximos aos dados experimentais, entretanto, a escolha do modelo não pode se basear unicamente no ajuste a esses dados.

O modelo deve possuir poder de previsão. Quanto maior o campo de aplicação de um modelo, isto é, as condições sobre as quais o modelo é válido, maior o seu poder de previsão. Modelos determinísticos são, em geral, de maior poder de previsão do que modelos estocásticos, embora estes possam conduzir a melhores ajustes aos dados experimentais (VON SPERLING, 2007).

A eficiência do modelo está diretamente relacionada a uma correta definição dos processos químicos, físicos e biológicos e às constantes envolvidas. Nos corpos d'água brasileiros, ainda existem muito poucos dados para determinação dessas constantes, o que pode gerar um grau de incerteza bastante grande nos resultados obtidos (ROSMAN, 2016).

De acordo com Rosman (2021), a necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

Entretanto, apesar de tantas funcionalidades e contribuições, é importante ressaltar que os modelos são ferramentas, e seu uso de modo inadequado pode levar a resultados errôneos. Portanto, é fundamental que os usuários desses modelos compreendam sua concepção e tenham um embasamento teórico para definir condições de contorno e iniciais coerentes, além de analisar os resultados.

2.3. Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHiA®

O SisBaHiA® é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Nas seções a seguir são dadas breves explicações sobre os modelos utilizados no estudo. Nesse sentido, essas abordagens foram desenvolvidas, conforme será mais bem detalhado no Capítulo 4. O texto apresentado nesta seção reproduz de forma adaptada o texto, bem como fórmulas, apresentados com mais detalhes na Referência Técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2021), disponível em www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

É um sistema de modelos computacionais em elementos finitos para previsão do escoamento ou movimento das águas e também para a previsão da qualidade das águas ou transporte de grandezas escalares em corpos de água naturais. Este é capaz de realizar a interpolação e extrapolação, espacial e temporal, para toda a área de interesse a partir das informações obtidas em poucos pontos de medição, o que permite otimizar custos de monitoramento e medição, integrando informações espacialmente dispersas; ampliar o conhecimento para regiões de interesse nas quais não há medições através da interpolação e extrapolação das medições; e entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais (ROSMAN, 2021).

Os resultados dos modelos e análises pertinentes são apresentados em Resultados e Discussões.

2.3.1. Modelo Hidrodinâmico

O SisBaHiA® possui modelos hidrodinâmicos planejados para representar escoamentos em corpos de água com geometria complexa, usualmente presente em corpos de água naturais. A discretização espacial utiliza elementos finitos quadrangulares biquadráticos e/ou triangulares quadráticos, possibilitando boa representação de contornos de corpos de água naturais, considerando as limitações de processamento computacional.

Escoamentos com escalas de movimentos horizontais ao menos 20 vezes maiores do que a profundidade podem ser considerados como escoamentos de águas rasas. Logo, o campo de pressões pode ser tido como quase hidrostático. Além disso, como tende a ser verticalmente

homogênea, justifica-se a aplicação de modelo hidrodinâmico promediado na vertical, isto é, bidimensional na horizontal, também conhecido como modelo 2DH.

Nesses casos, as equações diferenciais governantes do movimento, denominadas equações de águas rasas, são deduzidas a partir das equações gerais de escoamentos em regime turbulento, conhecidas como equações de Navier-Stokes, as quais expressam os princípios de conservação de massa e de balanço de quantidade de movimento via segunda Lei de Newton. Deduções numéricas e analíticas das equações podem ser encontradas na Referência Técnica.

No modelo 2DH, a cada intervalo de tempo, são calculadas as componentes das velocidades médias na vertical, $U(x, y, t)$ na direção x , e $V(x, y, t)$ na direção y , as elevações da superfície livre, $z = \zeta(x, y, t)$. As componentes da velocidade resolvível, média na vertical, podem ser definidas através da Equação 1.

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad \text{e} \quad V(x, y, z, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz \quad (1)$$

Na Figura 2, as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como (x, y) (x_1, x_2) e (u, v) (u_1, u_2) utilizando o índice $i = 1, 2$.

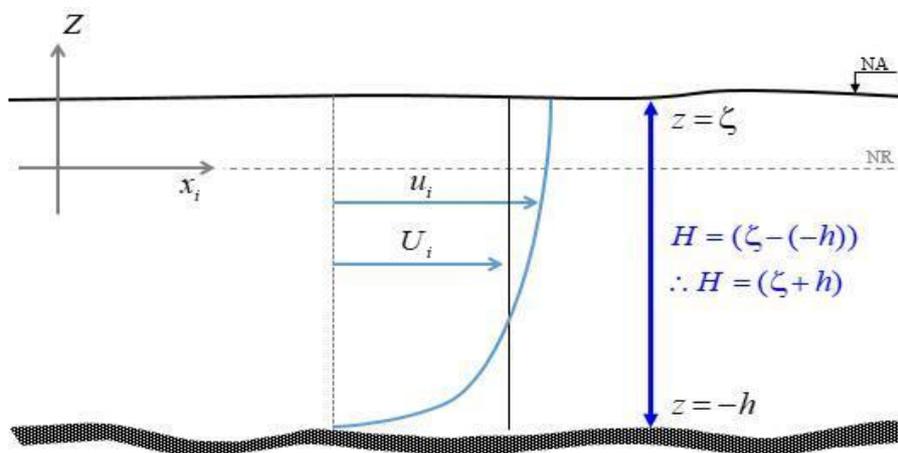


Figura 2: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência e, U_i , é a velocidade promediada na vertical. Fonte: Rosman, 2021

Note que a variação da cota batimétrica h com tempo só ocorre na modelagem acoplada com processos sedimentológicos e evolução morfológica de batimetria.

Para determinar essas incógnitas são necessárias três equações: equação da continuidade integrada na vertical (Equação 2), em que se considera batimetria fixa durante o

período de simulação; e equações de quantidade de movimento integradas na vertical, nas direções x (Equação 3) e y (Equação 4).

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é chamado de FIST3D (*filtered in space and time 3D*). Esta linhagem permite simular o comportamento hidrodinâmico de corpos d'água naturais ao resolver as equações de Navier-Stokes considerando as aproximações de águas rasas (aproximação de pressão hidrostática) e a aproximação de Boussinesq. Neste estudo foi realizado o uso do módulo 2DH, que resolve as componentes das velocidades médias promediadas na vertical e a elevação da superfície livre ao longo do domínio modelado.

Para resolver um escoamento com regime turbulento, usam-se as equações de Navier-Stokes, que são baseadas no princípio da conservação da quantidade de movimento, juntamente com a equação da continuidade (do volume), uma equação de estado e equações de transporte para cada constituinte da equação de estado. Estas equações possibilitam representar o movimento hidrodinâmico em qualquer corpo d'água natural. Assim para calcular a circulação no módulo 2DH, as seguintes equações são utilizadas:

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical, conforme Equação 2.

$$\frac{\partial(\zeta+h)}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q = 0 \quad (2)$$

Onde:

$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} =$	Variação da coluna d'água no tempo.
$\frac{\partial UH}{\partial x} =$	Variação da vazão através da coluna d'água na direção x.
$\frac{\partial VH}{\partial y} =$	Variação da vazão através da coluna d'água na direção y.

Os termos utilizados das Equações de (3) e (4) são semelhantes, havendo mudança apenas quanto à direção. Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - 2\Phi \sin(\theta) V - \frac{U}{H} \sum q \quad (3)$$

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \sin(\theta) U - \frac{V}{H} \sum q \quad (4)$$

Onde:

$$\frac{\partial U}{\partial t} =$$

Representa a aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} =$$

Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.

$$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} =$$

Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.

$$-g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} =$$

Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade ρ/ρ_o da água na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para locais com menor a densidade.

$$\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) =$$

Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade

de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.

$$\frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S) =$$

Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.

$$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^B) =$$

Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^E) =$$

Representa a tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$-\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) =$$

Representa o efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, e.g., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda.

$$2\Phi \sin(\theta) V =$$

Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, i.e., em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos.

$$-\frac{U}{H} \sum q =$$

Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P , evaporação q_E e infiltração q_I .

2.3.2. Modelo De Transporte Euleriano

O modelo de transporte Euleriano realiza a simulação com reações cinéticas de produção ou consumo de substâncias presentes no escoamento. Quando o constituinte tem comportamento ativo, ou seja, gera gradientes de pressão que influem de modo relevante no movimento das águas, o transporte do constituinte pode ser acoplado à modelagem hidrodinâmica. Quando o comportamento do constituinte é passivo, isto é, não interfere de forma significativa na hidrodinâmica, a solução do problema de transporte pode ser desacoplada do modelo hidrodinâmico, por não haver interferência na circulação.

Dentre importantes aplicações, estão a avaliação de Taxa de Renovação e Idade da Água e Taxa de Diluição de Efluentes, que representam metodologias de análise de tempos hidráulicos característicos mais apropriados para análises de corpos de água heterogêneos.

Para estudos hidrodinâmicos, é essencial conhecer os tempos hidráulicos característicos das águas, que têm grande importância no controle de processos biogeoquímicos, biológicos e na vulnerabilidade à poluição. Usualmente, são encontrados estudos de estuários e reservatórios, que adotam Tempo de Residência (TR) para caracterizar o tempo requerido para a renovação das águas. Esse parâmetro é determinado pela razão de determinado volume (V) com uma vazão (Q), descrita na Equação 5, que também pode ser encontrado na literatura com as nomenclaturas: Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), definido na NBR 12209/2011 e utilizado na área de engenharia sanitária para dimensionamento de tanques e reatores; e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) (TUNDISI& TUNDISI, 2016).

$$T = \frac{V}{Q} \quad (5)$$

A aplicação dessa razão para estudo da renovação das águas em corpos d'água naturais pode gerar resultados inconsistentes, visto que um corpo hídrico natural tem geometria e hidrodinâmica mais complexas do que um reator. A aplicabilidade do tempo de residência genérico faz sentido para uma análise inicial em corpos de água relativamente homogêneos e bem misturados.

Segundo Souza (2017), esse tempo não representa valores nem próximos da realidade, visto que a renovação das águas nesses sistemas ocorre com variações espaciais e temporais. Tais variabilidades dependem fortemente da geometria do corpo hídrico e circulação hidrodinâmica. Sendo assim, a partir da modelagem computacional, surgem os conceitos de Taxa de Renovação e Idade da Água, que juntos descrevem, de forma mais coerente e detalhada, a renovação das águas em reservatórios.

Rosman (2021) discute em detalhes esses conceitos. A Taxa de Renovação é definida como uma porcentagem de mistura entre águas internas e externas ao sistema. Essa taxa representa bem a variação temporal e espacial da renovação das águas, que através de modelagem computacional, leva em consideração diversos fatores que interferem na circulação hidrodinâmica.

A Idade da Água também é um parâmetro importante na indicação da relevância de processos cinéticos no corpo d'água, contabilizando quanto tempo determinada parcela de água permanece circulando dentro do domínio de interesse. Esse parâmetro é o que, conceitualmente, aproxima-se da definição de tempo de residência ou tempo de retenção hidráulica. No entanto, apresenta uma distribuição temporal e espacial, uma vez que as idades são calculadas via modelagem computacional.

Os parâmetros de Taxa de Renovação e Idade da Água são calculados através de modelos de transporte Euleriano, sendo, dessa forma, mais apropriados para corpos de água heterogêneos e variados. Esses modelos permitem estimativas mais detalhadas de cada região do domínio de estudo, podendo contribuir para formação de um melhor embasamento para se inferir, localmente, se os processos cinéticos de eutrofização serão relevantes ou não, para a qualidade das águas.

Rosman, Rosman & Souza (2016) destacam que quanto maior a Taxa de Renovação, menor será a Idade da Água. Quando o objetivo é analisar quanto tempo a água fica em diferentes setores, deve-se computar o parâmetro Idade da Água em diferentes pontos, ao longo do tempo

O modelo de Taxa de Renovação considera uma substância de referência passiva, e variação de sua concentração não interfere na circulação hidrodinâmica, e conservativa, que não possui reações cinéticas de produção ou consumo, nem velocidade de sedimentação e ressuspensão. Nessa modelagem, toda água do domínio de interesse recebe índice de renovação inicial igual a 0%, isto é, a substância recebe concentração igual a zero. As águas que entram no domínio de modelagem, seja pelos rios existentes ou pelo mar, devem receber valor de referência 100% em sua condição de contorno. O valor de concentração 0%, definido para as águas dentro do domínio, indicam zero renovado, e o valor de 100%, definido fora do domínio, indica água completamente nova.

Deste modo, no decorrer da simulação, as águas com diferentes concentrações se misturam devido à circulação hidrodinâmica. Águas com índice 0% se mesclam com as águas com índice 100% na medida em que ocorre a renovação. Por exemplo, se em um determinado ponto da área de estudo, ao fim da simulação, houver uma taxa de renovação de 70%, isto indica que, neste local, 70% da água presente naquele instante resulta de águas que entraram

no domínio de modelagem após o início da simulação, enquanto 30% já se encontravam dentro do sistema no início da simulação.

Cada ponto do domínio pode apresentar uma Taxa de Renovação diferente, uma vez que depende da magnitude de correntes e da turbulência em cada local. Além disso, essa taxa varia no tempo. Assim, caso seja efetuada uma simulação por um período suficientemente longo, a Taxa de Renovação tende a 100% em todo o domínio.

O modelo de Idade da Água, mais detalhado no capítulo de metodologia, retrata o tempo que uma parcela de água permanece dentro do domínio de modelagem. Para computar esse valor, o modelo considera uma substância passiva, que possui apenas reação cinética de decaimento de primeira ordem com uma taxa k constante, maior que zero.

O princípio da conservação de massa determina o transporte bidimensional, promediado na vertical, de um determinado constituinte em um corpo d'água natural. No modelo de transporte Euleriano, a Equação 6 representa tal princípio, que também é conhecida como equação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H} (qP - qE) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \sum R + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + \right. \\ & H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \left. + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + \right. \right. \\ & \left. \left. H \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Onde,

- $C =$ Concentração da substância de interesse.
- $qP, qE, q_{Ia} =$ Valores dados de vazões de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente, por unidade de área, e.g., [$m^3/s/m^2$].
- $D_{ij} =$ Representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal.
- $\Lambda_k = \alpha_k \Delta_k =$ Escalas de largura de filtragem local na dimensão e são parâmetros de calibração. O valor x calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem.

Quando há um descarte de um efluente no corpo d'água, imediatamente após seu lançamento, a concentração a jusante é inferior à concentração inicial do efluente, processo

chamado de diluição, variando de acordo com as vazões e do local de despejo da fonte, conforme a Equação 7. Vale ressaltar que o volume de diluição no campo próximo deve ser maior que o próprio volume do efluente.

$$S = \frac{V_c}{V_e} = \frac{V_c}{|Q_e|\Delta_t} \quad (7)$$

Onde:

- S = Fator de Diluição
- V_c = Volume de diluição no chamado campo próximo
- V_e = Volume do efluente
- Q_e = Vazão de emissão da fonte
- Δ_t = Passo de tempo do modelo

2.4. Legislação para Usinas Hidrelétricas

A Constituição de 1988 assumiu um papel muito importante na gestão dos recursos hídricos brasileira. Esta definiu a água como bem de uso comum e alterou o domínio das águas do território nacional, já definida anteriormente pelo Código de águas de 1934 (Decreto nº 24.63 de 1934). Desde então, coube à União e aos Estados promover a gestão do uso dos recursos hídricos de sua competência (CRUZ & TUCCI, 2008).

Posteriormente, a lei nº. 9.433 de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que organizou o sistema de gestão por bacias hidrográficas e estabeleceu os instrumentos de gestão dos recursos hídricos no país: enquadramento dos corpos de água em classes segundo os usos preponderantes, outorga de direito de uso, cobrança pelo uso da água e sistema de informações sobre recursos hídricos (PORTO, 2008).

Apesar de possuir uma das legislações mais avançadas do mundo (PORTO, 2008), passadas mais de duas décadas da promulgação da lei 9.433, muitos dos instrumentos de gestão ainda não foram completamente implementados. Como reflexo dessa ausência ou da má gestão dos cursos de águas superficiais e subterrâneas, percebe-se uma degradação acentuada da qualidade da água em importantes rios brasileiros, o que decorre de uma má utilização dos recursos hídricos, como o descarte de esgoto doméstico no meio urbano e uso não controlado de aditivos agrícolas.

Essa é uma realidade global, atualmente, em que mais de três milhões de pessoas morrem todos os anos devido a causas relacionadas à água e ao saneamento (OPS, 1996). Os aspectos qualitativos dos mananciais evidenciam que o recurso água é limitado. Esse recurso

deveria ser visto como prioridade em termos de quantidade e qualidade, o que requer, portanto, uma gestão eficiente e eficaz.

2.4.1. Resolução Conjunta ANA/ANEEL 003 de 2010

No caso dos empreendimentos hidrelétricos, a Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 3, de 10 de agosto de 2010, a qual revoga a Resolução ANEEL nº 396 de 04 de dezembro de 1998, determina mais algumas exigências quanto ao monitoramento dos dados hidrológicos dos reservatórios das usinas.

Esta Resolução estabelece as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos.

Para caracterizar a água, são determinados diversos parâmetros que representam as características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros são indicadores qualitativos, que quando alcançam valores superiores ao estabelecido para um determinado uso, são caracterizados como impuros e fora dos padrões. Os valores são estabelecidos de acordo com a Resolução CONAMA 357 de 2005 e Resolução CONAMA 393 de 2007.

Além disso, a Resolução exige que em locais de monitoramento fluviométrico e sedimentométrico e de monitoramento da qualidade da água deverão ser realizadas, no mínimo, quatro medições no decorrer do ano. Sendo as medições do monitoramento fluviométrico e sedimentométrico com finalidade de definir e atualizar as curvas de descarga líquida e sólida, respectivamente. Com isso, as medições de descarga líquida, descarga sólida e de qualidade da água deverão ocorrer simultaneamente.

2.4.2. Atendimento as Condicionantes do Processo de Licenciamento Ambiental

Além disso, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) determina que a construção de usinas hidrelétricas com potência superior a 10 MW passe por processo de licenciamento ambiental que envolve a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e demais documentos que servem de base para a avaliação do órgão licenciador sobre a viabilidade do empreendimento e para a tomada de decisão relativa à emissão das licenças ambientais.

Um dos objetivos do EIA e do processo de licenciamento ambiental em geral é prever os impactos ambientais que podem ocorrer nas fases de construção e operação das usinas hidrelétricas, visando estabelecer medidas de controle e mitigação, ou até mesmo, alternativas de menor impacto. Além disso, diversos casos de usinas hidrelétricas cujos impactos ambientais diferem qualitativamente e quantitativamente do que foi previsto no processo de licenciamento.

Os Programas Básicos Ambientais estipulados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis – IBAMA atendem às condicionantes das Licenças Ambientais, dentre eles: Programa de Monitoramento Limnológico e de Qualidade da Água; e o Programa de Monitoramento e Controle de Macrófitas Aquáticas.

O Programa de Monitoramento Limnológico e de Qualidade da Água tem como objetivo geral prognosticar e mensurar as modificações na qualidade da água advindas das transformações do ambiente decorrentes da implantação, enchimento e operação do empreendimento, e subsidiar a adoção de medidas de controle, caso sejam identificados problemas de qualidade da água.

A proposta destes Programas é prevenir, controlar e/ou mitigar os impactos que venham a alterar o regime fluvial, as características hidráulicas de escoamento, e a retenção de sedimentos no reservatório, assim como os impactos que os recursos hídricos já causam sobre o meio biótico, como a alteração da qualidade da água à jusante da barragem e do estado trófico da água; a redução das condições de oxigenação da água à montante da barragem; e o aumento excessivo de Macrófitas Aquáticas no reservatório das UHEs.

O monitoramento Limnológico apresenta um papel muito importante, pois permite que sejam adotadas medidas de controle emergenciais sobre eventuais alterações ambientais, possibilitando o aprimoramento das previsões relacionadas à qualidade das águas.

O Programa de Monitoramento Limnológico e da Qualidade de Água atende às condicionantes das Licenças Ambientais, além disso, outros instrumentos legais estão relacionados com o programa:

- Resolução ANA Nº 621, de 19 de novembro de 2010, que dispõe sobre a reserva de disponibilidade hídrica;

- Resolução Conjunta ANEEL/ANA Nº 3, de 10 de agosto de 2010, que estabelece as condições e procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia elétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos;
- Resolução CONAMA Nº 357 de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes; e
- Resolução CONAMA Nº 344 de 2004, estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação dos sedimentos.

O Programa de Monitoramento e Controle de Macrófitas Aquáticas objetiva monitorar e identificar possíveis alterações nos padrões de distribuição e composição da comunidade de macrófitas aquáticas na área de influência da UHE, em virtude das alterações na qualidade da água, assim como a proposição de mecanismos de controle e mitigação em caso de proliferação de macrófitas, sobretudo de espécies flutuantes em consequência do processo de eutrofização devido à formação dos reservatórios das UHEs.

Além disso, este Programa contribui no âmbito das atividades de monitoramento de vetores, visto que algumas espécies de macrófitas aquáticas funcionam como habitats para uma grande variedade de animais, incluindo insetos que atuam como vetores de doenças.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

3.1. Usina Hidrelétrica Itapebi

A usina hidrelétrica de Itapebi está implantada no rio Jequitinhonha, abrangendo parte dos municípios baianos de Itapebi, Itagimirim e Itarantim e Salto da Divisa (MG). Está localizada no extremo sul da Bahia, a 8 km a montante da cidade de Itapebi e a 118 km da foz no Oceano Atlântico.

Este aproveitamento tem o limite do reservatório situado imediatamente após a divisa dos Estados da Bahia e de Minas Gerais, inundando terras num total de 62,48 km² e acumula um volume d'água de 1,6 bilhão de metros cúbicos. A Usina Hidrelétrica de Itapebi é um empreendimento com potência instalada de 450 MW, podendo atender a mais de um milhão de residências. Suas principais estruturas constam de uma barragem de enrocamento com face de concreto, vertedouro, subestação de interligação com a rede básica e casa de força abrigando três turbogeradores, cada um com capacidade de 150 MW.

A usina não tem capacidade de regularizar as cheias do rio Jequitinhonha, pois opera “a fio d'água”, ou seja, toda água afluyente ao reservatório passa para jusante do aproveitamento pelas turbinas, ou em caso de excesso, pelo vertedouro, que tem capacidade para escoar qualquer cheia sem elevar o nível d'água a montante.

De acordo com informações fornecidas pelo empreendimento, o ecossistema aquático da área de influência da UHE Itapebi vem sendo analisado desde a fase de implantação do empreendimento através do Subprograma de Monitoramento Ecológico e o Subprograma de Monitoramento de Qualidade da Água. Por se tratar de acompanhamentos de longo prazo, estes subprogramas permitiram caracterizar o reservatório da UHE Itapebi e áreas limítrofes quanto a suas condições gerais, dentre as quais se destacam a boa qualidade da água do reservatório, com exceção de situações muito localizadas e pontuais; a estabilização do reservatório no que se refere a sua produtividade primária, em um sistema predominantemente mesotrófico com momentos oligotróficos; e picos de produção durante a estiagem.

3.2. Localização

Como proposta para área de estudo foi utilizado o reservatório da Usina Hidrelétrica Itapebi, instalada no município de Itapebi (BA) e dentro dos limites da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, compreendida entre as coordenadas geográficas 15°40'S / 43°48'O e 18°36'S / 39°35'O.

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, o Brasil compreende 12 regiões hidrográficas. A área de estudo pertence à região hidrográfica Atlântico Leste, região em amarelo conforme ilustrado na Figura 3, onde está sendo estudado o rio Jequitinhonha no trecho da divisa do Estado de Minas Gerais com o Estado da Bahia até a foz no Oceano Atlântico já no município de Belmonte (BA).

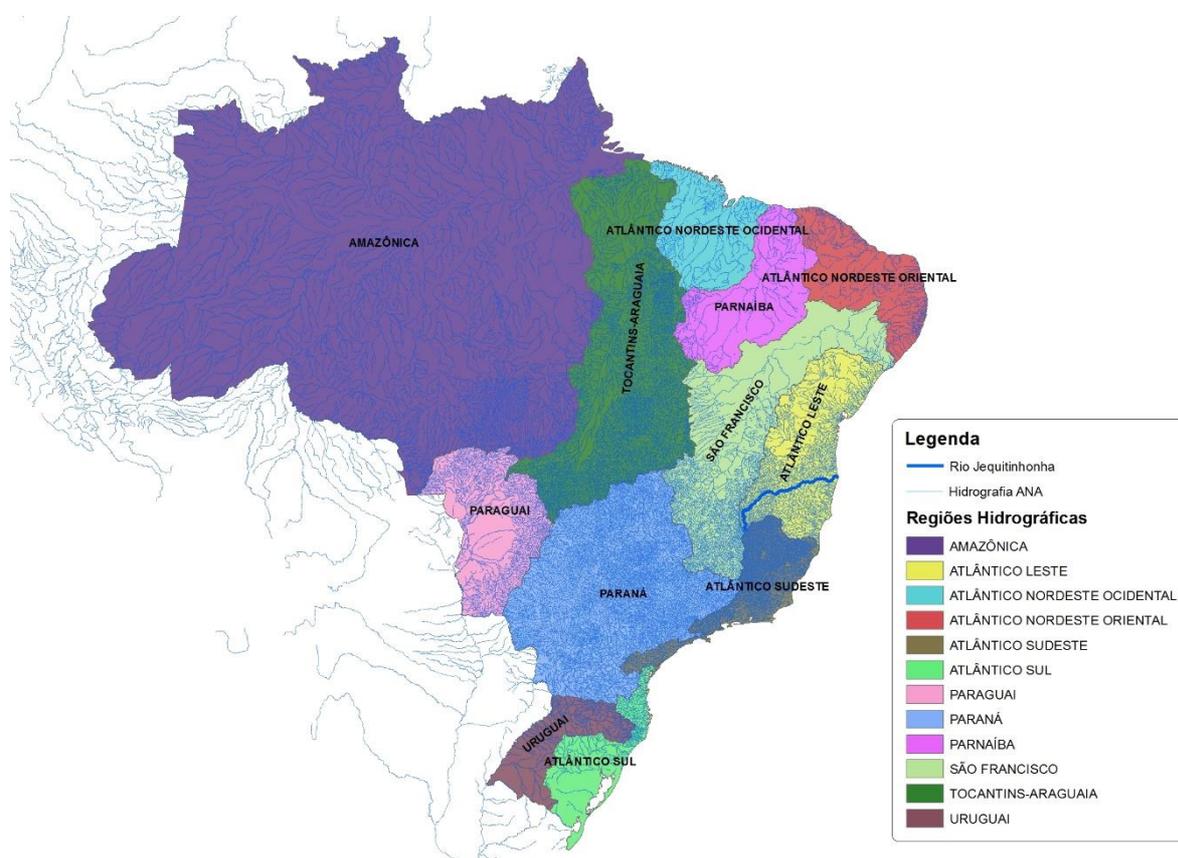


Figura 3: Regiões Hidrográficas Brasileiras. Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de dados INDE (2013).

A região hidrográfica do Atlântico Leste drena parte dos Estados de Sergipe, Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, sendo estes dois últimos os com maior representatividade quanto a área da bacia que abrange nos Estados. Quanto aos biomas que esta bacia abrange podemos citar os mais representativos: Mata Atlântica e Caatinga.

A bacia do rio Jequitinhonha, objeto deste estudo, é uma das mais relevantes quanto à área de drenagem que abrange dentro da região hidrográfica do Atlântico Leste. Esta bacia contempla os Estados de Minas Gerais e Bahia, com área de 70.315 km², sendo que 66.319 km² situam-se em Minas Gerais, enquanto 3.996 km² pertencem à Bahia (IBGE 1997).

O rio Jequitinhonha, das suas nascentes no Pico do Itambé, na Serra do Espinhaço (Minas Gerais) até a foz deltaica em Belmonte (Bahia) no Oceano Atlântico, percorre aproximadamente 1.050 km. Em decorrência das várias diferenciações que ocorre da nascente a foz e para melhor detalhamento da bacia, esta se subdivide em Alta, Média e Baixa. As porções alta e média da bacia estão delimitadas no trecho da nascente (MG) até a divisa dos Estados de Minas Gerais e Bahia, no município de Salto da Divisa (MG). A porção baixa está toda nos domínios do Estado da Bahia e vai de Itapebi até Belmonte.

3.3. Clima

Segundo Gonçalves (1997), a bacia do rio Jequitinhonha apresenta características climáticas que variam desde o clima semiárido ao úmido, com totais pluviométricos anuais que variam entre 600 e mais de 1.600 mm, que são irregularmente distribuídos ao longo do ano. No geral, as chuvas concentram-se basicamente em seis meses do ano (outubro a março), sendo o trimestre dezembro a fevereiro responsável por mais de 50% da precipitação total. O fato é mais grave por ocorrer em pleno período das chuvas, sendo de difícil previsão, geralmente coincidindo com um período de elevadas temperaturas e, conseqüentemente, condicionando altas taxas de evapotranspiração potencial.

A temperatura média anual apresenta pouca variação, entre 21 a 24°C. O mês mais quente é fevereiro e o mais frio é junho. As zonas serranas são amenizadas pelo efeito da altitude e por isso apresentam temperaturas mais amenas, ao contrário das áreas de vales, onde as temperaturas são mais elevadas. A evapotranspiração potencial varia entre 800 a mais de 1.200 mm. A umidade relativa do ar varia entre 60 e 80% de média anual, sendo mais baixa nas áreas mais deprimidas e mais altas nos extremos oriental e ocidental da bacia. (GONÇALVES, 1997)

Em função da taxa de evapotranspiração potencial elevada e pluviometria baixa, a bacia do rio Jequitinhonha apresenta, de modo geral, níveis elevados de deficiência hídrica. Este balanço hídrico desfavorável ainda é agravado pela alta intensidade luminosa, dias longos e temperaturas elevadas ao longo do ano.

3.4. Recursos Hídricos

O rio Jequitinhonha nasce nas serras do Espinhaço, a sul da cidade de Diamantina, nos arredores da localidade de Capivari, sopé do Morro Redondo, a uma altitude aproximada de 1.200m. Sua bacia confina a norte com a bacia do rio Pardo; a sul, limita com a bacia do rio Doce; a sudeste, situam-se divisores do Mucuri e de várias pequenas bacias independentes; a oeste, o maciço do Espinhaço é divisor da bacia do rio São Francisco; e a leste, situa-se o Oceano Atlântico. (GONÇALVES, 1997)

O Jequitinhonha tem regime permanente, abastecido por afluentes procedentes do sistema morfológico do Espinhaço, caracterizado como uma boa área armazenadora de água. Na região do baixo curso, os tributários são, sobretudo periódicos, com regime torrencial na época das chuvas. (GONÇALVES, 1997)

O rio Jequitinhonha apresenta como seus principais afluentes os rios: Itacambiruçu, Salinas, São Pedro e São Francisco pela margem esquerda, e Araçuaí, Piauí e São Miguel, pela margem direita. A área de drenagem referente à UHE Itapebi compreende 97 municípios, sendo 51 deles totalmente inseridos na bacia e 46 parcialmente inseridos. A Usina hidrelétrica de Itapebi possui potência instalada de 462.011 KW, de acordo com o despacho Nº 3.095 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Além da UHE Itapebi existem outras nove usinas hidrelétricas (UHE), cinco pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e uma central geradora hidrelétrica (CGH) na bacia do Rio Jequitinhonha.

De acordo com o IBGE (1997), do ponto de vista hidroquímico, em geral, as águas que circulam nos rios da bacia do Jequitinhonha apresentam baixa concentração salina, atendendo aos padrões de potabilidade. A qualidade da água do próprio rio Jequitinhonha e de seus principais tributários varia de média a boa, apta para o uso doméstico, irrigação e para uso industrial.

No Alto Jequitinhonha e na sub-bacia do rio Itacambiruçu a água é de excelente qualidade para todas as especificações. No Alto e Médio Jequitinhonha, as atividades mineradoras vêm causando forte erosão no leito e nas margens do rio e os sedimentos carreados poluem as águas. Outros fatores que tendem a desqualificar a qualidade da água são a poluição bacteriológica produzida por esgotos sanitários, o uso de agrotóxicos proveniente de atividades agrícolas e esterco de gado carreado pelas águas das chuvas.

Em estudos realizados por Gonçalves (1997) apontam que vários diagnósticos convergem ao apontar as restrições hídricas e as secas periódicas como agentes relevantes para o baixo desempenho da agropecuária na bacia, que ainda responde por 30% do PIB regional.

De modo geral, todos os sistemas prestam-se bem para o uso doméstico e pecuário. O sistema mais utilizado é o aluvial, através de poços rasos e das fontes e nascentes. Quanto ao uso para irrigação, os principais impedimentos são muito mais devidos à alta salinidade observada em algumas áreas do que referentes aos valores de sódio na água (GONÇALVES, 1997).

3.5. Uso e Ocupação do Solo

Segundo Gonçalves (1997), o rio Jequitinhonha é o recurso natural mais importante da região. Atividades humanas de desmatamento para fins agropastoris, de mineração e de garimpagem em seu alto curso e alguns dos afluentes têm causado, no decorrer dos anos, modificações importantes no ciclo hidrológico. Além disso, foi observada em todo o vale a formação de densos terracetes de pisoteio nas encostas. Todo o leito do Jequitinhonha mostra assoreamento extensivo. Na desembocadura mais à montante na cidade de Belmonte, acha-se intensamente colmatada em função do aporte de material carreado dos altos e médios cursos, comprometendo as atividades de navegação nos canais que dão acesso à cidade vizinha de Canavieiras.

Os núcleos urbanos da bacia do rio Jequitinhonha resultaram de um processo histórico de ocupação territorial determinado pela atividade garimpeira. Os bandeirantes, despertados pela cobiça das riquezas minerais, adentraram pelo interior à procura de ouro e diamantes, alcançando as margens do Jequitinhonha, onde fundaram algumas cidades. Com a decadência das atividades mineradoras, a agropecuária assumiu papel central na economia. Por ser uma área de vocação pastoril, a pecuária de corte passou a ser o suporte da economia regional, seguida da agricultura de subsistência (GONÇALVES, 1997).

Pode-se verificar que, atualmente, a população encontra-se distribuída regularmente ao longo dos principais cursos fluviais, sem, no entanto, observar-se densidades demográficas relevantes. Sabe-se que a atividade pastoril é incapaz de formar grandes aglomerados, exatamente por ter pouca dinâmica, com o emprego de parcela pequena da população e reduzidos investimentos de capital. A instalação de complexos industriais não consegue absorver parte significativa da mão-de-obra não especializada local. Por outro lado, a

precariedade do sistema de transporte até algumas décadas atrás contribuiu para que os centros urbanos permanecessem isolados e estagnados em sua economia local (GONÇALVES, 1997).

O Jequitinhonha tem regime permanente, abastecido por afluentes procedentes do sistema morfológico do Espinhaço, caracterizado como uma boa área armazenadora de água. Na região do baixo curso, os tributários são, sobretudo periódicos, com regime torrencial na época das chuvas (GONÇALVES, 1997).

Em meados do século XIX, com o declínio da mineração, a bacia teve seu desenvolvimento voltado para a pecuária e agricultura, sedimentando-se a estrutura fundiária baseada nas lavouras de subsistência. No começo do século XX, na parte média da bacia, tinha na pecuária extensiva sua base econômica. Nas décadas de 50 e 60, ocorreu, então, a introdução de culturas comerciais como o algodão e o reflorestamento, que se refletiram na sua estrutura agrária e produtiva. A pecuária bovina de caráter extensivo e a agricultura de subsistência continuaram, todavia, a ser a base da economia regional (GONÇALVES, 1997).

Em todo o setor, porém, observa-se a substituição generalizada da vegetação nativa por áreas de pastagem. Essa retirada recua a épocas pretéritas quando era uma constante a extração de madeira para fins comerciais. Hoje, os remanescentes da floresta nativa são utilizados no sombreamento da cultura do cacau. No litoral, as restingas são ocupadas por coqueirais plantados e os manguezais já demonstram a interferência do homem, que tem extraído deles madeira para carvoaria (GONÇALVES, 1997).

A implantação de atividades como o reflorestamento e a cafeicultura, aliadas à expansão da pecuária bovina, vem determinando modificações significativas na estrutura de uso e posse da terra, bem como das relações sociais e de produção. É importante salientar que a atividade reflorestadora ocupa um pequeno contingente de população rural. A cafeicultura, por sua vez, exige um número maior de mão-de-obra nos períodos de cultivo e da colheita. A pecuária ocupa mais de 55% das terras da bacia, enquanto estudos realizados pelo CETEC (1980) recomendam apenas 45% das terras disponíveis da bacia para este uso. Processo semelhante ocorre com o reflorestamento, que praticamente já ocupou todas as terras aptas à sua implantação (GONÇALVES, 1997).

Segundo Gonçalves (1997), os diversos tipos de atividades extrativas representam a segunda atividade produtiva da bacia. A mineração ocorre preferencialmente na alta e média bacia, bem como em todo o leito do rio Jequitinhonha e seus afluentes. Esta atividade é feita

através da cata manual de pedras preciosas e semipreciosas e da mineração a céu aberto, com desmonte hidráulico de cascalheiras e desmonte mecanizado através das imensas dragas. Esta atividade configura-se como a mais impactante das atividades, causando danos irrecuperáveis aos ecossistemas, com reflexos negativos nas atividades de navegação, piscicultura e na própria vida do rio principal.

Segue-se o extrativismo de madeira e lenha para carvoaria e abastecimento das siderúrgicas e, em menor escala, uso doméstico. A cata de flores silvestres é a atividade de menor impacto na região, ocorrendo em áreas de Refúgio Ecológico Montano e Campos de Altitude. Por fim, tem-se o extrativismo animal com a pesca e cata de moluscos e crustáceos nas áreas de mangues localizadas na foz do rio Jequitinhonha (GONÇALVES, 1997).

A terceira atividade em termos de ocupação espacial são os reflorestamentos, que ocupam vastas áreas de relevos tabulares, com terras aptas à implantação desses maciços florestais. A partir da década de 70, aproveitando-se dos incentivos fiscais concedidos pelo governo, os reflorestamentos expandiram-se pelas áreas de Cerrado da alta e média bacia. Este crescimento foi atenuado a partir de meados da década de 80 em função do corte nos incentivos fiscais (GONÇALVES, 1997).

Em nível de exploração, a agricultura representa a quarta atividade praticada na bacia. Ainda que incipiente, a agricultura tende a um crescimento acentuado, a despeito da rigidez climática da bacia. Os índices de precipitação, oscilando entre 700 e 1.300 mm, com distribuição muito variável, sujeitando a região a estiagens prolongadas, são um fator restritivo para um grande desenvolvimento agrícola (GONÇALVES, 1997).

3.6. Saneamento

De acordo com Gonçalves (1997), quase todos os municípios que compõem a bacia do rio Jequitinhonha apenas 40% da população da área recebe os serviços de água encanada. Observa-se que a grande maioria dos municípios apresenta captação de água superficial, em geral realizada de córregos e rios próximos aos centros urbanos. Apenas dois dos 63 municípios que compõem a bacia apresentavam estação de tratamento de água e um tem uma estação compacta. Os demais apresentam o que há de mais simples em termos de tratamento de água. Uma observação mais acurada dos dados mostra que os municípios localizados próximos ao rio Jequitinhonha, ou às margens de seus maiores afluentes, apresentam um maior percentual de população abastecida.

Segundo Gonçalves (1997), à época, na maioria das cidades, os esgotos são a céu aberto, contaminando as águas e expondo sua população a doenças, ou então, conectam-se apenas parcialmente à rede de esgotos, sendo os dejetos lançados diretamente nos rios (GONÇALVES, 1997).

De acordo com ANA (2013) o Município de Salto da Divisa (MG) apresentou em 2013 um índice de atendimento com coleta e sem tratamento de 69,6%, e índice de 29,9% sem atendimento (sem coleta e sem tratamento) e outros 0,5% de índice de atendimento por solução individual.

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve o desenvolvimento necessário em cada etapa para a aplicação dos modelos computacionais utilizados. Mostra-se como foi feita a aquisição e processamento dos dados ambientais para inserção nos modelos e a descrição dos cenários na construção de cada modelo utilizado no SisBaHiA®, são eles: modelagem hidrodinâmica e modelos de transporte euleriano.

A fim de averiguar o comportamento hidrodinâmico, bem como a influência do esgotamento sanitário ao longo do reservatório, foram utilizados dados de medição consistidos, disponibilizados pelo empreendimento para realizar a análise da Usina Hidrelétrica em estudo.

A Figura 4 mostra o fluxograma das etapas de modelagem realizadas ao longo dessa dissertação.

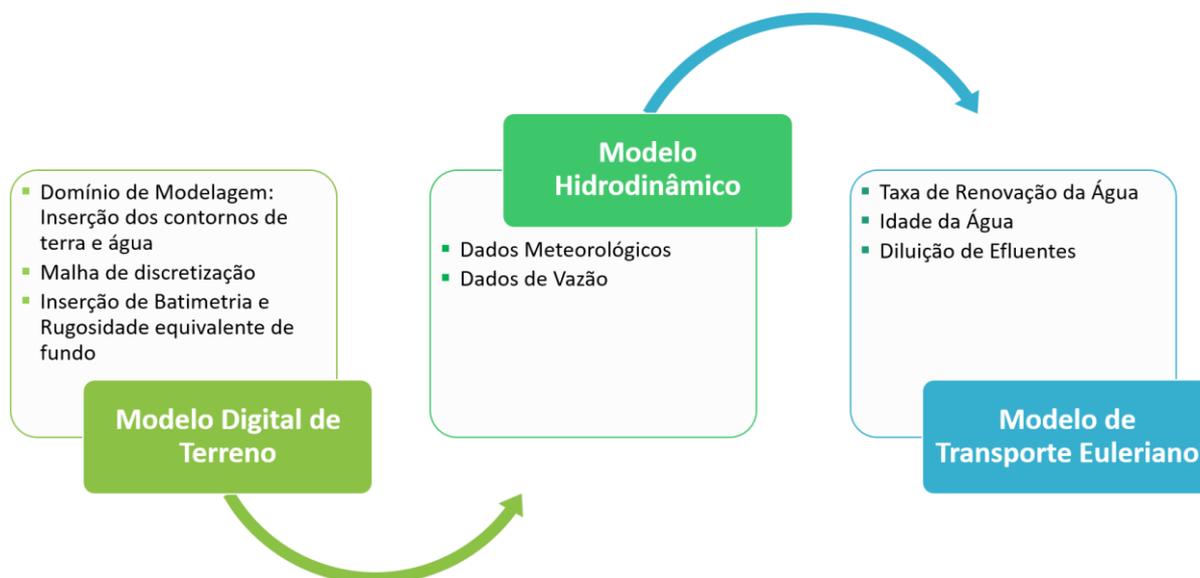


Figura 4: Fluxogramas da Modelagem. Fonte: Elaborado pela autora.

4.1. Modelo Digital de Terreno

A etapa de modelagem digital de terreno é essencial ao processo de modelagem ambiental, pois engloba a definição da área de estudo a ser modelada, denominada como domínio de modelagem, e são apresentadas as características necessárias para que haja então a construção da malha, a inserção de dados de batimetria e rugosidade do fundo.

4.1.1. Malha de discretização e Domínio de Modelagem

A definição do domínio de modelagem compreende a etapa inicial de construção do modelo. Na modelagem, o domínio de interesse representa os limites terrestres e abertos da região que pretende ser estudada.

Em geral, os contornos fechados, bem como com controle de fluxo, são associados a fronteiras terrestres que englobam desde as margens do reservatório, como seções de rios e ilhas inseridas na região. Enquanto o contorno aberto, ou de água, delimita a área que não possui contorno físico, ou contornos com fluxos de água, como a entrada do reservatório ou regiões costeiras, neste caso caracterizado pelas estruturas hidráulicas.

Os contornos da região em estudo foram disponibilizados pelo empreendimento e editados a montante, na entrada do reservatório para melhor enquadramento. O contorno de terra foi representado pelo contorno adaptado do reservatório. Enquanto o contorno de água foi representado pelas estruturas hidráulicas. A Figura 5 exibe o mapa base da área de estudo gerada, onde o domínio de modelagem está ilustrado em branco, e o contorno de terra em verde.

Para a realização do Mapa Base, foram incluídos os afluentes ao reservatório, em formato *shapefile* da hidrografia disponibilizado pela ANA – Agência Nacional de Águas: na margem esquerda, o Córrego do Trabalho, Córrego Gamaleira Seca, Córrego Gamaleira, Córrego do Dionísio, Córrego Peixe, Córrego Jundiá, Córrego Barrigudas, Córrego das Guaribas; e na margem direita, Córrego do Padre, Córrego Ribeira, Córrego Magamagem e o Córrego Teixeira.

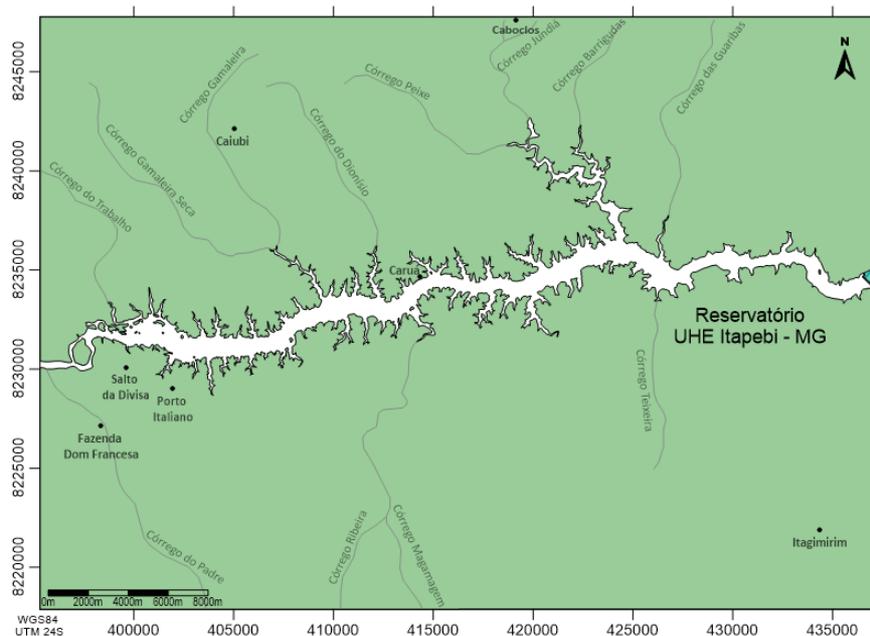


Figura 5: Mapa base do reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da discretização do domínio de modelagem, foi confeccionada a malha de elementos finitos, podendo-se usar elementos quadráticos ou triangulares da área em estudo.

A malha do modelo em questão, representada na Figura 6, apresentou 6386 nós de cálculo, contidos em um total de 1254 de elementos, onde 1134 quadrangulares e 120 triangulares, possibilitando uma representação detalhada dos principais contornos de corpos de água naturais.

A construção da malha priorizou um detalhamento no canal principal, nos principais rios afluentes ao reservatório, na entrada do reservatório, região onde apresentam pequenas ilhas, e na região do barramento. O motivo é propiciar um melhor detalhamento hidrodinâmico.

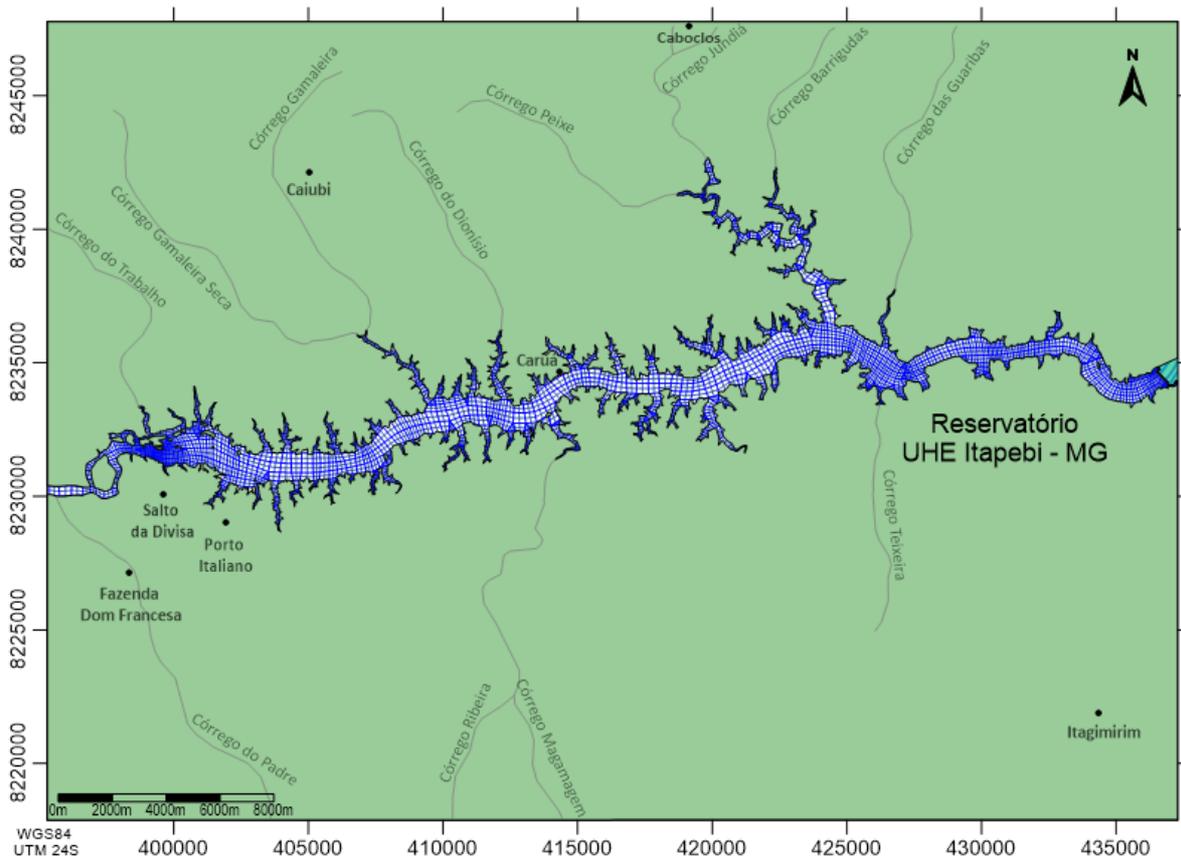


Figura 6: Malha de elementos finitos utilizada na discretização do domínio de modelagem da UHE Itapebi. Coordenadas UTM WGS84 setor 24S. Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2. Batimetria

Determinar as características da superfície de fundo do terreno é o primeiro passo para a construção do modelo. Para esse estudo foram inseridos dados de elevação de terreno disponibilizados pelo empreendimento. A Figura 7 ilustra o mapa da batimetria do domínio de modelagem.

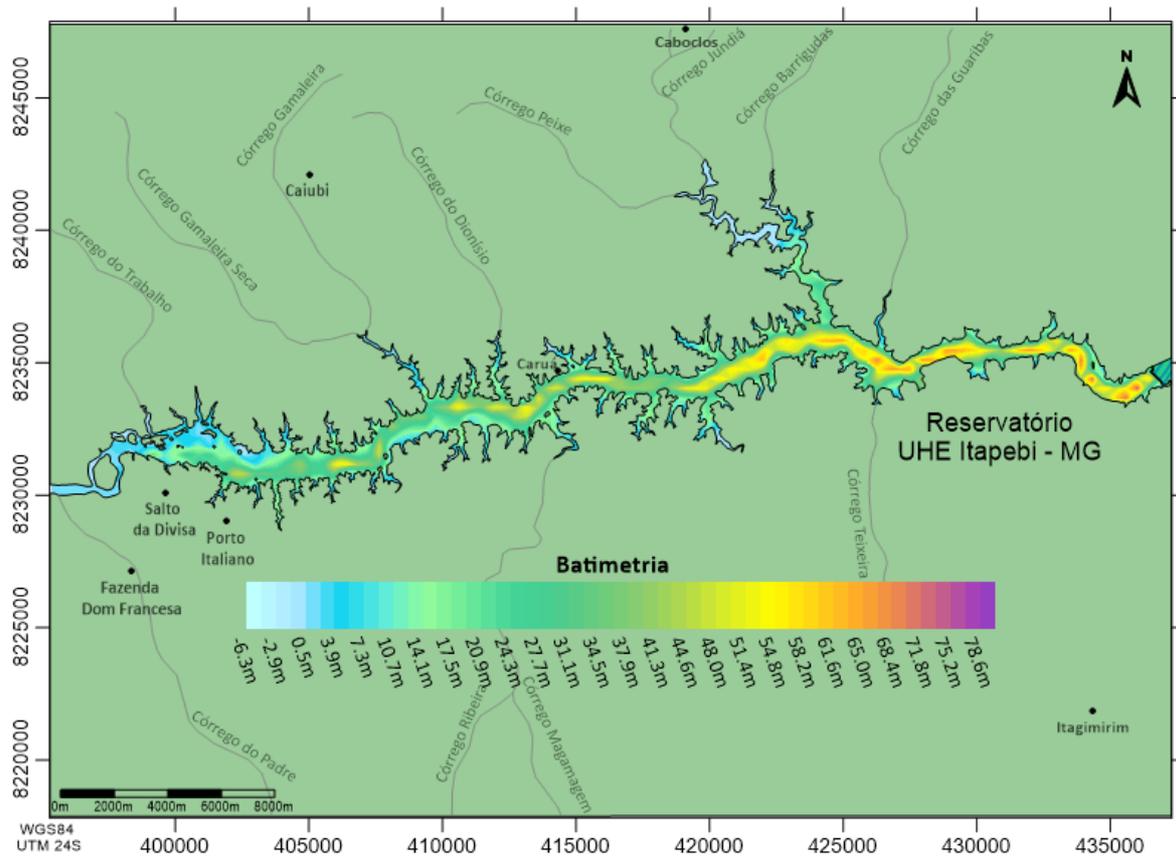


Figura 7: Batimetria do domínio de modelagem. Fonte: Elaborado pela autora.

A modelagem digital do domínio de interesse cobre todo o reservatório de UHE Itapebi incluindo o rio principal (rio Jequitinhonha) e seus afluentes. Esta foi realizada através de discretização em elementos finitos, considerando a área do reservatório após enchimento.

4.1.3. Rugosidade equivalente de fundo

O modelo hidrodinâmico calcula a tensão de atrito no fundo por meio do coeficiente de Chézy. A rugosidade equivalente de fundo é o parâmetro que representa a resistência exercida pelo fundo no escoamento. Estes parâmetros são influenciados pela granulometria dos sedimentos, pela ação do movimento das águas e pelo relevo do terreno. Para definição deste coeficiente, é necessário prescrever um valor de rugosidade para a superfície de fundo (ϵ) em cada nó da malha de discretização. Essa rugosidade varia de acordo com o tipo de material do leito.

O padrão de ocorrência de tensões no fundo é indicativo do tipo de sedimento passível de existir em determinada área, pois as tensões críticas de mobilidade de cada tipo de sedimento são conhecidas em literatura. Considerando certa classe de sedimentos, se a tensão crítica de mobilidade para este tipo de sedimento for frequentemente excedida em uma região,

difícilmente este tipo de sedimento estará presente nesta região, pois será transportado para outro local.

Neste estudo de caso, a amplitude de rugosidade adotada foi inferida a partir da distribuição granulométrica do fundo, e os valores de rugosidade equivalente de fundo são adotados através de uma aproximação, seguindo os valores sugeridos por Rosman (2021). Foi utilizado o valor de rugosidade constante e todo o domínio, caracterizado dentro da faixa de leito de sedimentos com rugas e similares, com obstáculos (e.g. pedras, troncos), devido ao alto fluxo de descarga sólida ao longo de todo o reservatório, considerando que o material de fundo e as características do solo sejam semelhantes e predominantes no percurso.

4.2. Modelagem Hidrodinâmica

Nesta seção são apresentados os cenários de modelagem propostos, como também a análise e interpretação das forçantes ambientais necessárias para construção dos modelos hidrodinâmicos, precipitação, ventos e descargas líquidas adotadas nas condições de contorno. São apresentadas as origens de todos os dados usados, e as considerações aplicadas em cada etapa da modelagem.

Para uma melhor caracterização dos padrões de circulação hidrodinâmica, é importante representar o efeito da sazonalidade na modelagem, para considerar diferentes padrões de ventos e vazões fluviais. Com o objetivo de simular padrões de circulação e sua variação sazonal, adotaram-se períodos aproximados das estações do ano, conforme na Tabela 1, como diferentes cenários na modelagem hidrodinâmica. Diante disso, a escolha dos períodos de simulação ocorreu de acordo com os meses de maiores e menores vazões afluentes, um representativo de períodos mais secos e mais chuvosos.

Tabela 1: Cenários utilizados na modelagem de acordo com a sazonalidade.

Período (meses)	Estação do ano
Janeiro a Março	Verão
Abril a Junho	Outono
Julho a Setembro	Inverno
Outubro a Dezembro	Primavera

Durante o estudo foram criados pontos ao longo do reservatório, denominados no SisBaHiA® como estações, para melhor identificação de pontos mais críticos, pontos moderados e pontos de boas condições. A Figura 8 ilustra essas estações.

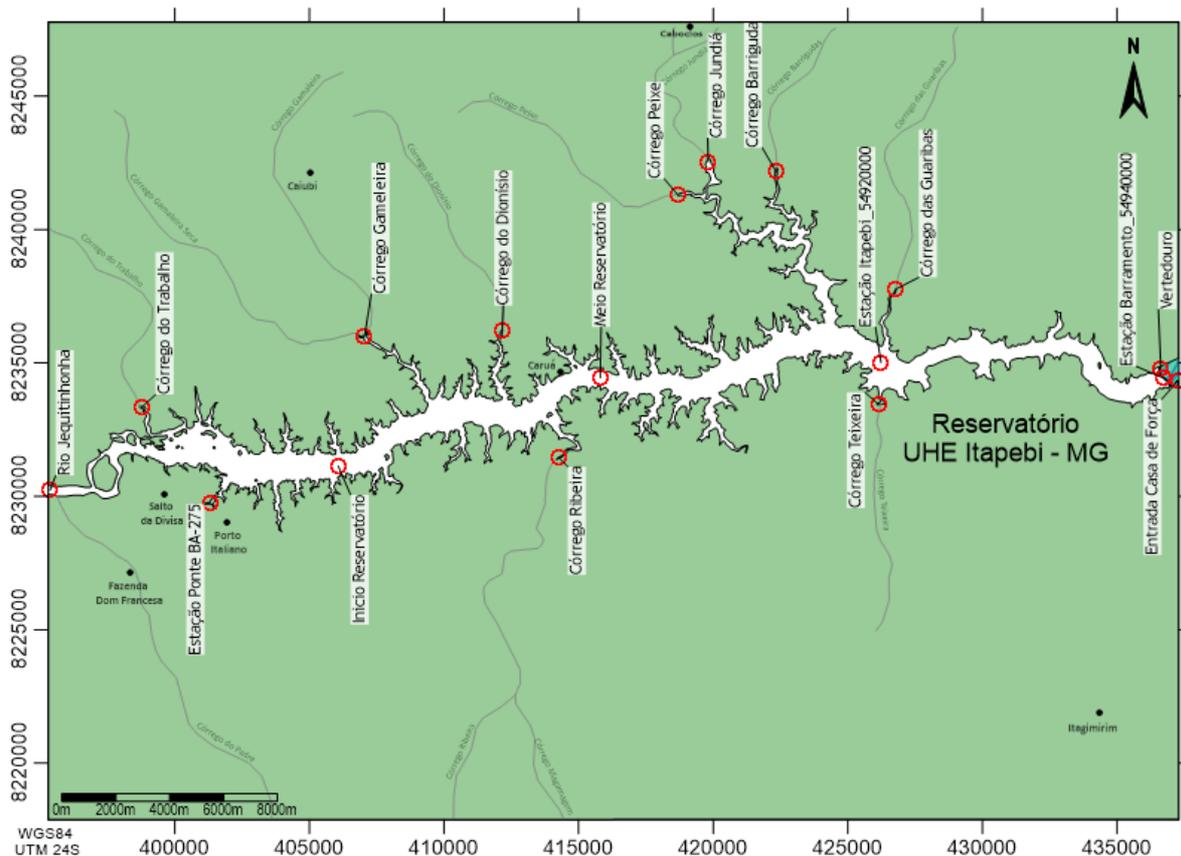


Figura 8: Localização das estações inseridas no SisBaHiA® para avaliações. Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1. Dados Meteorológicos

Os parâmetros meteorológicos utilizados neste modelo foram obtidos pelo modelo de reanálise de atmosférica global ERA5, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF. O período de abrangência dos dados utilizados foi referente ao ano de 2019, e os seguintes parâmetros foram empregados: ventos (m/s), evaporação (mm/h), e precipitação (mm/h). As localizações das estações de dados meteorológicos utilizadas nesse trabalho podem ser observadas na Tabela 2 e Figura 9.

Tabela 2: Coordenadas das Estações de dados meteorológicos. Fonte: ERA5 – ECMWF.

Estação	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
Est1	446503.63	8231000.29
Est2	419754.36	8230919.85
Est3	393003.79	8230807.24

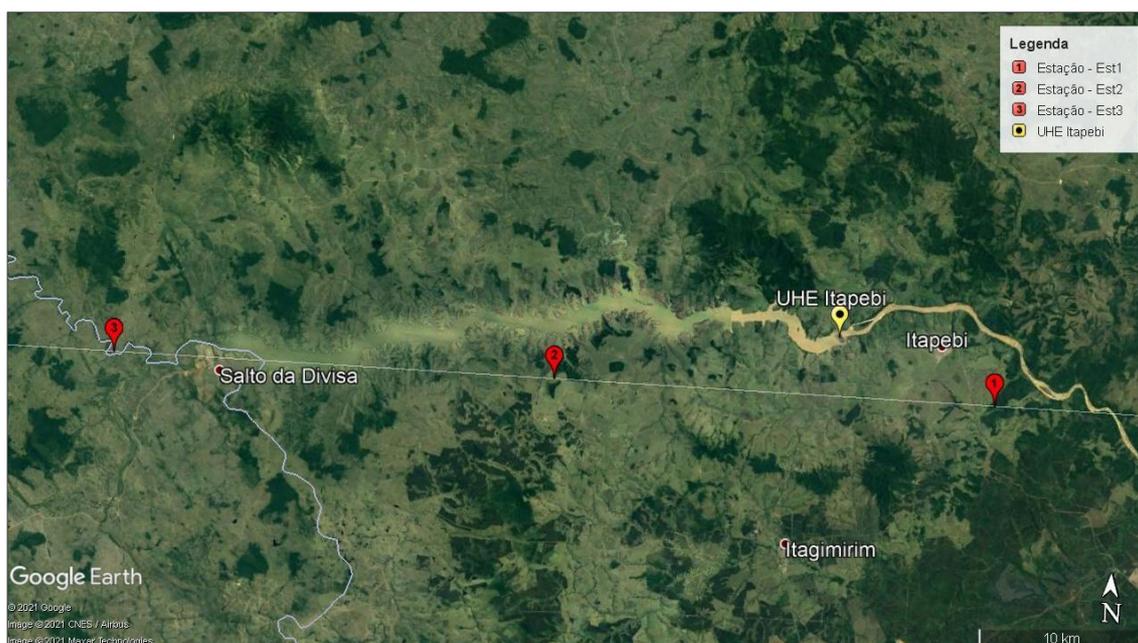


Figura 9: Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico ERA5 do ECMWF, nos quais foram extraídas as séries temporais de ventos, precipitação e evaporação utilizadas como forçantes atmosféricas para o modelo hidrodinâmico. Fonte: Elaborado pela autora.

Ventos

A variável vento pode apresentar significativa influência na circulação hidrodinâmica do corpo hídrico, dependendo de suas características. No modelo, a tensão de atrito do vento na superfície livre da água é calculada a partir de dados de direção e intensidade dos ventos.

Nesse sentido, em todas as simulações computacionais deste trabalho, foi considerado vento variável no tempo e variado no espaço. Os dados foram obtidos do modelo de ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF.

Os dados de vento foram espacialmente distribuídos pelos nós dos elementos no domínio a partir de dados das três estações do ERA5 indicadas anteriormente na Figura 9. Os dados utilizados, com resolução temporal de 1h, representam o vento a 10 m de altura. As séries temporais de vento obtidas em cada estação foram interpoladas para os nós da malha do modelo hidrodinâmico, a fim de gerar o campo de vento para todo o domínio.

O efeito do vento ocorre devido ao atrito gerado entre o vento e a superfície da água, o que causa uma transferência de energia cinética e, conseqüentemente, a movimentação da camada superficial da água. Esta é considerada uma circulação apenas horizontal, por não possuir efeitos em maiores profundidades.

Na Figura 10, estão ilustradas rosas dos ventos referentes às três estações do ERA5. O eixo radial indica a frequência de ocorrência de velocidades e direções; o eixo polar indica a direção do vento e a escala de cor a intensidade da velocidade. Observa-se que o vento reinante na estação Est1, ou seja, o vento de maior frequência é um vento de Nordeste (ENE), com cerca de 17% de frequência e picos de até 8m/s, seguido de um vento de Leste com 12% de frequência.

A estação Est2 registrou vento reinante na direção Nordeste (ENE), com frequência de quase 18%, seguido por 16% de ventos na direção leste (E). As intensidades observadas foram mais baixas, chegando até 8m/s.

Na estação Est3, o vento reinante na direção Leste é de quase 19%, seguido de um vento Nordeste (ENE), com frequência próxima de 17%, ambas com ventos de até 8 m/s. No quadrante sudeste (SE), foram observados ventos superiores de até 5m/s.

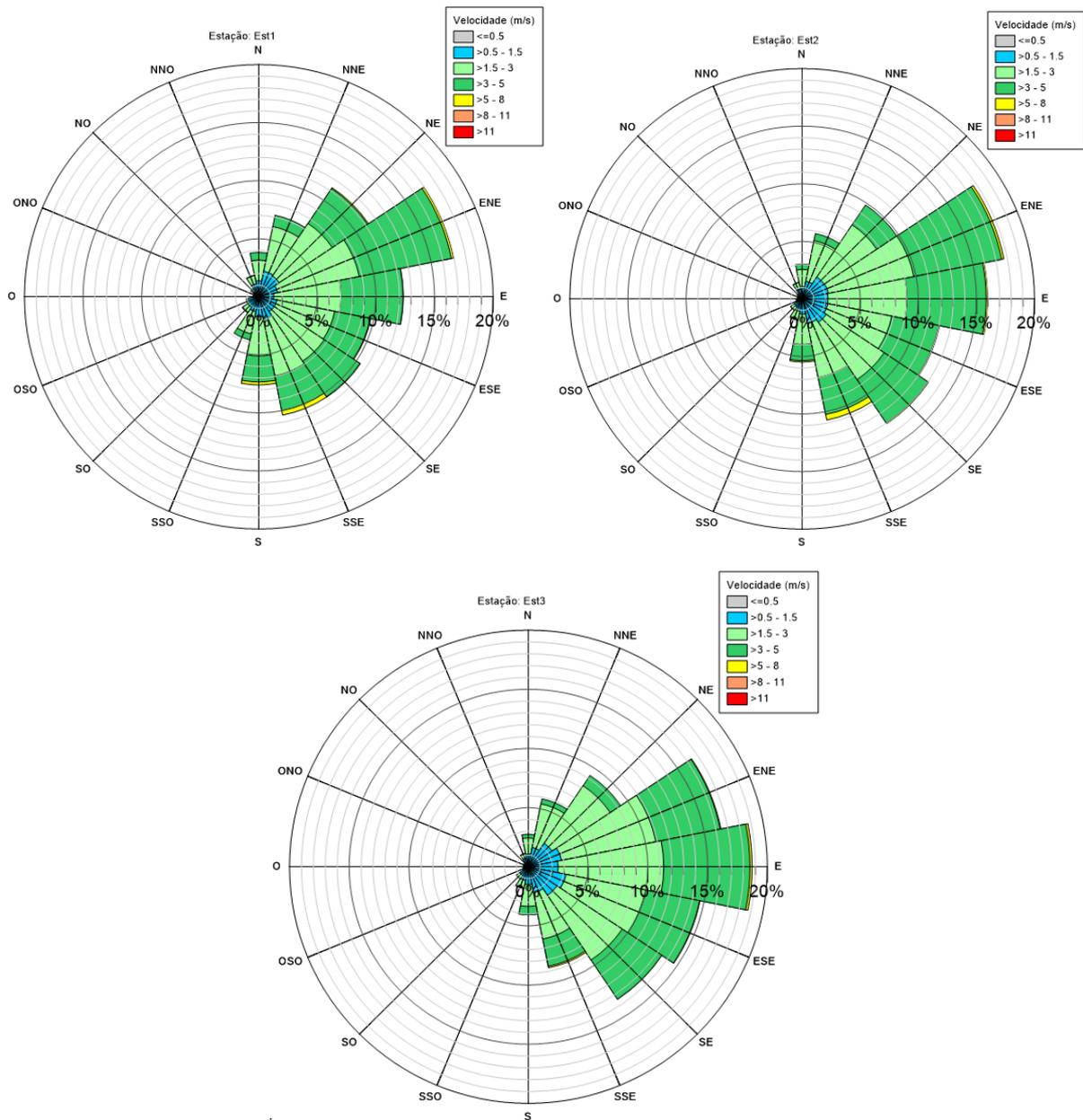


Figura 10: Rosa dos ventos. Fonte: Elaborado pela autora.

Para a análise sazonal dos ventos foram utilizados os dados da Estação Est2, visto que está localizada mais próxima do meio do reservatório da UHE Itapebi, enquanto às demais se localizam à montante e à jusante do reservatório. Foram expostos os dados dos meses de fevereiro (Figura 11), maio (Figura 12), agosto (Figura 13) e novembro (Figura 14), cada qual representando o mês intermediário de cada estação do ano. Os padrões de cores são proporcionais ao módulo da velocidade e as direções das setas indicam a direção do vento. As características já expostas anteriormente confirmam quanto a sua direção e intensidade, com velocidades atingindo máxima de 5,85 m/s no mês de agosto. Pode-se perceber que as velocidades aumentam a partir da metade do dia.

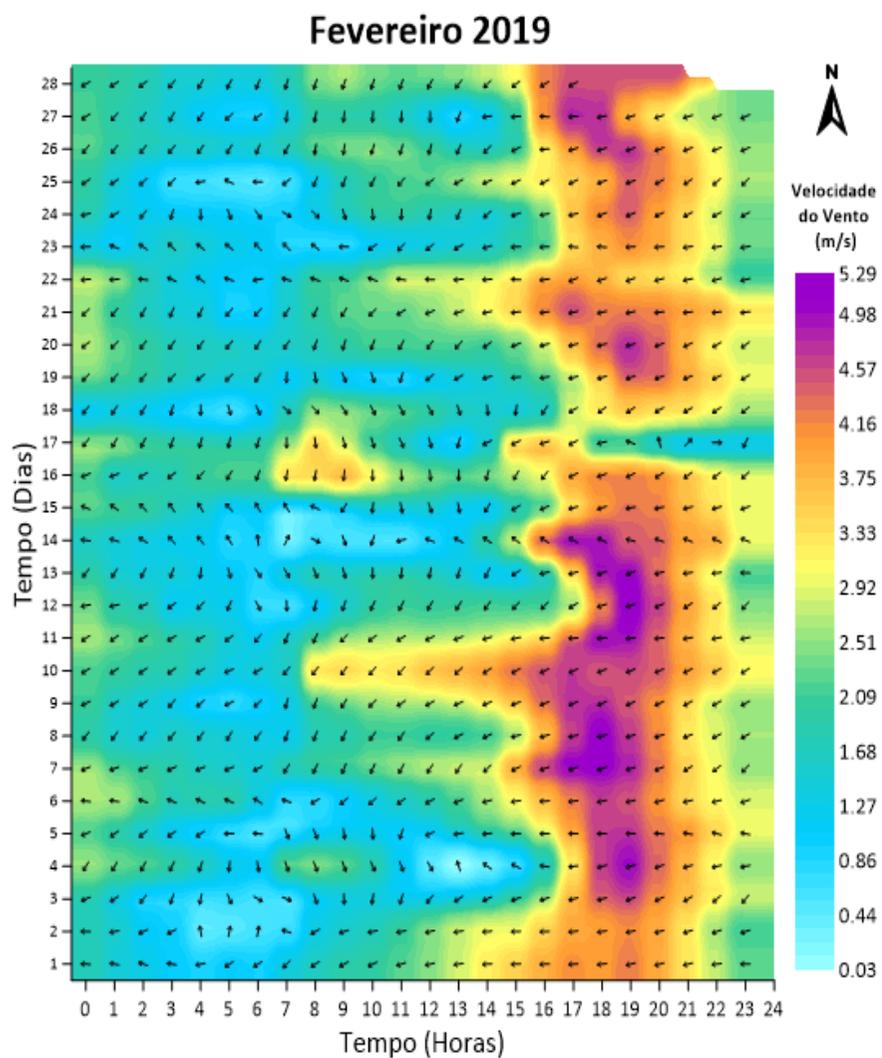


Figura 11: Dados de ventos representativos do mês de fevereiro de 2019, obtidos com dados da Est2. Fonte: Elaborado pela autora.

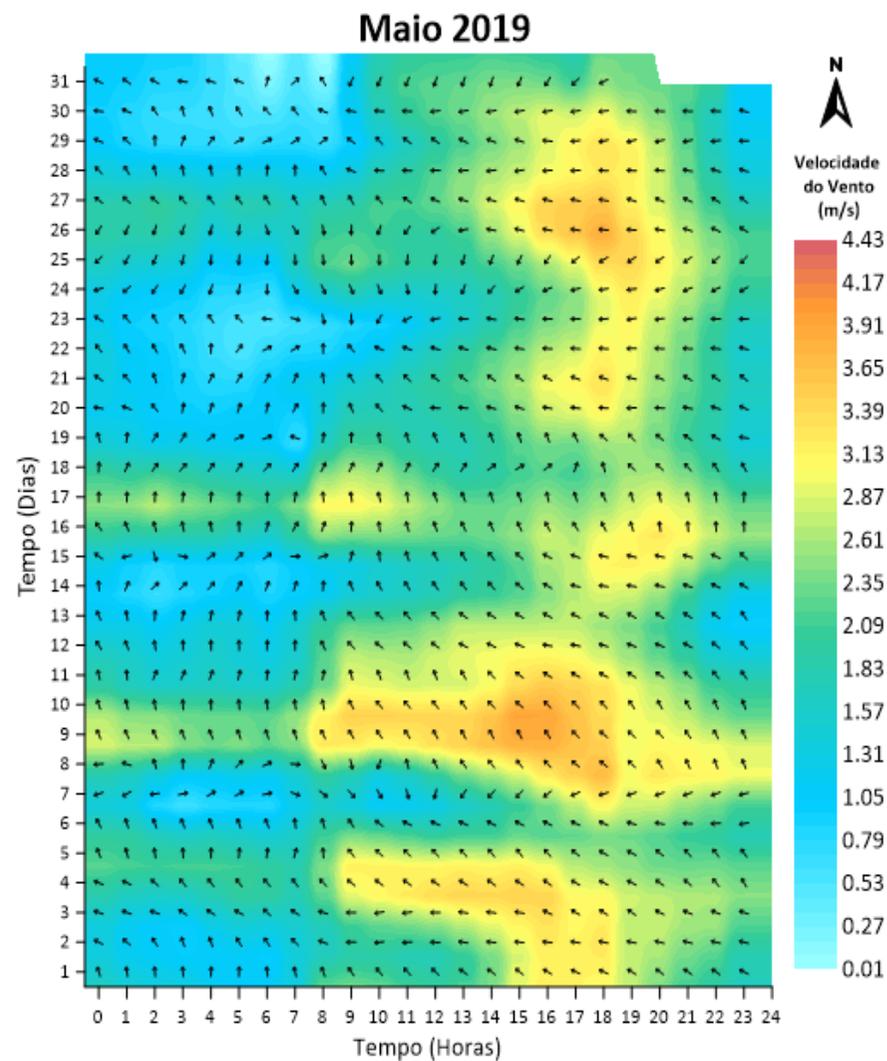


Figura 12: Dados de ventos representativos do mês de maio de 2019, obtidos com dados da Est2. Fonte: Elaborado pela autora.

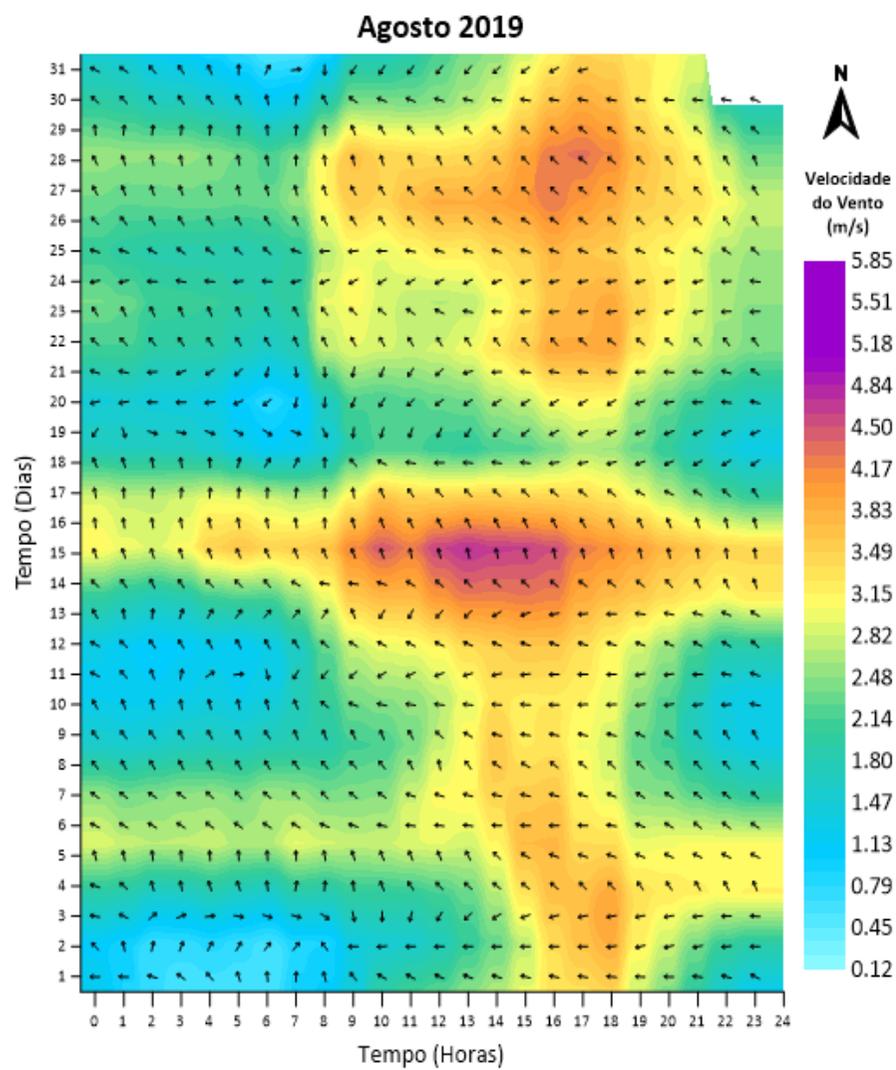


Figura 13: Dados de ventos representativos do mês de agosto de 2019, obtidos com dados da Est2. Fonte: Elaborado pela autora.

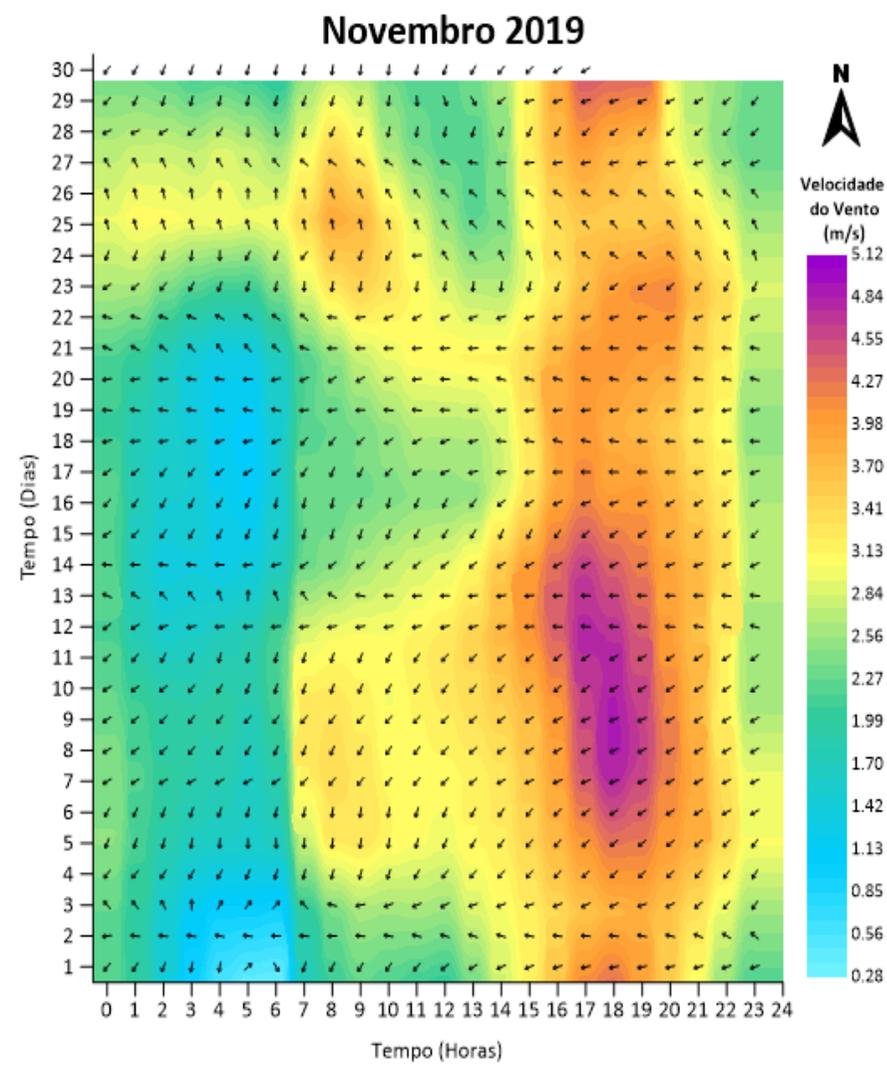


Figura 14: Dados de ventos representativos do mês de novembro de 2019, obtidos com dados da Est2. Fonte: Elaborado pela autora.

Levando em consideração o mês de fevereiro como um mês de maiores intensidades de vento, a Figura 15 ilustra as intensidade e direção dos ventos, geradas pelo modelo, referentes ao dia 01 de fevereiro de 2019.

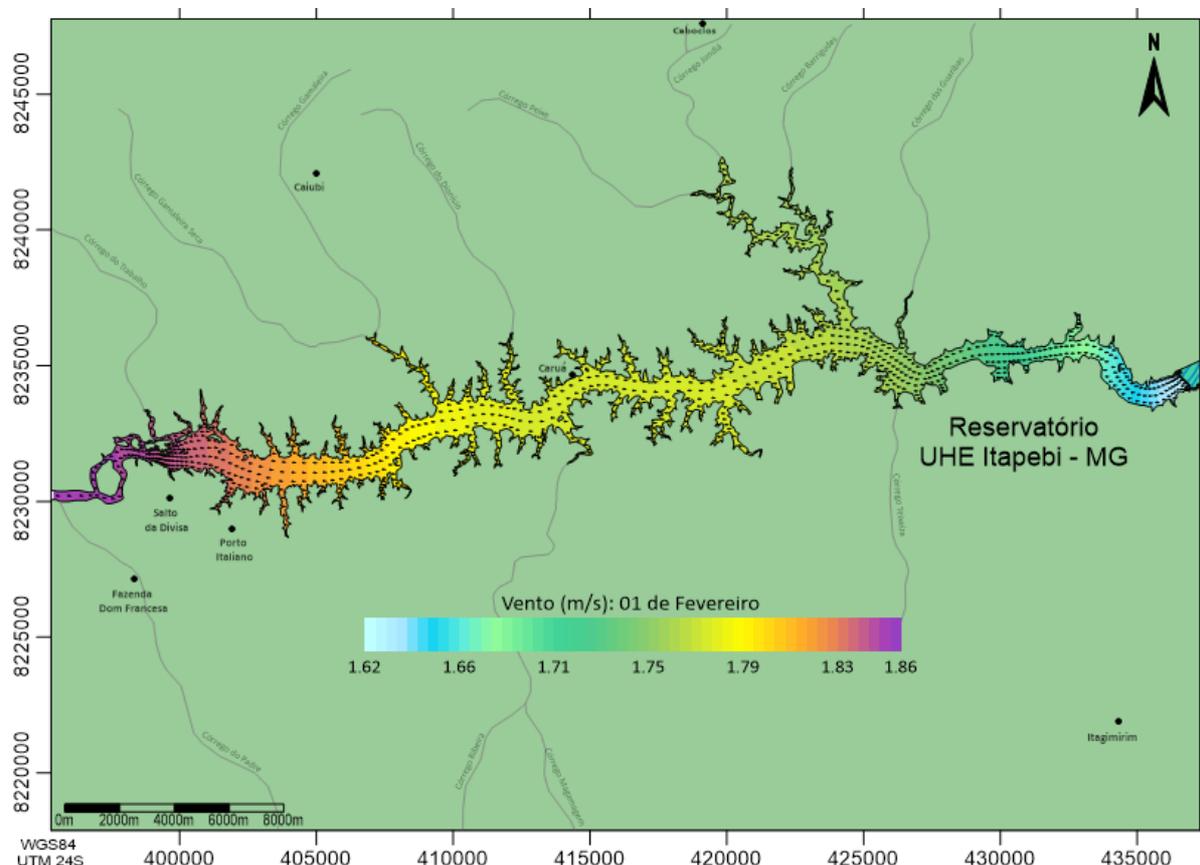


Figura 15: Representação de ventos no dia 01 de fevereiro de 2019. Fonte: Elaborado pela autora.

Evaporação

A variável evaporação pode apresentar significativa influência no balanço hídrico, dependendo de suas características. Nesse sentido, em todas as simulações computacionais deste trabalho, foi considerada evaporação variável no tempo e no espaço. Os dados de evaporação referentes ao ano de 2019 foram obtidos do modelo de ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF. Os dados utilizados foram evaporações horárias (mm/h), conforme a Figura 16. Apresentando maiores valores nos três primeiros (verão) e últimos (primavera) meses do ano de 2019.

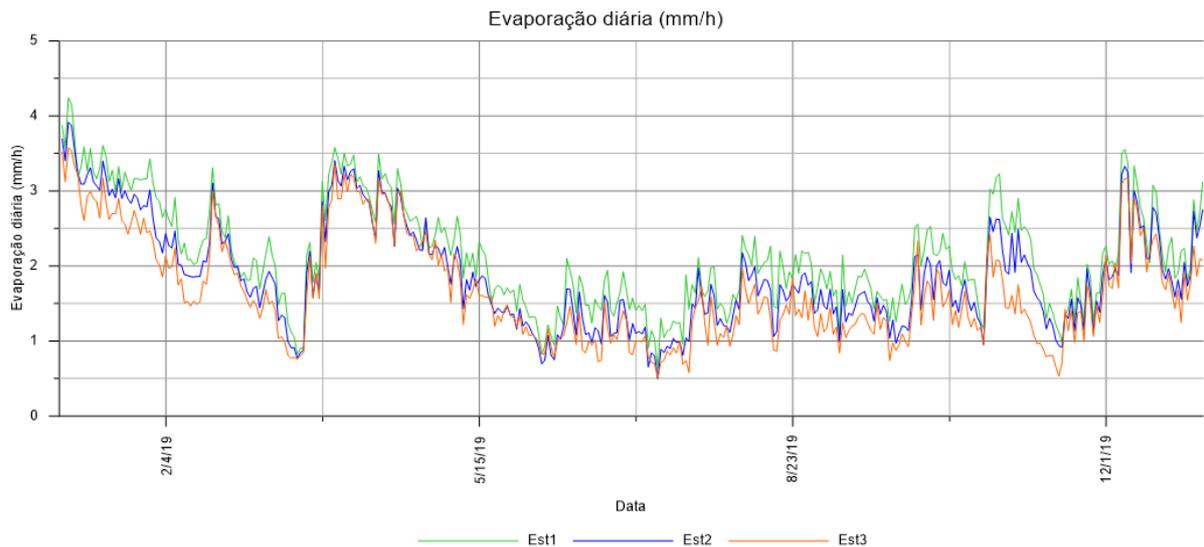


Figura 16: Série temporal de evaporação diária (mm/h) de 2019. Fonte: Elaborado pela autora.

Precipitação

A variável precipitação pode apresentar significativa influência no balanço hídrico, dependendo de suas características. Nesse sentido, em todas as simulações computacionais deste trabalho, foi considerada precipitação variável no tempo e no espaço. Os dados de precipitação referentes ao ano de 2019 foram obtidos do modelo de ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF. Os dados utilizados foram precipitações horárias (mm/h). A Figura 17 ilustra as séries históricas de precipitação nas três estações meteorológicas de montante para jusante, Est3, Est2 e Est1, respectivamente.

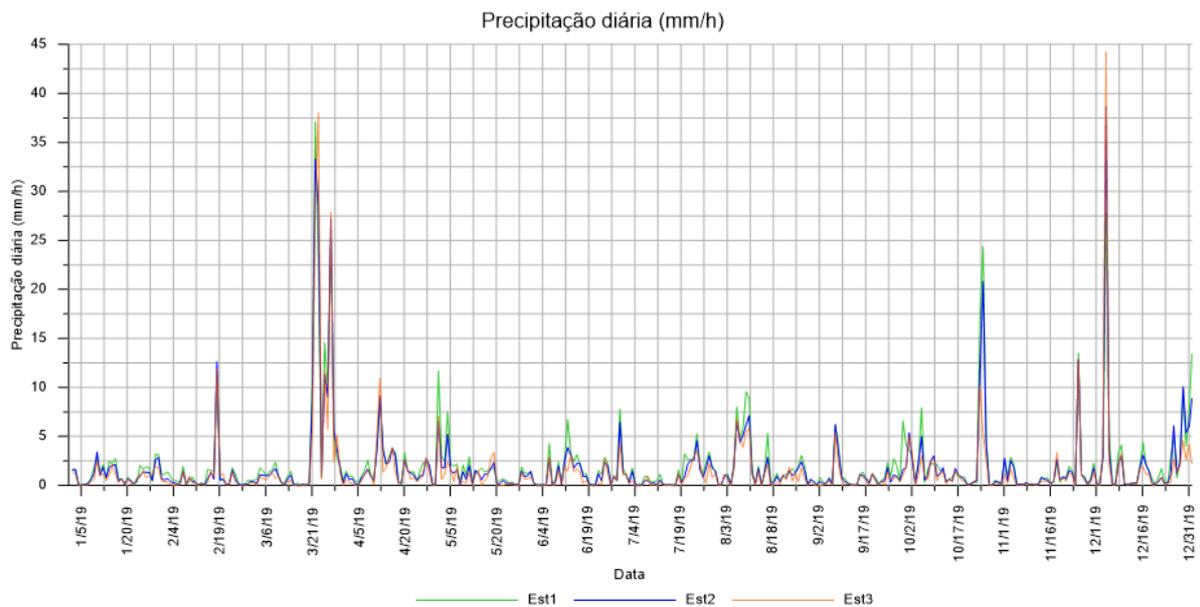


Figura 17: Série temporal de precipitação diária (mm/h) de 2019. Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando as precipitações à montante e no meio do reservatório (Est3 e Est2), foi elaborado um gráfico com o somatório mensal para análise de meses de maior e menor precipitação. Conforme ilustra a Figura 18, fevereiro (verão) foi o mês de menor precipitação seguido de setembro (inverno), enquanto março (verão) foi o mês de maior precipitação, seguido de dezembro (primavera).

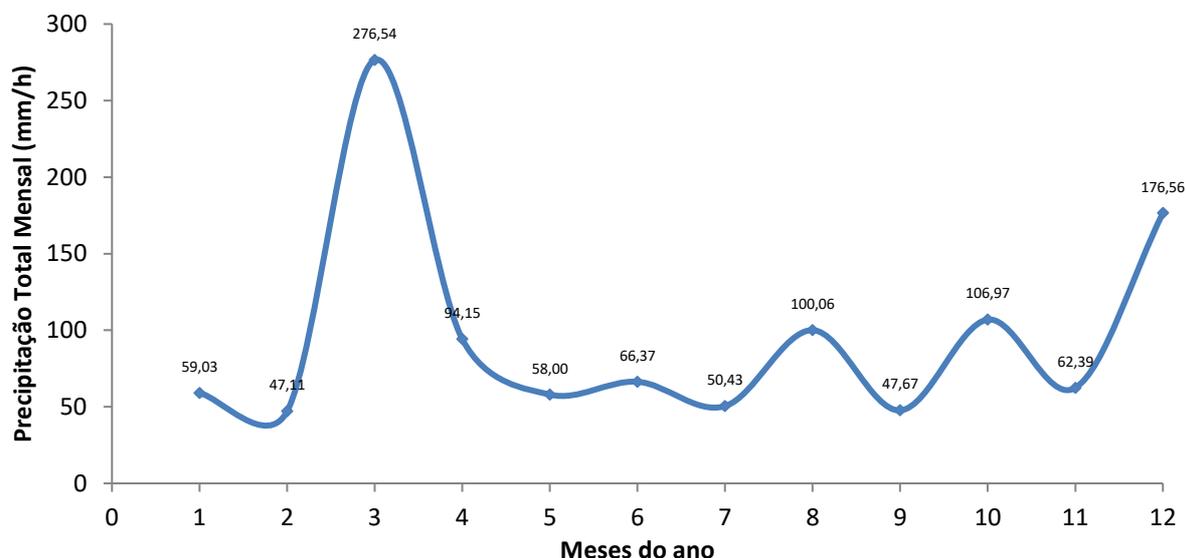


Figura 18: Precipitação Mensal (Est3 e Est2). Fonte: Elaborado pela autora.

Avaliando por estações do ano, pode-se verificar que houve maior precipitação no verão seguido da primavera, considerado período chuvoso que se estende outubro a março, e menor precipitação no inverno e outono, considerado período seco (ou de estiagem) que se estende de abril a setembro, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Precipitação total das estações do ano. Fonte: Elaborado pela autora.

Estação do ano	Precipitação total (mm/h)
Verão	382.68
Outono	218.52
Inverno	198.16
Primavera	345.92

Vazões Fluviais

Os dados de vazões fluviais referentes ao ano de 2019 foram fornecidos pelo empreendimento. Através das vazões horárias, foram calculadas as médias diárias. Visto que os afluentes são córregos sem medição, optou-se por determinar as vazões dos rios afluentes proporcionalmente, de acordo com a vazão de entrada do rio principal, o rio Jequitinhonha,

levando em consideração a área de drenagem de cada um deles. Ressalta-se que a mesma região possui características físicas similares, como tipo de solo, clima, regime de chuvas, etc.

Sendo assim, tanto no rio principal, bem como em seus principais afluentes, foram inseridos os hidrogramas de vazões, com dados médios diários. Enquanto em áreas de entrada de menor relevância foram estimadas microvazões médias. Os valores de vazões inseridos são divididos pela largura da seção de entrada do rio, visto que a unidade do Modelo Hidrodinâmico é em $m^3/s/m$.

A Figura 19 ilustra os locais com entrada de hidrograma de vazões e os locais com entradas de microvazões, ilustrados por setas azuis e pontos roxos, respectivamente.

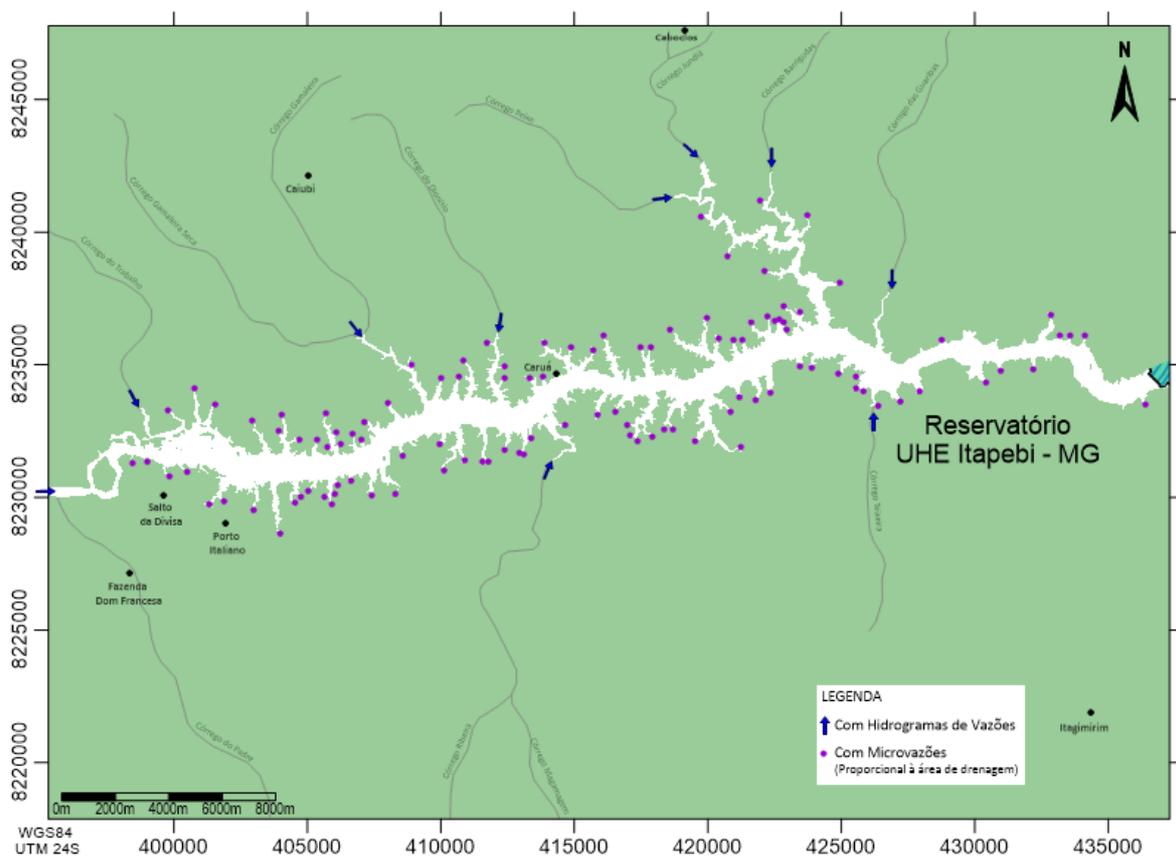


Figura 19: Destaque para pontos onde se tem entrada de vazão no modelo. Fonte: Elaborado pela autora.

4.3. Modelo de Transporte Euleriano - Tempos Hidráulicos Característicos

Nesta seção, estão descritos como foram elaborados os modelos de caracterização dos tempos característicos: Taxa de Renovação da Água, Idade da Água e Taxa de Diluição do Esgotamento Sanitário do município de Salto da Divisa. Estes cálculos foram realizados por meio do Modelo de Transporte Euleriano.

Para as análises de taxa de renovação e idade da água, foram feitos quatro modelos de cada, representando as estações do ano. Assim, a influência da sazonalidade na renovação e na idade da água foram bem representadas.

As seções a seguir apresentam os conceitos gerais da taxa de renovação e da idade da água, e da taxa de diluição de esgotamento sanitário, bem como a preparação dos nove modelos citados anteriormente.

4.3.1. Taxa de Renovação da Água

A taxa de renovação representa a mistura das águas presentes dentro no domínio de modelagem, aqui denominadas “águas velhas”, com as águas que entram no sistema, aqui chamadas “águas novas”. Vale ressaltar que os termos não representam a qualidade da água em questão, mas sim, o tempo em que elas estão presentes no corpo d’água. A qualidade desta água que adentra o estuário não é discutida na análise da Taxa de Renovação.

A taxa de renovação é calculada diretamente a partir da mistura das águas de dentro e fora do domínio, sendo apresentada em termos de porcentagem, de 0 a 100%, e capaz de representar a renovação temporal e espacial. Por existirem diversas forçantes e geometrias distintas influenciando na circulação de um reservatório, a sua complexidade faz com que a renovação das águas tenha variações não só temporal, mas também espacial. Nesse sentido, cada região do reservatório possui características particulares quanto à sua renovação.

Para começar o modelo de taxa de renovação, marca-se no instante inicial um valor de referência nulo para as águas que estão dentro do sistema, representando “águas velhas” (0% renovadas), e as vazões afluentes ao reservatório, as águas externas que entram no domínio, com um valor de referência igual a 100 (100% renovadas), representando “águas novas”, conforme ilustrado na Figura 20.

Ou seja, a mistura entre as águas interiores e exteriores ao sistema ocorre devido à descarga fluvial, também marcada com concentração igual a 1, por ser considerada como água nova ao sistema. Dessa forma, à medida que se mistura, a concentração sofre decaimento enquanto a idade da água aumenta. A variação espacial ocorre por influência da hidrodinâmica no decaimento que varia em todo o sistema. Ou seja, assim como a taxa de renovação, aqui também é calculada a variação temporal e espacial das partículas. A Figura 21 expressa a condição inicial imposta ao modelo.

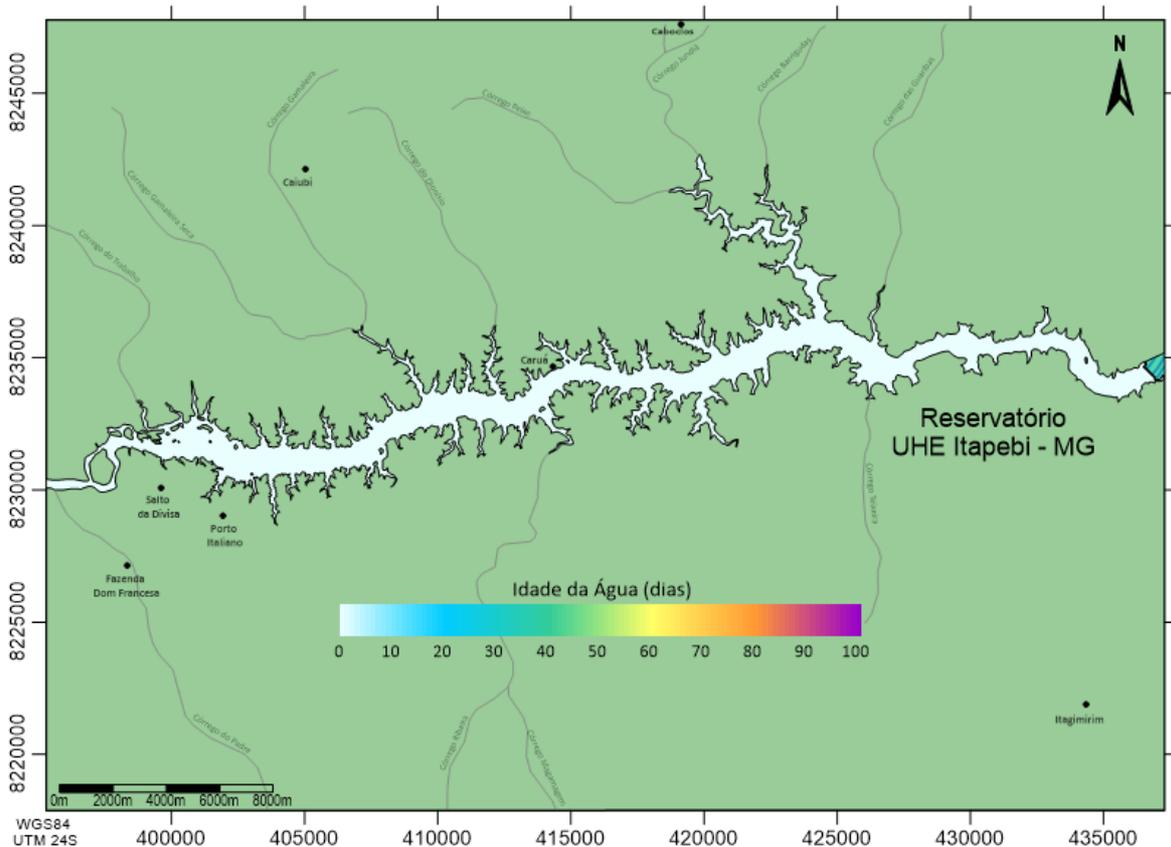


Figura 21: Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Idade da Água.
 Fonte: Elaborado pela autora.

As regiões do reservatório que possuem águas com maiores idades ou tempo de residência, ou seja, mais “velhas”, são mais susceptíveis à ocorrência de eutrofização e possuem pequena capacidade de diluir demais fontes de poluição. A idade da água é um indicativo do tempo que determinada região de um corpo d’água leva para renovar.

4.3.3. Taxa de diluição do efluente

Considerando que o principal ponto de fonte de poluição da área de estudo é o Município de Salto da Divisa, foi elaborado um modelo Euleriano visando simular a taxa de diluição do esgotamento sanitário ao longo do reservatório da UHE Itapebi.

Conforme ilustrado na Figura 22, a condição inicial deste modelo foi nula em todo o domínio, considerando um fluxo inferido de concentração 0,25, que considera a diluição com uma relação 1:4 de esgoto na vazão do afluente, localizado em um riacho nas proximidades do município de Salto da Divisa, representando a entrada de efluente no sistema.

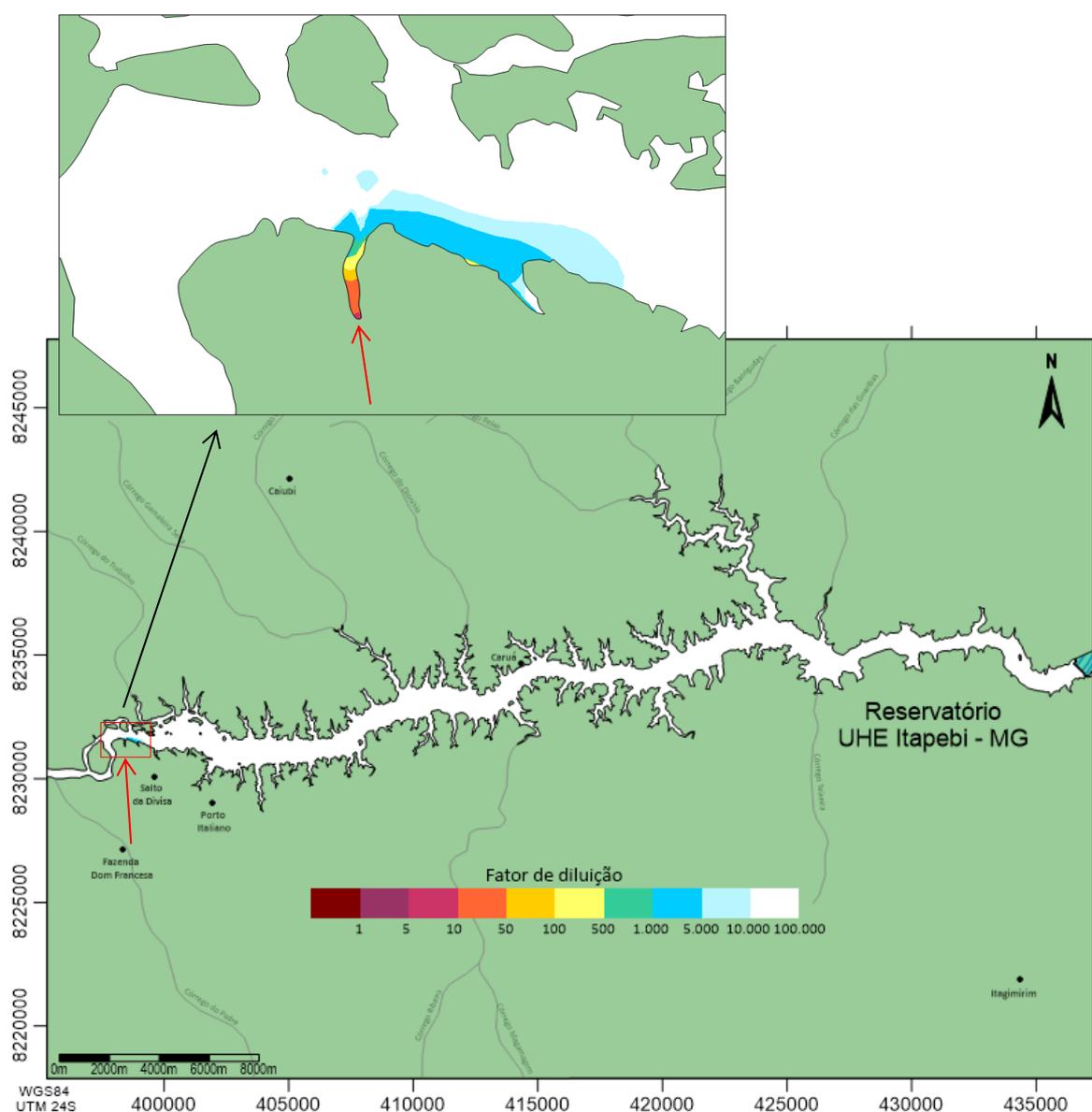


Figura 22: Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Taxa de diluição do efluente. Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.4. Dados de Esgotamento Sanitário

De forma a representar o esgotamento sanitário, levando em consideração o número de habitantes, foi inserido no modelo uma vazão média de esgoto doméstico, calculada de acordo com a Equação 10 em comparação com a vazão máxima (Equação 11) e mínima (Equação 12) de esgoto doméstico (CETESB, 1978; ALVAREZ & AZEVEDO NETTO, 1977).

$$Q_{Dmédia} = \frac{População \cdot Q_{PC} \cdot R}{86400} \left(\frac{L}{s} \right) = 8,6 L/s \quad (10)$$

$$Q_{Dmáx} = Q_{Dmédia} \cdot K_1 \cdot K_2 \left(\frac{L}{s} \right) = Q_{Dmédia} \cdot 1,2 \cdot 1,5 \left(\frac{L}{s} \right) = 1,8 \cdot Q_{Dmédia} \left(\frac{L}{s} \right) = 15,5 L/s \quad (11)$$

$$Q_{Dmín} = Q_{Dmédia} \cdot K_3 \left(\frac{L}{s} \right) = 0,5 \cdot Q_{Dmédia} \left(\frac{L}{s} \right) = 4,3 L/s \quad (12)$$

Onde:

$Q_{Dmédia}$	=	vazão doméstica média de esgotos (L/s)
População	=	7007 habitantes (Dado de 2017 – projeção Censo IBGE, 2010)
Q_{PC}	=	quota per capita (L/hab.d) = 125 L/hab.d (Magalhães et al. (2001))
R	=	coeficiente de retorno esgoto/água (NBR 9649 (ABNT,1986): 0,5 a 0,9 - utilizado 0,85(SABESP,1990))
K_1		Coeficiente de máxima vazão diária
K_2		Coeficiente de máxima vazão horária
K_3		Coeficiente de mínima vazão horária

A NBR 9649 (ABNT, 1986) recomenda os valores para os coeficientes de variação de vazão (K): $K_1 = 1,2$; $K_2 = 1,5$; $K_3 = 0,5$, Considerando a média das somas das vazões de esgoto doméstico média ($Q_{Dmédia}$), máxima ($Q_{Dmáx}$) e mínima ($Q_{Dmín}$), foi utilizada uma vazão de 10 L/s, também levando em consideração que o número da população pode ter aumentado desde 2017, e que pode haver outras fontes de esgotamento além de doméstico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são descritos e discutidos os resultados obtidos através das análises das modelagens realizadas.

5.1. Análise da Modelagem Hidrodinâmica

5.1.1. Velocidade e Vazão

Através dos dados de velocidade e vazão foram gerados gráficos de modo a melhor identificação de valores mínimos e máximos, bem como a oscilação ao longo do período em estudo, o ano de 2019, em todo o reservatório. A Figura 23 mostra a variação do módulo de velocidade e de vazão por metro linear na entrada do reservatório da UHE Itapebi.

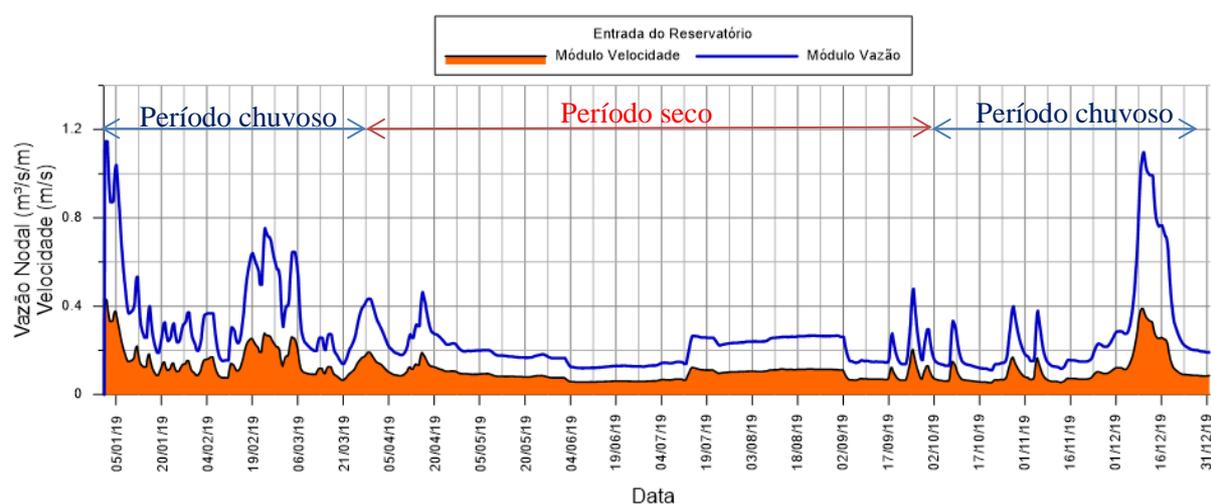


Figura 23: Séries Temporais do módulo de Velocidades e Vazões nodais na entrada do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando que a velocidade e a área da seção transversal do rio são relacionadas e inversamente proporcionais, foi verificado que as velocidades são maiores na entrada do reservatório e na saída do reservatório para a casa de força por se tratarem de seções mais estreitas. Analisando alguns pontos do reservatório, sendo eles, na entrada do reservatório, entre a entrada e o meio, no meio do reservatório, entre o meio e o final, no vertedouro e saída para a casa de força, verificou-se que ao longo do reservatório a largura da seção transversal aumenta fazendo com que a velocidade diminua, conforme a Figura 24.

Na Figura 25 foi observado que as velocidades nos córregos afluentes ao reservatório são abaixo de 0,015m/s, pequenas assim como nos pontos do reservatório de menores velocidades. Dentre eles, o Córrego Ribeira (linha roxa), próximo ao meio do reservatório, apresentou maiores velocidades. E os córregos Guaribas e Dionísio apresentaram velocidades

“negativas” o que indica que o sentido do fluxo de água pode ser alterado por possuir velocidades menores em relação ao entorno.

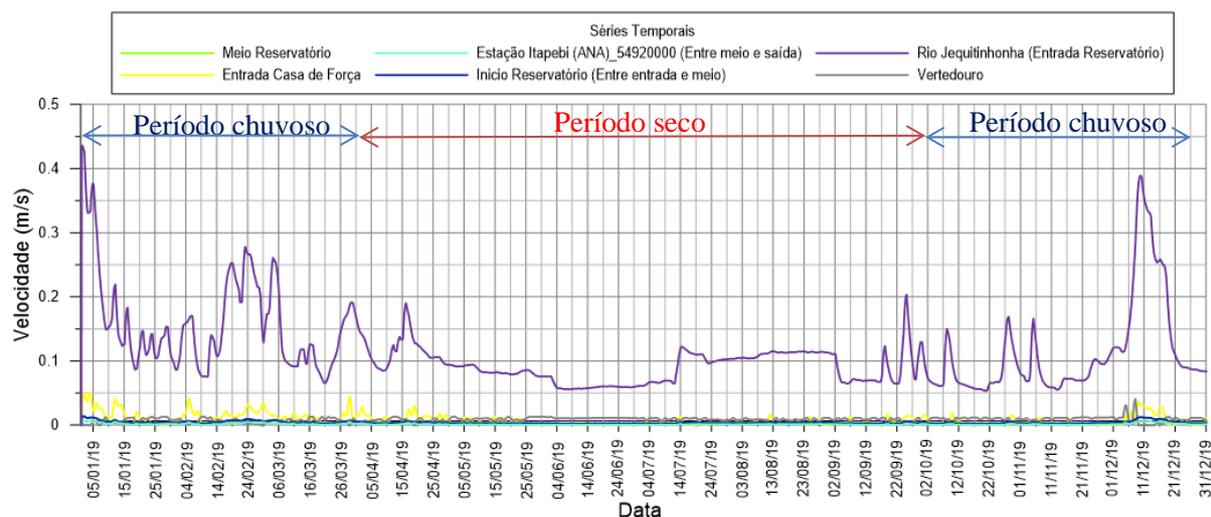


Figura 24: Séries temporais de velocidade em alguns pontos do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.

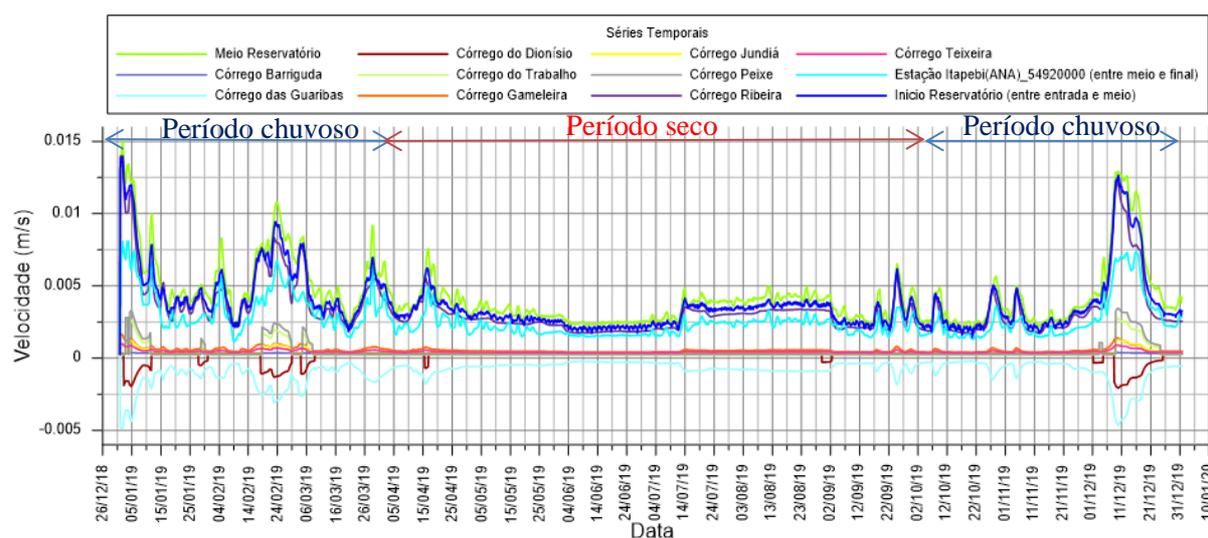


Figura 25: Séries temporais de velocidade em córregos afluentes e alguns pontos do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.

Semelhantemente, em estudos realizados por Spiegelberg (2010) na UHE Estreito (MA), foi verificado que a intensidade das velocidades em todo o reservatório durante os períodos secos tem valores inferiores a 0,3 m/s. Durante o período chuvoso, o reservatório apresentou velocidades consideravelmente mais elevadas.

Assim como na região próxima ao barramento e vertedouro da UHE Itapebi, o trecho mais próximo à UHE Estreito possui velocidades inferiores ao restante do reservatório, mesmo durante o período de cheia. Visto que, este é o trecho que tem sua hidrodinâmica mais alterada, pois com o represamento a área da seção transversal do rio tornando-a muito elevada,

consequentemente diminuindo a magnitude das velocidades. Já na região central do reservatório, onde há diversas ilhas e curvas, e nestes pontos de estrangulamento da área da seção hidráulica também ocorreram maiores velocidades.

Em outro estudo realizado por Cancelli & Nocko (2019) na UHE São Manoel - MT/PR observou-se menores velocidades principalmente nas áreas periféricas do reservatório; nas entradas dos afluentes as velocidades apresentam-se um pouco maiores em função da entrada de água, assim como na UHE Itapebi. No canal principal do reservatório a velocidade diminui de montante para jusante, com pequenas acelerações em algumas regiões.

Áreas com menores velocidades localizam-se nos braços (afluentes) e reentrâncias; áreas estagnadas favorecem o acúmulo de substâncias diversas e podem influenciar negativamente a qualidade da água. Todo o eixo principal do rio apresenta velocidades maiores do que 0,1 m/s, enquanto grande parte dos braços apresenta velocidades pequenas (menores do que 0,05 m/s).

Os módulos de velocidade média anual ao longo do reservatório da UHE Itapebi, bem como seus respectivos vetores, são ilustrados na Figura 26. É possível perceber que o rio principal apresenta a velocidade apontando em direção à jusante, no sentido do curso do rio, enquanto os afluentes menores apresentam vetores com sentidos mais confusos, visto que possuem vazões baixas em relação ao rio principal.

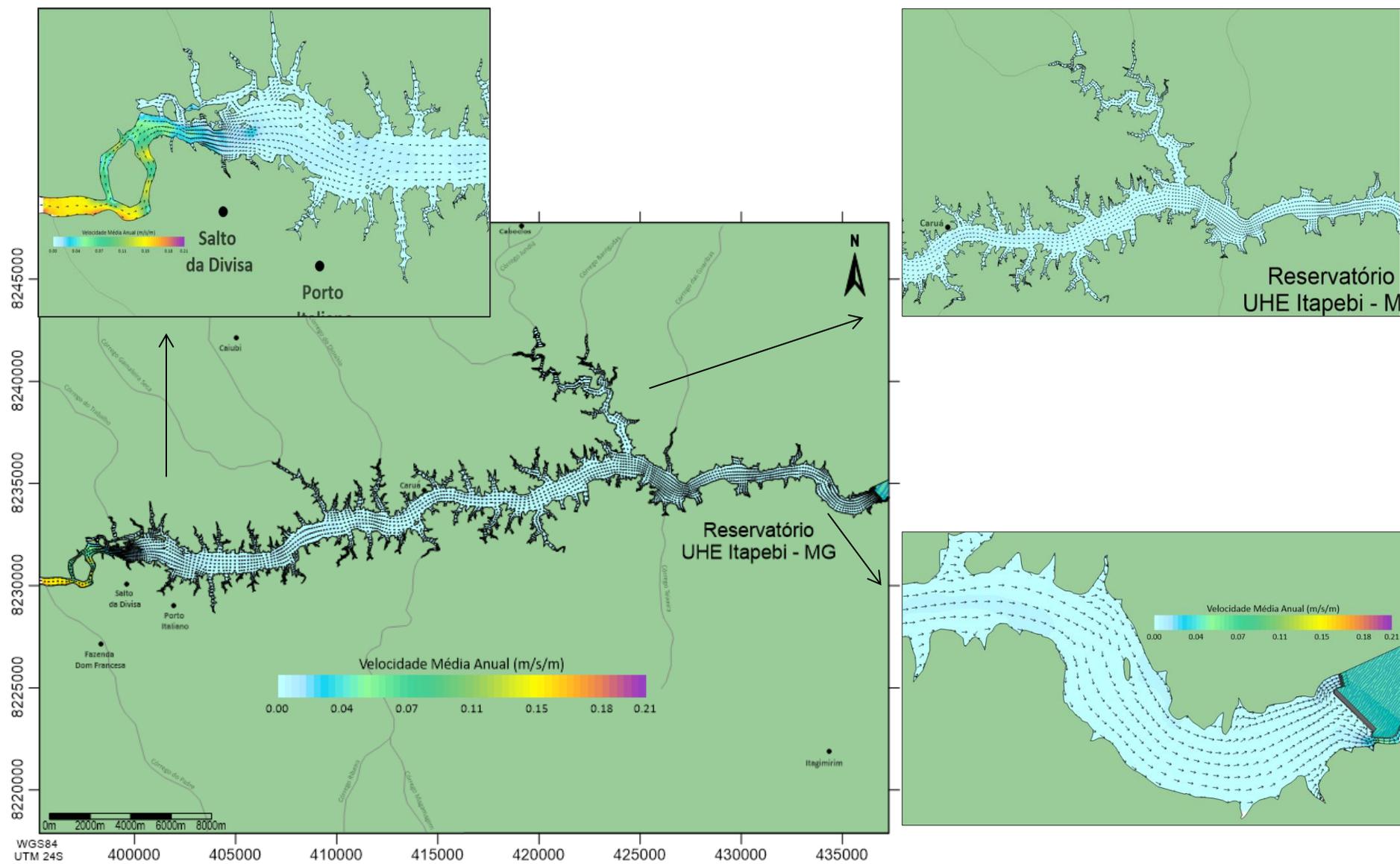


Figura 26: Mapa de intensidade e direção da velocidade média anual. Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir, a Figura 27 representa as séries temporais do módulo de vazões por metro linear das seções transversais observados em três pontos do reservatório, sendo eles, na entrada do reservatório, no meio do reservatório e ao final do reservatório. Pode-se observar que em épocas com picos de precipitação, também há picos de vazão, como esperado.

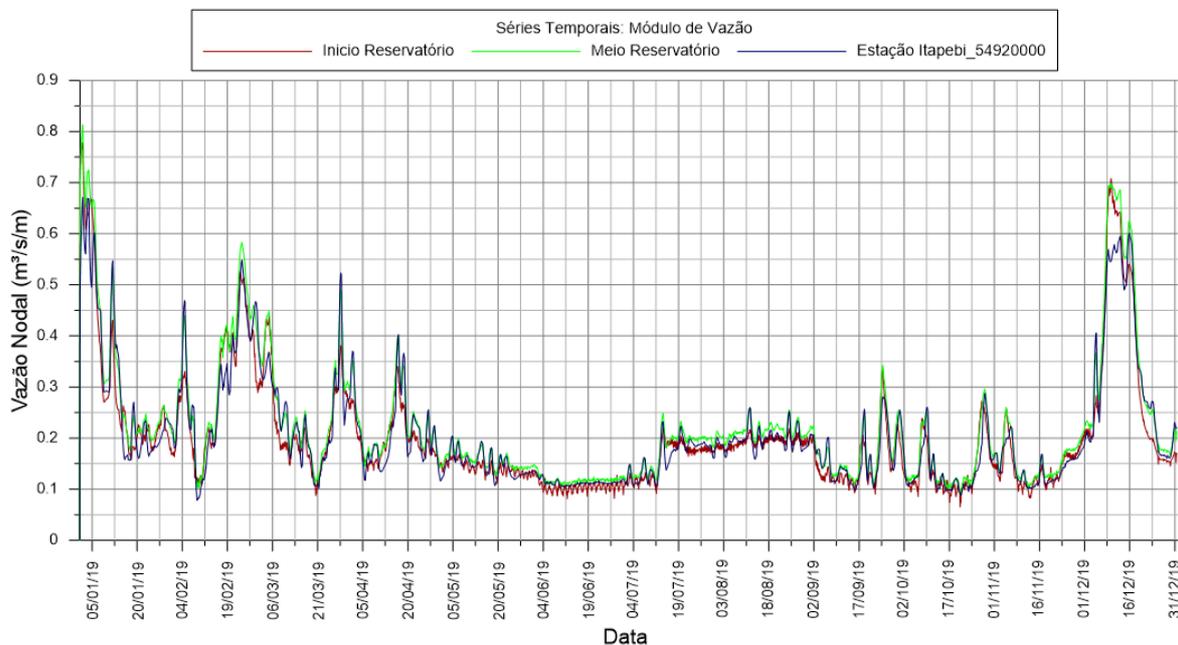


Figura 27: Séries Temporais do módulo de vazão por metro linear em três pontos do reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

Levando em consideração que não há uma diferença brusca entre a variação de vazão por metro linear de seção transversal ao longo do reservatório, foi elaborado a Figura 28 de modo a identificar a variação entre a série temporal de vazão por metro linear que entra no reservatório e a que sai pela casa de força.

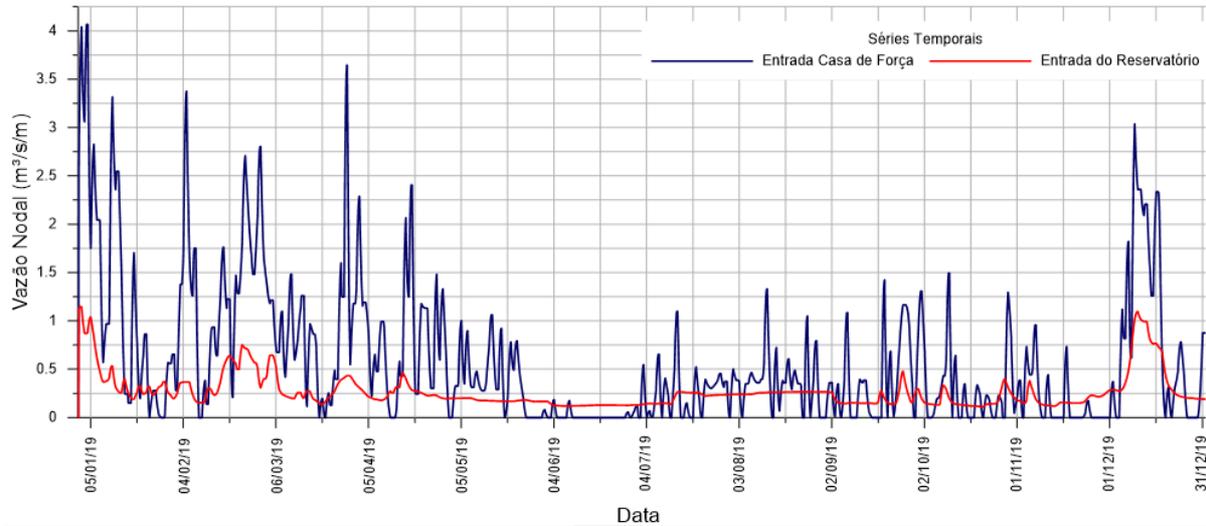


Figura 28: Séries Temporais de Vazão Nodal na entrada e saída do reservatório. Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando que esta usina hidrelétrica funciona “à fio d’água”, ou seja, não armazena água, o ideal para essas situações seria que a vazão que entre no sistema saia sem que seja armazenada. Porém, não impede que esta vazão seja regularizada e armazene certo volume de água. Além disso, isto se deve também ao fato da contribuição hidrológica, visto que o rio principal conta com afluentes que contribuem para o aumento da vazão no rio principal em relação à vazão de entrada.

Para melhor avaliação, espacial e temporal, foram elaborados mapas com as vazões médias ao longo do reservatório de acordo com as estações do ano, conforme já mencionados anteriormente, de modo a caracterizar as interferências dos períodos chuvosos e secos. Este período trimestral demonstrou-se suficiente para avaliações, visto que as condições do reservatório não apresentam mudanças médias mensais significativas.

As Figura 29, 30, 31 e 32 apresentam as vazões médias por metro linear de seção transversal no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente, em todo o reservatório.

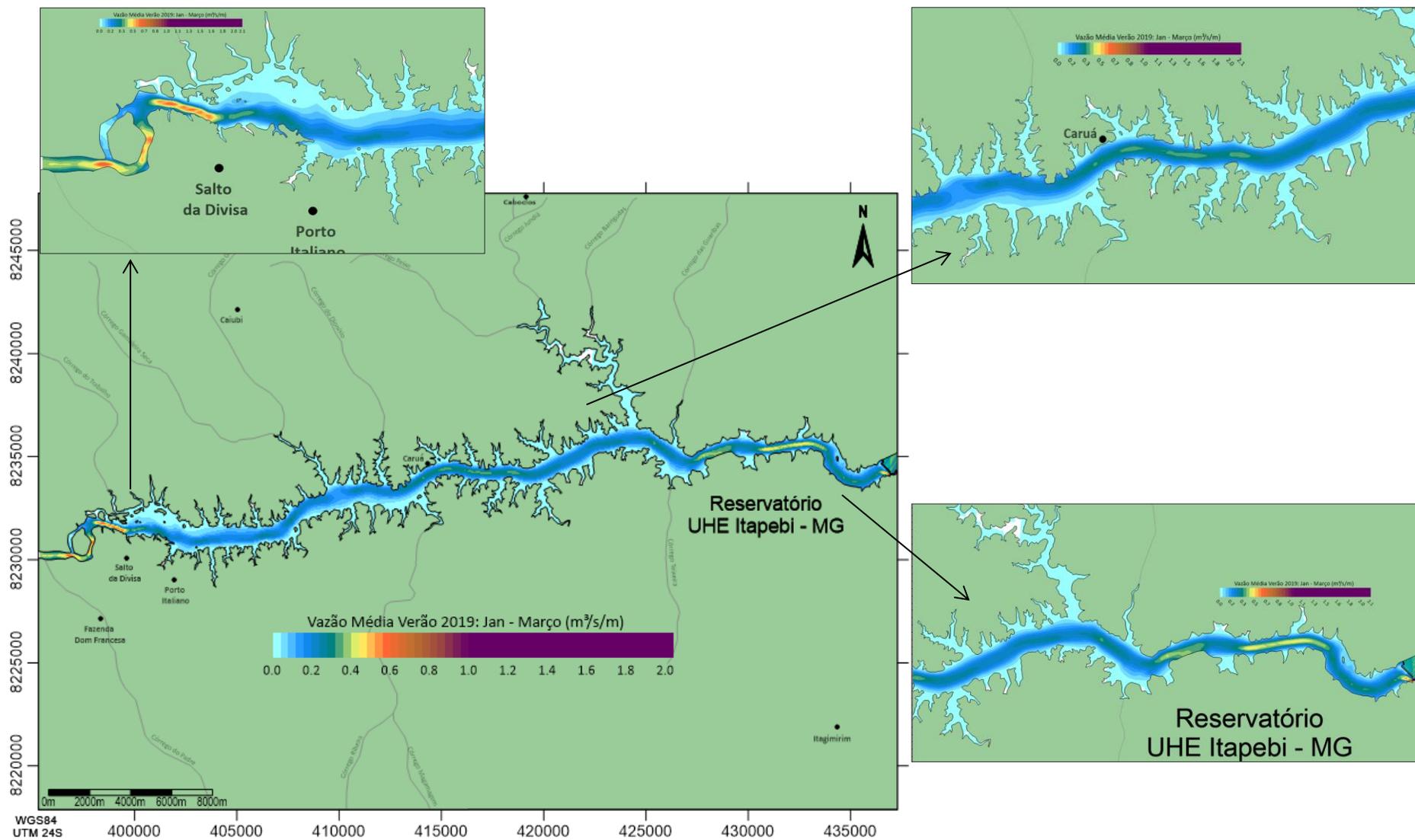


Figura 29: Mapa de vazão média por metro linear no verão em todo o reservatório da UHE Itapebi.
 Fonte: Elaborado pela autora.

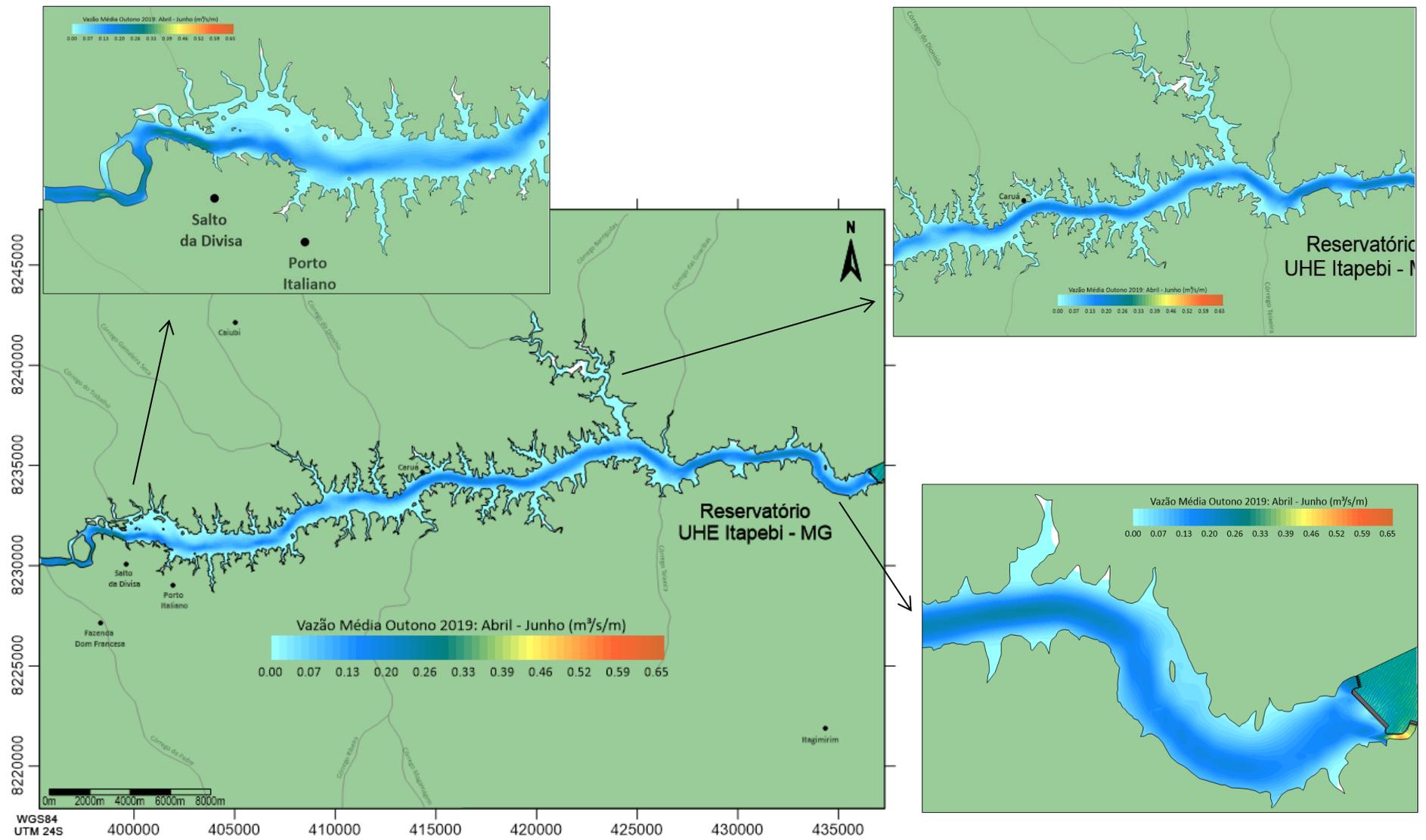


Figura 30: Mapa de vazão média por metro linear no outono em todo o reservatório da UHE Itapebi.
 Fonte: Elaborado pela autora.

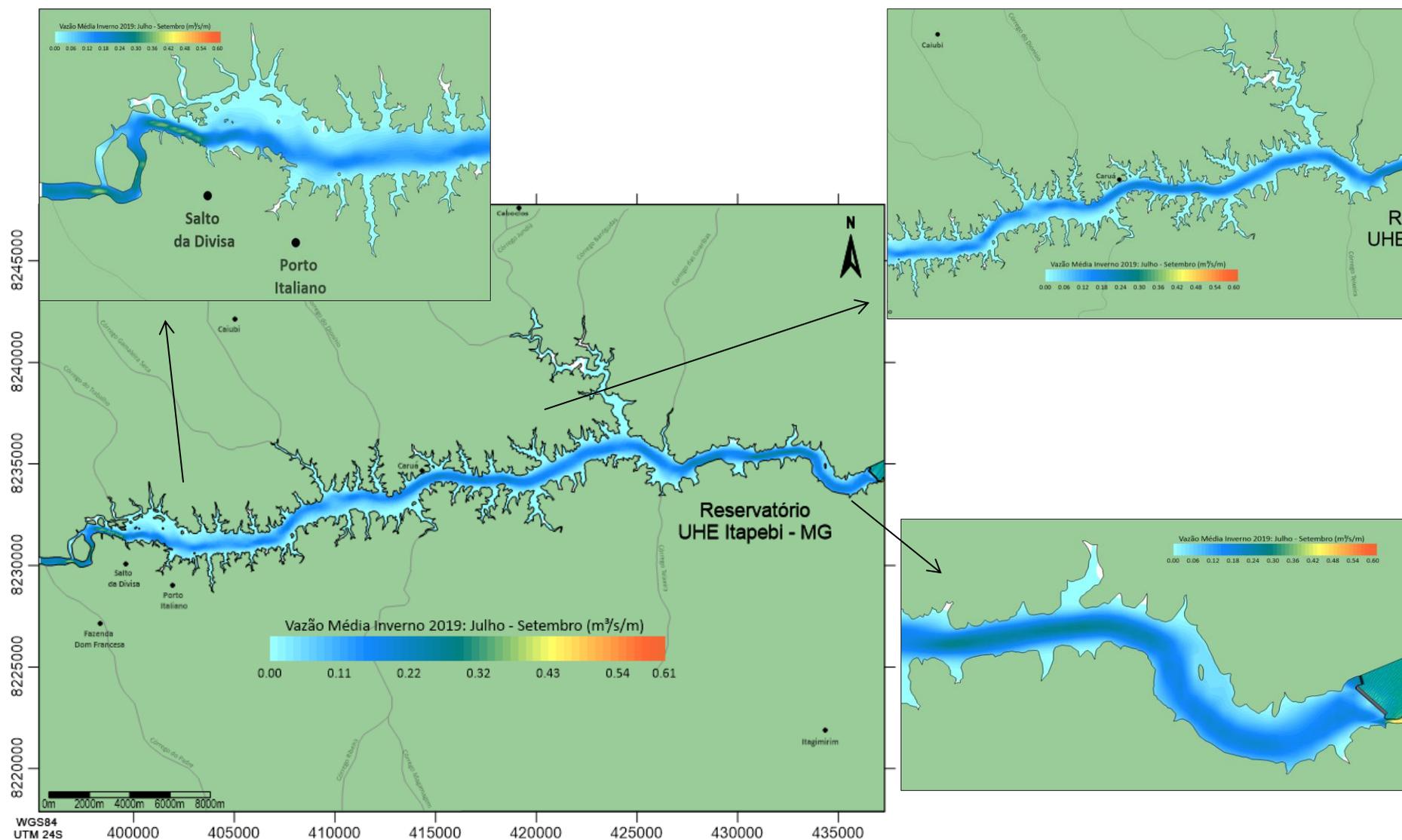


Figura 31: Mapa de vazão média por metro linear no inverno em todo o reservatório da UHE Itapebi.
 Fonte: Elaborado pela autora.

Sabe-se que na hidrologia, a vazão do rio é diretamente relacionada à velocidade e a área na seção do rio. Sendo assim, pode-se perceber que as vazões de entrada e de saída são maiores do que no restante do reservatório, principalmente por apresentarem estreitamento na largura da seção do rio. Ao longo do reservatório o fluxo de água perde velocidade visto que a área da seção aumenta, e com isso, apresenta vazões menores.

O período de chuvas é completamente influente na vazão dos rios. Nas imagens acima é possível perceber o aumento de vazão nas estações do ano em que há maiores índices pluviométricos, como no verão seguido da primavera. Enquanto as menores vazões foram identificadas nas estações do ano em que os índices pluviométricos são mais baixos, como no outono, seguido do inverno. Sendo assim, em ordem decrescente de pluviometria e de vazão estão: Verão, Primavera, Inverno e Outono.

Além disso, é notório que, apesar das microvazões constantes inseridas nos afluentes de menor relevância, as vazões estimadas nos afluentes de maior relevância, baseadas nas vazões do rio principal, também não apresentam alterações significativas ao variar das estações e períodos chuvosos e secos.

5.2. Análise da Modelagem de Transporte Euleriano

O modelo de Transporte Euleriano foi realizado baseado no modelo hidrodinâmico. Ou seja, a hidrodinâmica do reservatório influencia diretamente nos resultados obtidos nesta etapa. Através deste Modelo foram elaborados os modelos de taxa de renovação da água, idade da água e fator de diluição de efluente.

Para conhecimento dos tempos hidráulicos característicos do reservatório da UHE Itapebi foram desenvolvidos modelos descritos abaixo. Assim como o modelo hidrodinâmico, os modelos Eulerianos também foram analisados trimestralmente, caracterizando as estações do ano.

5.2.1. Taxa de Renovação da Água

Como já mencionado anteriormente, a taxa de renovação da água representa a porcentagem de água “nova” ao domínio de modelagem em relação à água “velha” ao sistema. Sendo estes termos não ligados à sua qualidade, e sim, o quão percentualmente ela se renova. Os resultados obtidos com o Modelo de Transporte Euleriano mostram a renovação da água avançando de acordo com a afluência da água de montante para jusante. A Figura 33 mostra

séries temporais de taxa de renovação da água de quatro pontos do reservatório, sendo elas na entrada, entre a entrada e o meio, no meio, entre o meio e o final, e no final do reservatório, respectivamente.

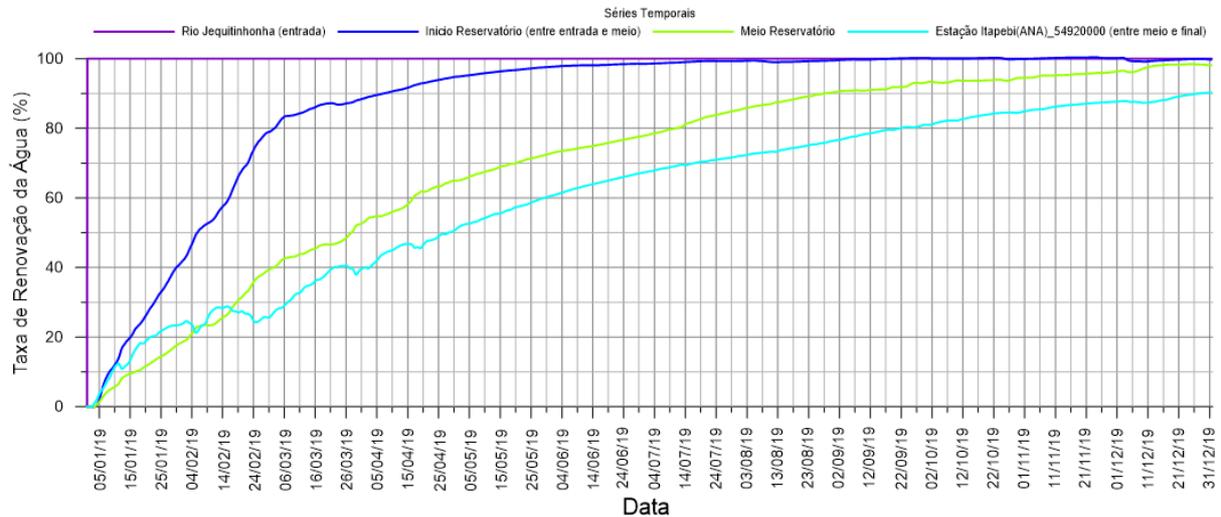


Figura 33: Taxa de Renovação da água no início e no final do reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

Foram elaborados mapas um para cada estação do ano e um para a média anual referente a 2019. De forma a avaliar a influência da sazonalidade na renovação da água de forma isolada. A Figura 34 apresenta o mapa da média anual de taxa de renovação da água de 2019.

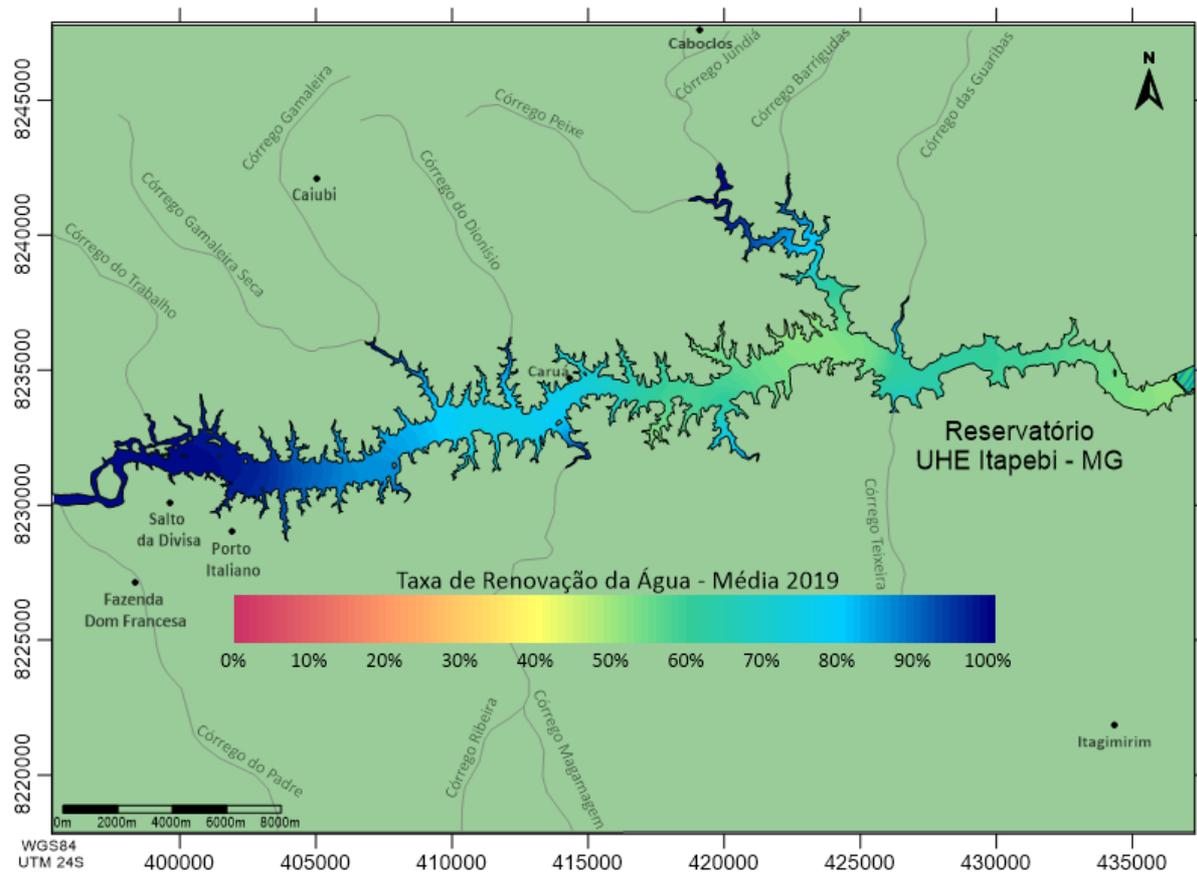


Figura 34: Mapa da Média anual (2019) de Taxa de Renovação da Água no reservatório da UHE Itapebi.
 Fonte: Elaborado pela autora.

As Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 apresentam os mapas das médias temporais de taxa de renovação da água no período do verão, outono, inverno e primavera, respectivamente.

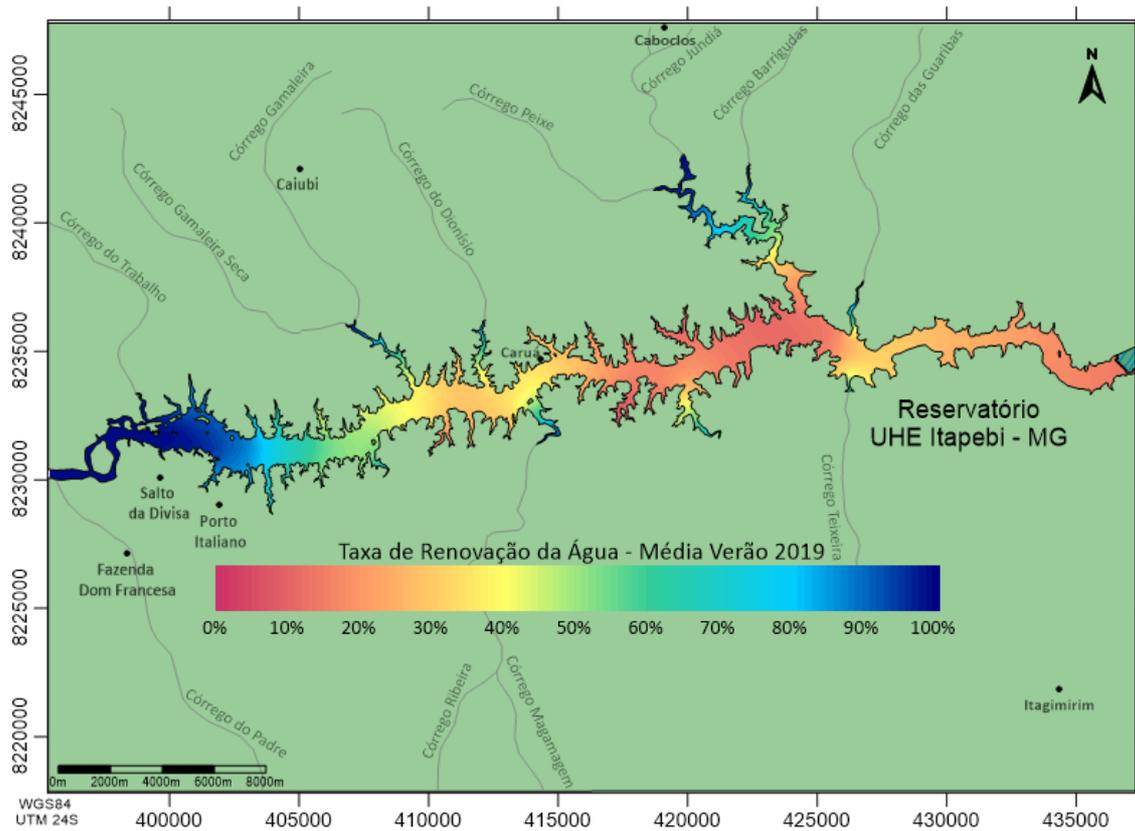


Figura 35: Mapa de Taxa de Renovação da Água média no verão de 2019 no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

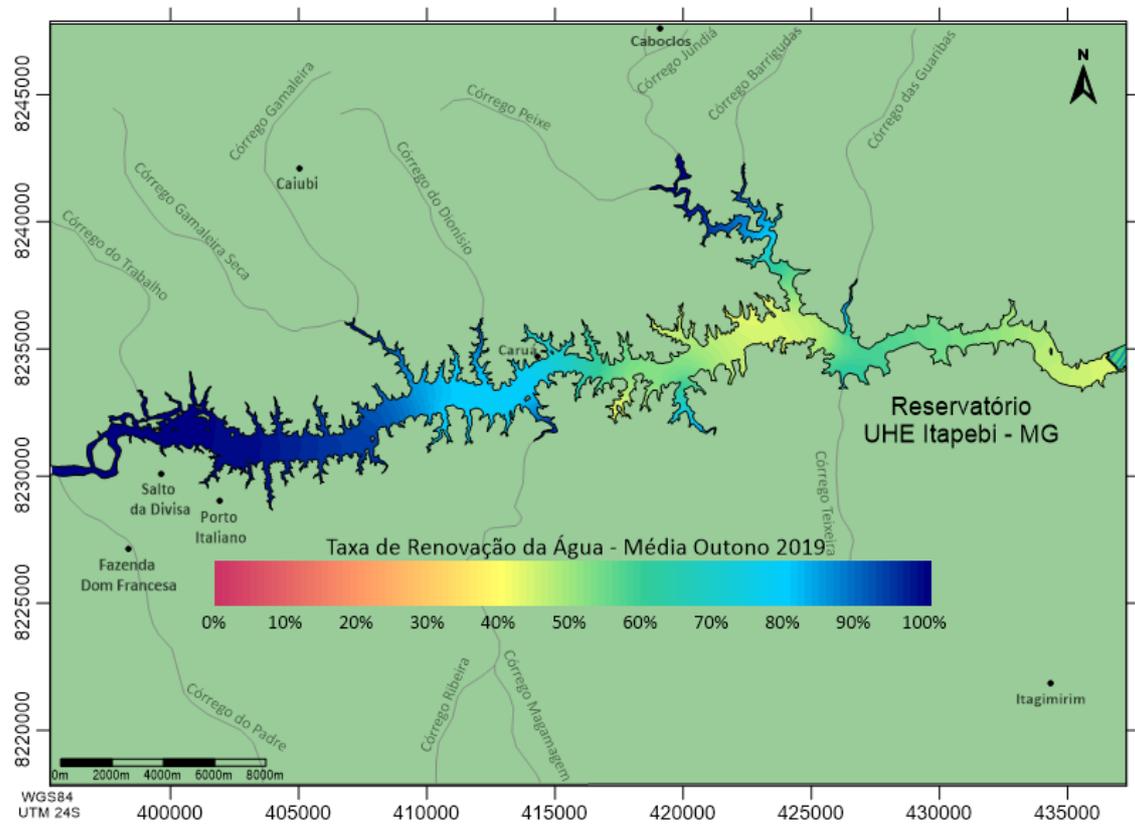


Figura 36: Mapa de Taxa de Renovação da água média no outono de 2019, considerando o verão como condição inicial. Fonte: Elaborado pela autora.

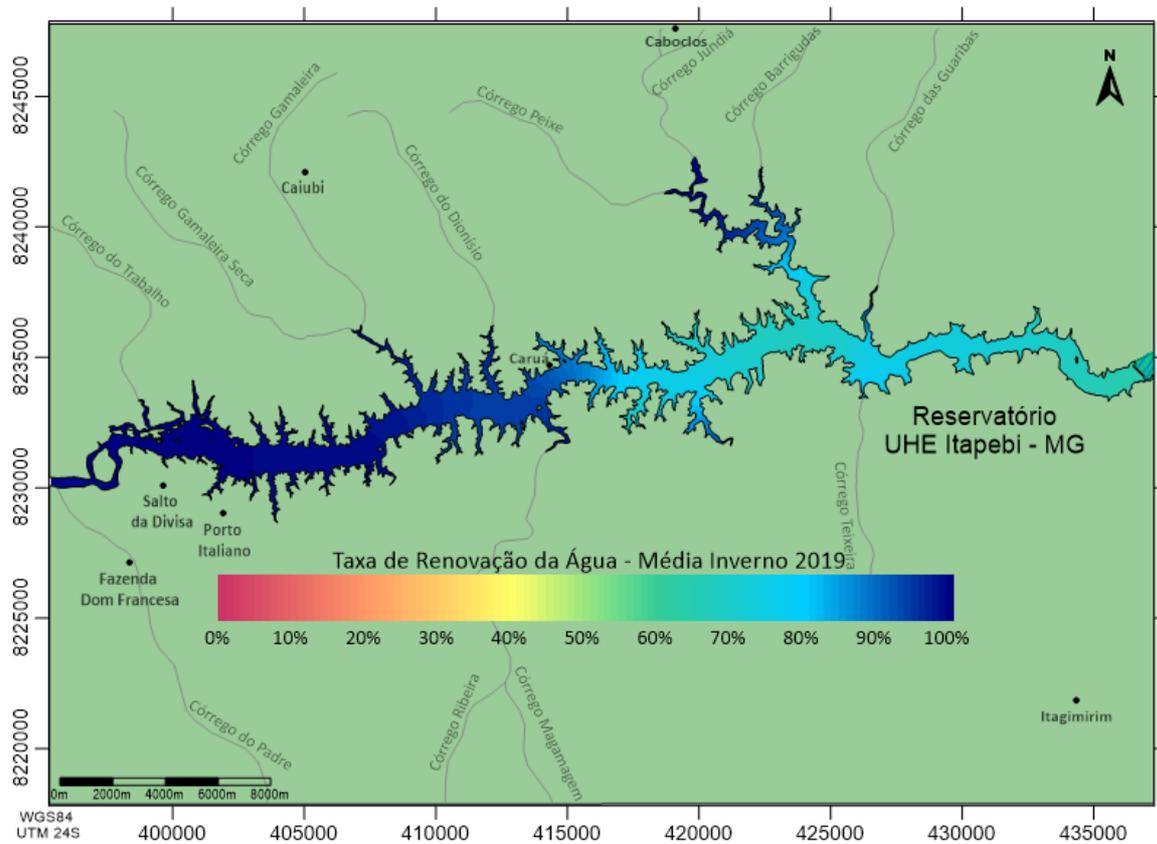


Figura 37: Mapa de Taxa de Renovação da água média no inverno de 2019, considerando o verão como condição inicial. Fonte: Elaborado pela autora.

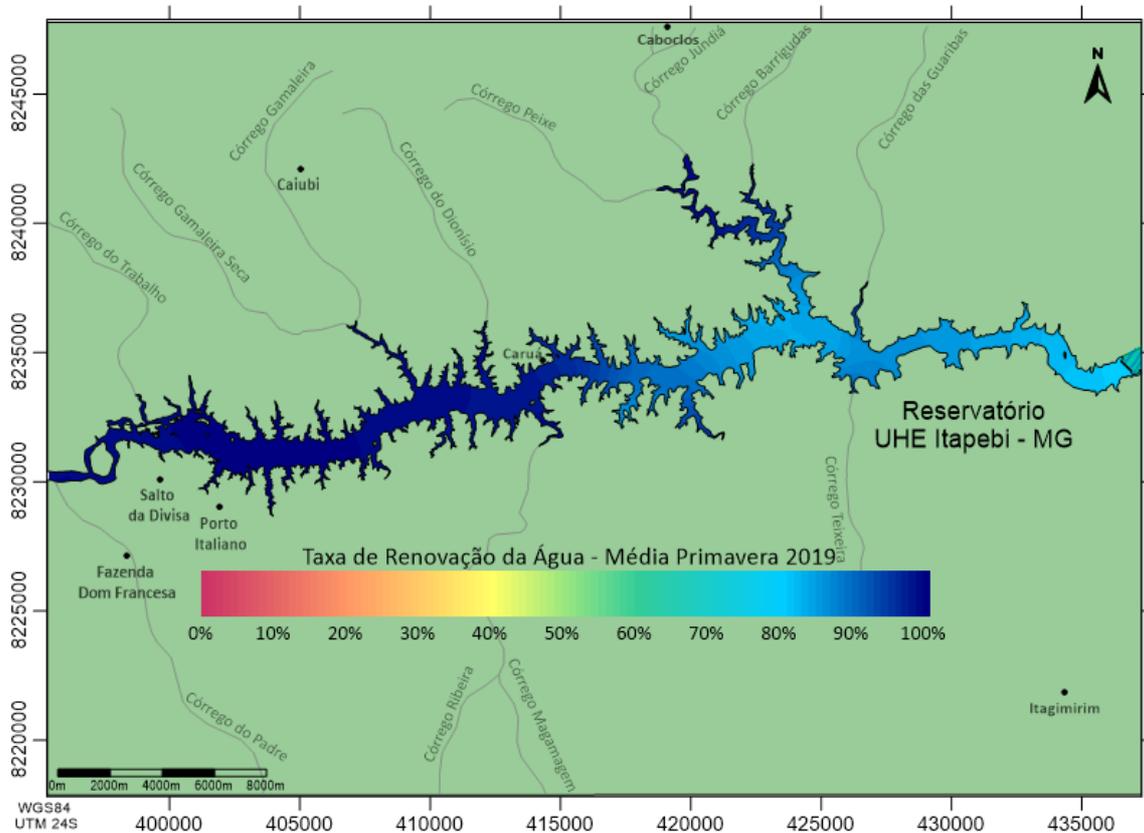


Figura 38: Mapa de Taxa de Renovação da água média na primavera de 2019, considerando o verão como condição inicial. Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando que este é um curso d'água natural, onde o escoamento ao longo do domínio de modelagem é contínuo e variável, porém o modelo não está considerando dados anteriores a este período analisado, pode-se verificar que na média do verão, primeira estação do ano modelada, a maior parte do reservatório se encontra pouco renovada. O que já era esperado, visto que a condição inicial do modelo é considerada 0% renovada em todo o reservatório até que águas “novas” entrem no sistema enquanto dentro do domínio toda a água encontrava-se em condição de “água velha”.

Contudo, é possível identificar pontos no reservatório em tons mais avermelhados em que a média neste trimestre se encontra bastante baixa, o que aponta que, neste período, estas áreas ainda não foram renovadas com a água que entrou no domínio no início da modelagem. Levando em consideração que neste período a evaporação é maior em função das altas temperaturas somada à umidade relativa do ar local.

É notável que com o passar do tempo a água que entrou no modelo avança a renovação da água já existente anteriormente. Comparando ao outono, a média temporal do verão apresentou tons mais avermelhados e alaranjados, com exceção dos pontos onde havia entrada de vazão. Na média da primavera a taxa de renovação da água aumenta ainda mais ao longo do reservatório, apresentando mais da metade do reservatório praticamente 100% renovado.

Foi verificado que o início do reservatório apresenta maior variação na taxa de renovação da água do que o final reservatório devido à afluência do curso d'água. Bem como, que nos períodos de maiores índices pluviométricos, verão e primavera, houveram maiores variações de taxa de renovação da água.

5.2.2. Idade Da Água (Tempo de residência da água)

A Idade da Água, assim como a Taxa de Renovação, é um parâmetro que, a partir de uma visão Euleriana do transporte, simula o tempo (em dias) em que a água reside no domínio de modelagem, considerando também sua variação espacial.

No decorrer da simulação, há uma estabilização do valor de idade da água, ou seja, as águas no interior do domínio de modelagem vão ficando mais velhas, à medida que há o aporte de águas novas no sistema. Assim, quanto maior a renovação da água em uma determinada área, menor será a idade da água nessa mesma região.

Assim como no modelo de Taxa de renovação da água, os resultados obtidos com o Modelo de Transporte Euleriano mostram a renovação da água de acordo com a afluência da água de montante para jusante. Com isso, essas regiões apresentaram uma idade menor que as

demais. As imagens a seguir ilustram as médias de idade da água nas quatro estações do ano: Verão (Figura 39), Outono (Figura 40), Inverno (Figura 41), Primavera (Figura 42).

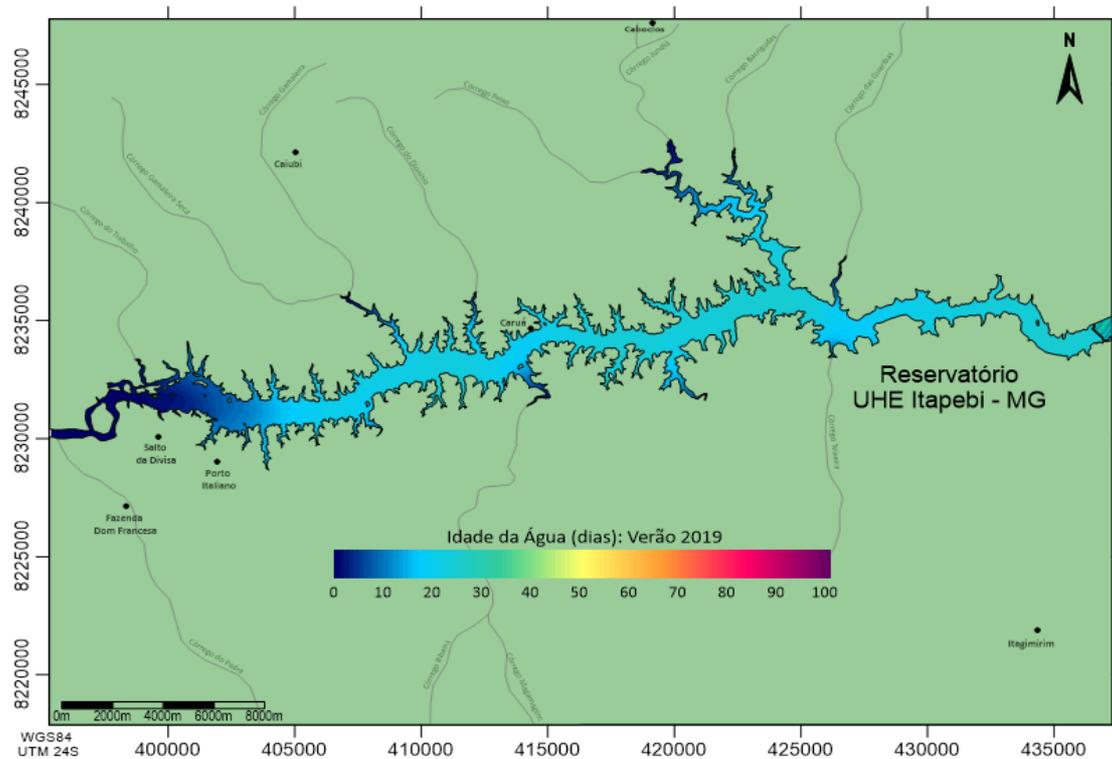


Figura 39: Média temporal da idade da água no verão de 2019 no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

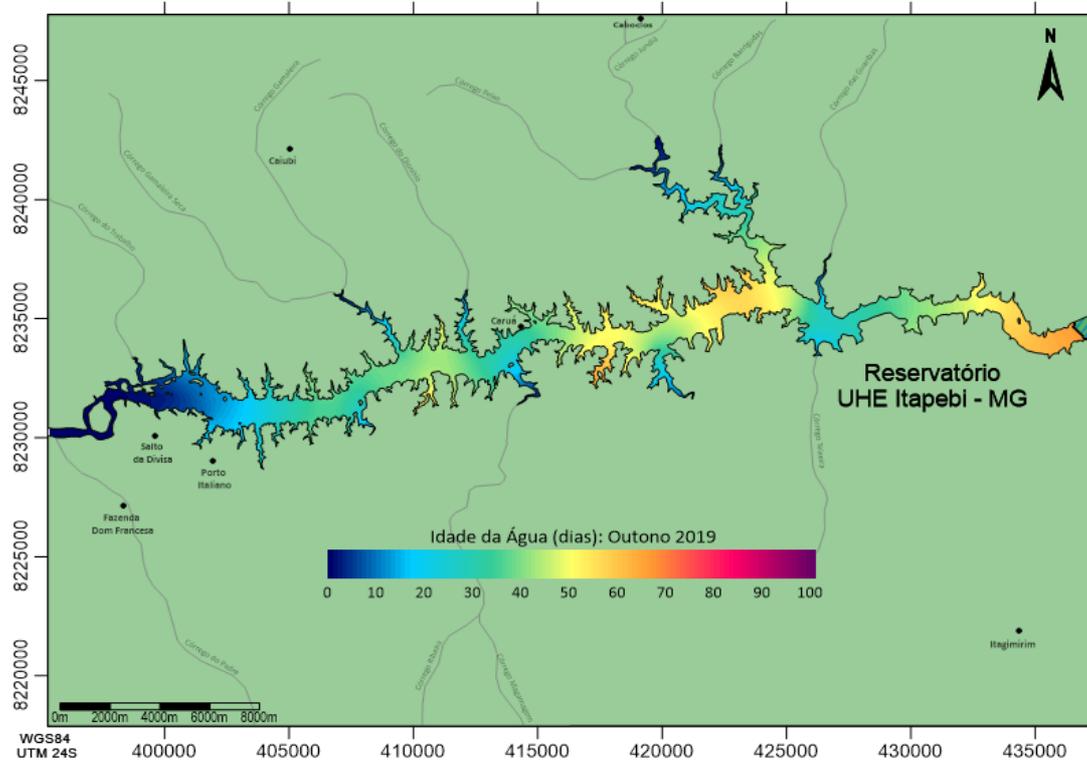


Figura 40: Média temporal da idade da água no outono de 2019 no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

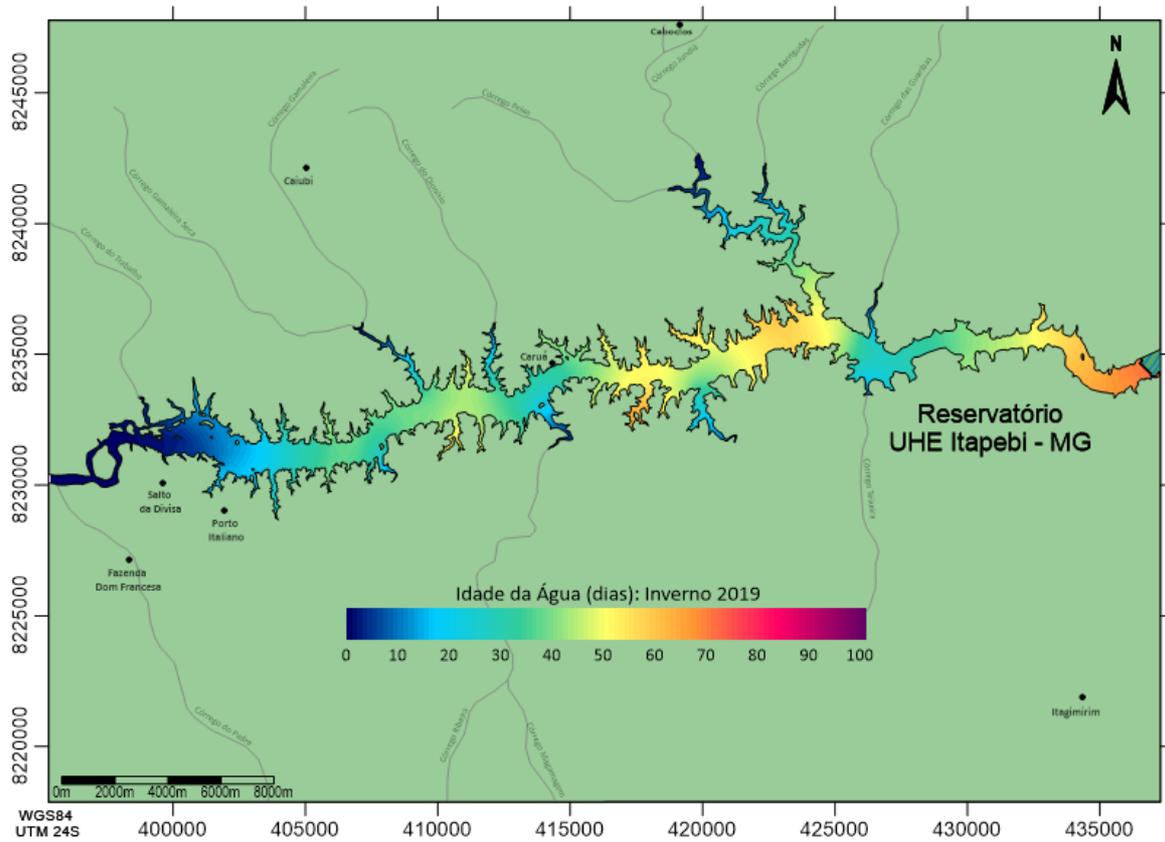


Figura 41: Média temporal da idade da água no inverno de 2019 no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

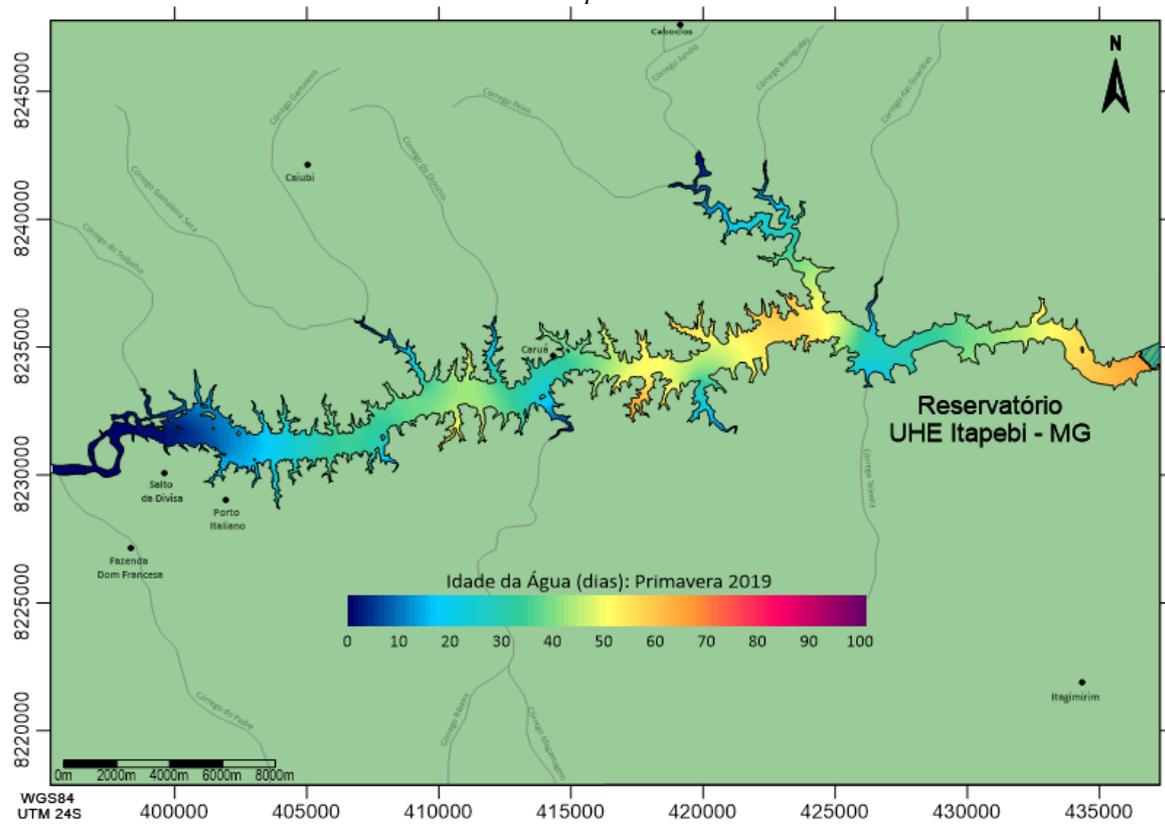


Figura 42: Média temporal da idade da água na primavera de 2019 no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

A idade da água está diretamente relacionada com a taxa de renovação da água. Os resultados obtidos com o Modelo de Transporte Euleriano mostram a renovação da água avançando de acordo com a afluência da água de montante para jusante. Com isso, pode-se perceber que quão maior é a renovação da água, menor é sua idade.

Assim como no modelo de taxa de renovação da água, os resultados em que as estações do ano foram modeladas isoladamente mostram que não houve uma variação visual relevante entre eles. Visto que cada um desses modelos só considera apenas seus respectivos três meses, pode-se verificar a variação espacial, mas não muito temporal. A pequena alteração entre as estações do ano deve-se a variação da série de vazões apresentadas em tais estações.

A Figura 43 mostra séries temporais em diferentes pontos do reservatório, sendo elas de montante para jusante, respectivamente. O início do reservatório apresenta menor idade da água do que o final devido à afluência do curso d'água. Sendo assim, como esperado, as menores idades da água foram no verão e na primavera, períodos de maiores índices pluviométricos.

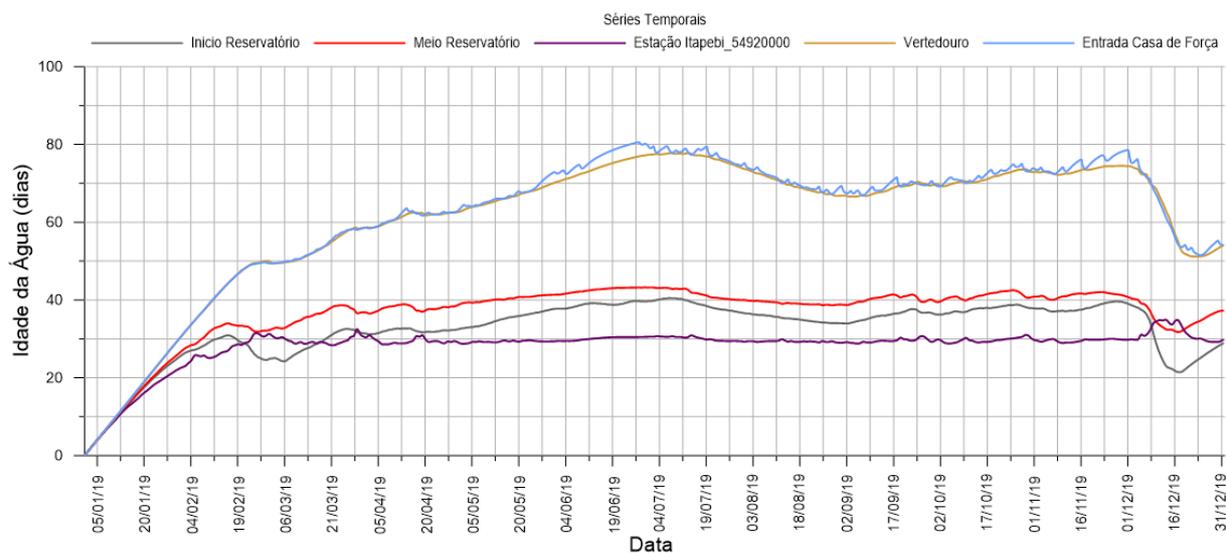


Figura 43: Séries temporais de idade da água no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como mencionado, os pontos do início e do meio do reservatório apresentam curvas de menores valores de idade da água em relação ao ponto de saída para o vertedouro e entrada da casa de força. Já a estação Itapebi, que se localiza entre o meio e o final do reservatório, após a afluência do principal afluente do reservatório e mais outros dois afluentes, por apresentar maior renovação da água, aponta melhora na idade da água.

5.2.3. Taxa de Diluição do Efluente

A Figura 45 mostra o modelo de transporte euleriano de diluição do efluente realizado para o período do outono no reservatório da UHE Itapebi com foco na área de lançamento de efluente proveniente do município de Salto da Divisa – MG.

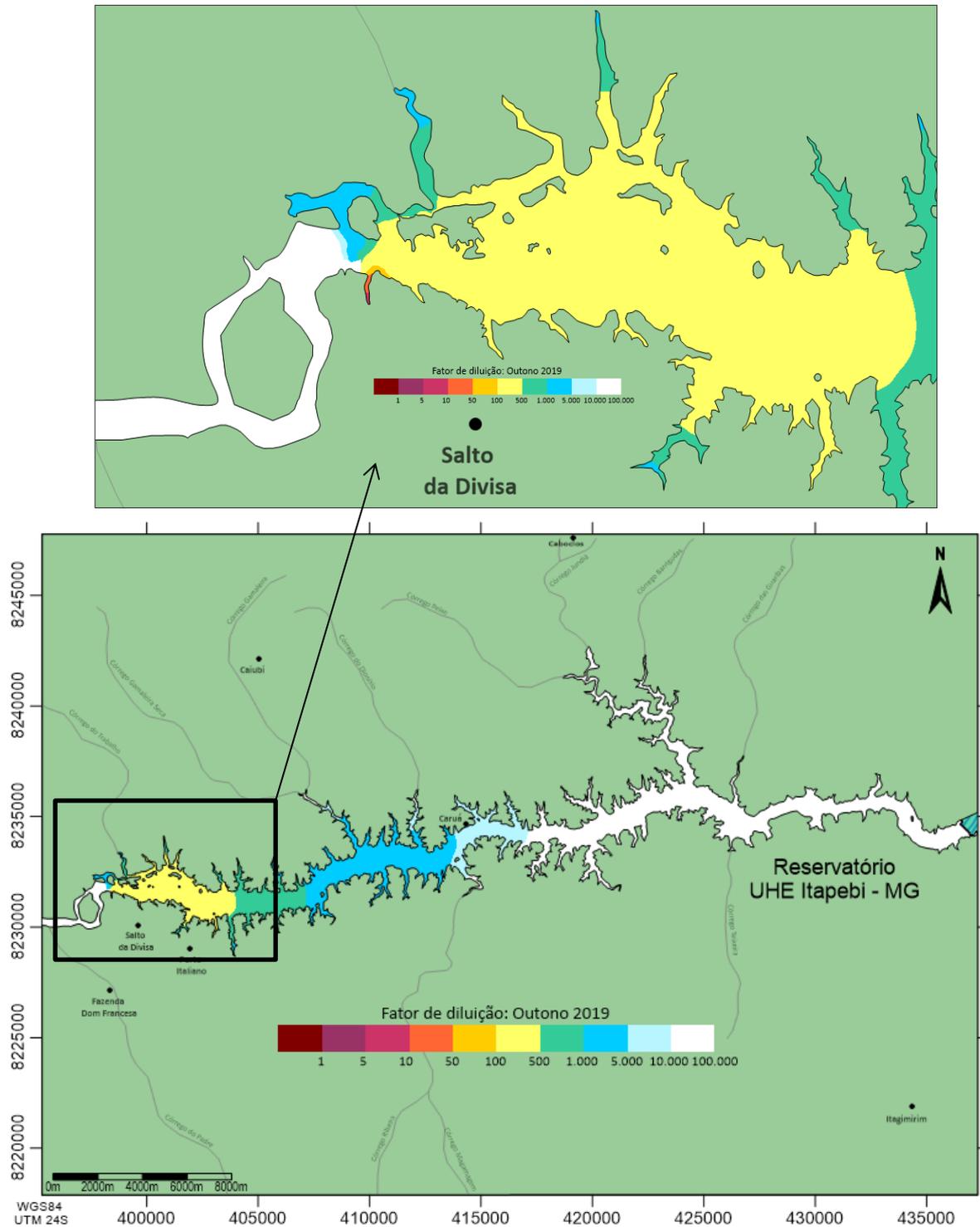


Figura 45: Mapa de diluição do efluente no outono no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

- Inverno: Julho – Setembro 2019

A Figura 46 mostra o modelo de transporte euleriano de diluição do efluente realizado para o período do inverno no reservatório da UHE Itapebi, com foco na área de lançamento de efluente proveniente do município de Salto da Divisa – MG.

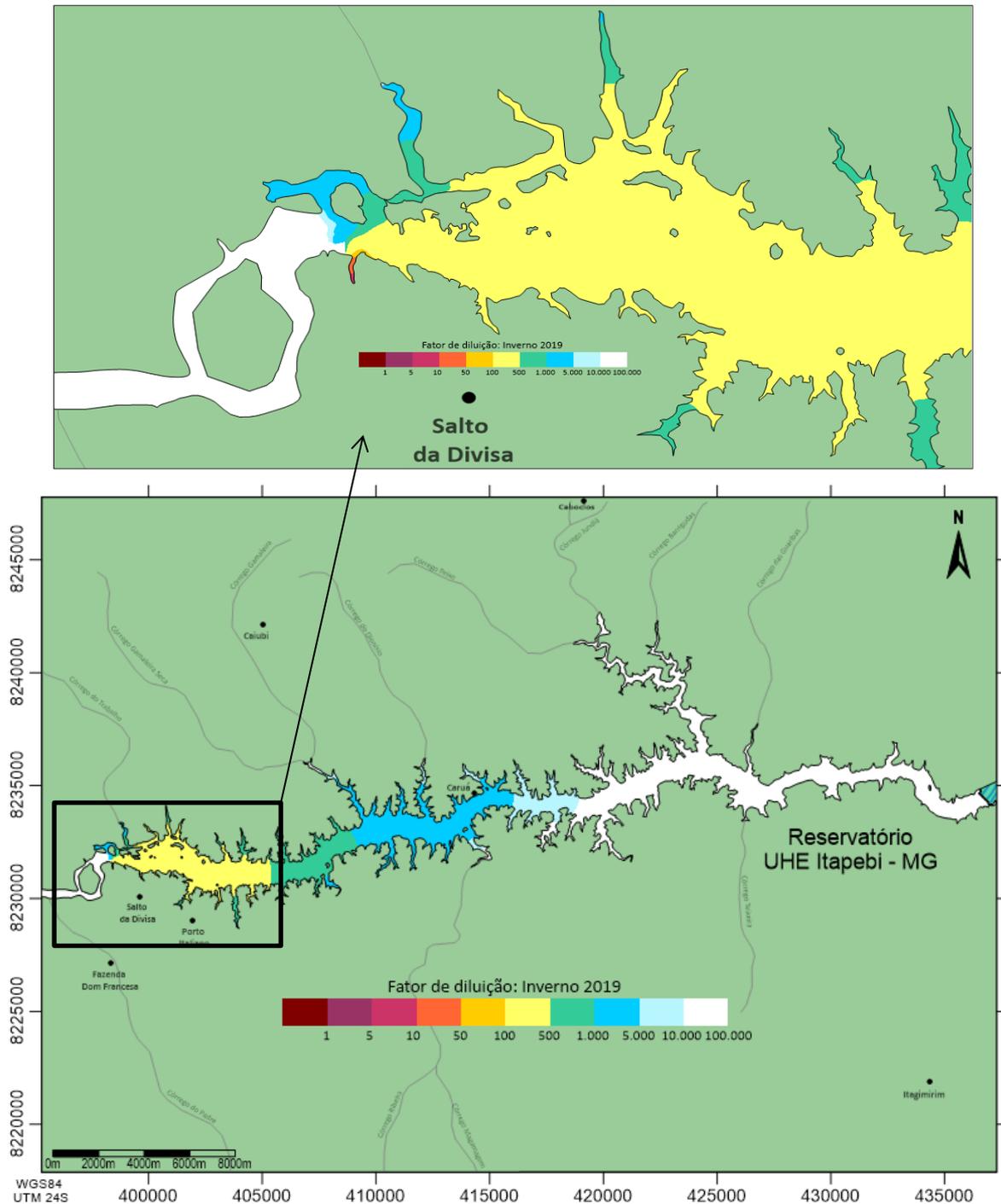


Figura 46: Mapa de diluição do efluente no inverno no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

- Primavera: Outubro a Dezembro 2019

A Figura 47 mostra o modelo de transporte euleriano de diluição do efluente realizado para o período da primavera no reservatório da UHE Itapebi com foco na área de lançamento de efluente proveniente do município de Salto da Divisa – MG.

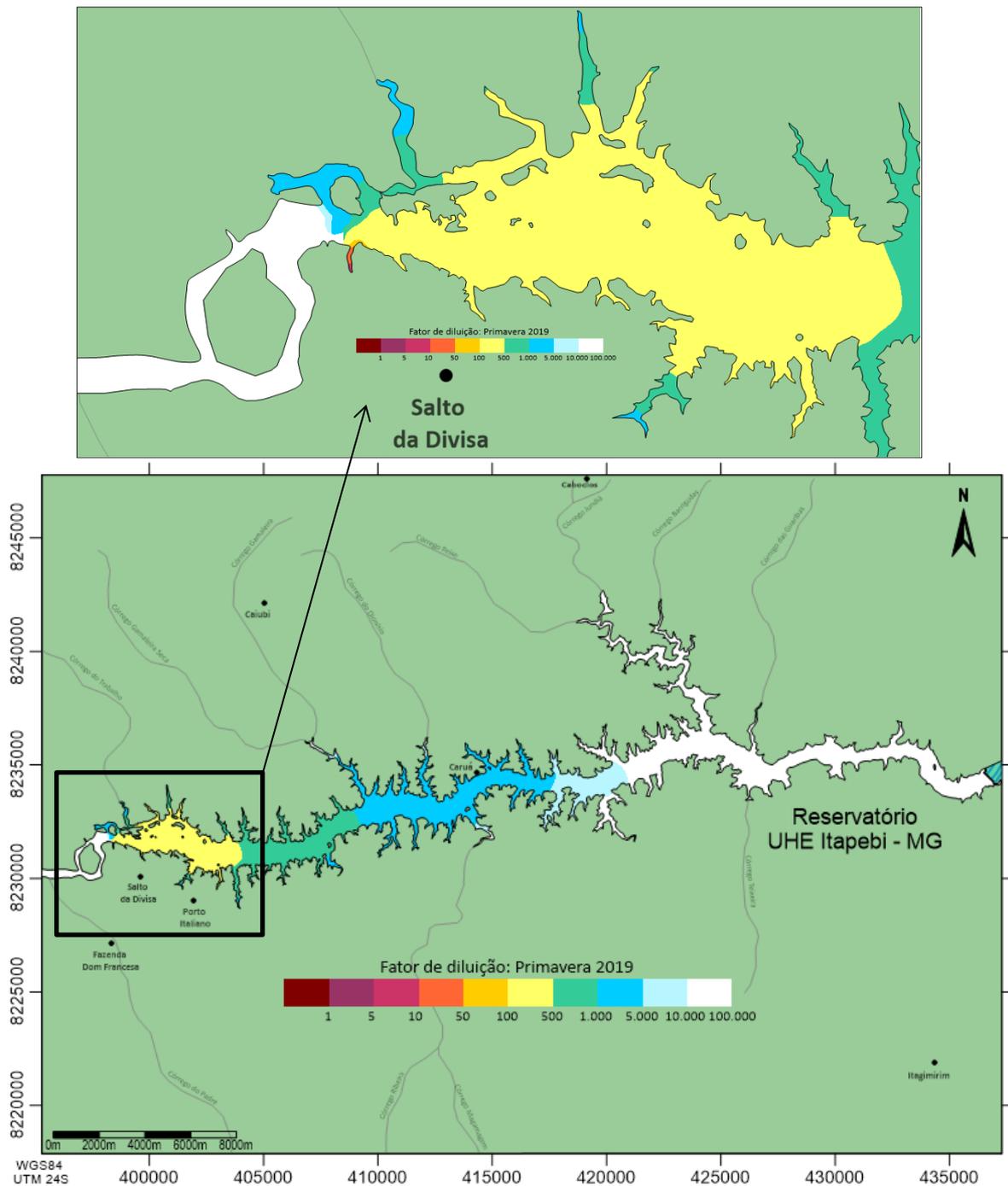


Figura 47: Mapa de diluição do efluente na primavera no reservatório da UHE Itapebi. Fonte: Elaborado pela autora.

Os mapas apresentam a legenda em fator de diluição, representando a proporção 1:1 na entrada do efluente, seguidos de 1:5, 1:10, 1:50, 1:100, 1:500, 1:1.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:100.000 ao longo do reservatório. Os tons avermelhados, alaranjados e amarelados possuem menor diluição. Sendo assim, estas são áreas mais susceptíveis à presença de macrófitas.

Conforme já relatado nos modelos Eulerianos de taxa de renovação da água e no de idade da água, a vazão afluente influencia na renovação da água, que está diretamente ligada à sua idade e diluição de qualquer substância presente nesta água. De acordo com as imagens acima, o efluente se dilui ao longo do tempo e do espaço. Em períodos de chuva, maiores são os índices pluviométricos bem como as vazões afluentes ao domínio de modelagem. Com maiores vazões nas estações do verão e da primavera, podem-se observar maiores diluições do que nos períodos mais secos, como nas estações do inverno e outono.

De acordo com as análises realizadas individualmente e a observação de seus resultados em conjunto, percebe-se que o reservatório apresenta alguns pontos mais críticos, como o local de entrada de efluente sanitário e locais que apresentam ambientes mais lênticos. Verificou-se que, nas regiões mais propensas a terem águas mais calmas e com menor turbulência (menores velocidades), as vazões tendem a ser menores e permanecem circulando por mais tempo pelo local, resultando em menores taxas de renovação nesses córregos e em suas adjacências, e conseqüentemente, maior idade da água (tempo de residência).

Em simulação hidrodinâmica do reservatório Acarape do Meio – CE (CAPELO NETO et. al., 2021), localizado na região semiárida tropical Brasileira, foi verificado que apesar da chuva ser a principal forçante de alteração nas taxas de renovação, a renovação total da massa de água só foi observada nas áreas próximas à entrada das vazões afluentes dos rios. Estimou-se um tempo de residência (idade da água) superior a 100 dias na maioria dos compartimentos, principalmente nas áreas de transição e lacustre. Por outro lado, nas áreas dendríticas, valores superiores a 365 dias foram estimados, o que pode intensificar a recirculação de nutrientes e a eutrofização do reservatório. Identificou-se que a circulação hidrodinâmica de toda massa d'água é influenciada principalmente pelos ventos e, em menor escala, pelos tributários no período de chuvas na área da bacia hidrográfica.

Segundo Capelo Neto et. al (2021), a morfologia do reservatório foi outra característica importante, impactando na variação do tempo de residência (idade) da água. Foi possível identificar no período chuvoso as alterações nas taxas de renovação a partir do aporte de vazões afluente e mantendo-se quase que constante após as vazões afluentes cessarem. A

renovação total da massa de água só foi possível nas áreas próximas à entrada das vazões afluentes dos rios. O tempo de residência (idade da água) é alto, superior a 100 dias na maioria dos compartimentos em profundidades elevadas enquanto nas zonas rasas e dendríticas esse valor foi superior a um ano. De maneira geral, os altos tempos de residência estão associados ao período seco na região.

Ressalta-se que a alta taxa de renovação não é um indicador de boa qualidade, porém caracteriza regiões com alta capacidade de mistura e deslocamento das águas. Ademais, a pluma tende a permanecer na região do próprio afluente no qual ocorre o esgotamento sanitário e se dispersa gradualmente no rio principal, percorrendo por pouco tempo as áreas à jusante do ponto de lançamento.

Desse modo, com o conhecimento das características hidrodinâmicas do reservatório, infere-se que locais com taxas de renovação baixas e pouca circulação, são mais suscetíveis à poluição quando a água responsável pela mistura se encontra poluída, resultado das reações cinéticas que ocorrem no corpo d'água maior. Considerando que essas condições variam no tempo e no espaço, as modelagens buscaram abranger as variações no tempo, considerando a mudança sazonal. Os locais de baixa taxa de renovação da água pode gerar crescimento excessivo de algas e a eutrofização causados pelas altas concentrações de Nitrogênio e Fósforo, principais poluentes relacionados à esgotamento sanitário e fertilizantes da agricultura.

Os resultados obtidos mostram como os processos que ocorrem no reservatório estão interligados e podem ser explicados e contornados com estudos de modelagem ambiental hidrodinâmica, uma vez que esta é uma ferramenta de gestão ambiental que possibilita dar suporte a diversas tomadas de decisões. No reservatório é possível melhorar o planejamento de campanhas de monitoramento, sejam elas de parâmetros de qualidade da água ou hidrodinâmicos, pois se apresenta como um indicativo de regiões mais críticas, que demandam maior atenção e trabalho, além de indicar os agentes responsáveis pelas condições dos cenários observados.

6. CONCLUSÕES

De acordo com a análise hidrodinâmica, o Rio Jequitinhonha apresentou maiores velocidades na entrada e na saída do reservatório, por apresentarem seções transversais mais estreitas (menores áreas molhadas). As maiores vazões apresentadas foram no verão e as menores no outono, devido aos índices pluviométricos, este fator influencia nos demais aspectos avaliados.

A renovação da água nos principais afluentes e na entrada do reservatório são maiores do que nas demais regiões por apresentarem maiores contribuições hidrológicas, e conseqüentemente maiores vazões. Nos locais onde há maiores velocidades, há maiores taxas de renovação da água, o que acarreta em menores idades da água, e conseqüentemente, menores concentrações de poluentes.

Pôde-se concluir que o reservatório apresenta pontos críticos que requerem maior atenção, como: o local onde ocorre o despejo de efluente sanitário e em locais que apresentam ambientes mais lânticos, como os afluentes do reservatório, o que altera a hidrodinâmica e dificulta a renovação da água, com isso também aumenta sua idade (tempo de residência) e piora a sua diluição de efluentes e qualidade.

A pluma do esgotamento sanitário despejado em um córrego afluente ao rio Jequitinhonha tem influência direta na concentração de componentes na água. Foi possível identificar que o efluente se dilui ao longo do tempo e do espaço. Em períodos de chuva, puderam-se observar maiores diluições do que nos períodos mais secos, como nas estações do inverno e outono. As áreas de menor diluição do efluente são áreas mais susceptíveis à presença de macrófitas.

Através do estudo de caso realizado nesta dissertação, foi possível concluir a importância na confiabilidade e análises em conjunto de diversos aspectos para uma análise com visão macro da situação local e uma gestão hídrica e energética integrada e de excelência.

7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Apesar de a modelagem computacional interpolar dados auxiliando no conhecimento físico, esta é uma simulação que depende totalmente dos dados de entrada. Quanto maior o número de dados, tanto temporal quanto espacial, mais confiabilidade e mais realista possível e, conseqüentemente, excelente e eficiente a gestão será.

Para isso, sugere-se a utilização de equipamentos automatizados de análise de dados inteligente, que sejam capazes de gerar maior número de dados de descargas líquidas, de forma mais confiável e completa. Visto que, um ponto de monitoramento não é capaz de caracterizar suficientemente um reservatório inteiro, já que as condições ambientais e hidrodinâmicas variam no tempo e no espaço.

Assim como, diversos pontos em apenas uma ou duas campanhas de medição no ano, também não são suficientes para tal caracterização hidrodinâmica e/ou de qualidade da água. As medições deveriam no mínimo respeitar a sazonalidade e sua possível interferência no meio. Com isso, o desenvolvimento de estudos com veículo autônomo é uma alternativa que visa contribuir decisivamente para eficácia destas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas de Esgotos 2013. Brasília, 2013.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, Planos de recursos hídricos e enquadramento dos corpos de água. Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos n. 5. Brasília: ANA, 2013

ALBANO, G. D. Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CEQUAL-R1) – Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí, Sistema Cantareira. Dissertação de M.Sc., ALBANO, G.D., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento – USP, São Paulo, 2004.

ALVAREZ, G.A.; AZEVEDO NETTO, J.M. Manual de hidráulica. 6 ed. 2 v. 668 p. São Paulo, 1977.

BRASIL. Lei 9.433. Política Nacional de Recursos Hídricos. Presidência da República. Diário Oficial da União, nº 22, 2131 jan., Seção 1. Brasília, 1997. pp. 134-143.

CANCELLI, D. M.; NOCKO, H. R. Modelagens matemáticas de prognóstico da hidrodinâmica e da qualidade da água do reservatório da UHE São Manoel. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ISSN 2318-0358). Foz do Iguaçu, 2019.

CAPELO NETO, J.; DE FRANÇA, J. M. B.; LIMA NETO, I. E.; PAULINO, W. D.; DE SOUZA FILHO, F.A. Simulação da compartimentação em reservatório no semiárido brasileiro – uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta de gestão. São Paulo, 2021. | Revista DAE | v. 69, n 231 / pp 41-53. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.045>. Acesso em: março de 2024.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Técnica de abastecimento e tratamento de água. Vol1, 2ed. São Paulo, 1978.

CHAUBEY, I.; COSTELLO, T. A.; COTTER, A. S.; NELSON, M. A.; SOERENS, T. S. Water Quality Model Output Uncertainty as Affected by Spatial Resolution of Input Data. Journal of the American Water Resources Association, n. 3001, pg. 977- 986. Woodbridge, 2003.

CRUZ, J.C; TUCCI, C.E.M., 2008. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 13 n.1 Jan/Mar 2008, p.111-124.

FINOTTI, A. R. et. al. Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas. Caxias do Sul, RS: Educs, 2009.

GONÇALVES, R. N. Diagnóstico ambiental da bacia do rio Jequitinhonha. Salvador, 1997.

HESPANHOL, K. M. H. Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do ribeirão Morangueiro. Dissertação em Engenharia Urbana – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá: 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jequitinhonha. Salvador, 1997. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95902.pdf>. Acesso em: abril 2019.

INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, 2013. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5> Acesso em: julho de 2022.

MAGALHÃES, C. A. C.; MORENO, J; GALVÃO JÚNIOR, A. C.. Estimativa do consumo per capita em comunidades atendidas pela unidade de negócio do médio Tietê. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001.

OPS - Organización Panamericana de la Salud, 1996. La calidad del agua potable em América Latina: ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química. Argentina, 1996.

PORTO, M. F. A. , PORTO, R. L. L., 2008. Gestão de bacias hidrográficas. Estud. av. [online]. 2008, vol.22, n.63, pp. 43-60.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SISBAHIA®. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Recursos Hídricos & Meio Ambiente da Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V10d.pdf. Acesso em: junho de 2022.

ROSMAN, P.C.C.; ROSMAN, P.A.; SOUZA, D.V.R. Modelagem de Hidrodinâmica Ambiental, Qualidade de Água e Processos Sedimentológicos em Rios Conexos ao Aproveitamento Hidrelétrico Jirau–RO. R12 –Relatório de Modelagens para Suporte à Gestão, noPENO-11920. Fundação COPPETEC, Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica. Rio de Janeiro, 2016.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Recomendações para projeto – Plano Diretor de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 1990.

SPIEGELBERG, G. Um modelo morfodinâmico: desenvolvimento e aplicação no reservatório da usina hidroelétrica de estreito no rio Tocantins. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/10001546/2010_mestrado_gustavo_spiegelberg_20210729104825203.pdf . Acesso em março de 2024.

TUCCI, C.E.M. Modelos Hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. - 2.ed. - Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. Oficina de textos, 2016.

VON SPERLING, M. Estudos e Modelagem da qualidade da água dos rios (Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, v.7). Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2014.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, 3 ed., vol. 1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte, 2005.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios, 1 ed., vol. 7. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte, 2007.