



Gestão & Gerenciamento

ANÁLISE HIDRODINÂMICA DE RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA SOB INFLUÊNCIA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

*HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF A HYDROPOWER PLANT RESERVOIR
UNDER THE INFLUENCE OF WASTEWATER DISCHARGE*

Débora Mattos de Oliveira

B.Sc. Engenharia de recursos hídricos e do meio ambiente; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; deboramattos@poli.ufrj.br

Monica Pertel

D.Sc. Engenharia civil; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; monicapertel@poli.ufrj.br

Celso Bandeira de Melo Ribeiro

D.Sc. Engenharia civil; Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil; celso.bandeira@ufjf.br

Luiz Gustavo Fortes Westin

B.Sc. Engenharia civil; Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil; lwestin@neoenergia.com

Recebido em: DD/MM/AAAA

Aceito em: DD/MM/AAAA

Publicado em: DD/MM/AAAA

(preenchido pela Comissão Editorial)

Resumo

Neste trabalho é apresentada a avaliação hidrodinâmica da influência de lançamento de carga poluidora em um reservatório destinado à geração de energia elétrica, utilizando como ferramenta a Modelagem Hidrodinâmica e Modelagem Euleriana de Tempos hidráulicos. O modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho faz parte do Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental, denominado SisBAHIA®. O objetivo principal deste artigo é avaliar as condições hidrodinâmicas e ambientais do sistema hídrico em questão, bem como possíveis impactos associados à lançamentos de esgotamento sanitário no reservatório de uma hidrelétrica localizada no Rio Jequitinhonha - MG. A aquisição de dados foi feita através da disponibilização de dados consistidos de monitoramento da hidrelétrica, referentes ao ano de 2019. Os resultados do modelo hidrodinâmico indicaram o movimento da pluma e locais com possíveis alterações nas condições ambientais, e a importância da modelagem na gestão hídrica. Concluiu-se que é de suma importância a análise hidrodinâmica para melhorar o conhecimento da região e gestão hídrica, visto que o modelo é capaz de proporcionar o ganho no entendimento da variabilidade espaço-temporal do comportamento hidrodinâmico, bem como da poluição, minimizando custos relacionados aos monitoramentos, e consequentemente, os possíveis impactos decorrentes do esgotamento na região.

Palavras-chave: Modelagem hidrodinâmica; recursos hídricos; gestão hídrica, monitoramento hidrológico, circulação hidrodinâmica.

Abstract

This work presents the development of Hydrodynamic Modeling and Eulerian Modeling of Hydraulic Times that are able to evaluate the conditions of the hydric system, used as a monitoring and water management tool that assess impacts of polluting load discharge in a reservoir intended for power generation. The hydrodynamic model used in this work is part of the Environmental Hydrodynamic Baseline System, called SisBAHIA®. The main aim of this work is to evaluate the hydrodynamic and environmental conditions, as well as possible impacts associated with sewage discharges into the reservoir of a hydropower plant located on the Jequitinhonha River - MG. The data acquisition was made through the availability of on-site measurement, performed by the monitoring of the enterprise, referring to the year 2019. The results of the hydrodynamic model indicated the movement of the plume and places with possible changes in environmental conditions, and the importance of modeling in water management. It was concluded that hydrodynamic modeling is of extreme importance to improve the knowledge of the region and water management, since the model is able to provide the gain in understanding the spatial-temporal variability of hydrodynamic behavior, as well as pollution, minimizing costs related to monitoring, and consequently, the possible impacts resulting from depletion in the region.

Keywords: Hydrodynamic modeling; water resources; water management, hydrological monitoring, hydrodynamic circulation.

1 INTRODUÇÃO

Gerenciar adequadamente os recursos hídricos de uma região demanda conhecimento quantitativo e qualitativo dos dados hidrológicos. Para melhor entendimento do corpo hídrico é importante a aplicação de modelos computacionais, que são ferramentas

integradoras capazes de permitir uma visão dinâmica de processos em sistemas ambientais complexos. O modelo é a representação de um objeto ou sistema, com o objetivo de entendê-lo e compreender os processos físicos a ele associados.

A possibilidade de interpolar e extrapolar dados por meio de modelagem computacional é um benefício para a gestão hídrica e conhecimento da região em estudo, principalmente em casos onde há escassez de dados ambientais. Quando verificados com dados de campo e analisados por especialistas, ou seja, validados, eles se tornam ferramentas indispensáveis para dar suporte à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais. O uso de modelos matemáticos para simulação de 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 nele atuam.

O levantamento de dados é de extrema importância para o conhecimento dos regimes hidrológicos da bacia onde está inserido um empreendimento, pois permite definir as regras de operação e uso máximo do potencial hidráulico dos reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos. Vale destacar a obrigatoriedade dos empreendimentos e autorizados em atenderem a Resolução Conjunta ANA/ANEEL 003 de 2010.

Segundo 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 sistemas ambientais.

Nesse sentido, este trabalho objetivou o conhecimento e avaliação das condições hidrodinâmicas e ambientais do reservatório da Usina Hidrelétrica Itapebi, através de modelagem computacional, onde os dados foram empregados à ferramenta SisBaHiA® (Sistema BAse de Hidrodinâmica Ambiental), sistema profissional de modelos computacionais elaborado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ademais, o trabalho visa estimar o possível impacto causado pelo lançamento de esgoto sanitário em pontos ao longo do reservatório e uma possível associação a maior proliferação de

macrófitas, que geram custos de retirada e eventuais manutenções e limpezas de turbinas. Sendo assim, são três os objetivos deste artigo:

- a. Conhecer as condições hidrodinâmicas e ambientais do reservatório da usina hidrelétrica;
- b. Analisar os tempos hidráulicos característicos;
- c. Analisar os efeitos dos possíveis impactos de esgotamento sanitário em locais específicos do reservatório.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo foi o reservatório da Usina Hidrelétrica Itapebi, compreendida entre as coordenadas geográficas 16°0'26.25"S/39°58'40.66"O e 15°58'10.05"S/39°35'12.17"O, no rio Jequitinhonha, abrangendo parte dos municípios de Itapebi, Itagimirim e Itarantim (BA) e Salto da Divisa (MG). A usina possui potência instalada de 462.011 KW, de acordo com o despacho Nº 3.095 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A fim de averiguar o comportamento hidrodinâmico e ambiental, bem como a influência do esgotamento sanitário na qualidade da água ao longo do reservatório da usina, foram utilizados dados de medição disponibilizados pelo empreendimento. Neste caso, foram utilizados os dados consistidos referentes ao ano de 2019 e as medições de descarga líquida foram realizadas através da medição convencional de molinete hidrométrico.

Para a modelagem digital do terreno foram utilizados os contornos da região em estudo 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.

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. De acordo com esses contornos, obteve-se o mapa base por meio do *Surfer* 19.2.213.

A partir da discretização do domínio de modelagem, utilizou-se o SisBaHiA® para confeccionar a malha de elementos finitos quadráticos, possibilitando uma representação detalhada do reservatório da hidrelétrica de Itapebi. 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 para propiciar um melhor detalhamento hidrodinâmico.

Para a batimetria foram inseridos dados de elevação de terreno referenciada ao *Datum* Imbituba disponibilizados pelo empreendimento. Os dados de batimetria foram inseridos em cotas batimétricas h definidas pelo negativo das cotas altimétricas (Z do fundo).

O modelo hidrodinâmico calcula a tensão de atrito no fundo por meio do coeficiente de Chézy. 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. Neste trabalho, a amplitude de rugosidade adotada foi inferida a partir da distribuição granulométrica do fundo, realizada por Silva *et al.* (2018), conforme sugerido por Rosman (2021). Foi adotado o valor de rugosidade de 0,321, caracterizado por leito de sedimentos com rugas e

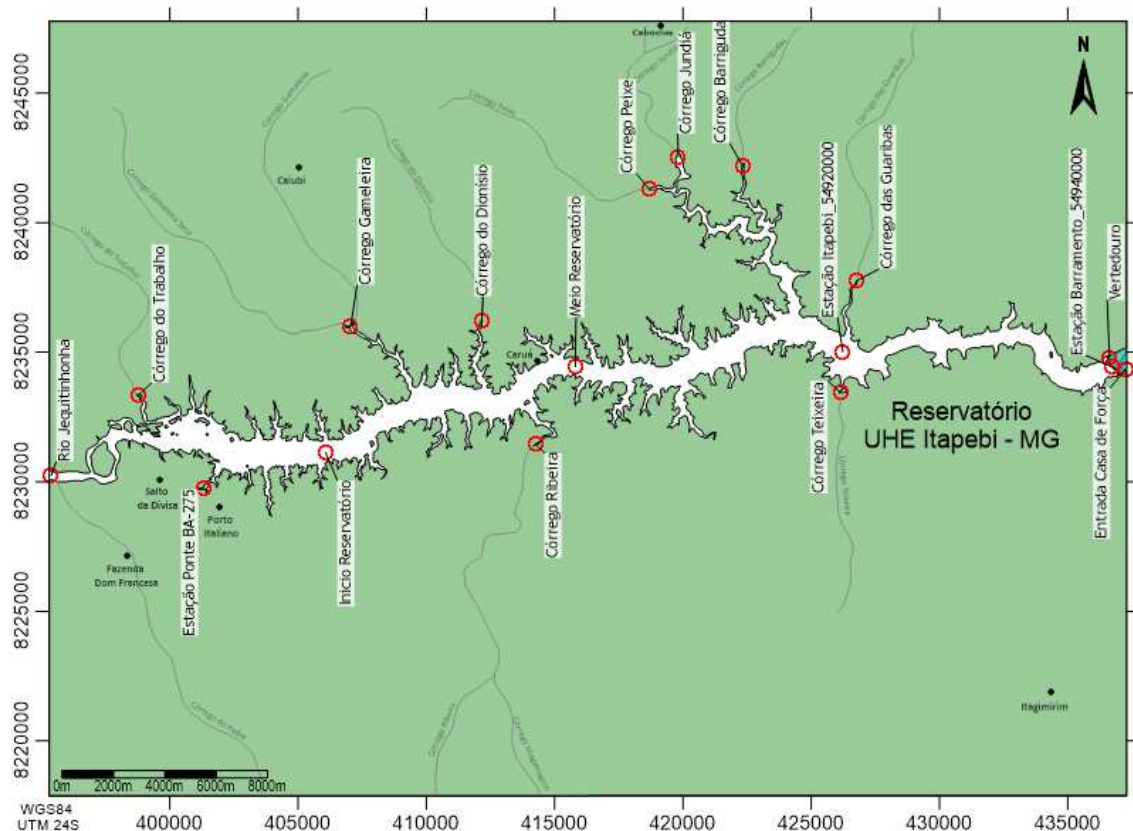
similares, com obstáculos (e.g. pedras, troncos), devido ao alto fluxo de descarga sólida ao longo de todo o reservatório, considerando que o material de fundo e as características do solo sejam semelhantes e predominantes no percurso.

Modelagem Hidrodinâmica

Com o objetivo de simular melhor caracterização dos padrões de circulação e sua variação sazonal, adotaram-se períodos aproximados das estações do ano, como diferentes cenários na modelagem hidrodinâmica. Sendo, verão de Janeiro a Março; Outono de Abril a Junho; Inverno de Julho a Setembro; e Primavera de Outubro a Dezembro. 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.

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 1 ilustra essas estações.

Figura 1 - Localização das estações inseridas no SisBaHiA® para avaliações.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Dados Meteorológicos

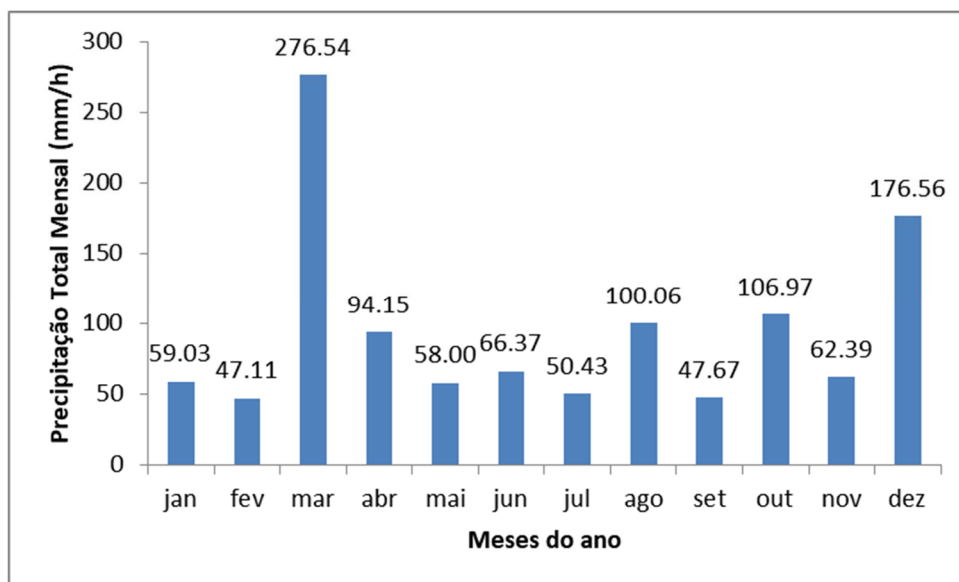
Os parâmetros meteorológicos utilizados neste modelo foram obtidos pelo modelo de reanálise de atmosférica global ERA5, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF (2020). O período de abrangência dos dados utilizados foi referente ao ano de 2019, e os seguintes parâmetros foram empregados: ventos (m/s), evaporação (mm/h), e precipitação (mm/h). A estação de dados meteorológicos utilizada nesse artigo localiza-se próxima a coordenada geográfica 16° 0'0,03"S/39°45'0,01"O, nas proximidades do meio do reservatório da UHE itapebi.

Para a variável vento, os dados utilizados, com resolução temporal de 1h, representam o vento a 10 m de altura. As séries temporais de vento foram interpoladas para os nós da malha do modelo hidrodinâmico, a fim de gerar o campo de vento para

todo o domínio. Esta é considerada uma circulação apenas horizontal, por não possuir efeitos em maiores profundidades. Nesse sentido, em todas as simulações computacionais deste artigo, foi considerado vento variável no tempo e variado no espaço.

Em todas as simulações computacionais deste trabalho, foram consideradas evaporação e precipitação variável no tempo e no espaço, com dados utilizados em horários (mm/h). O gráfico da Figura 2 mostra a série histórica de precipitação. Fevereiro foi o mês de menor precipitação seguido de setembro, enquanto março foi o mês de maior precipitação, seguido de dezembro. Avaliando por estações do ano, pode-se verificar que houve maior precipitação no verão e menor precipitação no inverno, sendo: Verão - 382,68 mm/h; Outono - 218,52 mm/h; Inverno - 198,16 mm/h; e Primavera - 345,92 mm/h.

Figura 2 - Precipitação Mensal



Fonte: ECMWF (2020)

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, 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 micro vazões 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 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Em locais onde há entrada de hidrograma de vazões, essas foram inseridas de forma distribuída entre os três nós da seção do rio, sendo eles margem esquerda, centro da seção e margem direita. Já os pontos de entrada de micro vazões, estes foram inseridos de forma concentrada no centro da seção do rio, com o cálculo de $Q_{\text{centralizada}} = 1,5 \times Q_{\text{rio}}$, conforme detalhado na referência técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2021).

Modelo de Transporte Euleriano - Tempos Hidráulicos Característicos

Para as análises de taxa de renovação e idade da água, foram feitos quatro modelos de cada, com as estações do ano para melhor caracterização da sazonalidade. A taxa de renovação representa a mistura das águas presentes no domínio, denominadas águas velhas, com as águas que entram no sistema, chamadas águas novas. Tal representação não indica a qualidade da água, mas o tempo em que estão presentes no corpo d'água.

Por existirem diversas forçantes e geometrias distintas influenciando na circulação de um reservatório, a 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.

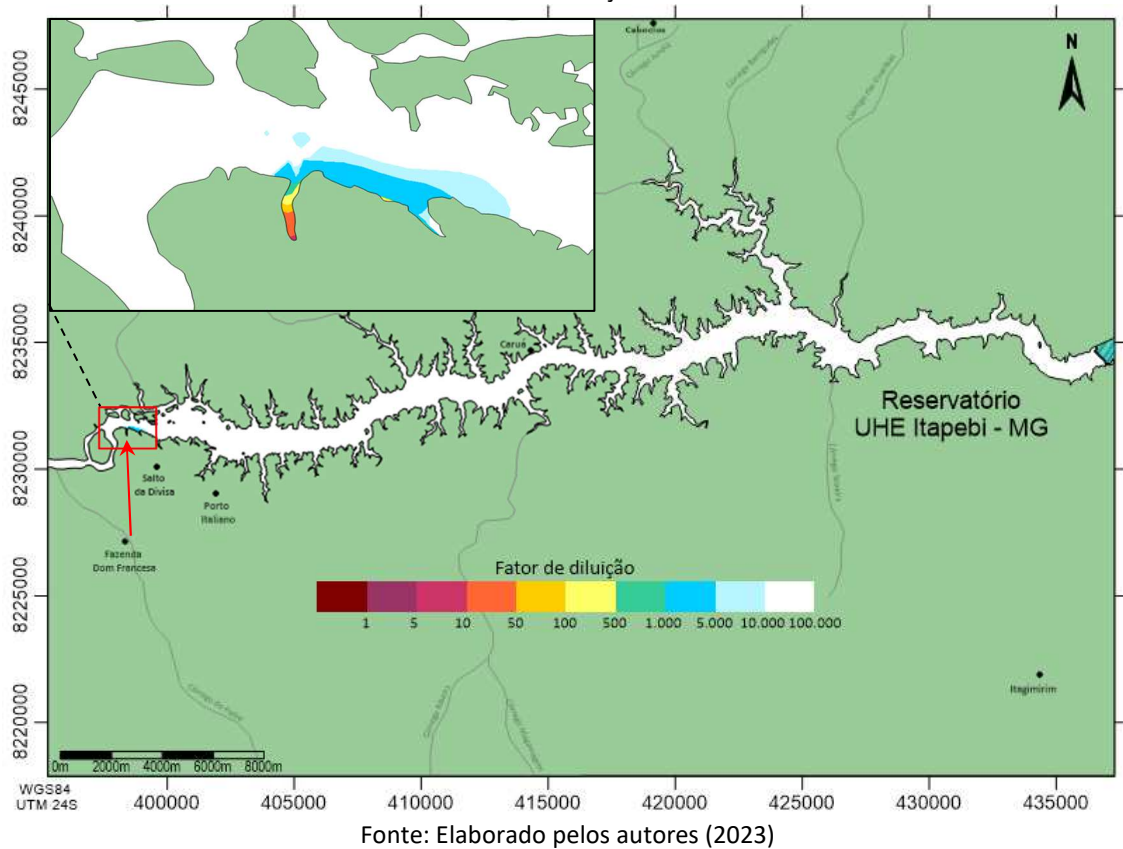
Para a taxa de renovação, no instante inicial, as águas dentro do reservatório devem possuir como condição inicial um valor de referência igual à zero representando “águas velhas”, e as vazões afluentes ao reservatório, as águas externas que entram no domínio, um valor igual a 100, representando “águas novas”. As vazões fluviais afluentes ao domínio possuem sua concentração sempre com um valor igual a 100, isto é, a partir do momento que começam a entrar no domínio de modelagem, sua taxa de renovação será sempre 100%.

A idade da água é um parâmetro que contabiliza o tempo que determinada água permanece em diferentes áreas dentro do domínio de modelagem. O modelo de idade da água calcula o tempo de permanência da partícula a partir do decaimento de primeira ordem de uma substância passiva. Para isso, determina-se no instante inicial uma concentração igual a 1 em todo o domínio, representando a idade zero da água, pois $\ln(1) = 0$. Assim, a idade da água inicial é zero e, à medida que as águas externas e internas ao domínio se misturam, esta idade sobe e a concentração decai.

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 3, a condição inicial deste modelo foi igual à zero em todo o domínio, considerando um fluxo de 0,25, localizado conforme indicado abaixo, em um riacho nas proximidades do município de Salto da Divisa, representando a entrada de efluente no sistema. Este valor considera a diluição com uma relação 1:4 de esgoto na vazão do afluente.

Figura 3 - Condição Inicial imposta com entrada de fluxo de efluente ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Taxa de diluição do efluente.



Modelo de diluição de Esgotamento Sanitário

De forma a representar o esgotamento sanitário, levando em consideração o número de habitantes e a porcentagem de esgoto tratado, foi inserida vazão de esgoto de 10 L/s, calculada de acordo com a Equação 1. Considerando que a Vazão doméstica máxima (Q_{dmax}) é $1,8 Q_{\text{dom}}$ e a vazão doméstica mínima (Q_{dmin}) é $0,5 Q_{\text{dom}}$, 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.

$$Q_{DM} = \frac{\text{População} \times Q_{PC} \times R}{864000} \left(\frac{l}{s} \right) = 8,55 l/s \quad (1)$$

Onde:

Q_{DM} = vazão doméstica média de esgotos (l/s)

População = 7007 habitantes (Dado de 2017)

Q_{PC} = quota per capita (l/hab.d) = 124 l/hab.d

R = coeficiente de retorno esgoto/água (utilizado 0,85)

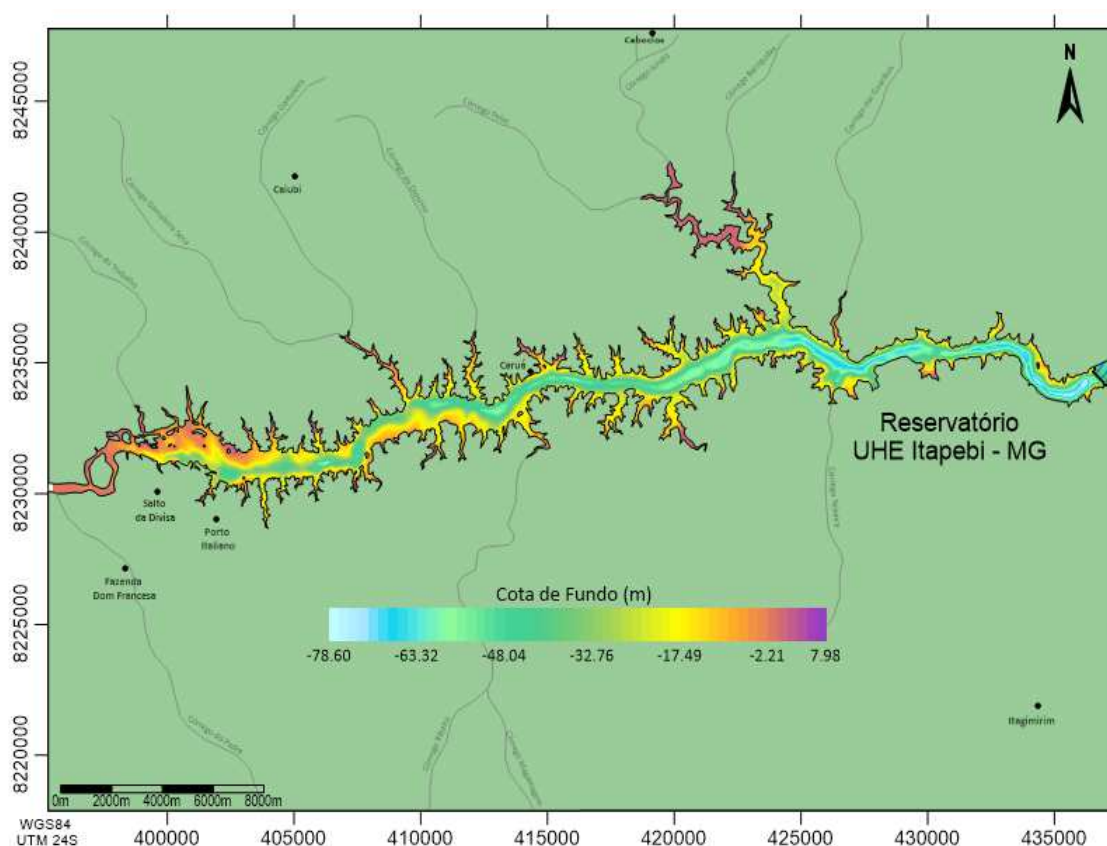
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A modelagem digital do domínio de interesse cobre todo o reservatório de UHE Itapebi incluindo o rio principal (rio Jequitinhonha) e seus afluentes até uma seção suficientemente a montante das confluências para possibilitar a prescrição de condições de contorno adequadamente. A modelagem foi realizada através de discretização em elementos finitos, considerando a área do reservatório após enchimento. A Área de Influência de cada nó da malha é calculada por processo semelhante ao dos polígonos de Thiessen usados em hidrologia.

A estação do ERA5 registrou vento reinante, ou seja, o vento de maior frequência na direção Lés-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. 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.

A Figura 4 mostra o mapa de cota do fundo tal como vista pelo modelo, retratando os dados fornecidos. Baseados em dados topohidrográficos, o SisBaHiA® calculou as curvas hipsométricas de Cotas × Área de espelho de água e de Cotas × Volume de água, conforme apresentadas na Tabela 3 e na Figura 5.

Figura 4 - Cotas de fundo como vistas pelo modelo do reservatório do UHE Itapebi.



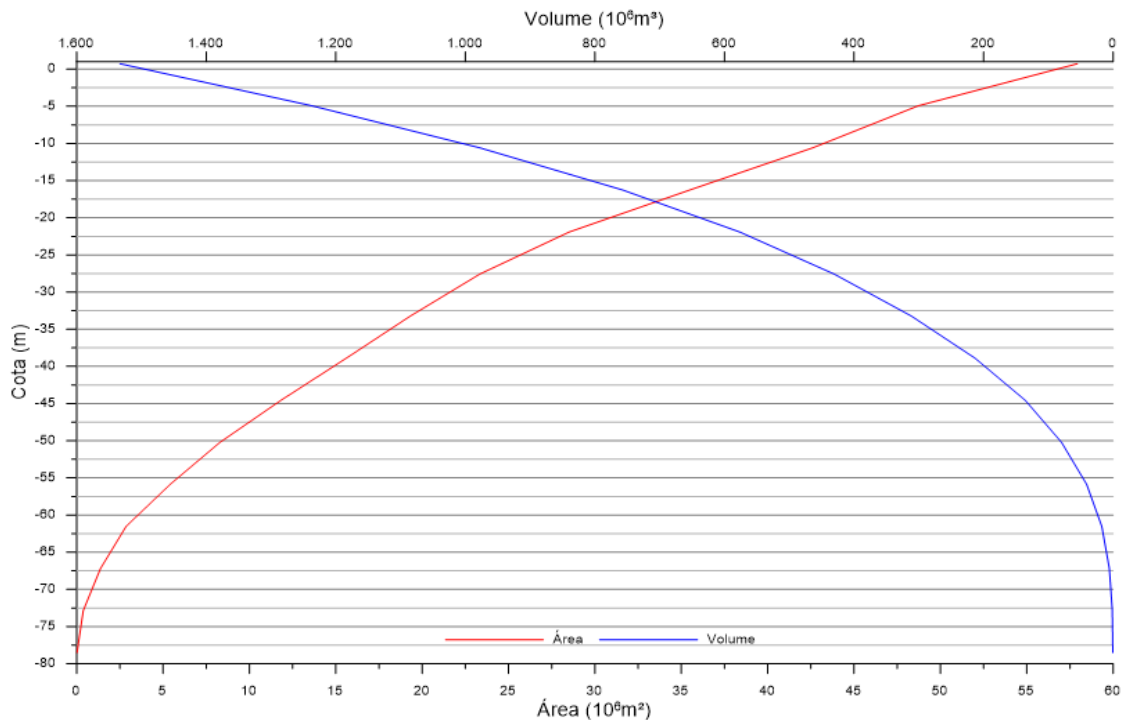
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 3 - Valores das curvas hipsométricas de áreas de espelho de água por cota de NA e volumes de água por cota de NA mostradas na Figura 5.

Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)
6675.011664	0.246582	-78.6019
367411.2146	820986.9	-72.9419
1364024.875	5429274	-67.2819
2845043.992	17013485	-61.6219
5396072.934	40387750	-55.9619
8278129.384	79153498	-50.3019
11808748.08	1.35E+08	-44.6419
15589640.46	2.12E+08	-38.9819
19298028.46	3.11E+08	-33.3219
23321034.94	4.3E+08	-27.6619
28494933.24	5.76E+08	-22.0019
35474419.44	7.57E+08	-16.3419
42594819.36	9.77E+08	-10.6819
48709776.05	1.24E+09	-5.0219
57917342.07	1.53E+09	0.6381

Fonte: dados da pesquisa (2023)

Figura 5 - Curva hipsométrica Cota X Área X Volume

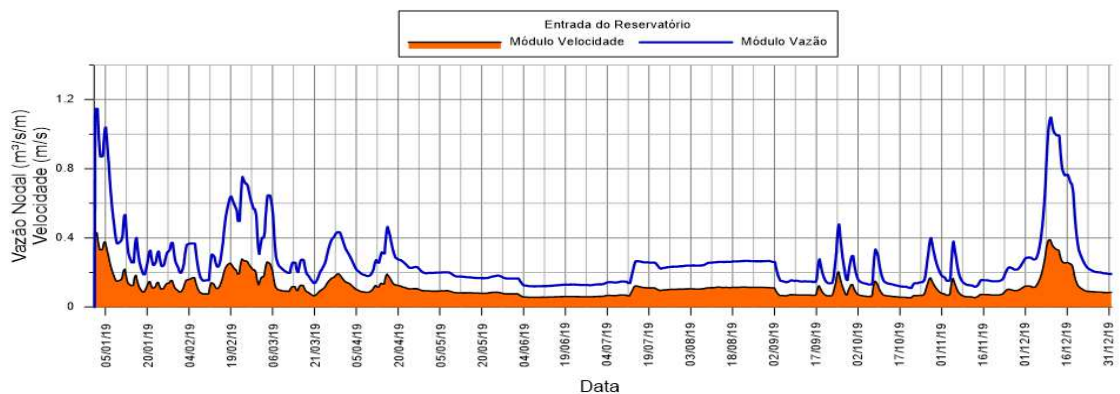


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

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. O gráfico da Figura 6 mostra a variação do módulo de velocidade e de vazão na entrada do reservatório da UHE Itapebi.

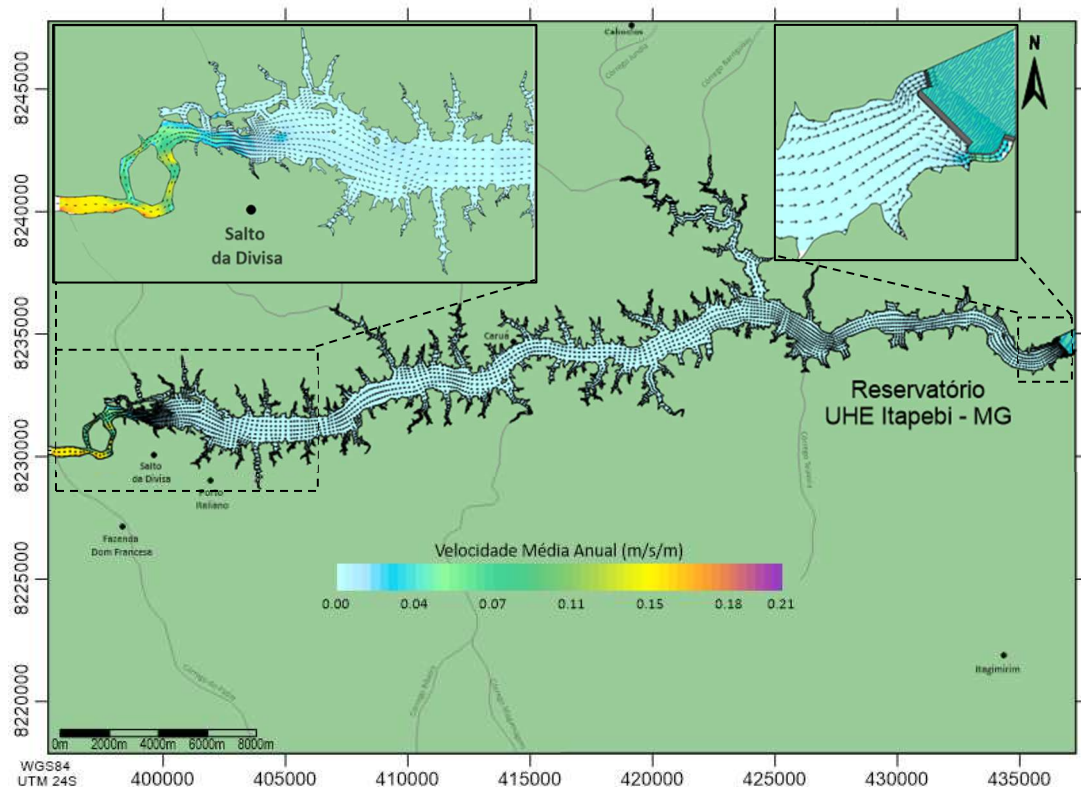
Figura 6 - Séries Temporais do módulo de Velocidades e Vazões nodais na entrada do reservatório.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os módulos de velocidade média anual ao longo do reservatório, bem como seus respectivos vetores, são ilustrados na Figura 7. 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.

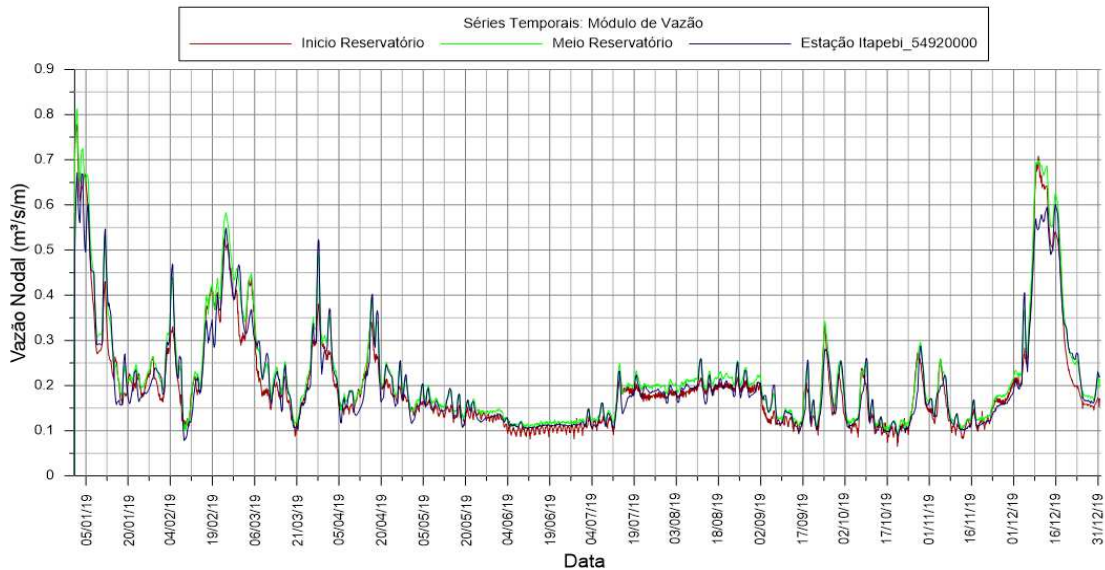
Figura 7 - Mapa de intensidade e direção da velocidade média anual.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A seguir, o gráfico da Figura 8 representa as séries temporais do módulo de vazões observadas 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.

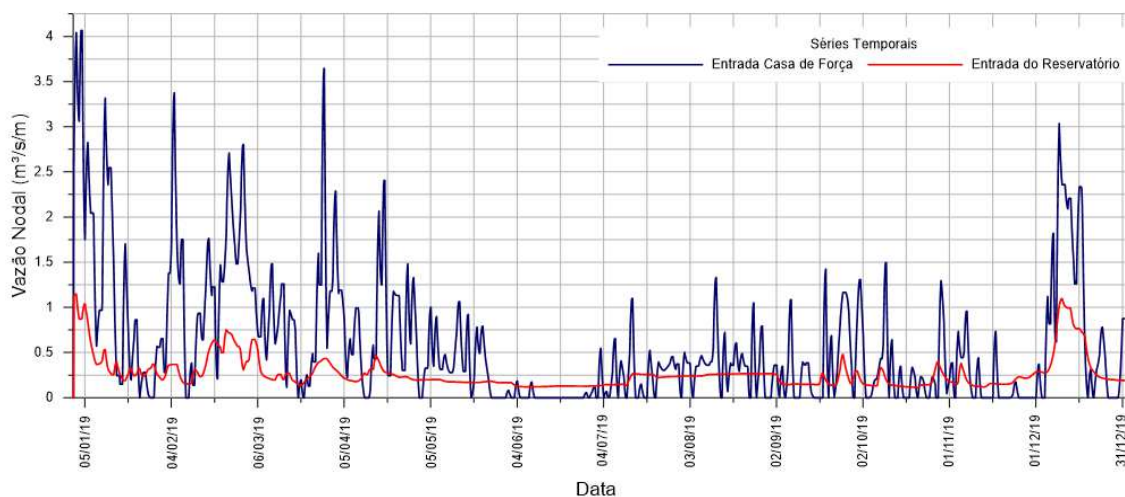
Figura 8 - Séries Temporais do módulo de vazão em três pontos do reservatório da UHE Itapebi.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Levando em consideração que não há uma diferença brusca entre a variação de vazão ao longo do reservatório, foi elaborado o gráfico da Figura 9 de modo a identificar a variação entre a série temporal de vazão que entra no reservatório e a que sai pela casa de força.

Figura 9 - Séries Temporais de Vazão Nodal na entrada e saída do reservatório.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

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 entra no sistema saia sem que seja armazenada. Porém, não impede que esta vazão seja regularizada e

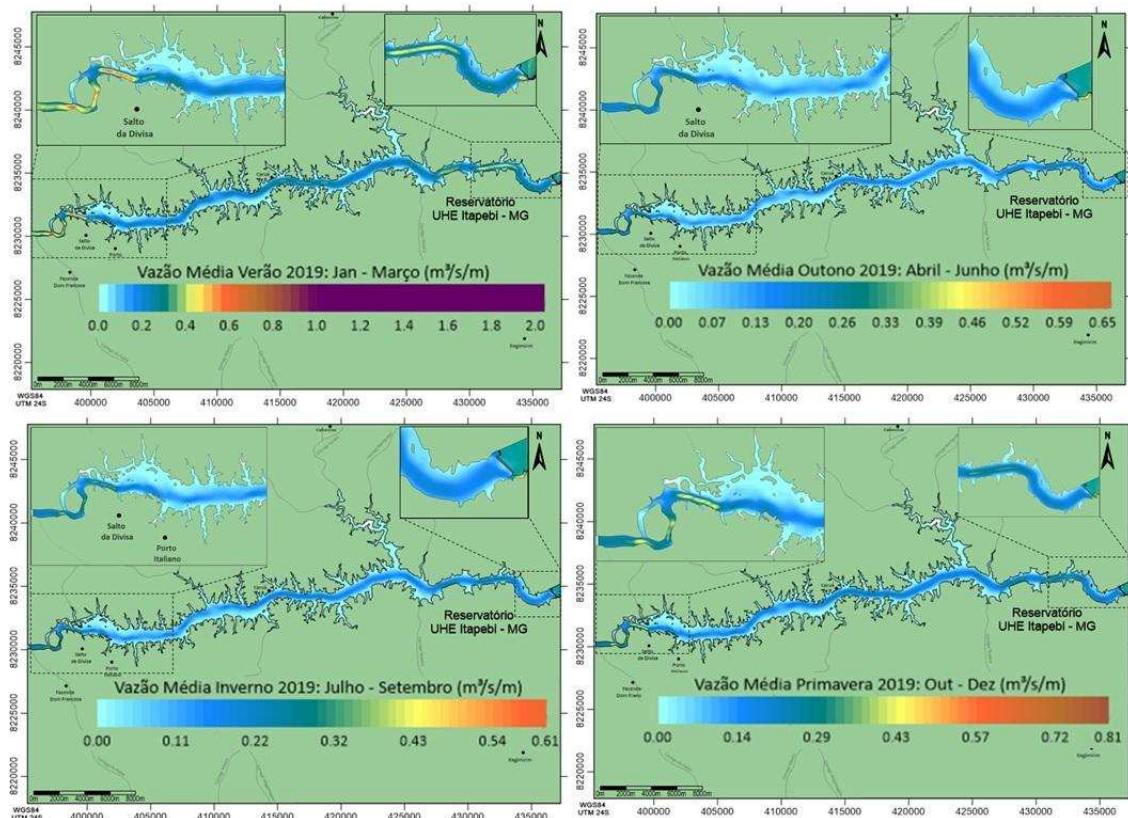
armazene certo volume de água. Além disso, o rio principal conta com afluentes que contribuem para o aumento da vazão no rio principal em relação à vazão de entrada.

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 mencionado 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 apresentaram mudanças médias mensais significativas.

Sabe-se que na hidrologia, a vazão do rio está diretamente relacionada à velocidade e a área na seção do rio. Sendo assim, ao longo do reservatório o fluxo de água perde velocidade visto que a área da seção aumenta, e com isso, apresenta vazões menores.

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. Além disso, é notório que, apesar das micro vazões 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. A Figura 10 apresenta a vazão média nas diferentes estações do ano em todo o reservatório.

Figura 10 - Mapa de vazão média no reservatório da UHE Itapebi.

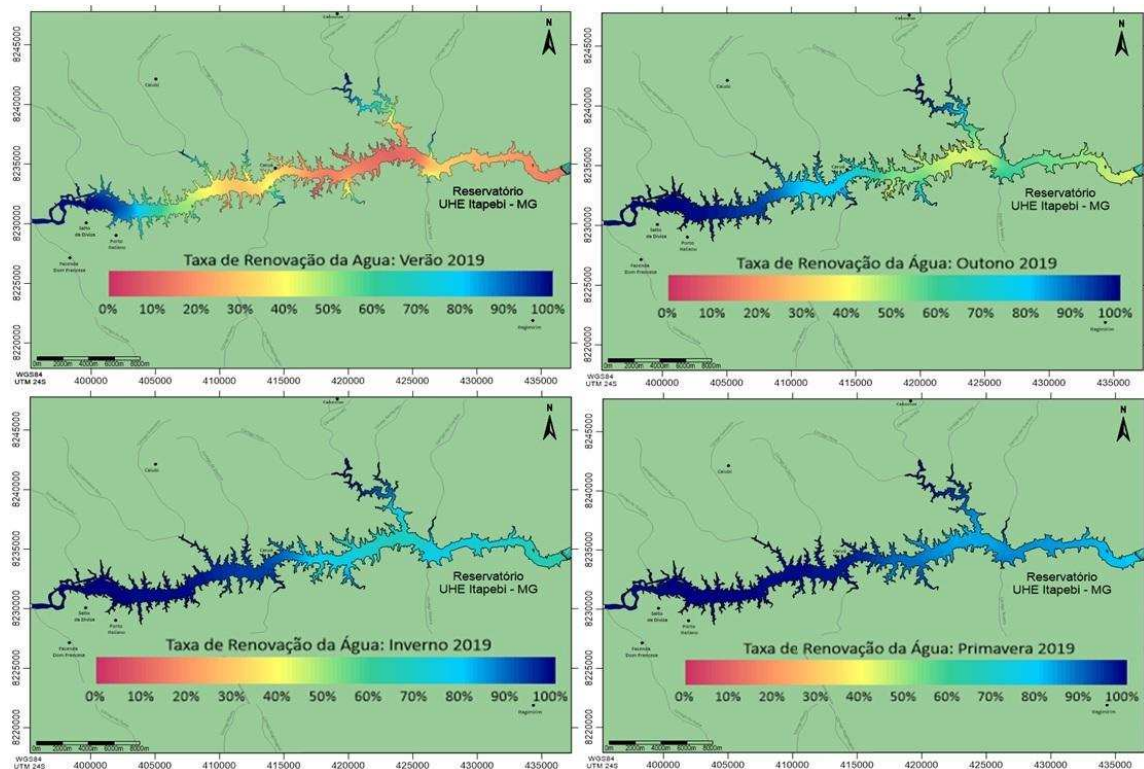


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Modelo Euleriano de Taxa de Renovação da Água

O modelo de taxa de renovação da água avalia as quatro estações do ano de forma a avaliar a influência da sazonalidade. A Figura 11 apresenta o mapa da média temporal da taxa de renovação de água ao longo do reservatório da UHE Itapebi nas quatro estações do ano.

Figura 11 - Mapa de Taxa de Renovação da Água no reservatório da UHE Itapebi.



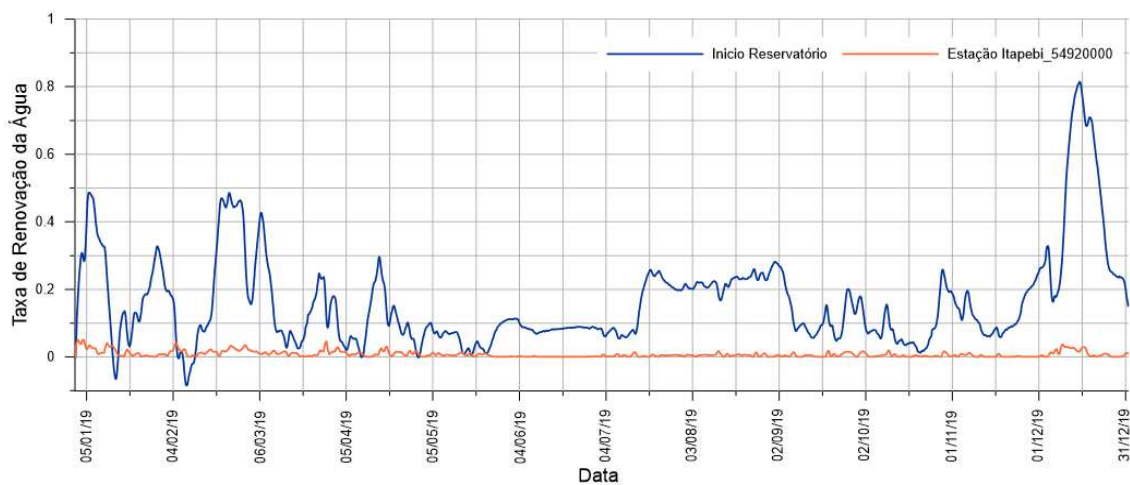
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Considerando que este é um curso d'água natural, onde o escoamento ao longo do domínio de modelagem é contínuo e variável, pode-se verificar que a maior parte do reservatório se encontra pouco renovada. O que já era esperado, visto que a condição inicial é igual à zero em todo o reservatório e que o verão é a primeira estação do ano avaliada. Ou seja, esta é apenas uma demonstração onde o modelo considera seu início como a entrada imediata de “água nova”, 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.

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 ao longo do passar das estações. O gráfico da Figura 12 mostra séries temporais de áreas do reservatório de maior e menor taxa de renovação de água, sendo elas no início e no final do reservatório, respectivamente.

Figura 12 - Taxa de Renovação da água no início e no final do reservatório da UHE Itapebi.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

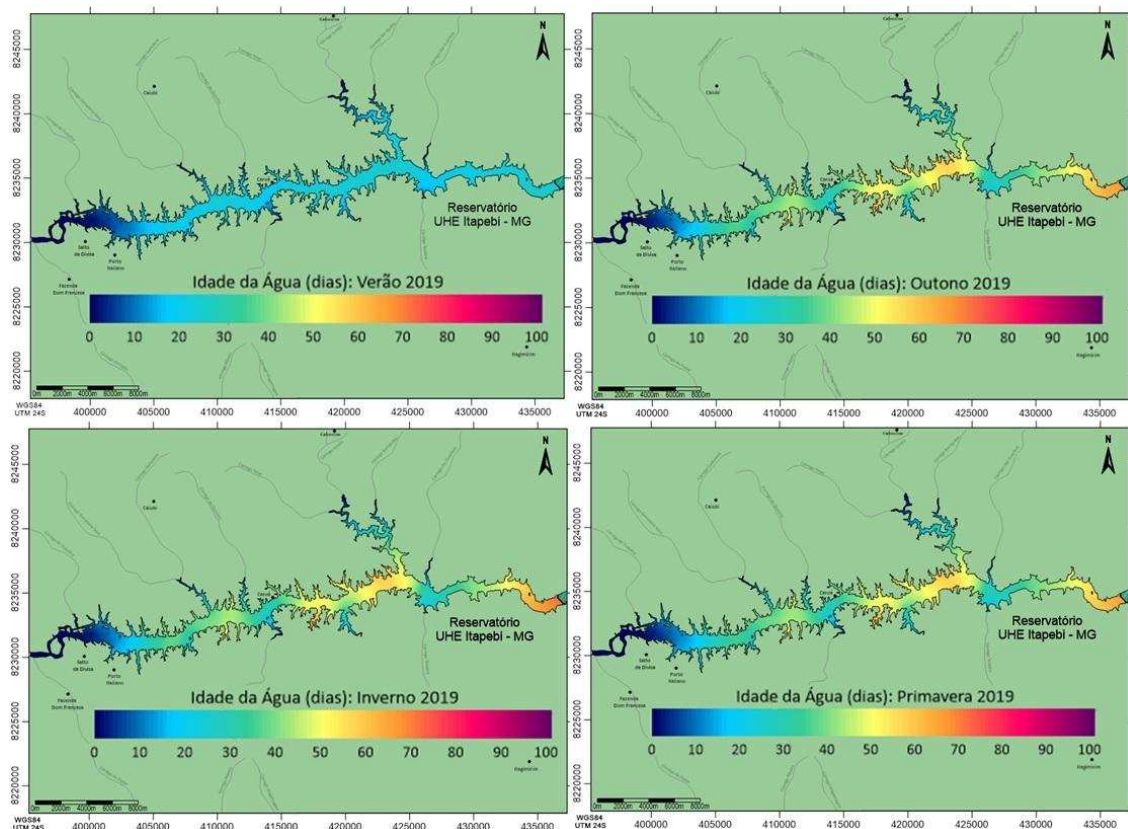
O início do reservatório apresenta maior variação na taxa de renovação da água do que o final reservatório devido à afluência do curso d'água. Como esperado, as maiores variações de taxa de renovação da água foram no verão e na primavera, períodos de maiores índices pluviométricos.

Modelo Euleriano de Idade Da Água

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. Logo, quanto mais estagnada for a área, maior será a idade da água neste local.

Os mapas da Figura 13 ilustram as médias de idade da água nas quatro estações do ano. 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 quanto maior é a renovação da água, menor é sua idade.

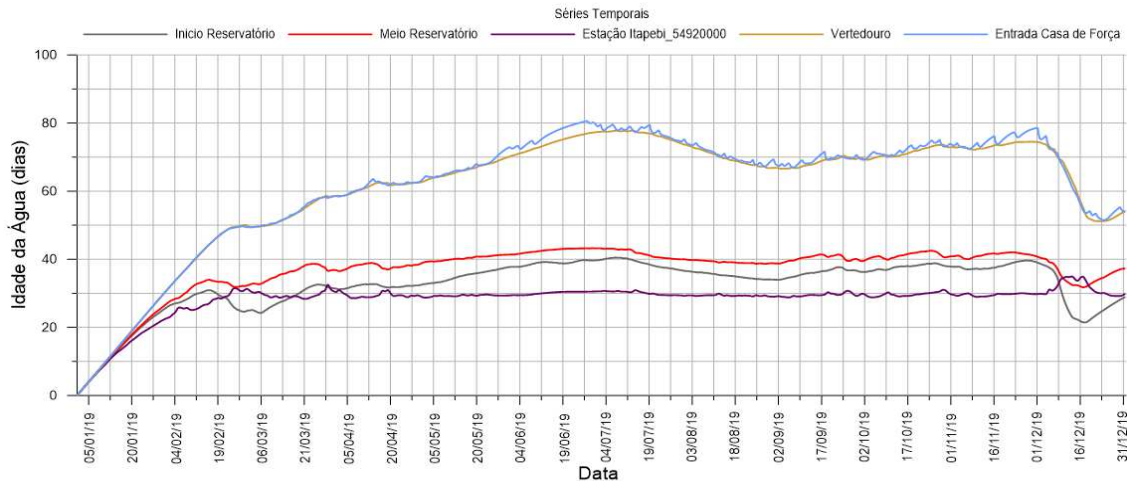
Figura 13 - Média temporal da idade da água no reservatório da UHE Itapebi.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O gráfico da Figura 14 mostra séries temporais em diferentes pontos do reservatório, sendo elas de montante para jusante, respectivamente. Como esperado, as menores idades da água foram no verão e na primavera, períodos de maiores índices pluviométricos.

Figura 14 - Séries temporais de idade da água no reservatório da UHE Itapebi.



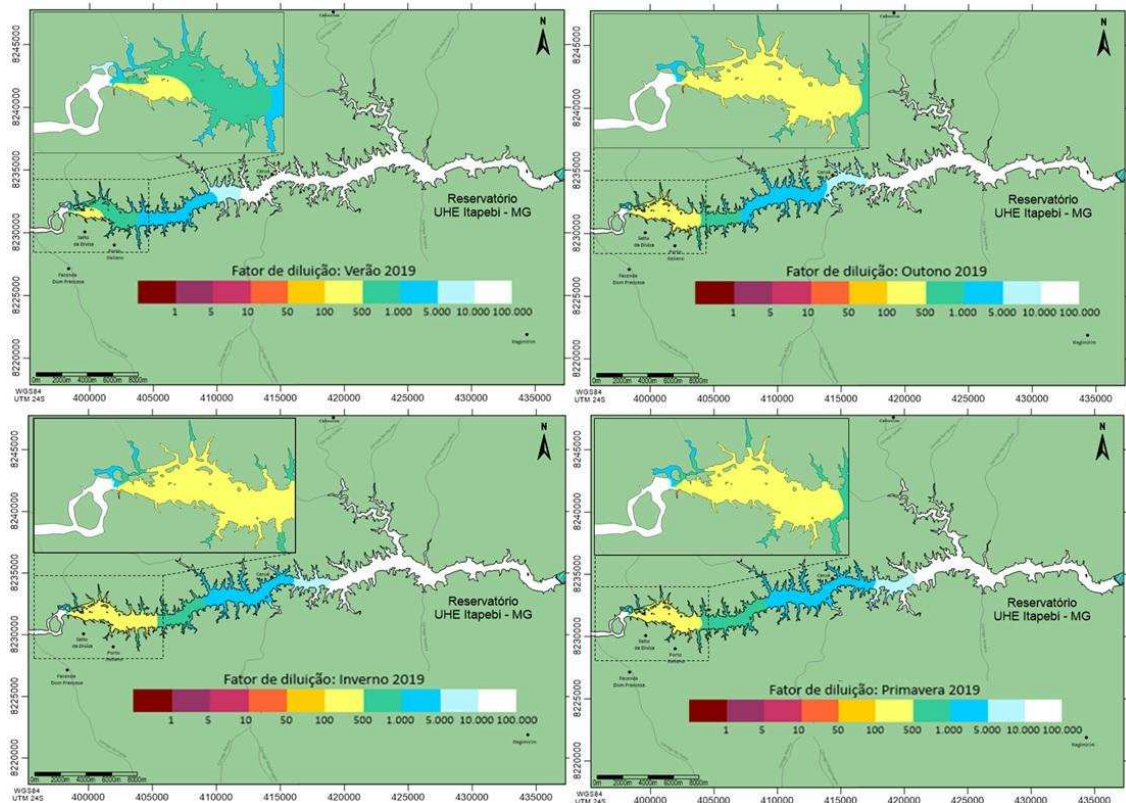
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os pontos do início e do meio do reservatório apresentam curvas de menor valor de idade da água em relação ao ponto de saída para o vertedouro e à 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 de água, aponta melhora na idade da água.

Modelo Euleriano de Diluição de Efluente

Com objetivo de analisar a taxa de diluição do Esgotamento Sanitário do Município de Salto da Divisa ao longo do reservatório, de modo a relacionar este fato ao surgimento de espécies de algas macrófitas, típicas de cursos d'água com presença de esgoto sanitário, foi realizado o modelo Euleriano. A Figura 15 mostra a diluição do efluente ao longo das quatro estações do ano no reservatório da UHE Itapebi com foco na área de lançamento de efluentes. 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.

Figura 15 - Mapa de diluição do efluente no reservatório da UHE Itapebi.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

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 modelagens realizadas, percebe-se que o reservatório apresenta alguns pontos mais críticos, como o local de entrada de efluente sanitário e locais que apresentam ambientes mais lânticos. Verificou-se que, nas regiões mais propensas a terem águas mais calmas e com menor turbulência, 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.

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, 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.

Ademais, 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.

4 CONCLUSÕES

Com o auxílio da ferramenta de modelagem foi possível compreender como as características do reservatório da UHE Itapebi interagem entre si e influenciam na hidrodinâmica ambiental. Os objetivos do trabalho foram alcançados. No geral, as simulações permitiram concluir que:

- i) O Rio Jequitinhonha apresentou maiores velocidades na entrada e na saída do reservatório, o que era esperado;
- ii) Foi confirmado que quanto maior a renovação da água, melhor será o cenário local;

- iii) Os períodos de chuva podem amenizar a concentração de poluentes devido ao aumento de vazão e maior renovação da água no reservatório;
- iv) Nos locais onde há maiores velocidades e maiores taxas de renovação da água, como nos afluentes maiores e na entrada do reservatório, há menores idades da água, e conseqüentemente, menores concentrações de poluentes.
- v) O reservatório apresenta pontos críticos, como: o local onde ocorre o despejo de efluente sanitário e em locais que apresentam ambientes mais lânticos, o que altera a hidrodinâmica e dificulta a renovação da água, com isso também aumenta sua idade (tempo de residência) e piora a diluição de efluentes, tornando mais suscetíveis à proliferação de algas e plantas macrófitas.

Agradecimentos

À Neoenergia pela disponibilização de dados de monitoramento da usina hidrelétrica para este estudo, e ao professor Paulo Rosman pelo suporte e auxílio no modelo utilizado neste trabalho, SisBaHiA®.

Referências Bibliográficas

ABBOTT, M. B., BATHURST, J.C, CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E., RASMUSSEN, J. **An introduction to the European Hydrological System — *Système Hydrologique Européen*, —SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system.** J. Hydrol., 87, pp. 61–77, 1985.

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, 2020. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>>

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

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_v11a.pdf>

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.

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

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, Brasil, 2005.