

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Luana Siebra Andrade

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL PARA AVALIAÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM RESERVATÓRIO URBANO:
ESTUDO DE CASO NA LAGOA DA PAMPULHA, BELO HORIZONTE - MG**

Belo Horizonte/MG
2023

Luana Siebra Andrade

MODELAGEM HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL PARA AVALIAÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM RESERVATÓRIO URBANO:
ESTUDO DE CASO NA LAGOA DA PAMPULHA, BELO HORIZONTE - MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Sistemas de Recursos Hídricos

Orientador: Dra. Talita Fernanda das Graças Silva

Belo Horizonte
2023

A553m

Andrade, Luana Siebra.

Modelagem hidrodinâmica tridimensional para avaliação espaço-temporal do comportamento térmico de um reservatório urbano [recurso eletrônico] : estudo de caso na Lagoa da Pampulha / Luana Siebra Andrade. – 2023.

1 recurso online (135 f.: il., color.) : pdf.

Orientadora: Talita Fernanda das Graças Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Modelagem - Teses. 4. Temperatura - Medição - Teses. 5. Água - Qualidade - Teses. 6. Reservatórios - Teses. 7. Pampulha, Lagoa da (MG) - Teses. I. Silva, Talita Fernanda das Graças. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Modelagem Hidrodinâmica Tridimensional Para Avaliação Espaço-Temporal Do Comportamento Térmico
De Um Reservatório Urbano: Estudo De Caso Na Lagoa Da Pampulha, Belo Horizonte - MG"

LUANA SIEBRA ANDRADE

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profa Talita Fernanda das Graças da Silva

Prof. Ricardo Tezini Minoti

Prof. Iran Eduardo Lima Neto

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof^ª. Talita Fernanda das Graças Silva

Coordenadora

Orientadora

Belo Horizonte, 17 de julho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Tezini Minoti, Usuário Externo**, em 17/07/2023, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Talita Fernanda das Gracas Silva, Professora do Magistério Superior**, em 17/07/2023, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iran Eduardo Lima Neto, Usuário Externo**, em 17/07/2023, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 16/06/2025, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2454796** e o código CRC **1130E171**.

Referência: Processo nº 23072.242279/2023-53

SEI nº 2454796

AGRADECIMENTOS

Mudar de cidade, escrever uma dissertação e concluir um mestrado não são tarefas fáceis. Principalmente se você estiver sozinho. Para a minha sorte, durante todo esse mestrado, eu não estive sozinha. Várias pessoas passaram e permaneceram durante todo o processo e sem elas esse sonho não teria sido realizado.

Primeiramente, meus pais Alcindo e Lúcia, que saíram do interior do Ceará para Fortaleza em busca de uma melhor educação para os filhos. Que sempre apoiaram minhas decisões e me incentivaram a seguir meus sonhos. Aos meus irmãos Ana Lúcia e Paulo Eduardo que, apesar da distância geográfica, sempre se fizeram presentes.

À minha orientadora, Talita Silva, por tudo. Por ter confiado em mim na execução desse trabalho, pelas oportunidades, conversas, conselhos e passos de forró. Pelas valiosas correções e puxões de orelha que me fizeram crescer e atravessar os desafios.

Aos membros do MOSAP, pelas considerações e disposição em contribuir com essa pesquisa. À Julia, pela execução do trabalho com os dados de temperatura do ar.

Ao Alexandre Assunção, companheiro de pesquisa e de mestrado. Por todo o acolhimento em Belo Horizonte, pela ajuda com programação, pelas cervejas e pães de queijo.

Às duas maiores amigas que eu poderia ter em Belo Horizonte: Jordana e Luíza. Obrigada por sempre me incentivarem, torcerem e dividirem bons momentos.

Aos amigos da salinha 4504: Alan, André, Daniel, Fábio, Igor, Juliana, Thomaz e Vinícius. Obrigada por me acolherem e fazerem me sentir em casa. Só tenho a agradecer a todos pelos momentos dentro e fora da salinha, desde conversas na cantina até músicas ruins em karaokês.

Aos amigos de Fortaleza, por sempre entenderem minha ausência e manterem a amizade, apesar da distância.

Aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, por todo o conhecimento repassado durante as disciplinas e pela amizade construída nos corredores do departamento.

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

*Mas é preciso ter manha
É preciso ter graça
É preciso ter sonho sempre.
Quem traz na pele essa marca
Possui a estranha mania
De ter fé na vida.*

(Maria, Maria – Milton Nascimento)

*Sonho e escrevo em letras grandes de novo
Pelos muros do país*

(Comentário a respeito de John – Belchior)

RESUMO

Devido aos usos múltiplos e serviços ecossistêmicos, reservatórios localizados dentro ou próximos a grandes centros urbanos sofrem com pressões antrópicas, que resultam no aumento do aporte de nutrientes, sedimentos e poluentes no sistema. Monitorar de forma temporal e espacial adequada variáveis relacionadas à qualidade da água em reservatórios, como a temperatura, muitas vezes pode ser oneroso. Logo, modelos hidrodinâmicos vêm sendo utilizados como ferramenta auxiliar na compreensão da dinâmica da temperatura em reservatórios. Utilizando-se de um modelo hidrodinâmico tridimensional, esse estudo buscou avaliar o comportamento térmico da Lagoa da Pampulha, reservatório urbano localizado em Belo Horizonte (MG). Foram utilizados dados morfométricos, séries temporais hidrológicas e meteorológicas no período de 2013 a 2015 para calibração e validação do modelo. Medições *in situ* de temperatura da água foram obtidas através de monitoramento realizado no mesmo período. O desempenho do modelo foi avaliado na calibração e na validação por meio da raiz do erro médio quadrático (RMSE), do erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação (R^2). Para avaliar a sensibilidade do modelo a mudanças nas variáveis de entrada, variou-se a vazão de entrada e a temperatura da água dos tributários. Para caracterização dos eventos de mistura e estratificação, foram calculados índices físicos relacionados a esses processos. Avaliou-se, também, de forma espacial e temporal a temperatura da água e a velocidade do fluxo em diferentes regiões do reservatório. Na calibração, os resultados apontaram que o modelo não representou de forma clara os eventos de estratificação, porém representou de forma precisa os eventos de mistura. Obteve-se RMSE de 0,84°C e MAE de 0,65°C para todo o período de calibração. Na validação, obteve-se RMSE de 0,68°C e MAE de 0,64°C para o ano de 2014 e RMSE de 0,90°C e MAE de 0,65°C para o ano de 2015. Na análise de sensibilidade, pode-se observar que a variação de 20% na vazão e o aumento de 2°C na temperatura da água dos afluentes afetaram a temperatura da água na superfície do reservatório. Na análise dos eventos de estratificação e mistura através dos resultados de temperatura na água em diferentes pontos da Lagoa, pode-se observar que a Lagoa da Pampulha mantém a condição de estratificação a maior parte do ano. Para a velocidade do fluxo, foram observadas maiores velocidades na superfície em todas as regiões do reservatório. Por fim, os resultados obtidos mostraram que utilização de um modelo hidrodinâmico tridimensional calibrado e validado é uma ferramenta essencial na compreensão do comportamento térmico da Lagoa da Pampulha, podendo ser utilizado na análise de variáveis importantes e no gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Processos hidrodinâmicos. Delft3D. Temperatura da água.

ABSTRACT

Due to multiple uses and ecosystem services, reservoirs located within or near large urban centers are subjected to anthropogenic pressures, resulting in increased input of nutrients, sediments, and pollutants into the system. Temporal and spatial monitoring of water quality variables in reservoirs, such as temperature, can often be costly. Therefore, hydrodynamic models have been used as an auxiliary tool to understand the temperature dynamics in reservoirs. Using a three-dimensional hydrodynamic model, this study aimed to evaluate the thermal behavior of Lagoa da Pampulha, an urban reservoir located in Belo Horizonte (MG), Brazil. Morphometric data, hydrological and meteorological time series from 2013 to 2015 were used for model calibration and validation. In-situ water temperature measurements were obtained through monitoring conducted during the same period. The model's performance was assessed in calibration and validation using root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R^2). To evaluate the model's sensitivity to changes in input variables, variations in inflow discharge and tributary water temperature were considered. Physical indices related to mixing and stratification events were calculated to characterize these processes. Water temperature and flow velocity were also spatially and temporally analyzed in different regions of the reservoir. In calibration, the results indicated that the model did not clearly represent stratification events but accurately simulated mixing events. The RMSE was 0.84°C and MAE was 0.65°C for the entire calibration period. In validation, RMSE was 0.68°C and MAE was 0.64°C for the year 2014, and RMSE was 0.90°C and MAE was 0.65°C for the year 2015. In the sensitivity analysis, it was observed that a 20% variation in inflow discharge and a 2°C increase in tributary water temperature affected the surface water temperature of the reservoir. Analyzing stratification and mixing events through water temperature results at different points in Lagoa da Pampulha, it was found that stratification prevailed for most of the year. Higher flow velocities were observed at the surface in all regions of the reservoir. Ultimately, the results obtained demonstrate that the use of a calibrated and validated three-dimensional hydrodynamic model is an essential tool in understanding the thermal behavior of Lagoa da Pampulha, enabling the analysis of important variables and water resource management.

Keywords: Hydrodynamic processes. Delft3D. Water temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estratificação térmica em um reservatório	25
Figura 2 - Exemplo de coordenadas sigma (esquerda) e coordenadas Z (direita)....	46
Figura 3 - Esquema da troca de calor na superfície de um reservatório	49
Figura 4 - Lagoa da Pampulha e seus tributários.....	60
Figura 5- Vazões dos tributários da Lagoa da Pampulha (2013 - 2015)	63
Figura 6 - Média diária das variáveis meteorológicas no período de calibração e validação (2013 a 2015).....	66
Figura 7 - Pontos de observação na superfície da Lagoa da Pampulha	75
Figura 8 - Temperatura da superfície (0,5m) em simulações com vazões 10% maior (linha azul) e 10% menor (linha vermelha) no ponto 4	82
Figura 9 - Temperatura do fundo (9,5m) em simulações com vazões 10% maior (linha azul) e 10% menor (linha vermelha) no ponto 4.....	82
Figura 10 - Temperatura da superfície (0,5 m) em simulações com vazões 20% maior (linha azul) e 20% menor (linha vermelha) no ponto 4	83
Figura 11 - Temperatura do fundo (9,5 m) em simulações com vazões 20% maior (linha azul) e 20% menor (linha vermelha) no ponto 4	84
Figura 12 - Análise de sensibilidade da alteração das vazões de entrada, no ano de 2013	85
Figura 13 - Temperatura da água na superfície (0,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 1 °C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.....	86
Figura 14 - Temperatura da água no fundo (9,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 1 °C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4	86
Figura 15 - Temperatura da água na superfície (0,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 2°C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.....	87
Figura 16 - Temperatura da água no fundo (9,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 2°C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4	88
Figura 17 - Análise de sensibilidade da alteração da temperatura da água nos afluentes, no ano de 2013.....	90

Figura 18 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido in situ (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para cada campanha de campo.....	92
Figura 19 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido in situ (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para as duas campanhas de campo em 2014	96
Figura 20 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido in situ (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para cada campanha de campo em 2015.....	97
Figura 21 - Temperatura média diária da água no ponto 4 para as profundidades 0,5 m, 2,5 m, 5,5 m e 9,5 m durante o período de calibração	99
Figura 22 - Valores médios diários para o índice Lake Number durante o período de calibração (01 de fevereiro a 31 de dezembro de 2013)	102
Figura 23 - Diferença de temperatura entre a superfície (0,5 m) e o fundo (9,5 m) para o período de calibração no ponto 4. A linha tracejada representa a condição de mistura com diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de 1°C	102
Figura 24 - Índice de estabilidade de Schmidt calculado a partir de temperaturas média diária simuladas durante o período de calibração (01 de fevereiro a 31 de dezembro de 2013) no ponto 4	104
Figura 25 - Temperatura da água no ponto 4 para quatro profundidades diferentes durante o primeiro período de validação (01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014)	105
Figura 26 - Temperatura da água no ponto 4 para quatro profundidades diferentes durante o segundo período de validação dois (10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015)	107
Figura 27 - Temperatura da superfície (0,5 m) na Lagoa da Pampulha simulada para os meses de fevereiro a dezembro de 2013	108
Figura 28- Perfil de temperatura da água simulada em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha	110
Figura 29 - Velocidade do fluxo em diferentes profundidades em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curvas-chaves para os córregos Ressaca e Sarandi	62
Tabela 2 - Curva cota-descarga do vertedouro linear da Lagoa da Pampulha	64
Tabela 3 - Equações para obtenção da temperatura da água a partir da temperatura do ar nos tributários diretos da Lagoa da Pampulha de acordo com Santiago et al. (2022).....	65
Tabela 4 - Métricas de desempenho utilizadas no processo de calibração	72
Tabela 5 - Parâmetros para calibração, intervalo de calibração e descrição física. ...	73
Tabela 6 - Calibração do parâmetro número de Stanton.	77
Tabela 7 - Calibração do parâmetro número de Dalton.	78
Tabela 8 - Calibração do parâmetro profundidade do disco de Secchi.	79
Tabela 9 - Calibração do parâmetro viscosidade horizontal turbulenta.....	79
Tabela 10 - Calibração do parâmetro difusividade horizontal turbulenta.....	80
Tabela 11 - Valores obtidos no processo de calibração do modelo.	80
Tabela 12 - RMSE(°C) obtido a partir da comparação entre o perfil de temperatura simulado e o perfil de temperatura in situ, mediante variações de 10% e 20% nas vazões de entrada, para o ano de 2013.....	84
Tabela 13 - RMSE(°C) obtido a partir da comparação entre o perfil de temperatura simulado e o perfil de temperatura in situ, mediante variações de acréscimo e diminuição da temperatura da água dos afluentes, para o ano de 2013.....	88
Tabela 14 - Métricas de desempenho obtidas para diferentes profundidades na Lagoa da Pampulha.	94
Tabela 15 - Métricas de desempenho obtidas em outros estudos utilizando Delft3D	94
Tabela 16 - Métricas de desempenho para o primeiro período de validação (01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014).	96
Tabela 17 - Métricas de desempenho para o segundo período de validação (10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015).	97
Tabela 18 - Quantidade de eventos de mistura e estratificação na Lagoa da Pampulha para o ano de 2013.	100
Tabela 19 - Dias de estratificação e de mistura obtidos a partir de diferentes métodos de análise.....	103

Tabela 20 - Dias com eventos de estratificação em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha para o ano de 2013.	111
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETAF – Estação de Tratamento de Águas Fluviais

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LN – Lake Number

MAE - Erro Médio Absoluto

NMAE - Erro Médio Absoluto Normalizado

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte

PROPAM – Programa de Recuperação e Desenvolvimento Ambiental

R^2 - Coeficiente de Determinação

RMSE - Raiz Quadrada Do Erro Quadrático Médio

SUDECAP – Superintendencia de Desenvolvimento da Capital

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1	Características de lagos e reservatórios	20
3.2	Comportamento hidrodinâmico de lagos e reservatórios	22
3.2.1	Variáveis externas	22
3.2.2	Estratificação térmica e mistura em lagos e reservatórios	24
3.3	Processos hidrodinâmicos	28
3.3.1	Leis de conservação	28
3.3.2	Advecção e dispersão	31
3.3.3	Balanço de massa	32
3.3.4	Balanço de calor	33
3.3.5	Circulação vertical e modelos de turbulência	36
3.4	Modelos hidrodinâmicos	39
3.4.1	Tipos de modelo	39
3.4.2	Modelos hidrodinâmicos tridimensionais	40
3.4.3	Modelo hidrodinâmico Delft3D	43
4	MATERIAL E MÉTODOS	54
4.1	Área de estudo	54
4.2	Dados para entrada no modelo	61
4.2.1	Dados morfológicos	61
4.2.2	Dados hidrológicos	61
4.2.3	Dados meteorológicos	65
4.3	Monitoramento <i>in situ</i>	67
4.4	Elaboração do modelo hidrodinâmico	67
4.4.1	Configuração do modelo Delft3D	67
4.4.2	Análise de sensibilidade	69
4.4.3	Calibração e validação do modelo	70
4.4.4	Tempo de processamento e ferramentas de pós-processamento	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1	Avaliação de desempenho da modelagem hidrodinâmica 3D	76
5.1.1	Calibração dos parâmetros	76
5.1.2	Análise de sensibilidade do modelo às variáveis de entrada	81

5.1.3	Simulação da temperatura da água no período de calibração	91
5.1.4	Simulação da temperatura da água no período de validação	95
5.2	Comportamento térmico da Lagoa da Pampulha	98
5.2.1	Período de calibração	98
5.2.2	Períodos de validação	105
5.3	Comportamento hidrodinâmico	107
5.3.1	Espacialização da temperatura e da velocidade do fluxo na Lagoa da Pampulha	107
6	CONCLUSÕES	114
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – CURVA HIPSONÔMETRICA DA LAGOA DA PAMPULHA PARA O ANO DE 2013	128
	APÊNDICE B – TEMPERATURAS OBSERVADAS E SIMULADAS PARA PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (2013)	129
	APÊNDICE C - TEMPERATURAS OBSERVADAS E SIMULADAS PARA OS PERÍODOS DE VALIDAÇÃO (2014 e 2015)	135

1 INTRODUÇÃO

Lagos e reservatórios são importantes fontes de água doce que podem ser modificados ou construídos para atender múltiplos usos, como geração de energia, navegação, irrigação e abastecimento humano, além de serviços ecossistêmicos, como controle de cheias, proteção ao ambiente natural, entre outros (LAP; MORI, 2007; SOULIGNAC *et al.*, 2017). Os reservatórios, principalmente aqueles localizados próximos ou dentro de áreas urbanas, são vulneráveis a impactos derivados da pressão antrópica característica dessas regiões. Mudanças no uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, transporte de altas cargas de poluentes, carreamento de sedimentos e, conseqüentemente, deterioração da qualidade da água são alguns dos impactos causados por esses usos (BERTONE *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2018).

A temperatura da água é uma variável fundamental nas condições hidrodinâmicas e na qualidade da água de um reservatório, desempenhando um papel importante em dois processos físicos inerentes a ambientes lênticos: estratificação e mistura da coluna d'água (TUNDISI; TUNDISI, 2008). A estratificação se caracteriza pelo aquecimento da coluna d'água de maneira não uniforme, gerando um gradiente de temperatura e densidade. Esse gradiente de temperatura leva à formação de camadas distintas, com água mais quente e menos densa na parte superior e água mais fria e densa na parte inferior do reservatório. Por outro lado, a mistura da coluna d'água refere-se ao processo de mistura das camadas, geralmente ocasionada pelo vento, por mudanças sazonais ou por aporte de vazão no reservatório, promovendo a distribuição uniforme da temperatura e a circulação de nutrientes na coluna d'água (WAHL; PEETERS, 2014; WU *et al.*, 2016).

Compreender esses processos espacialmente e monitorá-los localmente pode ser desafiador, uma vez que são necessários instrumentos e técnicas capazes de realizar medições em tempo real de variáveis relevantes a esses processos, como a temperatura (DE GOEDE, 2020).

A utilização de modelos hidrodinâmicos com diferentes dimensionalidades tem se tornado uma ferramenta útil para entender as variações espaciais e temporais na temperatura da água, para superar as limitações que as medições *in situ* apresentam e para gerenciar variáveis importantes relacionadas à qualidade da água em

reservatórios, além de auxiliar no planejamento e aplicação de práticas de manejo (WANG *et al.*, 2013).

Modelos unidimensionais simulam variações em uma direção e utilizam valores médios das outras duas dimensões, por exemplo, valores médios nas direções transversal e longitudinal ou valores médios nas direções transversal e vertical. Esses modelos exigem que a possível heterogeneidade das propriedades nessas direções não altere significativamente o equilíbrio das propriedades na direção de interesse (BONNET; POULIN; DEVAUX, 2000).

Os modelos bidimensionais resolvem o fluxo em dois planos, longitudinal-vertical ou longitudinal-transversal, utilizando valores médios em uma direção. São modelos mais complexos e requerem uma maior densidade de informações, resultando em uma melhor representação dos processos hidrodinâmicos, quando comparados aos modelos unidimensionais. O desempenho dos modelos bidimensionais também é influenciado pela qualidade dos dados de entrada uma vez que esses modelos simplificam a representação vertical ou transversal, comprometendo a precisão em ambientes com alta variabilidade espacial (AMIRKANI *et al.*, 2016; SABETI *et al.*, 2017; ISHIKAWA *et al.*, 2021).

Os modelos tridimensionais, por sua vez, equilibram as propriedades em todas as direções e são capazes de representar com maior precisão as variações espaciais da dinâmica de um reservatório. Quando comparados com os modelos uni e bidimensionais, os modelos tridimensionais oferecem uma representação mais abrangente dos processos hidrodinâmicos, sendo utilizados para simular o comportamento térmico em reservatórios urbanos (CHEN *et al.*, 2017; SOULIGNAC *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2020). No entanto, esses modelos exigem uma maior quantidade de dados que nem sempre estão disponíveis devido à variabilidade espacial e ausência de monitoramento, afetando a confiabilidade dos resultados.

Xue *et al.*, (2015) desenvolveram um modelo hidrodinâmico tridimensional para investigar a resposta da dinâmica térmica às forçantes meteorológicas no Lago Superior (Canadá). Os autores concluíram que a variabilidade espaço-temporal dos fluxos de calor influencia diretamente na estrutura térmica do reservatório. Wu *et al.*, (2016) utilizaram o modelo tridimensional EFDC para analisar o impacto da estabilidade térmica no transporte de poluentes no reservatório de Hongfeng (China).

Os autores mostram que as variações espaço-temporais na estabilidade térmica são afetadas principalmente pela temperatura do ar e nível d'água.

No Brasil, Ishikawa *et al.*, (2021) compararam modelos com diferentes dimensionalidades (GLM, CE-QUAL-W2 e Delft3D) na representação da estratificação da coluna d'água, velocidade de fluxo e transporte de substâncias em um reservatório urbano localizado no Paraná. Os autores concluíram que todos os modelos foram capazes de representar as mudanças sazonais na temperatura da água, e que apenas o modelo tridimensional foi capaz de apresentar resultados semelhantes os obtidos *in situ* para velocidade de fluxo. Amorim *et al.*, (2021) investigaram a capacidade do modelo Delft3D em representar o comportamento hidrodinâmico e seu efeito nas variáveis que caracterizam a qualidade da água em um reservatório urbano brasileiro. Os autores concluíram que o modelo apresentou resultados semelhantes aos obtidos *in situ* e que longos períodos de estratificação e de mistura provocam alterações na qualidade da água.

A Lagoa da Pampulha, reservatório localizado na cidade de Belo Horizonte (Minas Gerais), é atingida pelas pressões antrópicas exercidas na bacia hidrográfica desde os anos 70. Devido a sua importância histórica e paisagística para a cidade e ao título de Patrimônio Cultural da UNESCO, desde 2016 a Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) monitora e realiza a recuperação da qualidade da água, baseando-se na aplicação periódica de produtos que visam a remoção do fósforo presente na coluna d'água.

Nesse contexto, a utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais em reservatórios como a Lagoa da Pampulha pode desempenhar papel fundamental no suporte ao monitoramento da temperatura da água e na análise do comportamento térmico do reservatório. Tais modelos permitem a criação de diferentes cenários e estratégias para a recuperação de reservatórios urbanos, contribuindo para tomada de decisão e otimização de tratamentos voltados para a melhoria da qualidade da água. Através desses modelos, é possível simular a distribuição espacial de variáveis, como a temperatura, fornecendo informações sobre áreas que requerem intervenções prioritárias, auxiliando na melhoria da qualidade da água.

A partir disso, esse trabalho buscou avaliar o comportamento térmico da Lagoa da Pampulha através da utilização de um modelo hidrodinâmico tridimensional. Para essa avaliação, realizou-se a calibração e validação do modelo para o ano de 2013, a

análise de sensibilidade do modelo à alteração dos valores das variáveis de entrada, e simulações para a análise espaço-temporal da temperatura e da velocidade de fluxo em diferentes pontos do reservatório.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar o impacto dos processos hidrodinâmicos no comportamento térmico da Lagoa da Pampulha, através de modelagem hidrodinâmica tridimensional.

2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Calibrar o modelo Delft3D para a Lagoa da Pampulha, considerando período seco e chuvoso;
- Avaliar a sensibilidade do modelo em relação a mudanças nas variáveis de entrada;
- Caracterizar a variação espaço-temporal da temperatura e da velocidade do fluxo na Lagoa da Pampulha.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Características de lagos e reservatórios

Lagos e reservatórios são corpos d'água que geralmente desempenham diferentes usos, como abastecimento de água para uso humano, recreação, pesca e navegação, controle de enchentes e geração de energia. As características físicas, químicas e biológicas de cada ecossistema os diferenciam entre si e determinam como esses usos serão atendidos (SOULIGNAC *et al.*, 2017).

As diferenças entre lagos e reservatórios para outros sistemas lênticos estão relacionadas às suas características geomorfológicas, como dimensões físicas, profundidade e tempo de detenção hidráulica, bem como às características biogeoquímicas, como estado trófico, ciclo de nutrientes, entre outros (BIRCH; MCCASKIE, 1999). Além disso, a localização geográfica desses corpos d'água também está relacionada às características físicas e biogeoquímicas, pois influencia tanto as características físicas e biogeoquímicas, quanto os processos ecológicos e hidrológicos, determinando padrões de sedimentação, temperatura da água e regime de precipitação (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

As características físicas mais importantes em lagos e reservatórios incluem seu comprimento, profundidade, área e volume, e a partir dessas informações é possível estabelecer relações hidráulicas relevantes. Uma dessas relações é o tempo de detenção hidráulico, definido pela razão entre o volume de água e a vazão de saída (WETZEL, 2001). Dependendo do volume do lago, o tempo de detenção hidráulica, ou seja, o tempo necessário para que a água do reservatório seja renovada, pode variar de algumas horas a anos. Essa relação é fundamental para entender a permanência de poluentes no lago e a influência das vazões dos tributários (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

Os reservatórios desempenham papel fundamental na regulação do fluxo de água por meio do barramento, controlando as descargas que ocorrem à jusante. Esses sistemas são construídos para diferentes usos, como controle de cheias, navegação, abastecimento humano, geração de energia, entre outros e possuem diferentes características em relação à morfometria, hidrologia e gerenciamento. (JI, 2008).

Como a principal função de um reservatório é o armazenamento de água, o tempo de residência hidráulica é um dos parâmetros mais importante para o gerenciamento desses sistemas. Se o tempo de residência for longo, possivelmente os processos internos e hidrodinâmicos, como estratificação e o fluxo de nutrientes provenientes do leito, irão afetar a qualidade da água. Caso contrário, a qualidade da água será controlada pelos fluxos de entrada de água (CHAPRA, 2008; JI, 2008).

Os reservatórios são considerados ambientes híbridos, possuindo características semelhantes a lagos e rios, e com características próprias de forma, qualidade da água e variações nos processos hidrodinâmicos (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Os reservatórios podem ser divididos em três zonas: i) ribeirinha, caracterizada por ser uma zona estreita e misturada. Nessa zona, o fluxo fluvial ainda é bastante característico e transporta quantidades significativas de partículas em suspensão, com baixa atenuação da luz e alta turbidez; ii) transição, onde as velocidades são menores e as partículas em suspensão, advindas da zona ribeirinha, se depositam, aumentando a penetração da luz nessa zona.; iii) lacustre, é a região localizada próxima à barragem. Nessa zona, devido à baixa velocidade, as concentrações de partículas em suspensão são baixas, aumentando a penetração da luz e favorecendo o crescimento do fitoplâncton de algas (JI, 2008).

A eutrofização de um reservatório é resultado da entrada excessiva de nutrientes. Esses nutrientes são provenientes de diversas atividades humanas na bacia hidrográfica. Esses nutrientes podem permanecer no corpo hídrico por um período variável de tempo, influenciado pela taxa de renovação da água, que é afetada pelo tempo de detenção hidráulica desses ecossistemas (DEHBALAEI, 2016). Como resultado, ocorre enriquecimento de nutrientes no meio, perturbando o equilíbrio do ecossistema. Esse enriquecimento de nutrientes causa um aumento na produtividade primária, ou seja, na taxa de fotossíntese e pode resultar na proliferação excessiva de algas e no crescimento descontrolado de plantas aquáticas (DJIHOUESSI; AINA, 2018).

O desequilíbrio na concentração de nutrientes pode causar a proliferação de fitoplâncton e cianobactérias, resultando no aumento da turbidez da água e na formação de condições anóxicas no fundo do reservatório (CHAPRA, 2008). A

turbidez é caracterizada pela quantidade de partículas em suspensão na água, como sedimentos, matéria orgânica e inorgânica, que fornecem nutrientes para o fitoplâncton, aumentando sua concentração e consequentemente a turbidez. Esse aumento pode gerar outras consequências, como a falta de oxigênio na camada mais profunda do reservatório, criando condições anóxicas. Além disso, alta concentração de fitoplâncton pode reduzir a penetração de luz na água, afetando negativamente outros organismos aquáticos que dependem da fotossíntese para sobreviver (ESTEVES, 2011).

Um indicador do potencial primário de produção de sistemas lênticos é o seu estado trófico (ESTEVES 2011). Lagos e reservatórios são comumente agrupados em três grupos tróficos diferentes: i) oligotrófico, associado a reservatórios profundos onde as águas localizadas no fundo são frias e apresentam altos níveis de oxigênio dissolvido durante o ano, levando a baixas concentrações de nutrientes e baixo crescimento de algas; ii) mesotrófico, caracterizado por níveis intermediários de nutrientes e com oxigênio dissolvido reduzido no fundo; iii) eutrófico, com altas concentrações de nutrientes e algas, baixa concentração de oxigênio dissolvido no fundo e alta produtividade biológica (JI, 2008).

3.2 Comportamento hidrodinâmico de lagos e reservatórios

3.2.1 Variáveis externas

Três principais forçantes externas aos sistemas de lagos e reservatórios influenciam nos processos hidrodinâmicos, sendo elas: a radiação solar, que determina a transferência de energia na interface ar-água; o vento na superfície; e os fluxos de entrada e saída de água (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

A radiação solar desempenha um importante papel no funcionamento de lagos e reservatórios, impulsionando o processo de fotossíntese em plantas aquáticas, favorecendo a cadeia alimentar no ecossistema do reservatório. A quantidade de radiação solar que penetra na coluna d'água depende de vários fatores, como turbidez da água, profundidade e matéria orgânica dissolvida (ESTEVES, 2011; CHAPRA, 2008).

A penetração da radiação solar na água é explicada pela Lei de Beer, que relaciona esse fato com o coeficiente de atenuação, propriedade que é dependente da natureza da água e do comprimento de onda da radiação (HENDERSON-SELLERS, 1986). A Lei de Beer é dada pela Equação ((1).

$$I(z) = I_0 * e^{(-k*z)} \quad (1)$$

Onde, $I(z)$ é a intensidade da luz a uma profundidade z na coluna d'água, I_0 é a intensidade da luz na superfície da água, k é o coeficiente de atenuação da luz, que depende das características físicas e químicas da água e z é a profundidade medida a partir da superfície.

Em reservatórios com baixos níveis de partículas em suspensão, a maior parte da radiação solar penetra e alcança o fundo do reservatório, porém sua intensidade diminui com o aumento da profundidade devido à absorção e dispersão da luz. Em contraste, em reservatórios com altos níveis de partículas em suspensão e matéria orgânica dissolvida na coluna d'água, a radiação é absorvida próximo à superfície, limitando a penetração nas camadas mais profundas (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

O vento é outro fator importante na dinâmica dos lagos e reservatórios, afetando tanto a camada superficial quanto as águas mais profundas. O vento exerce efeitos variados em um reservatório, como a criação de correntes horizontais, a mistura vertical da coluna d'água e a geração de ondas na superfície. Esses efeitos dependem de fatores como: a distância que o vento percorre, o tamanho e a forma do reservatório e a topografia (Ji, 2008).

A principal força que promove a criação de correntes horizontais e a mistura vertical é a energia cinética gerada pela tensão de cisalhamento provocada pelo vento na superfície do reservatório (WETZEL, 2001). Essa tensão é influenciada por diversos aspectos, como a força do vento, a estabilidade da camada superficial, a variabilidade da velocidade do vento e o comprimento do reservatório, além do desenvolvimento e dissipação de ondas nas margens do reservatório (CHAPRA, 2008)

A tensão exercida pelo vento na superfície do reservatório é descrita a partir da Equação ((2), segundo Ji (2008).

$$\tau = C_D \rho_A U^2 \quad (2)$$

Onde, C_D é o coeficiente de arraste, ρ_A é a densidade do ar e U é a velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície da água. O valor de C_D compreende o intervalo entre $1,1 \times 10^{-3}$ a $1,5 \times 10^{-3}$.

Os fluxos de entrada e saída em um reservatório são compostos por diversos fatores como fluxo de rios, escoamento superficial de bacias hidrográficas, descarga de poluentes e liberação de água por meio de barragem, comportas ou outras estruturas de controle de água, respectivamente. Quando há entrada de água, esta pode provocar o arraste da água parada do reservatório. A velocidade e a efetividade desse processo dependem da diferença de temperatura e densidade entre a água de entrada e a água do reservatório. Caso não haja diferenças significativas, a água de entrada irá se misturar rapidamente com a água do reservatório. No entanto, se houver diferença, ocorrerá uma mistura turbulenta no reservatório e a água de entrada irá se mover com uma certa velocidade (BIRCH; MCCASKIE, 1999; JI, 2008).

Os fluxos de entrada e saída em um reservatório são componentes do balanço de água. O balanço de água é proveniente do princípio de conservação de massa, que representa a alteração do volume e o nível d'água do reservatório (CHAPRA, 2008). Compõem o balanço de água: entradas, saídas, precipitação, evaporação, escoamento superficial e infiltração e pode ser calculado a partir da Equação ((3):

$$\frac{dV}{dt} = Q_{entrada} - Q_{saída} + P * A_s - Evap * A_s - Q_{infiltração} + Q_{escoamento} \quad (3)$$

Onde, Q é a vazão (m^3/s), A_s é a área superficial (m^2), P é a precipitação (mm/h) e $Evap$ é a taxa de evaporação (mm/h), $Q_{infiltração}$ é a quantidade de água que infiltra no solo (m^2/s), $Q_{escoamento}$ é o escoamento superficial (m^3/s) e V é o volume de água armazenado no sistema (m^3).

3.2.2 Estratificação térmica e mistura em lagos e reservatórios

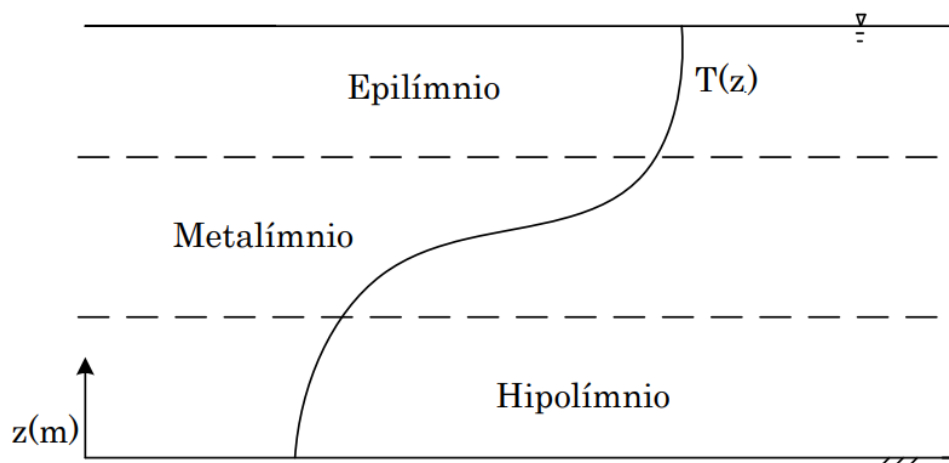
A temperatura é a característica física mais importante na hidrodinâmica de lagos e reservatórios, influenciando também na qualidade da água em diferentes aspectos (JI, 2008). Quando há uma diferença significativa de temperatura entre as camadas do

reservatório, gerando diferentes níveis de densidade, ocorre o fenômeno conhecido como estratificação térmica, que pode se estender ao longo da coluna d'água (WETZEL, 2001).

A estratificação térmica em sistemas lênticos é influenciada por duas forças opostas: A radiação solar e as trocas de calor na superfície, que criam um gradiente de densidade ao longo da coluna d'água, enquanto a tensão cisalhante do vento e a convecção turbulenta tendem a desfazer a estratificação e promover a mistura vertical (JI, 2008). A estratificação representa o acúmulo de uma grande quantidade de energia potencial no sistema, a qual é responsável por estabilizar a coluna d'água (CHAPRA, 2008; MICHAEL, 2013; TEIXEIRA, 2019).

Comumente são definidas três camadas em corpos hídricos estratificados: o epilímnio, caracterizado por ser a camada na interface ar-água onde, conseqüentemente, o balanço energético sofre influência das condições meteorológicas, variando ao longo dia. É a camada mais quente, com menor densidade, com maior grau de mistura e maior concentração de oxigênio dissolvido. O metalímnio, que é a faixa intermediária, apresenta forte variação de temperatura e é onde localiza-se a termoclina, onde localiza-se o ponto de inflexão do perfil térmico. O hipolímnio, região mais profunda e mais fria e densa, caracterizada pela baixa concentração de oxigênio dissolvido e baixa luminosidade, chegando à anoxia em alguns casos (VON SPERLING, 2005; JI, 2008). A Figura 1 apresenta a disposição das camadas verticais de acordo com a estratificação térmica.

Figura 1 - Estratificação térmica em um reservatório.



T é a temperatura da água e z a profundidade (m). Fonte: Adaptado de Esteves, (2011)

A estratificação horizontal, ou seja, diferenças nas propriedades físicas e químicas da água em diferentes regiões do reservatório na mesma profundidade, e a estratificação vertical, quando há diferença de temperatura, densidade e/ou salinidade entre as camadas ao longo da coluna d'água, exercem influência direta na circulação da água, no transporte de substâncias, na disponibilidade vertical de nutrientes, luz e substratos, e na alimentação de níveis tróficos superiores como o zooplâncton. A estratificação vertical também afeta a qualidade da água em sistemas lênticos, uma vez que compostos químicos podem permanecer confinados em camadas do perfil que apresentam baixo grau de mistura (WUEST; SCHMID, 2013; TEIXEIRA, 2019). Como exemplo, tem-se o perfil de oxigênio dissolvido, no qual é afetado diretamente e sua concentração é reduzida em camadas mais próximas ao fundo do reservatório (RAHBANI, 2015).

Outro fator que influencia os eventos de estratificação é o vento, que exerce uma ação turbulenta na superfície do reservatório, ocasionando uma redistribuição do calor no sistema (TUNDISI, 2008). A amplitude e a dimensão vertical dessa ação são dependentes da velocidade do vento e pode, também, ser ocasionada pela afluência de vazões e por processos ondulatórios internos. Esses movimentos internos, denominados seiches, criam uma oscilação na componente vertical de velocidade, podendo ocasionar a ressuspensão do material localizado no fundo do reservatório, afetando significativamente a qualidade da água (WETZEL, 2001).

Em geral, durante o verão, a energia cinética provocada pelo atrito do vento na superfície da água é insuficiente para romper a estabilidade criada pela estratificação térmica. No entanto, durante o inverno, o resfriamento das camadas da superfície somado à turbulência ocasionada a partir da ação do vento sobre a superfície, pode promover a mistura da coluna d'água (JI, 2008).

A caracterização de eventos de estratificação e mistura em reservatórios pode ser realizada através de índices físicos. Segundo Read *et al.* (2011) a utilização desses índices tem como objetivo estimar a estabilidade da coluna d'água e as contribuições do resfriamento convectivo, que acontece devido à perda de calor da superfície da água para a atmosfera, e de condições meteorológicas para o processo de mistura.

O índice de estabilidade Schmidt (S_T) avalia a energia mecânica necessária para misturar completamente um reservatório com uma determinada condição de estratificação. Esse índice permite também comparar a energia potencial contida em diferentes eventos de estratificação em um dado ambiente (IDSO, 1973).

Valores altos desse índice indicam que o reservatório possui alta estratificação, tornando mais difícil a completa mistura. Em contrapartida, valores baixos indicam que o reservatório está bem misturado, com menor necessidade de energia para mistura completa da água (IDSO, 1973). A estabilidade de Schmidt, dada em $J.m^{-2}$, é calculada através da Equação (4) apresentada a seguir.

$$S = \frac{g}{A_0} \int_0^{Z_M} (z_v - z)(\rho_i - \rho_v)A(z)dz \quad (4)$$

Onde, ρ_v é a densidade da água na profundidade do centro de volume z_v , em kg/m^3 , ρ_i é a média da densidade, g é a aceleração da gravidade (m/s^2), A_0 é a área da superfície do lago, $A(z)$ é a área da seção horizontal do lago na profundidade z e z_v é a profundidade no centro de volume do reservatório, definida como $z_v = \frac{1}{V} \int_0^{Z_M} zA(z)dz$, sendo V (m^3) o volume da superfície do lago.

O número de Wedderburn e Lake Number comparam a força de estabilização da estratificação com a força de mistura dos ventos e permitem determinar se a tensão do vento é mais forte que a estratificação, ocasionando a mistura da coluna d'água. (IDSO, 1973). Valores pequenos em ambos os índices representam um maior potencial para a mistura. Valores maiores representam um reservatório mais estável e estratificado ; READ *et al.*, 2011). O número de Wedderburn e Lake Number estão apresentados nas Equações ((4) e ((5)), respectivamente.

$$W = \frac{g' z_e^2}{u_*^2 L_s} \quad (4)$$

$$L_N = \frac{S_T(z_e + z_h)}{2\rho_h u_*^2 A_s^{1/2} z_v} \quad (5)$$

Na Equação 4, que representa o número de Wedderburn, $g' = g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_h} \right)$ é a aceleração da gravidade (m/s^2) reduzida devido à mudança da gravidade ($\Delta\rho$) entre o hipolímnio (ρ_h) e o epilímnio, u^* é a velocidade de fricção da água devido à ação do vento (m/s), L_s é o *fetch* do reservatório (m) e z_e é a profundidade no fundo do epilímnio (m). Quando o valor do número de Wedderburn é igual ou inferior a 1, as forças cinéticas (denominador) e de inércia (numerador) estão equilibradas, representando o valor crítico. Nesse cenário, a turbulência interna é a principal responsável pelo aprofundamento da camada de mistura e há uma maior possibilidade de inclinação da termoclina em direção à superfície, arrastando as águas do metalímnio para a camada de mistura na superfície. Para $W \geq 1$, a estratificação é mantida (READ *et al.*, 2011).

Na Equação 5, que representa o Lake Number, S_T é a estabilidade de Schmidt, ρ_h é a densidade da água no hipolímnio (kg/m^3), u^* é a velocidade de fricção da água devido à ação do vento (m/s), A_s é a área superficial (m^2), z_v é a profundidade do centro de volume do reservatório (m), z_e é a profundidade do fundo do epilímnio e z_h é a profundidade do fundo do metalímnio. Assim como o número de Wedderburn (W), valores mais baixos de L_N representam estratificação fraca, com potencial para mistura. Para $L_N > 1$, a estratificação é forte e o vento agita apenas as porções superiores do epilímnio e, a partir disso, espera-se que aconteça pouca mistura no hipolímnio e pouco desequilíbrio da termoclina (IMBERGER; PATTERSON, 1981).

3.3 Processos hidrodinâmicos

3.3.1 Leis de conservação

Os processos hidrodinâmicos são governados por três principais leis de conservação: conservação da massa, conservação da energia e conservação da quantidade de movimento, que unidas tornam-se essenciais para a compreensão e estudo da hidrodinâmica e qualidade da água (KUNDU *et al.*, 2016). As equações para cada lei estão descritas a seguir.

A equação da conservação da massa estabelece uma relação entre a massa que entra e que sai em um volume de controle (V_c), resultando na variação de massa dentro dos limites deste volume. Ou seja:

$$m_e - m_s = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (6)$$

Onde m_e e m_s correspondem aos fluxos de massa que entram e que saem do volume de controle (VC), respectivamente e $\frac{dm_{vc}}{dt}$ corresponde à taxa de variação de massa dentro do volume de controle (VC).

Considerando apenas o balanço de massa de água, a equação de conservação da massa pode ser representada pela Equação ((7)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Onde ρ é a densidade da água (kg/m^3), ∇ é o operador divergente e $\vec{v}$ é o vetor velocidade. A forma diferencial da Equação 8 é conhecida como equação da continuidade (JI, 2008) e pode ser expressa pela Equação (9).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Onde u , v e w são os componentes de velocidade nas direções x , y e z .

A energia dentro de um sistema pode se manifestar como calor ou trabalho, podendo ser transferida tanto para dentro quanto para fora desse sistema (KUNDU *et al.*, 2016). De acordo com o princípio da conservação de energia, a variação líquida de energia de um sistema é igual ao saldo entre a quantidade de energia que entra e a que sai do sistema (JI, 2008).

De acordo com Popescu (2014), a equação de energia deve considerar tanto a contribuição da energia cinética quanto da energia potencial, representadas pelo termo $\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right)$. Logo, a equação de conservação de energia pode ser representada pela Equação ((9)):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{\overline{u^2}}{2} \right) \vec{u} \right] = \nabla(k \nabla T) - \nabla(\vec{u} p) + \nabla(\vec{u} \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \vec{u} \quad (9)$$

Onde e é a energia potencial, $\vec{\tau}$ é a tensão de cisalhamento, k é um coeficiente relativo à temperatura, e T é a temperatura.

Na hidrodinâmica, além das forças externas que atuam sobre lagos e reservatórios, como o vento, outras três forças também exercem influência: a força gravitacional, o gradiente de pressão da coluna d'água e as forças viscosas, relacionadas tanto à viscosidade do fluido quanto à turbulência (JI, 2008). Levando em consideração essas influências, a equação da conservação da quantidade de movimento pode ser representada pela Equação ((10)).

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \overrightarrow{f_{vis}} \quad (10)$$

Onde $\overrightarrow{f_{vis}}$ é a força viscosa, p é a pressão da água e $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Para fluidos newtonianos, nos quais a tensão de cisalhamento está linearmente relacionada à taxa de deformação, a contribuição das forças viscosas pode ser expressa como:

$$\overrightarrow{f_{vis}} = \nabla \vec{\tau} = \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (11)$$

Onde $\vec{\tau}$ é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade dinâmica, ou absoluta, e ∇^2 é o operador Laplaciano (POPESCU, 2014). Esse operador, em sistema de coordenadas Cartesiano, é definido pela Equação ((12)).

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (12)$$

Ao combinar os termos da Equação (12) para cada uma das três dimensões, podemos obter a forma vetorial da equação de Navier-Stokes, ilustrada na Equação ((13)), para o caso de escoamento de fluidos newtonianos incompressíveis com viscosidade constante (POPESCU, 2014).

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (13)$$

Para escoamentos turbulentos, no entanto, a equação de Navier-Stokes precisa ser modificada para levar em consideração as flutuações associadas à turbulência. Isso é realizado por meio da decomposição de Reynolds, em que as variáveis de

velocidade e pressão são divididas em componentes médias e flutuantes. A equação resultante, conhecida como equação de Reynolds, introduz o termo relacionado às tensões de Reynolds, que modelam os efeitos da turbulência sobre o escoamento (KUNDU *et al.*, 2016).

A equação de Navier-Stokes, considerando as tensões de Reynolds, é dada por:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (15)$$

O termo $-\partial \overline{u'_i u'_j} / \partial x_j$ representa as tensões de Reynolds, que surgem a partir das flutuações das velocidades em torno das componentes médias. Esses termos necessitam de modelos de turbulência para serem resolvidos e para descreverem o comportamento da turbulência no escoamento.

3.3.2 Advecção e dispersão

Quando há a entrada de uma vazão afluyente em um lago ou reservatório, as características ambientais do corpo hídrico são modificadas em relação ao nível d'água, temperatura e concentração de elementos químicos. No que diz respeito a esses elementos, fatores como o transporte hidrodinâmico e as reações químicas ou biológicas desempenham um papel fundamental na determinação da concentração resultante (JI, 2008; RIVERSON *et al.*, 2013).

O movimento que ocorre no sistema pode ser classificado em duas categorias: i) Advecção: refere-se ao transporte de uma substância através do movimento de um fluido. A advecção é resultado do movimento em larga escala do fluido e não é influenciada pelo movimento aleatório das partículas, podendo ser um mecanismo de transporte dominante em fluidos com correntes fortes, como rios e oceanos. ii) Difusão/Dispersão: refere-se à propagação de uma substância, como um poluente ou nutriente, em um fluido devido à mistura e difusão. A dispersão ocorre devido ao movimento aleatório das partículas do fluido e é influenciada por fatores como velocidade, temperatura e gradientes de densidade. Pode ser dividida entre difusão molecular, resultante do movimento aleatório das moléculas, e difusão turbulenta, produzida por redemoinhos.

O transporte de substâncias no meio compreende dois componentes, o fluxo advectivo e o fluxo dispersivo, definidos como a massa que percorre uma unidade de área por unidade de tempo. No fluxo advectivo, o transporte de massa de poluente (J_a) acontece na mesma direção do fluxo e depende da velocidade da água ($\vec{v}$) e da concentração (C), representado pela Equação ((6)). O fluxo dispersivo é um fenômeno que ocorre durante o transporte de substâncias na água, sendo causado pela difusão e pela turbulência. A difusão ocorre devido à diferença de concentração de uma substância em diferentes partes da água, e sua resultante é descrita pela Lei de Fick. No entanto, essa lei não considera a mudança da concentração ao longo do tempo (CHAPRA, 2008). Já a turbulência pode ocorrer em correntes de água e ocasionar a mistura, resultando em um transporte de substâncias mais rápido e uniforme. Para descrever os dois processos, utiliza-se a decomposição de Reynolds (JI, 2008; CHAPRA, 2008), apresentada na Equação ((147)).

$$J_a = C * \vec{v} \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (14)$$

Onde, T é a temperatura, u, v, w são as velocidades nas direções x, y e z, respectivamente. D_{tx}, D_{ty}, D_{tz} são os coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z, respectivamente.

3.3.3 Balanço de massa

Utilizando-se o princípio de conservação da massa, a variação na concentração de constituintes pode ser obtida através da Equação ((8)), e ao contabilizar entradas e saídas, reações e trocas nos sistemas, essa variação pode ser representada, para o caso unidimensional, a partir da equação:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S + R + QL \quad (18)$$

Onde, C é a concentração do reagente, t é o tempo, x é a distância na direção x, U é a velocidade de advecção na direção x, D é o coeficiente de dispersão e mistura, o termo à esquerda representa a variação da concentração em relação ao tempo, o

primeiro e o segundo termo à direita representam a advecção e a dispersão, respectivamente, S é a sedimentação, R é a taxa de reação e QL são as cargas externas ao sistema (JI, 2008).

3.3.4 Balanço de calor

O balanço total de calor em um reservatório inclui os efeitos das trocas de calor que ocorrem com a atmosfera e com o fundo do reservatório, entradas e saídas, além do calor gerado por reações químicas e biológicas que acontecem dentro do sistema (JI, 2008).

Os processos radiativos, como a radiação de onda curta emitida pelo sol e a radiação de onda longa emitida pela atmosfera e pela superfície da água, e as trocas de calor turbulentas, como a transferência de calor latente através da evaporação da água e a troca de calor sensível devido à diferença de temperatura entre o ar e a água, são responsáveis pelo fluxo de calor entre a atmosfera e a coluna d'água do reservatório (ESTEVES, 2011).

O fluxo de calor líquido pode ser expresso pela Equação (159).

$$H_{liq} = H_s + H_L + H_E + H_C \quad (159)$$

Onde, H_{liq} é o fluxo de calor líquido na interface ar-água, H_s é o fluxo de calor através de ondas curtas oriundas da radiação solar, H_L é o fluxo de calor através de ondas longas emitidas pela atmosfera e pelo corpo d'água, H_E é o fluxo de calor latente através da evaporação e H_C é o fluxo de calor sensível. Algumas fontes menores de calor, como o calor gerado das reações químicas e biológicas, a troca de calor entre a superfície e o fundo do reservatório são comumente desprezadas (JI, 2008).

A radiação solar, ou radiação de ondas curtas, é o componente mais importante no balanço de calor, por conseguir penetrar e distribuir calor na coluna d'água, ao contrário dos demais componentes. Quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, uma parte dessa energia emitida sofre espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos. Fatores como a altitude do sol, que varia diariamente, o efeito de dispersão e absorção na atmosfera provocado pela cobertura de nuvens e o

reflexo da superfície da água, são determinantes na quantidade de radiação solar que irá incidir e penetrar na coluna d'água (CHAPRA, 2008).

A radiação líquida de onda longa que ocorre na interface água – ar é resultante de dois processos: a radiação descendente da atmosfera e a radiação ascendente emitida pela superfície do reservatório.

A radiação atmosférica está diretamente relacionada com a temperatura atmosférica, nebulosidade e outras condições atmosféricas (TUNDISI e TUNDISI, 2008). Durante a noite, em condições nubladas a temperatura da água de um reservatório pode ser afetada pela radiação atmosférica. Isso ocorre, porque, nesse período, a radiação solar não está presente para aquecer a água, e a atmosfera resfria a superfície do reservatório por meio de trocas radiativas (MARTIN; MCCUTCHEON; SCHOTTMAN, 1999).

A quantidade de radiação atmosférica que atinge o reservatório é determinada pela aplicação da Lei de Stephan-Boltzman, que incluiu o coeficiente de emissividade da atmosfera ε (HENDERSON-SELLERS, 1986). Considerando o efeito da reflexão pela superfície e reflexão e absorção pelas nuvens, a Equação (20) descreve a relação para a radiação atmosférica.

$$H_R = (1 - r)\varepsilon\sigma\bar{T}_a^2 g(F_c) \quad (20)$$

Onde, H_R é a magnitude da radiação atmosférica, r é o coeficiente de reflexão ($r = 0,03$), ε é o coeficiente de emissividade e depende da pressão e vapor e da temperatura do ar (para condições de céu limpo e baixa temperatura varia entre 0,7 e 1,0), T_a é a temperatura do ar (em K), F_c é a fração do céu coberta por nuvens.

A perda de calor mais significativa em um corpo d'água ocorre devido ao calor latente gerado durante o processo de evaporação (JI, 2008). Nesse processo, há um resfriamento da superfície devido à utilização da energia térmica da água no rompimento das ligações intermoleculares, transformando a água líquida em vapor (MARTIN; MCCUTCHEON; SCHOTTMAN, 1999). Essa transferência de calor está diretamente relacionada à entrada de energia na forma de radiação solar e pode ser

utilizada para estimar variáveis como a taxa de evaporação, pressão de vapor, entre outras (ESTEVEZ, 2011).

O fluxo de calor latente pode ser calculado a partir da Equação ((161).

$$H_E = \rho L_E E \quad (161)$$

Onde, H_E é o fluxo de calor latente em W/m^2 , ρ é a densidade da água em kg/m^3 , L_E é o calor latente da água em J/k e E é a taxa de evaporação em m/s .

A Equação (16) pode ser utilizada para estimar a taxa de evaporação, uma vez que essa é um componente significativo no balanço hídrico, principalmente, em reservatórios tropicais onde as temperaturas mais elevadas da água influenciam na taxa de evaporação (JI, 2008). Para o cálculo da mudança de profundidade da água, ocasionada pela evaporação, a Equação ((172) pode ser utilizada.

$$\Delta z = E \Delta t = \frac{H_E}{\rho L_E} \Delta t \quad (172)$$

Onde, Δt é o intervalo de tempo em segundos e Δz é a mudança de profundidade em um período de tempo, em metros.

A pressão de vapor real do ar é um parâmetro importante para o cálculo do fluxo de calor latente. A pressão de vapor real (e_a) e a pressão de vapor de saturação (e_s) dependem do valor da umidade relativa (R_h) (HENDERSON-SELLERS, 1986)

A pressão de vapor real e_a pode ser expressa a partir da Equação ((183), e e_s pode ser obtida a partir de uma equação empírica expressa na Equação ((194).

$$e_a = e_s \frac{R_h}{100} \quad (183)$$

$$e_s = 6,112 \exp \left(\frac{17,67T}{T + 243,5} \right) \quad (194)$$

Entende-se calor sensível como o fluxo de calor transferido entre a água e a atmosfera ocasionado pela diferença de temperatura entre eles. Esse calor é transferido a partir

de processos turbulentos que ocorrem entre o ar e a água e é influenciado tanto por esses processos quanto por eventos de estratificação de densidade (CHAPRA, 2008). Para o cálculo do calor sensível, admite-se que a transferência de calor aumenta na medida em que a diferença de temperatura entre a água e o ar aumenta, sendo influenciada também pela velocidade do vento (JI, 2008).

O fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível estão comumente relacionados, uma vez que ambos são afetados pelas mesmas variáveis da evaporação, como a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. Isso ocorre, pois, a evaporação é uma forma de transferência de calor que envolve tanto o fluxo de calor latente (relacionado à mudança de fase da água) quanto ao fluxo de calor sensível (relacionado à troca de calor entre a superfície da água e o ar) (MARTIN *et al.*, 1999; JI, 2008). Essa relação pode ser expressa a partir da Equação ((205).

$$\frac{H_C}{H_E} = C_B \frac{p_a}{p_0} \frac{T - T_a}{e_s - e_a} \quad (205)$$

Onde, H_C é a troca de calor sensível devido à condução térmica, H_E é a troca de calor latente devido a evaporação, C_B é o coeficiente de Bowen ($=0,62 \text{ mb/}^\circ\text{C}$), p_a é a pressão atmosférica, p_0 é a pressão atmosférica de referência no nível do mar ($=1013 \text{ mb}$), T é a temperatura da água ($^\circ\text{C}$), T_a é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

3.3.5 Circulação vertical e modelos de turbulência

Nos reservatórios, a circulação interna é caracterizada por movimentos turbulentos que ocorrem tanto na direção vertical quanto na horizontal, muitas vezes formando redemoinhos. Esses movimentos de mistura são essenciais para a geração de turbulência, que, por sua vez, desempenha um papel fundamental na homogeneização vertical da coluna d'água. Em corpos d'água rasos, a turbulência pode ser gerada tanto na superfície quanto no fundo (JI, 2008).

No sentido vertical, o transporte ocasionado por esses movimentos internos e por difusão turbulenta pode ser suficiente para misturar completamente a coluna d'água. Difusão turbulenta é um processo de mistura em que a turbulência é responsável pelo transporte dos constituintes na água, enquanto que a difusão molecular é causada pelo movimento aleatório das moléculas, sem participação da turbulência. Em águas

superficiais, a difusão turbulenta é geralmente muito mais intensa do que a difusão molecular, uma vez que a turbulência gerada pelo cisalhamento vertical tende a misturar os constituintes dissolvidos, atuando na redução de gradientes acentuados (MARTIN *et al.*, 1999; JI, 2008; CHAPRA, 2008).

Em um reservatório, a mistura vertical é geralmente ocasionada pela ação dos ventos na superfície através da transmissão da turbulência para porções inferiores da coluna d'água. A quantidade de mistura vertical é controlada, em grande parte do tempo, pela estratificação resultante das diferenças de densidade na coluna d'água, onde a forte estratificação vertical inibe a ocorrência dessa mistura (CHAPRA, 2008).

Para calcular o efeito da mistura vertical na água, os modelos numéricos utilizam equações que levam em conta a difusão turbulenta horizontal e vertical. A mistura vertical geralmente é representada por meio de um coeficiente de mistura constante, obtido a partir de relações empíricas. Esse coeficiente, em outras palavras, é uma medida de quanto a água se mistura em um determinado ponto da coluna d'água, levando em consideração a turbulência e a viscosidade do fluido (DELTARES, 2020). Esse coeficiente, determinado a partir de um modelo de turbulência, é utilizado nas equações de transporte de momento e de massa.

Dentre os modelos existentes, destacam-se (DELTARES, 2020):

- Modelo algébrico (ALG): baseia-se na resolução de equações algébricas para determinar os coeficientes de transporte de momento e de massa. É um modelo simples e requer poucos parâmetros de entrada, sendo utilizado em simulações de escoamento;
- Modelo de mistura de Prandtl (PML): considera a turbulência como um conjunto de vórtices que se movimentam dentro do fluido. A turbulência é então representada através da relação entre a escala do vórtice e o comprimento característico do escoamento. O PML é um modelo relativamente simples e é adequado para escoamentos de baixa turbulência;
- Modelo de turbulência k-L: nesse modelo a turbulência é representada através de duas equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e a escala de comprimento L . Esse modelo é adequado para escoamentos com variações

significativas de comprimento e velocidade, sendo amplamente utilizado em simulações de ondas oceânicas;

- Modelo de turbulência k-épsilon: é um dos modelos mais utilizados em simulações numéricas e é baseado na resolução de duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta k e outra para a taxa de dissipação ϵ . Esse modelo é adequado para escoamentos turbulentos e amplamente utilizado em simulações de reservatórios por representar adequadamente a turbulência em fluxos com geometrias complexas e diferentes condições de contorno.

Os lagos e os reservatórios podem ser classificados de acordo com seu padrão térmico vertical e em relação à sua evolução durante os ciclos de estratificação e mistura. Assim, os sistemas podem ser classificados em (TUNDISI; TUNDISI, 2008):

- Lagos monomíticos: apresentam um período regular de circulação total. Existem dois tipos de lagos monomíticos: os quentes, que circulam durante o inverno e não apresentam cobertura de gelo; e os frios, que apresentam estratificação inversa no inverno. Nesse caso, a água mais fria (0°C) se mantém na superfície, enquanto a água mais quente (4°C) permanece nas camadas mais profundas. Isso ocorre, pois, a água atinge maior densidade a 4°C , fazendo com que a água mais densa permaneça no fundo e a menos densa flutue na superfície. A circulação acontece durante a primavera e o verão.
- Lagos dimíticos: apresentam dois períodos anuais de circulação. Durante o verão, ocorre a estratificação, permanecendo até o outono, quando ocorre a circulação da coluna d'água. Segue-se um período de resfriamento térmico e na primavera, o aquecimento térmico produz uma nova circulação decorrente do desaparecimento da camada de gelo. Lagos dimíticos podem ocorrer em regiões com elevada altitude.
- Lagos polimíticos: apresentam vários períodos de circulação ao longo do ano. Esses lagos possuem variações diurnas de temperatura e formação de termoclina durante esse período, que podem ser mais importantes que as variações estacionais. Em geral, lagos rasos que sofrem com a ação dos ventos apresentam esse tipo de circulação.

- Lagos meromíticos: nunca apresentam circulação completa e possuem uma camada permanente sem circulação, denominada monimolímnia.
- Lagos holomíticos: apresentam sempre circulação completa e não apresenta períodos de estratificação.

3.4 Modelos hidrodinâmicos

3.4.1 Tipos de modelo

Em estudos sobre águas superficiais, os modelos são usualmente divididos em duas grandes categorias principais: físicos e matemáticos. Os modelos físicos são criados para simular o fluxo em uma escala específica e utilizam a água para reproduzir esse fluxo. Por outro lado, os modelos matemáticos propõem representar os processos hidrodinâmicos por meio de equações matemáticas, que são resolvidas numericamente por meio de métodos computacionais (BRUNETTI, FRANCO, 2008). Diferentes modelos numéricos e multidimensionais estão disponíveis para o estudo da hidrodinâmica em reservatórios (SOARES; CALIJURI, 2021; VINÇON-LEITE; CASENAVE, 2019). Esses modelos podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

Modelos unidimensionais representam os processos hidrodinâmicos variando verticalmente, ao longo da coluna d'água, e são usualmente utilizados em estudos com longos períodos de tempo ou com vários reservatórios (BRUCE *et al.*, 2018; SOARES *et al.*, 2019). Por exemplo, Wang (2009) realizou um estudo sobre o impacto dos processos hidrodinâmicos no crescimento de algas utilizando um modelo 1-D e obteve resultados satisfatórios em sua validação. Outros estudos realizaram a utilização de modelos 1-D juntamente com modelos para simulação de fósforo e de transporte de sedimentos (HUANG *et al.*, 2015; NIELSEN *et al.*, 2014). São alguns exemplos de modelos unidimensionais utilizados para essas abordagens: General Lake Model (GLM), Dynamic Reservoir Simulation Model (DYRESM), entre outros (HIPSEY *et al.*, 2019; SOARES *et al.*, 2019; TAKKOUK; CASAMITJANA, 2016; LUO *et al.*, 2018).

Modelos bidimensionais permitem a simulação de processos hidrodinâmicos nas dimensões horizontal (em geral, no sentido longitudinal) e vertical. No entanto, para a realização dessas simulações, o esforço computacional é maior que os dos modelos

unidimensionais (GOLYJESWKI, 2020). Os modelos bidimensionais são comumente empregados em simulações de grandes corpos d'água, em que, no sentido vertical e horizontal, espera-se encontrar variações importantes nas características da água (HAMILTON; HOCKING; PATTERSON, 1997). Destaca-se o CE-QUAL-W2 como um exemplo de modelo 2-D longitudinal vertical e o SisBaHia (Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental) como exemplo de modelo 2-D horizontal para simulações hidrodinâmicas e de qualidade da água em corpos hídricos (MESQUITA *et al.*, 2020; PALMAN *et al.*, 2021).

3.4.2 Modelos hidrodinâmicos tridimensionais

A compreensão e representação dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em ecossistemas aquáticos tem sido aperfeiçoada através da utilização de modelos tridimensionais. Na literatura, esses modelos são utilizados principalmente no detalhamento da dinâmica de estuários, lagunas e ondas oceânicas. Para sistemas lênticos, como lagos e reservatórios, a utilização desses modelos deu-se a partir da necessidade de simular com precisão processos físicos, como mistura vertical e horizontal, e de obter resultados mais próximos da realidade, auxiliando no monitoramento *in situ* (ZAMANI *et al.*, 2014).

Modelos como Delft3D, TELEMAC, MIKE3, *Estuary and Lake Computer Model* (ELCOM), entre outros, têm sido utilizados e aprimorados para águas interiores, principalmente lagos e reservatórios, com o objetivo de entender e simular processos hidrodinâmicos (VAN DER LINDEN *et al.*, 2015; STANSBY *et al.*, 2016; AMADORI *et al.*, 2021), na predição de possíveis impactos que lagos e reservatórios possam vir a sofrer frente a alterações diversas, tais como entrada de poluentes advindos de fontes poluidoras difusas (ZHAO *et al.*, 2013), na captação de água (CHANUDET *et al.*, 2016), deposição de sedimentos (HILLEBRAND; KLASSEN; OLSEN, 2017), entre outros.

Na literatura, a utilização de modelos tridimensionais como abordagem para representação de lagos e reservatórios se estende em diversas partes do mundo, ressaltando a necessidade de compreender a dinâmica desses sistemas em diferentes contextos geográficos. No Canadá, Ye *et al.*, (2019) utilizaram modelo tridimensional para investigar como a formação de gelo e os processos de mistura

afetam a variação da temperatura da água na superfície de um reservatório. Na China, os modelos tridimensionais são frequentemente empregados na análise da estrutura térmica de lagos e reservatórios (ZHANG *et al.*, 2022), na investigação influência de variáveis meteorológicas (LIU *et al.*, 2020) e no estudo do impacto da variação de nível d'água na estrutura térmica (LI *et al.*, 2016). Em áreas tropicais, como Brasil, os estudos com modelos tridimensionais têm sido direcionados à compreensão da qualidade da água e ocorrência de florações de algas em reservatórios (DEUS *et al.*, 2013a; PLEC *et al.*, 2021; AMORIM *et al.*, 2021).

Os períodos de simulação adotados em estudos que utilizam modelos tridimensionais variam de acordo com os objetivos específicos de cada pesquisa. Em estudos relacionados à concentração de nutrientes e eutrofização (ZAMANI *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2018) nos quais a dinâmica desses processos ocorre rapidamente, são encontradas simulações em curtos períodos. Por outro lado, em estudos que visam simular eventos extremos (CHEN; YAO; FITRI, 2019) ou transporte de poluentes (SHEN *et al.*, 2002), comumente encontra-se períodos de simulação mais longos, variando de anos a décadas. Além disso, em estudos como o de Okhravl; Sokáč; Velísková, (2022) que investigaram a dinâmica da temperatura da água em um reservatório na Eslováquia, a representação sazonal das trocas de calor foi realizada, analisando o período de simulação ao longo do ano de 2013.

Para a representação das variáveis presentes processos físicos, químicos e biológicos em lagos e reservatórios, os modelos hidrodinâmicos requerem estratégias de modelagem como etapas de calibração, validação, análise de sensibilidade, entre outros (JØRGENSEN, 1995).

Para modelos tridimensionais, o método de calibração dos parâmetros de interesse é executada de diferentes formas, tais como tentativa e erro e calibração automática (BRACHT-FLYR; FRITZ, 2016; BARACCHINI *et al.*, 2020). Na literatura, alguns autores ressaltam que a abordagem de tentativa e erro pode ser uma tarefa demorada, uma vez que alguns parâmetros são dependentes e a alteração nos valores são compensados entre si (BARDOSSY; SINGH, 2008; BARENZUG, 2019) Porém, estudos como os de Liu *et al.*, (2021) e Plec *et al.*, (2021), em reservatórios urbanos,

utilizam-se dessa técnica na calibração de parâmetros relacionados aos fluxos de calor, tais como número de Dalton, número de Stanton, entre outros.

A calibração automática, ao contrário da tentativa e erro, reduz a incerteza do modelo e, simultaneamente, permite a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros (BARDOSSY; SINGH, 2008). Esse tipo de calibração é comumente utilizada em modelos 1D ou 2D, através de métodos de otimização (AFSHAR; KAZEMI; SAADATPOUR, 2011; GAUDARD *et al.*, 2017). A utilização em modelos 1D e 2D deve-se ao custo computacional que essa técnica requer devido ao grande número de execuções e parâmetros a serem estimados. Porém, na literatura, é possível encontrar estudos que aplicaram técnicas de calibração automática em modelos tridimensionais tais como Baracchini *et al.*, (2020) e Piccioni *et al.*, (2022) que utilizaram algoritmo computacional e método Bayesiano combinado com algoritmo de aprendizado de máquina, respectivamente, na calibração do modelo Delft3D em reservatórios urbanos.

A utilização de modelos tridimensionais para fins específicos tem levado à busca por eficiência nos resultados, resultando ao acoplamento desses modelos com outros modelos ou bibliotecas para simulações de processos químicos e biológicos. Além da simulação da proliferação de algas e da análise de padrões espaciais e temporais em eventos de *bloom* de algas, como observado nos estudos de Li *et al.*, (2018) e Wang *et al.*, (2023) na China, modelos tridimensionais também foram utilizados por Coppens *et al.*, (2020) para simular cenários de mudanças climáticas, como o efeito de ondas de calor, em reservatórios na Europa.

A aplicação de modelos tridimensionais oferece vantagens significativas, quando comparados a modelos com diferentes dimensionalidades. A capacidade de representar variáveis em três dimensões permite uma melhor caracterização dos processos hidrodinâmicos e uma análise mais precisa dos fenômenos a serem representados (BACHMANN *et al.*, 2019). Entretanto, a utilização de modelos tridimensionais pode ser desafiador, uma vez que, a alta demanda computacional é uma das principais dificuldades reportadas na literatura (BRETT *et al.*, 2016; GLOCK *et al.*, 2019; AL-ZUBAIDI; WELLS, 2020).

3.4.3 Modelo hidrodinâmico Delft3D

Desenvolvida em 2007 por Deltares, um instituto independente de pesquisa aplicada a corpos hídricos localizado na Holanda, a plataforma Delft3D é um modelo matemático gratuito que se baseia na resolução das equações de Navier-Stokes através do método de diferenças finitas. O modelo é capaz de simular fluxos, processos de advecção e dispersão de poluentes, qualidade da água e processos ecológicos, entre outros. Através do modelo é possível, também, analisar a interação entre esses processos, de forma espacial e temporal, e aplicá-lo em reservatórios, lagos, estuários e oceanos (DELTARES, 2020).

Utilizando simulação hidrodinâmica bidimensional ou tridimensional, o Delft3D calcula o fluxo não permanente e fenômenos de transporte relacionados a forçantes meteorológicas. Além disso, o modelo soluciona equações de conservação da quantidade de movimento, da continuidade e transporte, considerando as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq e resolvendo equações de águas rasas derivadas das equações de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), que descrevem o comportamento do fluido em um ponto específico em um determinado momento. O modelo possui um conjunto de módulos que podem ser executados independentes ou em combinação entre eles, além da troca de dados e resultados entre si quando requerido pelo processo de simulação (DELTARES, 2020).

O grupo de equações existentes no Delft3D consiste nas equação da continuidade (balanço de massa), equação da quantidade de movimento e equação do transporte (DELTARES, 2020). A Equação ((216) apresenta a equação da continuidade para a profundidade média.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (216)$$

Onde, ζ é a diferença entre o nível de referência e o nível d'água, ξ e η são a longitude e latitude, respectivamente, $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ são os coeficientes usados para transformar as coordenadas curvilíneas em retangulares, d é profundidade abaixo do plano de referência, U é a velocidade na profundidade média na direção ξ (m/s²), V é a velocidade na profundidade média na direção η (m/s²) e Q representa a contribuição

por unidade de área através de descargas ou retirada de massa, precipitação ou evaporação.

Equação ((227) descreve a contribuição por área utilizando descarga ou retirada de massa.

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (227)$$

Onde q_{in} e q_{out} são as entradas e saídas de água por unidade de volume, P é a precipitação, E é a evaporação, H é a profundidade total, d é profundidade abaixo do plano de referência no sistema de coordenadas σ (na superfície, $\sigma = 0$ e no fundo $\sigma = -1$).

As Equações ((238) e ((249) apresentam a equação da conservação da quantidade de movimento nas direções ξ e η , respectivamente.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uu}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ - f_v = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (238)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ - f_u = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(u_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (249)$$

Onde, f_v e f_u são os termos existentes da força de Coriolis, P_ξ e P_η são os termos relacionados à pressão, d é profundidade abaixo do plano de referência no sistema de coordenadas σ (na superfície, $\sigma = 0$ e no fundo $\sigma = -1$), F_ξ e F_η são as tensões de Reynolds na horizontal, M_ξ e M_η são as entradas e saídas da equação da conservação da quantidade de movimento e que podem acontecer a partir da ação de forças externas como as estruturas hidráulicas.

A Equação (30) calcula a velocidade vertical a partir da equação da continuidade.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (30)$$

$$= (d + \zeta)(q_{in} - q_{out})$$

Onde, w é a velocidade vertical e d é profundidade abaixo do plano de referência no sistema de coordenadas σ (na superfície, $\sigma = 0$ e no fundo $\sigma = -1$).

Na seção de parâmetros físicos podem ser caracterizados as constantes e coeficientes resultantes de forças externas e que afetam os processos hidrodinâmicos. São esses: gravidade, densidade do ar e da água, salinidade, coeficiente de arraste do vento, rugosidade de fundo, velocidade vertical e horizontal, difusividade horizontal e vertical, modelo de turbulência, profundidade do disco de Secchi, fluxo de calor evaporativo, fluxo de calor convectivo. Além desses coeficientes, podem ser inseridos dados meteorológicos e valores monitorados de velocidade e direção do vento.

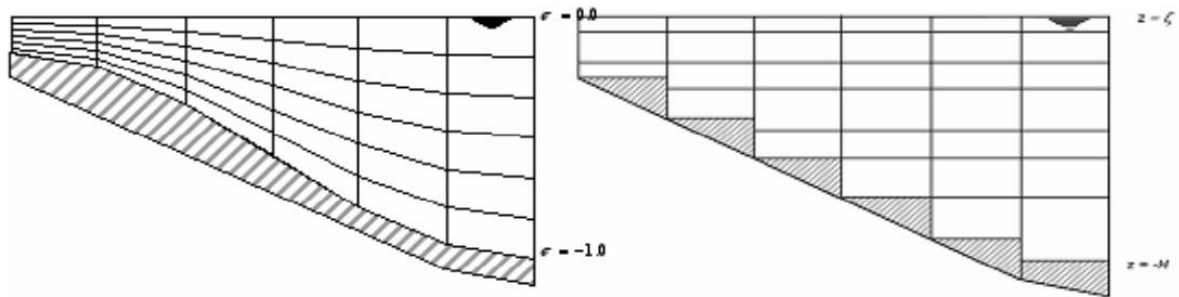
O ambiente de estudo é representado através de uma malha ortogonal e curvilínea, de dimensões variáveis, onde é possível anexar informações morfológicas para dados de batimetria e rugosidade. Na vertical, a representação pode ser feita utilizando dois esquemas de coordenadas distintos: sistema de coordenadas σ (sigma) e o modelo- z (DELTARES, 2020).

Segundo Deltares (2020), o sistema de coordenadas σ é um modelo ajustado aos limites e pode simular as mudanças no fundo e na superfície. Neste modelo, o número de camadas verticais em toda a malha numérica é constante, independente da profundidade, e a espessura das camadas não é uniforme, permitindo uma maior resolução em áreas de interesse como áreas próximas à superfície e ao leito. Em fundos íngremes, combinado à estratificação vertical da temperatura da coluna d'água, o sistema de coordenadas σ introduz uma difusão vertical artificial provocada pelos erros de truncamento no gradiente de pressão entre as camadas.

O sistema de coordenadas Z , ou modelo- z , possui linhas de coordenadas horizontais quase paralelas às interfaces de densidade em regiões com declive acentuado. De acordo com Michael (2013), as camadas do modelo- z têm a vantagem de não induzir a mistura artificial das camadas, ao contrário do sistema de coordenadas sigma. As

linhas de grade horizontal desse sistema não são ajustadas ao limite na direção vertical, e o fundo e a superfície são representados como uma escada, causando um má reprodução da dinâmica do fundo reservatório (DELTARES, 2020). Os modelos de coordenadas são representados esquematicamente pela Figura 2.

Figura 2 - Exemplo de coordenadas sigma (esquerda) e coordenadas Z (direita).



Fonte: Deltares (2020)

Para a execução de um cenário, utiliza-se o módulo hidrodinâmico denominado Delft3D-FLOW. Nesse módulo, o domínio da área de estudo deve ser representado a partir de uma malha numérica com dados morfológicos, a quantidade e espessura de camadas pode ser escolhida, assim como o passo de tempo da simulação. De acordo com Deltares (2020), nesse módulo é possível simular quatro tipos diferentes de constituintes: temperatura, salinidade, poluentes e sedimentos. É possível também simular processos físicos como vento e ondas.

O módulo FLOW possui uma grande diversidade de dados de entrada para condições iniciais e de contorno, que podem ser modificadas e escolhidas a partir dos tipos de dados disponíveis. As condições iniciais são o estado inicial do corpo d'água que será simulado no começo da modelagem, permitindo que o modelo se estabilize e represente com precisão a realidade daquela área. As condições de contorno representam as entradas e saídas do sistema, a serem fornecidas ao modelo e exercendo influência direta nos resultados obtidos (DELTARES, 2020).

Por meio do método numérico de diferenças finitas, o módulo FLOW resolve um conjunto de equações diferenciais combinado com um conjunto de condições iniciais e de contorno bem definidas, utilizando o método de integração no tempo para

alcançar a estabilidade numérica e computacional. Nesse processo, é utilizada a condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), apresentada na Equação ((251).

$$CFL = 2\Delta t \sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} < 1 \quad (251)$$

Onde, Δt é o passo de tempo (s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), H é a profundidade (m), Δx é o tamanho da célula na direção x (m) e Δy é o tamanho da célula na direção y (m).

No módulo FLOW, a viscosidade turbulenta e a difusividade turbulenta são calculadas de formas diferentes nas direções vertical e horizontal. Segundo Ji (2008), em escoamentos turbulentos, o mecanismo de difusão é realizado por movimentos moleculares e intensificado por movimentos turbulentos. Ou seja, ao modelar a turbulência, a viscosidade turbulenta e a difusividade molecular são somadas para se determinar o coeficiente de difusividade. Na direção horizontal, obtém-se o valor dos coeficientes de viscosidade turbulenta (v_H) e de difusividade turbulenta (D_H) através das Equações ((262) e ((273), respectivamente.

$$v_H = v_V + v_H^{back} \quad (262)$$

$$D_H = D_V + D_H^{back} \quad (273)$$

Onde, v_v é a viscosidade vertical turbulenta (m^2/s), v_H^{back} é o coeficiente de viscosidade horizontal turbulenta de fundo (m^2/s), D_V é o coeficiente de difusividade vertical (m^2/s), e D_H^{back} é o coeficiente de difusividade horizontal turbulenta de fundo (m^2/s).

Na direção vertical, os coeficientes de viscosidade turbulenta (v_V) e de difusividade turbulenta (D_V) são calculados a partir das Equações ((284) e ((295), respectivamente.

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{back}) \quad (284)$$

$$D_V = \frac{v_{mol}}{\sigma_{mol}} + \max(D_{3D}, D_V^{back}) \quad (295)$$

Onde, ν_{mol} é a viscosidade cinemática da água (m^2/s), σ_{mol} é o número de Prandtl, ν_{3D} é viscosidade turbulenta (m^2/s) calculada pelo modelo de turbulência k- ϵ , ν_V^{back} é o coeficiente de viscosidade vertical turbulenta de fundo (m^2/s), D_{3D} é a difusividade turbulenta (m^2/s) calculada pelo modelo de turbulência k- ϵ , D_V^{back} é o coeficiente de difusividade vertical turbulenta de fundo (m^2/s).

Os coeficientes de viscosidade turbulenta são dependentes da malha numérica, ou seja, eles variam em malhas numéricas mais ou menos refinadas, influenciando seu valor (DELTARES, 2020).

O módulo FLOW fornece opções para modelar a troca de calor que ocorre na superfície livre. As trocas de calor são estimadas levando em consideração os efeitos da radiação solar (ondas curtas) e radiação atmosférica (ondas longas), além da perda de calor emitido pelo corpo d'água (radiação de fundo), convecção e evaporação (DELTARES, 2020). A Equação ((306) apresenta o fluxo de calor que ocorre através da superfície livre.

$$Q_{tot} = Q_{sn} + Q_{an} + Q_{br} + Q_{ev} - Q_{co} \quad (306)$$

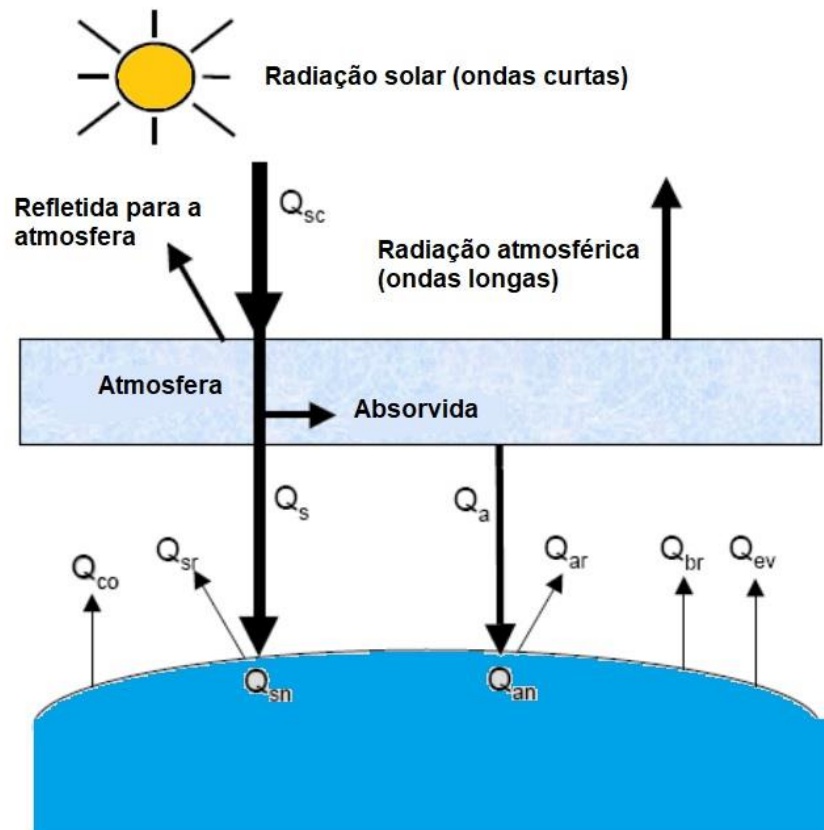
Onde, Q_{sn} é a radiação solar líquida incidente (ondas curtas), Q_{an} é a radiação atmosférica líquida incidente (onda longas), Q_{br} é a radiação de fundo (ondas longas), Q_{ev} é o fluxo de calor evaporativo (calor latente), Q_{co} é a troca de calor convectivo (calor sensível).

A troca de calor na camada da superfície é apresentada pela Equação ((317) abaixo.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q_{total}}{\rho_w c_p \Delta z_s} \quad (317)$$

Onde, Q_{total} é o fluxo de calor total que ocorre na interface ar-superfície ($J.m^{-2}.s$), ρ_w é a densidade específica da água ($kg.m^{-3}$), c_p é a calor específico da água do mar ($= 3,930 J.kg^{-1}K$) e Δz_s é a espessura da camada superficial (m).

Figura 3 - Esquema da troca de calor na superfície de um reservatório.



Q_{sc} : radiação solar na condição de céu limpo [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{co} : troca de calor convectivo (calor sensível) [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{sr} : radiação solar refletida [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{sn} : radiação solar líquida incidente (ondas curtas), Q_a : radiação atmosférica (radiação de ondas longas) [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{ar} : radiação atmosférica refletida [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{an} : radiação atmosférica líquida incidente, Q_{br} : radiação de fundo (radiação de ondas longas) [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_s : radiação solar (radiação solar de onda curta) [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$], Q_{ev} : fluxo de calor evaporativo (calor latente) [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$]. Fonte: Adaptado de Deltares (2020)

Quando adicionado o processo de temperatura à simulação são apresentados seis diferentes modelos para representação dos fluxos de calor na superfície. Cada modelo é aplicado a uma situação diferente e sua escolha pelo usuário depende da disponibilidade de dados. São eles: sem fluxo, fluxo absoluto (radiação solar total), fluxo absoluto (radiação solar líquida), excesso de temperatura, Murakami e *Ocean* (DELTAIRES, 2020). A seguir, será descrito o modelo de troca de calor *Ocean*, uma vez que é o modelo mais completo oferecido pelo módulo FLOW e amplamente utilizado em lagos e reservatórios (ZHAO *et al.*, 2012; SOULIGNAC *et al.*, 2017; PLEC *et al.*, 2021; SHARAF *et al.*, 2021; LANG *et al.*, 2022).

O modelo *Ocean* considera que nem toda a radiação é absorvida pela superfície da água. A radiação solar emitida é dividida em uma porção composta por ondas longas,

sendo absorvida pela superfície, e outra parte é enviada para o fundo do reservatório. A Equação ((328) apresenta a absorção do calor pela água.

$$Q_{sn}(h) = \frac{\gamma e^{-\gamma h}}{1 - e^{-\gamma H}} (1 - \beta) Q_{sn} \quad (328)$$

Onde, β é parte da radiação solar incidente líquida (Q_{sn}) absorvida pela superfície em função do comprimento de onda e da distância do fundo até a superfície do reservatório (h), γ é o coeficiente de atenuação da luz, em m^{-1} , e está relacionado com a profundidade do disco de Secchi através da equação $\gamma = \frac{1,7}{H_{Secchi}}$ e H é a profundidade total (m).

O fluxo de radiação solar é influenciado pela posição geográfica da área de estudo e pelo horário local. O fluxo de energia que chega até o reservatório depende diretamente do ângulo formado entre a radiação incidente e a superfície da Terra (DELTARES, 2020). Ao atingir a superfície, uma parte da radiação é refletida e depende da latitude e da estação do ano. A fração refletida é representada pelo albedo de superfície e assume o valor constante de 0,06.

A evaporação é diretamente influenciada por fatores meteorológicos, como a pressão de vapor e a convecção ocasionada pelo vento, e depende de condições entre a água na superfície e o ar acima dela (DELTARES, 2020). A Equação ((339) apresenta a descrição desse processo.

$$Q_{ev} = L_v E \quad (339)$$

Onde, L_v é o calor latente de vaporização em J/kg e é obtido através da expressão $L_v = 2,5 * 10^6 - 2,3 * 10^3 T_s$, sendo T_s a temperatura da água na superfície. E é a massa de água evaporada por unidade de área e por tempo.

Para obtenção do valor de E , utiliza-se a Equação (40), que apresenta a Lei de Dalton para estimar a transferência de massa.

$$E = f(U_{10})(e_s - e_a) \quad (40)$$

Onde, U_{10} é a velocidade do vento medida 10 m acima da superfície da água, e_s é a pressão de vapor saturado e e_a é a pressão de vapor real.

Para obter os valores das pressões de vapor, o modelo *Ocean* aplica as Equações ((341) e ((352).

$$e_a = r_{hum} 10^{\frac{0,7859+0,3477T_a}{1,0+0,00412T_a}} \quad (341)$$

$$e_s = 10^{\frac{0,7859+0,3477T_s}{1,0+0,00412T_s}} \quad (352)$$

Onde, r_{hum} é a umidade relativa do ar e T_a é a temperatura do ar.

Para o cálculo da taxa de evaporação é mais apropriado considerar a umidade relativa, ao invés da diferença entre a pressão de vapor saturado e pressão de vapor real. Isso deve-se ao fato de que a umidade relativa, que leva em consideração a temperatura do ar, é uma medida mais direta da quantidade de água presente na atmosfera. Se a diferença na pressão de vapor fosse utilizada, seria necessário medir a pressão do vapor d'água tanto na superfície da água quanto na atmosfera, sendo um processo mais difícil e menos preciso do que medir a umidade relativa (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

A contribuição do fluxo de calor evaporativo (Q_{ev}) pode ser dividida em duas categorias: convecção forçada ($Q_{ev,forced}$) e convecção livre ($Q_{ev,free}$), onde a primeira é influenciada diretamente pelo vento e a segunda é influenciada pelas forças flutuantes ocasionadas pela diferença de densidade entre a superfície da água e a atmosfera. Quando há diferença de densidade, é criada uma condição instável na interface superfície – atmosfera. Essas contribuições são expressas pela Equação ((363) (DELTARES, 2020).

$$Q_{ev} = Q_{ev,forced} + Q_{ev,free} \quad (363)$$

A convecção forçada pode ser expressa pela Equação (44).

$$Q_{ev,forced} = L_v + \rho_a f(U_{10}) \{q_s(T_s) - q_a(T_a)\} \quad (374)$$

Onde, q_s e q_a são a umidade específica do ar saturado e do ar remoto (medido a 10 metros acima do nível d'água), respectivamente. Os valores para esses termos podem ser obtidos a partir das Equações (45) e ((386)).

$$q_s(T_s) = \frac{0,62e_s}{P_{atm} - 0,38e_s} \quad (45)$$

$$q_a(T_a) = \frac{0,62e_a}{P_{atm} - 0,38e_a} \quad (386)$$

O termo $f(U_{10})$, que representa uma função do vento, pode ser obtida a partir da Equação (47).

$$f(U_{10}) = c_e U_{10} \quad (397)$$

Onde, c_e é o número de Dalton.

A perda de calor por evaporação associada à convecção livre pode ser importante quando há gradientes inversos de temperatura e densidade da água. Nesses casos, a influência da velocidade do vento é insignificante resultando em uma pequena parcela de perda de calor por convecção forçada (DELTARES, 2020). A convecção livre pode ser obtida através da Equação (48).

$$Q_{ev,free} = k_s L_v \bar{\rho}_a (q_s - q_a) \quad (408)$$

O valor da densidade média do ar, $\bar{\rho}_a$, pode ser obtido através da Equação (9).

$$\bar{\rho}_a = \frac{\rho_{a0} + \rho_{a10}}{2} \quad (49)$$

O valor do coeficiente de transferência de calor, k_s , é definido a partir das Equação ((e ((41)).

$$k_s = 0 \quad se \quad \rho_{a10} - \rho_{a0} \leq 0 \quad (50)$$

$$k_s = C_{fr.conv} \left\{ \frac{g\alpha^2}{\nu_{ar}\rho_a} (\rho_{a10} - \rho_{a0}) \right\}^{\frac{1}{3}} \quad se \quad \rho_{a10} - \rho_{a0} \geq 0 \quad (41)$$

O valor do coeficiente de convecção livre é adotado pelo modelo como 0,14 (DELTARES, 2020), assume-se o valor de $16,0 \times 10^{-6}$ para a viscosidade do ar, ν_{ar} , e a difusividade molecular do ar (α) é obtida através da relação $\alpha = \frac{\nu_{ar}}{\sigma}$, onde σ é o número de Prandtl que assume o valor de 0,7.

A Equação ((42) representa a densidade do ar saturado (ρ_{a0}) e a Equação (43 expressa a densidade do ar remoto (ρ_{a10}).

$$\rho_{a0} = \frac{\frac{100P_{atm}-100e_s}{R_{dry}} + \frac{100e_s}{R_{vap}}}{T_s + 273,15} \quad (42)$$

$$\rho_{a10} = \frac{\frac{100P_{atm}-100e_a}{R_{dry}} + \frac{100e_a}{R_{vap}}}{T_{air} + 273,15} \quad (43)$$

Onde, R_{dry} representa a constante específica dos gases para o ar seco (287,05 J/kgK) e R_{vap} é a constante para o vapor de água (461,495 J/kgK).

O fluxo de calor sensível também é dividido em dois tipos: convecção forçada ($Q_{co,forced}$) e convecção livre ($Q_{co,free}$), expresso na Equação ((444) (DELTARES, 2020).

$$Q_{ev} = Q_{ev,forced} + Q_{ev,free} \quad (44)$$

O fluxo do calor sensível devido à convecção forçada é expresso pela Equação ((455).

$$Q_{co,forced} = \rho_a c_p g(U_{10})(T_s - T_a) \quad (45)$$

Onde c_p assume o valor de 1,004.0 J/kgK e é o calor específico do ar. A função da velocidade do vento $g(U_{10})$ é definida pela Equação ((466).

$$g(U_{10}) = c_H U_{10} \quad (46)$$

Onde, c_H é o número de Stanton.

A transferência de calor por convecção livre é expressa na Equação ((477).

$$Q_{co,free} = k_s \overline{\rho_a} c_p (T_s - T_a) \quad (477)$$

No modelo *Ocean*, a radiação atmosférica Q_{an} (radiação atmosférica) e Q_{br} (radiação de fundo) fazem parte do fluxo total de radiação de onda longa Q_{eb} .

A radiação atmosférica refere-se à quantidade de energia radiante emitida pela atmosfera que atinge a superfície do reservatório. Essa energia radiante pode ser absorvida pela água do reservatório, resultando em um aumento da temperatura na água, ou pode ser refletida pela superfície de volta para a atmosfera (DALE; GILLESPIE, 1977).

A radiação de fundo refere-se à radiação emitida pela superfície do reservatório. Essa radiação é uma das componentes do balanço de radiação de onda longa na superfície do reservatório e contribui para o aquecimento ou resfriamento da água, dependendo de sua intensidade e do saldo entre as demais componentes do balanço de radiação (DELTARES, 2020).

No modelo *Ocean*, o fluxo total de radiação de onda longa Q_{eb} é computado e chamado de radiação efetiva de retorno. A Equação ((488) apresenta essa relação.

$$Q_{eb} = \varepsilon \sigma \overline{T_s^4} (0.39 - 0.05 \sqrt{e_a}) (1.0 - 0.6 F_c^2) \quad (488)$$

Sendo F_c a fração do céu coberta por nuvens.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A Lagoa da Pampulha é um reservatório urbano hipereutrófico (SILVA *et al.*, 2016) localizado na parte Nordeste da cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais (Figura 4). O reservatório possui volume de $9,9 \times 10^3 \text{ m}^3$, profundidade média de 5,1 m e máxima de 16,2 m e área de contribuição de $97,91 \text{ km}^2$. A altitude média da bacia da Lagoa é de 850 m, estando a superfície da Lagoa a 801 m (CPRM, 2001).

A região de Belo Horizonte possui o clima caracterizado como Tropical de Altitude, com duas estações distintas marcadas por um inverno seco e um verão chuvoso. De acordo com as classificações de Köppen, o clima é caracterizado como C_{wa} nas duas

ocasiões. A temperatura média anual é de aproximadamente 27,1°C, com máximas médias de 28,8° C em fevereiro e mínimas médias de 13,1° C em julho (CPRM, 2001).

A bacia hidrográfica da Lagoa da Pampulha, localizada nos municípios de Belo Horizonte e Contagem, apresenta uma divisão territorial distinta entre essas localidades. Belo Horizonte abrange aproximadamente 45% da área total da bacia hidrográfica, enquanto Contagem detém os outros 55% (CPRM, 2001).

A área de contribuição do reservatório é drenada por oito afluentes diretos: Olhos d'Água, AABB, Braúnas, Água Funda, Tijuco, Mergulhão, Ressaca e Sarandi (Figura 4). Os córregos Ressaca e Sarandi, juntos, são responsáveis por 70% da vazão de entrada e suas bacias representam 63% da área de contribuição da Lagoa (TORRES; RESCK; PINTO-COELHO, 2007). A barragem da Lagoa da Pampulha foi originalmente construída, em 1938, para armazenar água e evitar inundações na região do córrego Pampulha, além do abastecimento de água para a região norte de Belo Horizonte e da criação de uma área de recreação para a população. No entanto, o rápido crescimento populacional e diversos usos do solo na bacia hidrográfica trouxeram consequências negativas que inviabilizaram o uso do reservatório para seus fins originais (FRIESE *et al.*, 2010).

O crescimento expressivo da área urbanizada, entre 1984 e 2011, ocupou cerca de 21% das regiões que anteriormente eram destinadas à agricultura e 8,4% das áreas com presença de vegetação (MATOS *et al.*, 2017). A eutrofização tem sido um problema recorrente na Lagoa da Pampulha desde os anos 1970, sendo resultado direto da rápida urbanização e das mudanças do uso do solo na bacia hidrográfica. Essas transformações contribuíram significativamente para o aumento do aporte de nutrientes provenientes dos tributários da Lagoa, intensificando o processo de eutrofização (SANTOS; DE CASTRO, 2021).

Diversas medidas de mitigação foram tomadas para diminuir a entrada de nutrientes na Lagoa da Pampulha. Em 1997, a Prefeitura de Belo Horizonte iniciou o Programa de Recuperação e Desenvolvimento Ambiental da Bacia da Pampulha (PROPAM), sendo oficializado em 2005 o termo de cooperação entre os municípios de Belo Horizonte e Contagem para a execução de projetos para proteção de nascentes,

melhoria na coleta de resíduos sólidos, educação ambiental, entre outros (SUDECAP, 2014).

Em 2003, a Estação de Tratamento de Águas Fluviais (ETAF) foi inaugurada com o objetivo de tratar a água proveniente da confluência dos córregos Ressaca e Sarandi, principais tributários diretos do reservatório. A capacidade de tratamento da ETAF foi dimensionada para atender o fluxo médio durante a estação seca. No entanto, quando a capacidade da estação é excedida, as vazões afluentes são direcionadas diretamente para o reservatório, sem passar pelo processo de tratamento da ETAF (COUTINHO, 2007).

Em 2016, a Lagoa da Pampulha recebeu o título de Patrimônio Cultural da Humanidade da UNESCO, o qual levou o setor público a buscar ações para melhorar a qualidade da água. Para alcançar esse objetivo, o município de Belo Horizonte, por meio de contrato com a iniciativa privada, utiliza produtos como *Phoslock* e *Enzilimp* na Lagoa da Pampulha, com a finalidade de remover o fósforo presente na coluna d'água e reduzir os níveis de coliformes e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (BARÇANTE *et al.*, 2020).

A Lagoa da Pampulha é influenciada por intervenções humanas e processos de eutrofização que se refletem em alterações na sua morfologia, qualidade da água e dinâmica térmica ao longo do tempo. Intervenções para o controle do assoreamento, como as dragagens realizadas entre 1999 e 2007, descritas por Resck *et al.*, (2007), aumentaram o volume do reservatório em 17,25%. Porém esse aumento volumétrico foi acompanhado pela redução da área superficial devido à formação de ilhas artificiais, entre elas o Parque Ecológico Francisco Lins do Rego, e pela amplificação das diferenças entre compartimentos no reservatório: uma região mais profunda próxima à barragem, com profundidade de até 16,1 metros, e uma área mais rasa próxima à Ilha dos Amores, com profundidade inferior a 3 metros.

A qualidade da água da Lagoa da Pampulha é condicionada pela entrada de grandes volumes de sólidos e de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, conforme relatado por Torres *et al.*, (2007). Os tributários Ressaca/Sarandi e Água Funda são os responsáveis por mais de 85% da carga externa de fósforo (54,9 toneladas por ano) e nitrogênio inorgânico dissolvido (404,4 toneladas por ano), além de sólidos

totais, o que resulta em acúmulo contínuo, especialmente durante a estação chuvosa. A alta retenção de fósforo, estimada em 80,9%, faz com que esse nutriente seja o principal fator limitante do sistema (Torres et al., 2007).

Esse aporte de nutrientes leva ao processo de eutrofização que favorece a proliferação de fitoplâncton e cianobactérias, conforme descrito por Figueredo *et al.*, (2016). Os autores observaram que, entre 1993 e 2011, as concentrações de fósforo na Lagoa da Pampulha triplicaram, atingindo níveis superiores a 100 µg/L, favorecendo florações persistentes de cianobactérias. Nos anos 1990, as florações de cianobactérias eram esporádicas, ocorrendo principalmente entre setembro e novembro. Contudo, em 2010 e 2011, essas florações tornaram-se persistentes, ocorrendo durante todo o ano. Os autores comentam que a instalação da ETAF, em 2003, não foi suficiente para interromper o processo de eutrofização no reservatório, uma vez que o tratamento abrange apenas dois dos oito tributários diretos, apenas no período seco, deixando uma parte do aporte de nutrientes sem tratamento e controle.

Nos últimos anos, foram implementadas ações para melhorar a qualidade da água da Lagoa da Pampulha, por meio do uso de *Phoslock*, uma argila enriquecida com lantânio que captura o fósforo da coluna d'água. Esse tratamento foi avaliado por Barçante *et al.* (2022), que observaram uma redução significativa das concentrações de fósforo de 0,15 mg/L para 0,05 mg/L no primeiro ano de aplicação, além de um aumento na transparência da água. A profundidade do disco de Secchi aumentou de 0,35 metros para 0,85 metros, indicando melhor penetração da luz. No entanto, os níveis de fósforo ainda permaneceram acima de 100 µg/L, sustentando florações de cianobactérias em determinados períodos. Esse comportamento reforça que, embora ações internas como o uso de *Phoslock* possam ser eficazes no curto prazo, o controle da eutrofização no reservatório depende de uma redução substancial das cargas externas de nutrientes proveniente dos tributários.

O estudo de Silva *et al.*, (2019), utilizando modelagem numérica, indica que a ampliação das áreas impermeáveis na bacia hidrográfica da Lagoa da Pampulha levaria ao aumento do escoamento superficial e do aporte de nutrientes no reservatório, intensificando o processo de eutrofização. Simulações utilizando um modelo hidrológico acoplado a um modelo ecológico mostraram que o aumento de

áreas impermeabilizadas elevaria o escoamento superficial em até 30%, enquanto que as concentrações de fósforo atingiriam 350 µg/L. O estudo também mostrou que, mesmo com uma redução de 50% na carga externa de fósforo, a meta de alcançar concentrações de clorofila-a abaixo de 60 µg/L seria difícil de atingir, devido à contínua entrada de nutrientes proveniente da bacia urbanizada. Além disso, os autores destacaram que apesar das melhorias no saneamento e da redução das fontes pontuais de poluição, o aumento das áreas impermeabilizadas e o consequente escoamento de nutrientes continuariam a comprometer a qualidade da água.

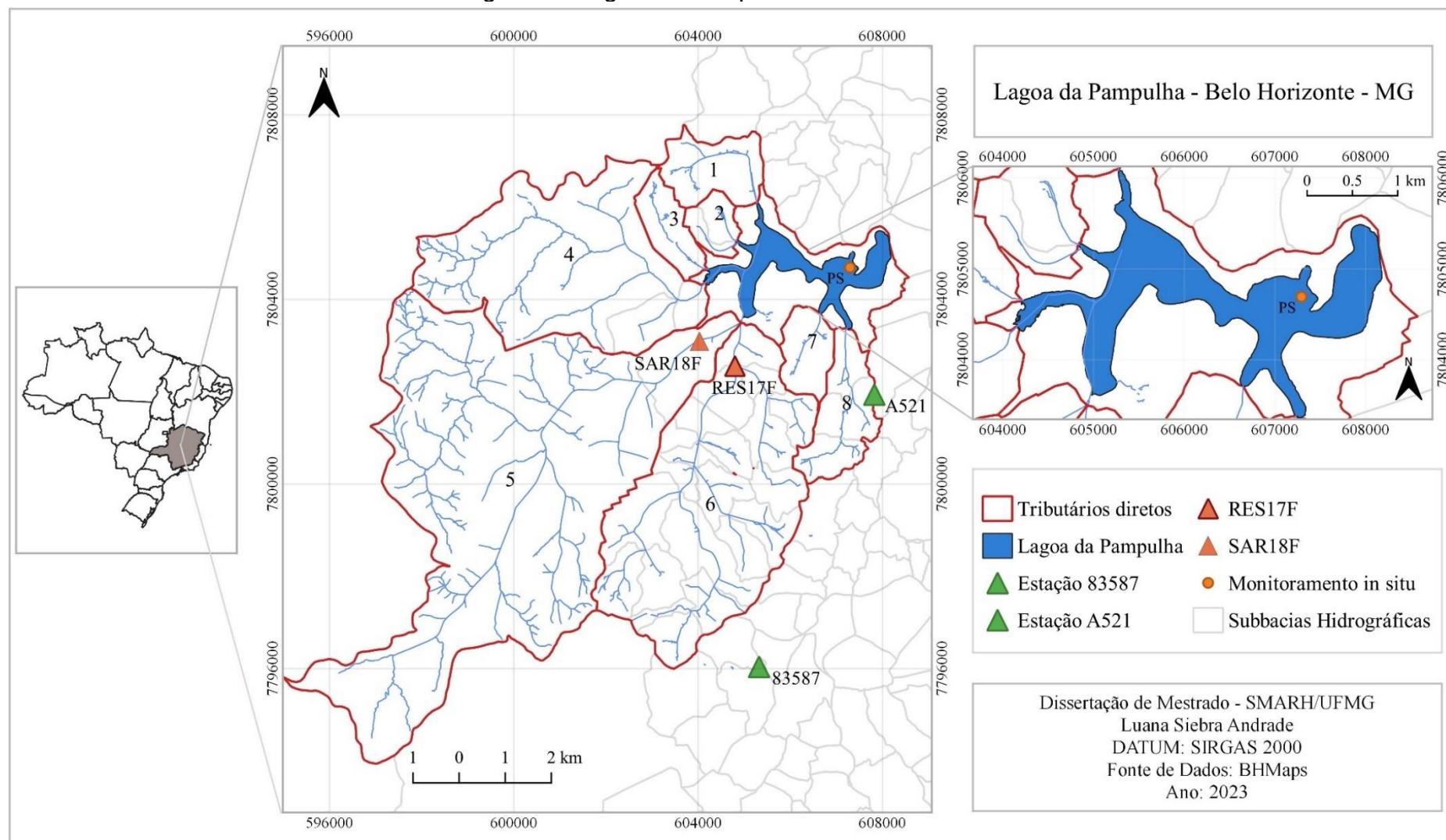
O comportamento térmico da Lagoa da Pampulha foi analisado por Silva *et al.*, (2016), que utilizaram um modelo unidimensional para investigar o impacto de eventos de precipitação intensa sobre a estratificação térmica e a qualidade da água. O estudo mostrou que eventos de chuva resultam em misturas verticais na coluna d'água, interrompendo a estratificação e redistribuindo nutrientes, o que afeta diretamente a biomassa fitoplanctônica. Durante um evento de chuva em dezembro de 2011, a biomassa fitoplanctônica foi reduzida significativamente, de 200 µg/L para 7 µg/L, demonstrando o papel importante que a mistura térmica tem na dinâmica do fitoplâncton, principalmente no controle de cianobactérias.

Um modelo unidimensional foi utilizado por Belico (2007) para investigar a interação entre os eventos chuvosos e a dinâmica da Lagoa da Pampulha. O autor observou que a precipitação resultou em uma redução temporária da condutividade e da biomassa fitoplanctônica, similar ao que foi observado por Silva *et al.*, (2016) durante os eventos de mistura. O autor observou, também, que a estratificação térmica do reservatório permaneceu estável durante o período quente e chuvoso, porém durante a estação seca e fria foram observados eventos de mistura, mostrando que o comportamento da Lagoa da Pampulha é cíclico e responde de forma diferente às variações sazonais. Belico (2007) concluiu que, apesar das mudanças temporais na condutividade, o comportamento do reservatório se manteve estável na maior parte do tempo, exceto nos períodos de maior variabilidade sazonal.

As simulações utilizando um modelo hidrodinâmico tridimensional conduzidas por Plec *et al.*, (2021) na Lagoa da Pampulha, utilizando medições de temperatura da água em alta frequência, reforçam a complexidade do comportamento térmico do reservatório.

Os resultados, obtidos ao longo de um período de simulação compreendido entre maio e junho de 2016, mostraram que a entrada de água mais fria proveniente dos afluentes, durante eventos de alta vazão, impacta diretamente as camadas mais profundas da coluna d'água, promovendo eventos de mistura. Esse comportamento evidencia a necessidade de monitoramento constante das temperaturas dos afluentes e do efeito de tais eventos sobre o transporte vertical de nutrientes no reservatório.

Figura 4 - Lagoa da Pampulha e seus tributários.



1-Olhos d'Água; 2 – AABB; 3- Braúnas; 4- Água Funda; 5 – Sarandi; 6- Ressaca; 7 – Tijuco; 8- Mergulhão. Fonte: Autora (2023)

4.2 Dados para entrada no modelo

4.2.1 Dados morfológicos

Os dados morfométricos da Lagoa da Pampulha foram obtidos a partir do levantamento topobatimétrico realizado pela Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP) em 2014. Para a entrada no modelo, converteu-se os pontos do levantamento batimétrico para um formato específico (.xyz), com informações de latitude, longitude e altitude, respectivamente. Obteve-se o contorno da Lagoa da Pampulha a partir da extração dos pontos do levantamento topobatimétrico localizados no entorno e utilizou-se esses pontos como guia para identificação dos limites do reservatório.

4.2.2 Dados hidrológicos

Desde 2011, os principais tributários da Lagoa da Pampulha, córregos Ressaca e Sarandi, possuem monitoramento linmétrico através das estações que integram o Sistema de Monitoramento Hidrológico operado pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH). As estações SAR17F e RES18F, localizadas no córrego Sarandi e Ressaca, respectivamente, medem o nível d'água a cada 10 minutos por meio de sensores ultrassom.

Para obtenção dos valores de vazão para esses córregos, no período de 2013 a 2015 (Figura 5), empregou-se as curvas-chave desenvolvidas por Nogueira (2015). No entanto, para esse período foram encontrados valores de cotas maiores e menores que aqueles empregados na curva-chave do autor. Realizou-se então a extrapolação da curva-chave utilizando o método de Stevens e o método logarítmico, respectivamente, de acordo com a metodologia descrita por Horn (2018).

Tabela 1 - Curvas-chave para os córregos Ressaca e Sarandi

Número	Método	Córrego	Equação	Cotas
1	Stevens	Ressaca	$y = 4,6798x + 0.0523$	Menor que 804,97 m
2		Sarandi	$y = 0,3596x + 0.0261$	Menor que 806,11 m
3	Logarítmico	Ressaca	$y = 26.368 * (x - 0.1129)^{1.470}$	Maior que 804,97 m
4		Sarandi	$y = 18.589 * (x - 0.1047)^{1.258}$	Maior que 806,11 m

Onde x refere-se ao valor de nível de água medido na estação, em metros. Fonte: Autora (2023)

Os demais tributários da Lagoa da Pampulha não possuem monitoramento hidrométrico. Logo, estimou-se a série temporal (Figura 5) de cada afluente por meio do produto entre a vazão da estação de referência e razão entre a área da bacia de contribuição do tributário e a área da bacia da estação de referência (Equação 59). Definiu-se a estação do córrego Ressaca (RES19F) ou do córrego Sarandi (SAR18F) como a estação de referência, de acordo com a disponibilidade de dados no período.

$$Q_{\text{trib}} = Q_{\text{ref}} * \left(\frac{\text{Área trib}}{\text{Área ref}} \right) \quad (499)$$

Onde:

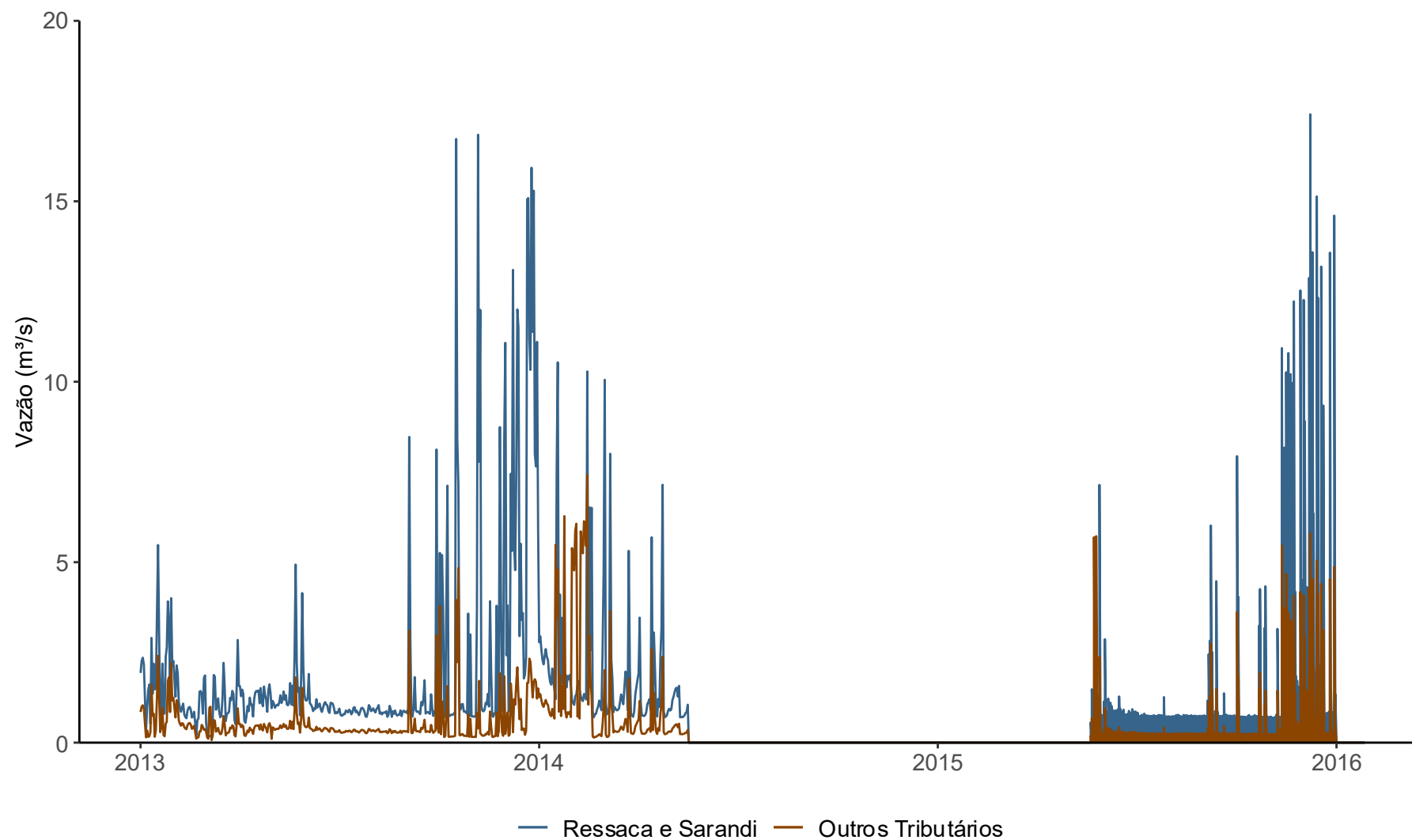
Q_{trib} = Vazão de entrada do tributário (m^3/s)

Q_{ref} = Vazão de entrada da estação de referência (m^3/s)

A_{trib} = Área de contribuição do tributário (km^2)

A_{ref} = Área de contribuição da estação de referência (km^2)

Figura 5- Vazões dos tributários da Lagoa da Pampulha (2013 - 2015)



De 18/05/2014 a 27/01/2015 não houveram registros de medições nas estações SAR18FE RES19F. Fonte: Autora (2023)

O reservatório conta com duas estruturas hidráulicas para saída das vazões: um vertedouro linear do tipo canal lateral e um vertedouro do tipo tulipa. As vazões escoadas pelo vertedouro linear foram simuladas pelo próprio modelo, considerando-se como condição de contorno a vazão e o nível d'água, de acordo com a curva cota-descarga da estrutura apresentada por Vianini Neto (2016), apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Curva cota-descarga do vertedouro linear da Lagoa da Pampulha

Nível d'água (m)	Vazão (m³/s)
0,0*	0,00
0,5	23,1
1,0	72,39
1,5	133,45
2,0	198,72
2,5	264,76
3,0	331,07

* Nível d'água igual a zero corresponde à cota altimétrica de 801,0 m

Para a temperatura da água dos tributários, adotou-se a metodologia proposta por Santiago *et al.* (2022), na qual foram analisadas diferentes métodos de regressão para estimativa da temperatura da água com base na temperatura do ar. As autoras utilizaram dados de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Por meio de regressão linear, foram determinadas equações específicas para cada tributário.

Juntamente com dados horários de temperatura do ar medidos pela estação automática A521 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram empregadas as equações obtidas pelas autoras. Para o córrego Tijuco, que não dispõe de monitoramento do IGAM e, portanto, não possui sua própria equação, utilizou-se a equação do córrego Mergulhão devido à proximidade entre eles. As equações utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações para obtenção da temperatura da água a partir da temperatura do ar nos tributários diretos da Lagoa da Pampulha de acordo com Santiago *et al.* (2022)

Córrego	Equação
AABB	$T_w = 0,65T_a + 6,47$
Olhos d'Água	$T_w = 0,3T_a^2 - 0,87T_a + 25,28$
Sarandi	$T_w = 0,68T_a + 7,56$
Mergulhão	$T_w = 0,75T_a + 4,19$
Tijuco	$T_w = 0,75T_a + 4,19$

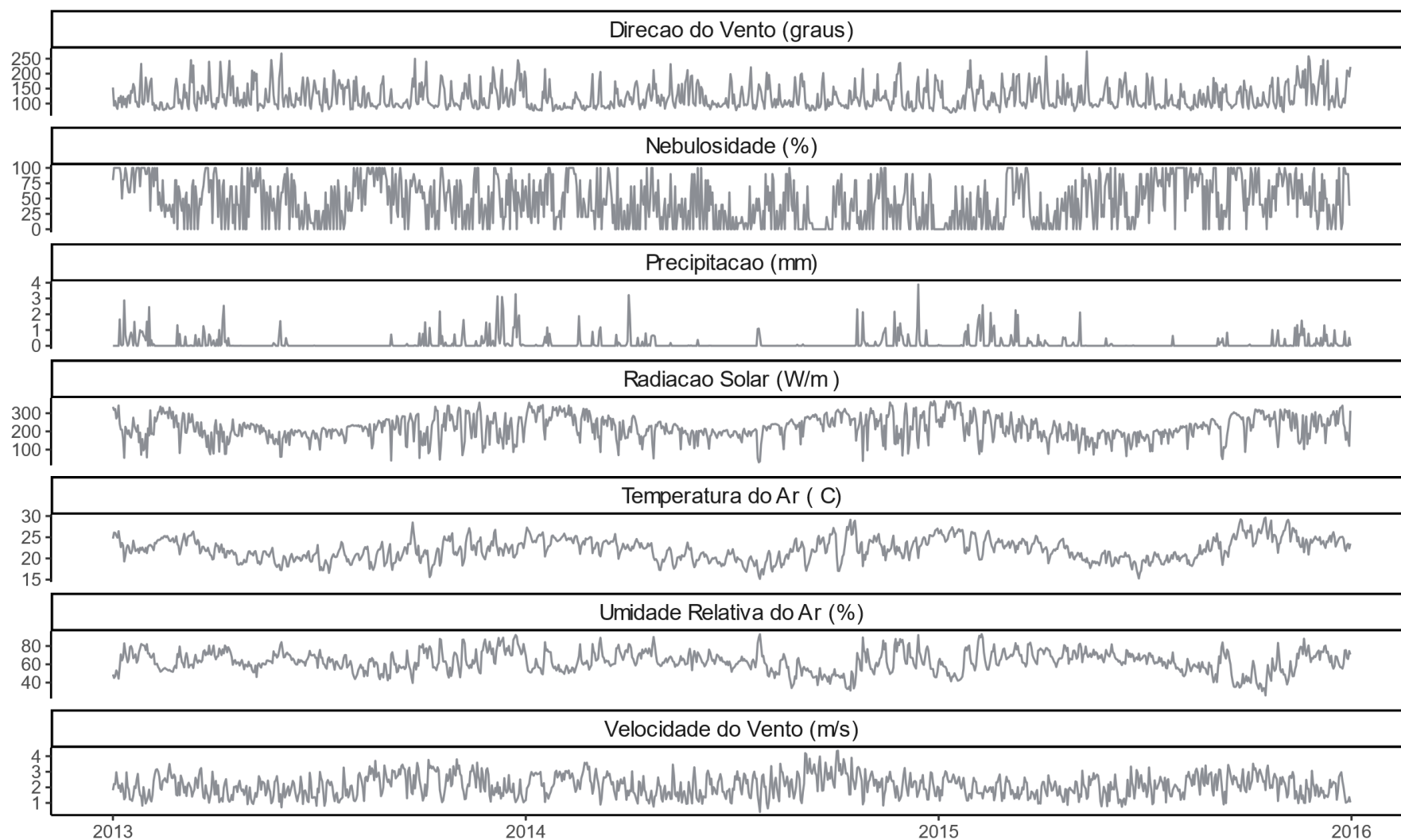
Fonte: Sampaio et al. (2022)

4.2.3 Dados meteorológicos

Os dados horários de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade (m/s) e direção (graus) do vento, precipitação (mm) e radiação solar (kJ/m²) foram coletados a partir de medições realizadas pela estação automática A521 do INMET (Figura 6). A radiação solar foi convertida para W/m².

Os dados de nebulosidade foram obtidos a partir da medição da estação convencional Belo Horizonte (83587) operada pelo INMET, localizada a aproximadamente 9,5 km da Lagoa da Pampulha. Essa estação fornece dados de nebulosidade três vezes ao dia, às 0h, 12h e 18hrs, e esses valores foram interpolados linearmente para valores horários de medição. Em ambas as estações meteorológicas o período dos dados utilizados neste trabalho é de 2013 a 2015.

Figura 6 - Média diária das variáveis meteorológicas no período de calibração e validação (2013 a 2015).



Temperatura do ar, Umidade Relativa do Ar, Radiação Solar, Precipitação, Velocidade e Direção do vento: Estação A521. Nebulosidade: Estação 83857. Fonte: INMET (2023)

4.3 Monitoramento *in situ*

Os dados de medição *in situ* utilizados para a avaliação do desempenho do modelo foram obtidos através do monitoramento da Lagoa da Pampulha realizado em estudos anteriores (SILVA, 2014). Para o período de 2013-2015, os dados de temperatura da água foram obtidos por meio de campanhas mensais, com medições a cada 0,5 m a partir da superfície, em um ponto do reservatório (Figura 4), onde a profundidade máxima atinge 12 m. Nessas campanhas, também foram obtidas medidas da profundidade do disco de Secchi.

4.4 Elaboração do modelo hidrodinâmico

4.4.1 Configuração do modelo Delft3D

Para o estudo dos parâmetros relacionadas à temperatura da água no reservatório e sua evolução ao longo do tempo, é necessário aplicar uma grade sobre a área de estudo. Usando informações fornecidas pelo Google Maps por meio do plug-in OpenLayers no QGis (versão 3.16), o contorno da Lagoa da Pampulha foi recortado e exportado como arquivo vetorial (shapefile, extensão.shp). Utilizou-se o módulo QuickPlot para transformação em arquivo de limite de terreno (arquivo do Delft3D, extensão. lbd), que posteriormente foi utilizado no módulo RFGRID. Este módulo tem como objetivo a geração e edição de malhas numéricas para inclusão nos demais módulos do Delft3D.

No ambiente do RFGRID foram desenhadas *splines* de acordo com a forma do reservatório. As *splines* consistem em retas e pontos que constituem a base para a criação da malha numérica. A partir dessas *splines* foi gerada uma malha numérica com células de 2 x 2 m, que foi ortogonalizada várias vezes para garantir sua qualidade. A qualidade da malha é determinada principalmente pela sua ortogonalidade (*orthogonality*) e a taxa de variação de suas propriedades ao longo dela (*smoothness*), avaliada pela relação entre as dimensões das células nas duas direções (*aspect ratio*) e pela relação entre as dimensões das células adjacentes (*ratio of neighbouring grid cell dimensions*). Os valores sugeridos para essas propriedades são propostos por Deltares, (2020).

Essa grade, no entanto, cobre apenas a superfície do reservatório. Os dados de profundidade foram extraídos a partir do arquivo de levantamento topobatimétrico

disponibilizado pela SUDECAP em 2014. Os pontos com dados de profundidade foram fornecidos como informação, juntamente com o arquivo de contorno da Lagoa, para o módulo QUICKIN. Devido à densidade de dados contidos na amostra, aplicou-se o método de média das profundidades nas células na grade com o objetivo de preencher todas as células com informação de profundidade.

Extraiu-se a batimetria como um arquivo .dep e forneceu-se essa informação para o módulo FLOW. Esse módulo oferece o uso do sistema de coordenadas sigma ou z para resolução vertical do lago, no qual as camadas sigma seguem a forma do perfil de profundidade da água, logo, nenhuma das células do fundo estaria vazia. Nas camadas z, os limites superior e inferior são horizontais e sua largura não varia, portanto, a quantidade de células não vazias na coluna d'água pode diferir de um local para outro. Escolheu-se a utilização do modelo Z para o sistema de coordenadas por permitir uma representação direta da estratificação, mistura vertical e outros processos dependentes da profundidade, uma vez que nesse sistema cada célula da grade corresponde a um intervalo de profundidade fixo. Estabeleceu-se 20 camadas com espessura de 5% em relação à profundidade total da Lagoa. Cada camada possui a espessura de 0,8 m. O limite Ztop foi definido para 1 m acima do nível d'água informado como condição contorno, atuando como uma “camada de segurança”, permitindo que o modelo funcione mesmo no caso de fortes oscilações na superfície.

A estabilidade numérica foi alcançada com o passo de tempo de 1,2 minutos. Para as condições iniciais de temperatura da água, considerou-se a média horária da temperatura do ar no primeiro dia de simulação. Para o nível d'água, foi adotado o valor zero, representando o reservatório em sua capacidade máxima. Para a rugosidade de fundo, adotou-se o valor do coeficiente de Chézy ($65 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$), como indicado por Deltares (2020). Escolheu-se o modelo k-épsilon como modelo para cálculo da viscosidade e da difusividade turbulenta ocasionada por redemoinhos. Adotou-se o valor nulo para a viscosidade vertical de fundo e para a difusividade vertical de fundo que passaram então a serem calculadas a partir do modelo de turbulência escolhido. A viscosidade e difusividade horizontal de fundo foram escolhidas como parâmetros de calibração.

Para as trocas de calor, escolheu-se o modelo *Ocean*, para o qual foram fornecidas séries temporais de umidade relativa do ar, temperatura do ar, cobertura de nuvens e radiação solar, no intervalo de tempo horário. O número de Dalton, número de Stanton e profundidade do disco de Secchi também foram selecionados como parâmetros de calibração. Para os ventos, utilizou-se série temporal com intervalo de tempo horário, considerando a velocidade e a direção como uniformes, ou seja, variando apenas no tempo, uma vez que não há medições dessas variáveis em toda a Lagoa. Para precipitação, utilizou-se os dados horários medidos pela estação do INMET 83587 no período de 2013 a 2015. A evaporação foi calculada pelo próprio modelo e utilizada no cálculo do balanço de massa.

4.4.2 Análise de sensibilidade

Para investigar como o modelo responde a variações nas variáveis de entrada sobre as quais tem-se maiores incertezas, realizou-se uma análise de sensibilidade. A vazão dos afluentes e a temperatura da água nos afluentes foram selecionadas como as variáveis de interesse pois foram obtidas através de aproximações e equações empíricas, conforme descrito na seção 4.2.

Para a vazão dos afluentes, foram conduzidas simulações considerando-se aumentos e reduções de 10% e 20% em relação ao valor original da vazão de entrada. Para a temperatura da água nos afluentes foram simulados acréscimos e reduções de 1° C e 2° C em relação à temperatura da água originalmente adotada nos dados de entrada.

A escolha dos intervalos de 10% e 20% nas variações da vazão dos afluentes baseou-se no estudo de McCMillan; Krueger; Freer, (2012) que discute as incertezas associadas às curvas-chave para estimativa de vazão em rios. De acordo com os autores, devido às limitações técnicas, as medições de vazão são frequentemente escassas e sujeitas a incertezas significativas, que variam entre 5% e 20% da vazão medida. Para as variações de 1°C e 2°C na temperatura da água dos afluentes, a escolha foi fundamentada na ordem grandeza da raiz do erro médio quadrático (RMSE) obtido por Sampaio *et al.*, (2022) nas regressões lineares calculadas para os afluentes da Lagoa da Pampulha.

A fim de avaliar o desempenho do modelo nessas diferentes condições, foi calculado a raiz quadrada do erro médio (RMSE, Tabela 4) para cada simulação, sendo esses valores posteriormente comparados ao RMSE obtido durante o processo de calibração.

4.4.3 Calibração e validação do modelo

Escolheu-se o período de calibração a partir da disponibilidade de dados de medição *in situ*, sendo este compreendido entre os meses de fevereiro/2013 a dezembro/2013.

Foram selecionados parâmetros ligados aos fluxos de calor identificados na literatura: difusividade horizontal de fundo, viscosidade horizontal de fundo, número de Dalton, número de Stanton e profundidade do disco de Secchi.

Para comparação entre as temperaturas simuladas pelo modelo e os dados de temperatura observada foram utilizadas as seguintes métricas de desempenho (Tabela 4): RMSE (Equação 60), erro médio absoluto (MAE) (Equação 6), o erro médio absoluto normalizado (NMAE) (Equação 6) e coeficiente de determinação (r^2) (Equação 6).

O processo de calibração foi conduzido por meio de iterações nos valores dos parâmetros estabelecidos anteriormente, utilizando a abordagem de tentativa e erro. O objetivo principal da calibração manual consistiu em ajustar os resultados do modelo para que se aproximassem aos dados obtidos *in situ*, além de compreender como a variação dos parâmetros influencia nas simulações de temperatura da água.

Para cada parâmetro foi estabelecido um intervalo de variação, apresentado na Tabela 5. Esse intervalo compreende dados provenientes estudos anteriores encontrados na literatura e em dados obtidos em campo.

No processo de calibração, a cada iteração, os valores dos parâmetros foram modificados em incrementos de 10% em relação ao valor inicial. Durante cada simulação, o modelo foi avaliado com base nas métricas de desempenho para determinar o impacto da variação dos parâmetros. A busca pelo melhor desempenho envolveu análises das métricas de desempenho do modelo, sendo utilizado o MAE e o RMSE.

O valor do parâmetro que resultou no melhor desempenho dessas métricas foi fixado e posteriormente avançou-se para a calibração do próximo parâmetro. Esse processo foi repetido para todos os parâmetros de calibração, garantindo que cada um fosse ajustado de forma individualizada. O critério de parada para o processo de calibração foi baseado no desempenho global do modelo, considerando a análise das métricas em conjunto. Uma vez que as métricas de desempenho atingiram um resultado satisfatório, no qual o melhor valor encontrado se repetisse em cada parâmetro, a calibração foi considerada concluída.

Tabela 4 - Métricas de desempenho utilizadas no processo de calibração

Número	Métrica	Equação	Descrição
60	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_{obs})^2}$	Mede a diferença média entre os valores preditos por um modelo e os valores reais, levando em consideração o quadrado das diferenças. Quanto menor o valor, melhor é o desempenho do modelo.
50	MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \hat{x}_{obs} $	Mede a média das diferenças absolutas entre os valores preditos e os valores reais, sem levar em consideração o quadrado das diferenças, o que o torna menos sensível a valores extremos. Quanto menor o valor, melhor é o desempenho do modelo.
51	NMAE	$NMAE = \frac{MAE}{(x_{imax} - x_{imin})}$	É a versão normalizada do MAE. Varia de 0 a 1, sendo 0 o melhor resultado possível, indicando que o modelo não tem erros de previsão. Quanto maior o valor de NMAE, pior é o desempenho do modelo.
52	r ²	$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i \hat{x}_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i)}{n} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{x}_i)^2}{n} \right]}$	Fornecer uma medida da qualidade da regressão em relação à variação total dos dados. Varia de 0 a 1, sendo 1 o melhor resultado possível, indicando que o modelo explica perfeitamente a variação dos dados. Quanto mais próximo de 0, pior é o ajuste do modelo aos dados.

x_i são os valores preditos, x_{imax} são os máximos valores preditos, x_{imin} são os mínimos valores preditos, x_{obs} são os valores observados e n é o número de medições.

Fonte: Autora (2023)

Tabela 5 - Parâmetros para calibração, intervalo de calibração e descrição física.

Parâmetro	Intervalo de calibração	Descrição	Referência
Viscosidade horizontal de fundo (m ² /s)	0 - 1	Caracteriza a transferência de movimento turbulento por redemoinhos. Maior valor resulta em uma maior fricção interna do fluido.	(POLLI; BLENINGER, 2019; SOULIGNAC et al., 2017; AMADORI et al., 2021; PLEC et al., 2021)
Difusividade horizontal de fundo (m ² /s)	0 - 2	Define a difusão ou dispersão causada pelo movimento turbulento. Maiores valores resultam em uma maior mistura do fluido.	(POLLI; BLENINGER, 2019; SOULIGNAC et al., 2017; AMADORI et al., 2021; PLEC et al., 2021)
Número de Dalton	0,0007 – 0,003	Define a o fluxo evaporativo por convecção forçada. Quanto maior, mais rápido ocorre a evaporação e resfriamento da água.	(AMORIM et al., 2021; ZHAO et al., 2012; BARENZUG, 2019)
Número de Stanton	0,0012 – 0,007	Representa o fluxo de calor sensível por convecção forçada. Quanto maior o valor, maior a influência da temperatura do ar na temperatura da superfície do reservatório.	(AMORIM et al., 2021; ZHAO et al., 2012; BARENZUG, 2019)
Disco de Secchi (m)	0,20 – 0,50	Representa a profundidade máxima de penetração da luz na coluna d'água. O valor obtido está relacionado com o aumento da temperatura da água devido à absorção da radiação solar.	Mínimo e máximo das medições realizadas <i>in situ</i> durante o período de calibração (fevereiro/2014 – dezembro/2014).

Fonte: Autora (2023)

No processo de validação do modelo foram selecionados dois períodos diferentes: um período chuvoso, compreendendo de 01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014, e um período seco, abrangendo de 10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015. A escolha desses períodos deu-se em função da disponibilidade de dados, com o

objetivo verificar a capacidade do modelo em representar diferentes contextos sazonais.

Para os períodos de calibração foram calculadas a quantidade de eventos de estratificação e mistura através da diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório. Considerou-se a diferença de temperatura maior que 1°C para caracterizar a ocorrência de eventos de mistura (KERIMOGLU; RINKE, 2013; MAGEE; WU, 2017).

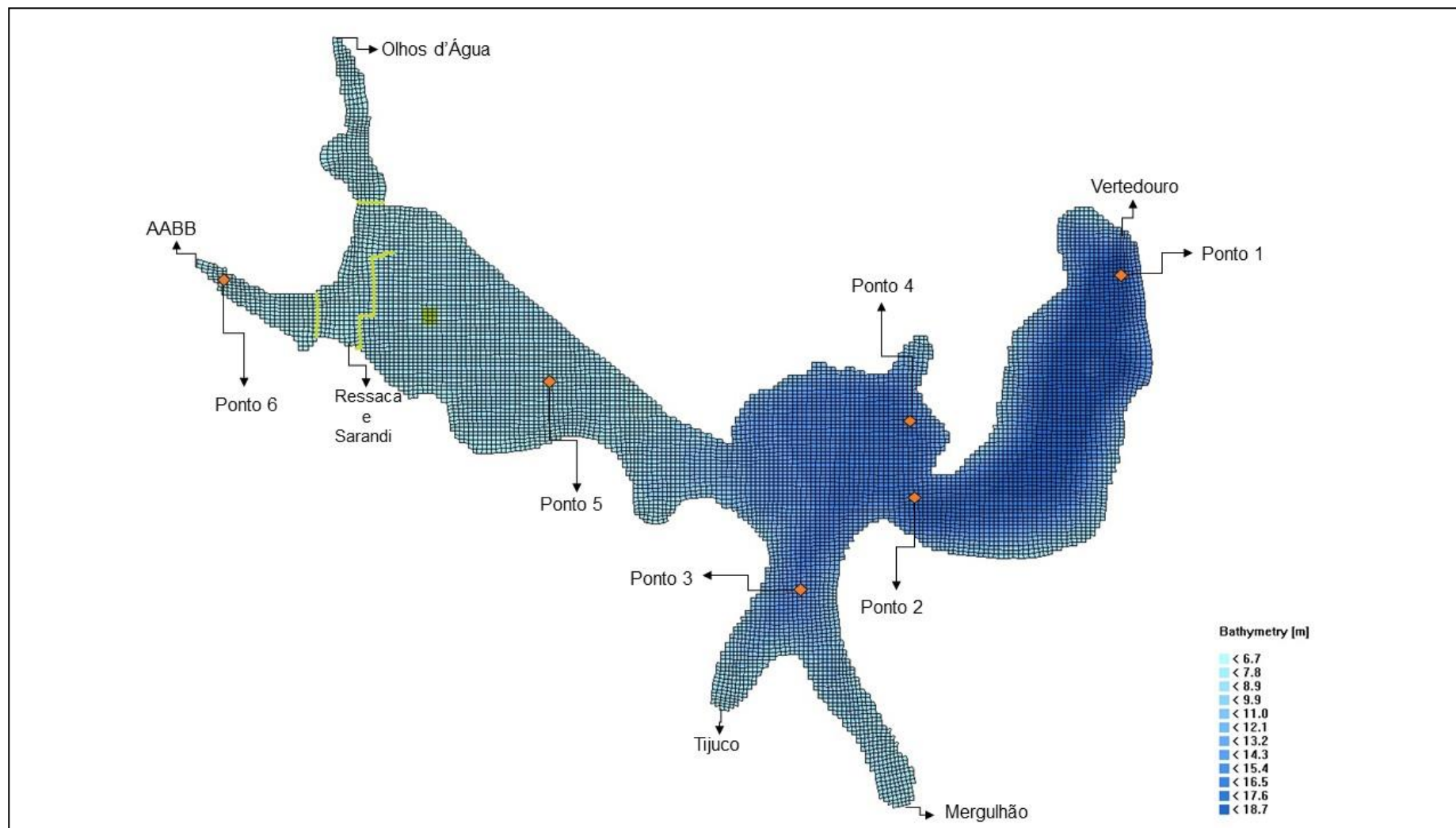
Para a caracterização do comportamento térmico da Lagoa da Pampulha, calculou-se os índices físicos de Schmidt e Lake Number utilizando o pacote *rLakeAnalyzer* (READ *et al.*, 2011) no ambiente do RStudio Team (2020).

Para o cálculo do índice de Schmidt, utilizou-se as informações de profundidade extraídas do levantamento topobatimétrico para a geração da curva hipsométrica do reservatório (Anexo A) e dados horários de temperatura da água, obtidos a partir da simulação do modelo. Para o Lake Number, utilizou-se também os dados de velocidade do vento em m/s.

Para análise do comportamento espacial da temperatura na superfície da Lagoa da Pampulha, utilizou-se os dados hidrológicos e meteorológicos do período de calibração, juntamente com os parâmetros previamente calibrados. A análise deu-se a partir da média mensal da temperatura da água na superfície para todo o ano de 2013.

Foram distribuídos seis pontos em locais distintos da malha numérica para análise dos eventos de mistura e estratificação na coluna d'água. A escolha desses pontos deu-se de modo a representar diferentes condições da Lagoa (Figura 7). Para cada ponto, obteve-se o perfil vertical de temperatura e a velocidade horizontal do fluxo, além do número de eventos de mistura e estratificação.

Figura 7 - Pontos de observação na superfície da Lagoa da Pampulha



Fonte: Autora (2023)

4.4.4 Tempo de processamento e ferramentas de pós-processamento

Em relação ao tempo de processamento, cada execução do modelo levou em torno de 1 dia e 19hrs para ser finalizada. Para a calibração, foram necessárias 19 simulações para obtenção de resultados satisfatórios. Para o pós-processamento dos dados, utilizou-se a ferramenta QuickPlot disponível no ambiente do Delft3D, e rotina em Python para análise dos resultados de temperatura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados e discussão sobre as etapas de calibração e validação do modelo hidrodinâmico para simulação do perfil de temperatura utilizando o módulo Flow do Delft 3D. As simulações realizadas incluem a calibração dos parâmetros, a análise da influência da variação de temperatura e da vazão dos afluentes na temperatura do reservatório e a espacialização da temperatura e da velocidade do fluxo na Lagoa da Pampulha.

5.1 Avaliação de desempenho da modelagem hidrodinâmica 3D

5.1.1 Calibração dos parâmetros

Para fins de calibração, realizou-se simulações no módulo Flow que compreendem o período de 01 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2013, totalizando 365 dias. No processo de calibração manual foram avaliados cinco parâmetros: viscosidade horizontal de fundo, difusividade horizontal de fundo, número de Dalton, número de Stanton e profundidade do disco de Secchi. Os resultados obtidos para cada variável e as métricas de desempenho são apresentados a seguir.

Uma das principais variáveis relacionadas à transferência de calor sensível entre a água e a atmosfera é o número de Stanton. Barenzug (2019) explica que à medida que o valor do número de Stanton aumenta, o impacto da temperatura do ar na temperatura da superfície do reservatório também se intensifica, uma vez que esse parâmetro está diretamente relacionado à taxa de transferência de calor.

Na Lagoa da Pampulha, durante o processo de calibração desse parâmetro (Apêndice D), à medida que o número de Stanton aumentou, a temperatura modelada apresentou valores maiores quando comparados aos valores obtidos *in situ*.

Tabela 6 - Calibração do parâmetro número de Stanton.

Métrica	Stanton					
	0.0012	0.00236	0.00352	0.004468	0.00584	0.0070
RMSE (°C)	0.84	0.88	0.89	0.92	0.93	0.97
MAE (°C)	0.66	0.67	0.70	0.71	0.72	0.72
NMAE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
R ²	0.84	0.75	0.76	0.76	0.80	0.76

Fonte: Autora (2023)

O número de Dalton é uma grandeza adimensional que relaciona a difusividade de uma substância em um meio com sua velocidade de transporte. Nos fluxos de calor em lagos e reservatórios, o número de Dalton é utilizado na descrição da transferência de calor entre a superfície da água e o ar em diversos processos. Um desses processos é a evaporação, em que a energia térmica é transferida da superfície da água para as moléculas de água na fase de vapor (CHAPRA, 2008).

Quando o número de Dalton é baixo, a difusão de calor é mais lenta em relação à transferência de calor por convecção. A transferência de calor mais eficiente por convecção acelera o aquecimento da água na superfície devido à movimentação do fluido. Essa maior eficiência na transferência de calor permite que a energia térmica seja transferida da fonte de calor para a superfície da água, resultando em um rápido aquecimento (MARTIN; MCCUTCHEON; SCHOTTMAN, 1999). Nessa condição, o fluxo de calor evaporativo também é maior. Isso se deve à alta taxa de evaporação da água quando aquecida. A transferência de calor por convecção aquece a água da superfície, fazendo com que mais moléculas adquiram energia suficiente para se transformar em vapor. Esse aumento na evaporação contribui para um fluxo de calor evaporativo mais intenso.

Por outro lado, quando o número de Dalton é alto, a difusão do calor se torna mais rápida em relação ao processo convectivo. Isso resulta em uma menor transferência de calor por convecção. Como resultado, a superfície da água aquece mais lentamente e o fluxo de calor evaporativo é menor nessa situação (KUNDU *et al.*, 2016).

Durante as simulações para calibração do modelo na Lagoa da Pampulha, houve um resfriamento gradual da superfície da água (Apêndice D), que resultou em maiores diferenças entre temperaturas simuladas e observadas (Tabela 7), à medida que o número de Dalton aumentava, principalmente no período seco, quando os valores da incidência de radiação e a umidade do ar são menores.

Tabela 7 - Calibração do parâmetro número de Dalton.

Métrica	Dalton					
	0.0007	0.0013	0.00162	0.00208	0.00254	0.0030
RMSE (°C)	0.92	0.84	0.92	0.97	1.25	1.42
MAE (°C)	0.72	0.65	0.86	0.81	0.95	1.28
NMAE	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
R ²	0.69	0.83	0.77	0.79	0.80	0.82

Fonte: Autora (2023)

A profundidade do disco de Secchi é uma medida de transparência da água em lagos e reservatórios determinada pela profundidade máxima em que um disco branco ou preto é visível abaixo da superfície da água (TUNDISI; TUNDISI, 2008) .

No módulo FLOW é possível inserir apenas um valor referente à profundidade do disco de Secchi, que deve representar uma condição média do reservatório. Calibrar valores do disco de Secchi faz-se importante pois a transparência da água é um parâmetro crítico que afeta a distribuição de luz na coluna d'água e pode variar significativamente em diferentes áreas do reservatório e ao longo do tempo, afetando diretamente a temperatura da água, a produção primária e a qualidade da água.

A variação da profundidade do disco de Secchi ao longo do tempo e do espaço em reservatórios pode ser influenciada por uma série de fatores, incluindo a concentração de partículas em suspensão, a produtividade biológica, a ocorrência de mistura vertical, as variações sazonais e a influência humana (ESTEVES, 2011).

Nas simulações com variação do disco de Secchi para valores acima e abaixo da média das medições *in situ*, os valores de temperatura obtidos na simulação foram maiores do que os obtidos *in situ* à medida que o valor da profundidade do disco de Secchi aumentava. Para valores menores, os valores de temperatura simulados foram menores (Apêndice D). O valor médio das medições *in situ* do disco de Secchi apresentou o menor erro dentre os valores simulados.

Tabela 8 - Calibração do parâmetro profundidade do disco de Secchi.

Métrica	Secchi (m)				
	0.20	0.30	0.35	0.40	0.50
RMSE (°C)	0.87	0.87	0.84	0.87	0.87
MAE (°C)	0.73	0.72	0.65	0.72	0.72
NMAE	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
R ²	0.75	0.75	0.83	0.75	0.75

Fonte: Autora (2023)

A viscosidade horizontal de fundo refere-se à resistência da água ao fluxo horizontal devido à turbulência e correntes que ocorrem no fundo do reservatório, impactando na temperatura da água em determinados cenários, como em reservatórios com altos níveis de turbulência (KUNDU *et al.*, 2016).

Quando há turbulência na água, os redemoinhos ocasionados por essa turbulência podem promover a mistura da coluna d'água, deslocando água mais fria do fundo para a superfície, distribuindo o calor uniformemente e ocasionando uma diminuição da temperatura nas camadas superiores. Da mesma forma, quando há pouca turbulência, o gradiente de temperatura na coluna d'água pode se manter, tornando a superfície mais quente e uma camada inferior mais fria (WÜEST; LORKE, 2009; FERNÁNDEZ CASTRO *et al.*, 2021).

No processo de calibração dos parâmetros para a Lagoa da Pampulha, o aumento dos valores de viscosidade horizontal turbulenta ocasionou um aumento das temperaturas simuladas (Apêndice D). O valor que apresentou o menor erro entre as duas temperatura é o mesmo obtido por Plec *et al.* (2021) para a mesma área de estudo.

Tabela 9 - Calibração do parâmetro viscosidade horizontal turbulenta.

Métrica	Viscosidade Horizontal Turbulenta				
	0.022	0.025	0.028	0.030	0.038
RMSE (°C)	0.87	0.84	0.87	0.87	0.87
MAE (°C)	0.72	0.65	0.72	0.72	0.72
NMAE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
R ²	0.75	0.83	0.75	0.75	0.75

Fonte: Autora (2023)

A difusividade horizontal turbulenta é um parâmetro utilizado para descrever a capacidade de um corpo d'água em dispersar ou misturar substâncias ao longo de sua superfície, horizontalmente. É uma medida da taxa de movimento das partículas ou das moléculas na direção lateral, causada por processos turbulentos ou de difusão molecular (MARTIN *et al.*, 1999; JI, 2008).

No processo de calibração, a difusividade horizontal turbulenta apresentou o mesmo comportamento que a viscosidade horizontal de fundo, em que o aumento dos valores ocasionou o aumento da temperatura simulada (Apêndice D). A partir disso, ambas obtiveram o mesmo valor final.

Tabela 10 - Calibração do parâmetro difusividade horizontal turbulenta.

Métrica	Difusividade Horizontal Turbulenta				
	0.022	0.025	0.028	0.030	0.038
RMSE (°C)	0.87	0.84	0.87	0.87	0.87
MAE (°C)	0.72	0.65	0.73	0.74	0.65
NMAE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
R ²	0.75	0.83	0.75	0.75	0.75

Fonte: Autora (2023)

Os parâmetros ajustados para representar a Lagoa da Pampulha estão descritos na Tabela 11, juntamente com seus valores iniciais.

Tabela 11 - Valores obtidos no processo de calibração do modelo.

Parâmetro	Valor inicial (default Delft3D)	Valor calibrado
Viscosidade horizontal turbulenta (m ² /s)	10	0.025
Difusividade horizontal turbulenta (m ² /s)	10	0.025
Número de Dalton (-)	0.0013	0.0013
Número de Stanton (-)	0.0013	0.0012
Profundidade do Disco de Secchi (m)	2.0	0.35

Fonte: Autora (2023)

A calibração dos parâmetros do modelo para representar a Lagoa da Pampulha mostrou ajustes em relação aos valores iniciais (*default*). A viscosidade e a difusividade horizontal turbulenta, ambas com valores iniciais de $10 \text{ m}^2/\text{s}$, foram reduzidas para $0.025 \text{ m}^2/\text{s}$ após a calibração. Essa diferença indica que os processos de mistura e dispersão horizontal na lagoa são muito mais lentos que o representado pelo valor inicial. Essa redução pode estar associada a características físicas específicas da Lagoa da Pampulha, por exemplo a presença de estratificação, que limita o transporte de massa por meio do movimento turbulento.

Em relação aos números de Dalton e de Stanton, observou-se pouca alteração entre os valores *default* e os valores obtidos no processo de calibração. O número de Dalton permaneceu inalterado, indicando que o processo de troca de calor por meio da interface água-ar está adequadamente representado pelo valor *default* do modelo. O número de Stanton, que também é relacionado com as trocas entre a água e o ar, foi ajustado de 0.0013 para 0.0012. Essa pequena alteração sugere que as trocas de calor entre a água e a atmosfera não requereram grandes modificações, sendo o valor inicial próximo ao valor calibrado.

A profundidade do Disco de Secchi, inicialmente estabelecida em 2.0 metros, foi calibrada para 0.35 metros. Esse ajuste está diretamente relacionado à diminuição da transparência da água no ponto de monitoramento, indicando uma maior concentração de sólidos em suspensão ou material particulado, tais como sedimentos e fitoplâncton, ao longo da coluna d'água. Essa variação também está diretamente associada ao coeficiente de atenuação da luz. Com a diminuição da profundidade do Disco de Secchi, há um aumento no coeficiente de atenuação da luz, indicando que a penetração da radiação solar na água é limitada devido à maior presença de partículas.

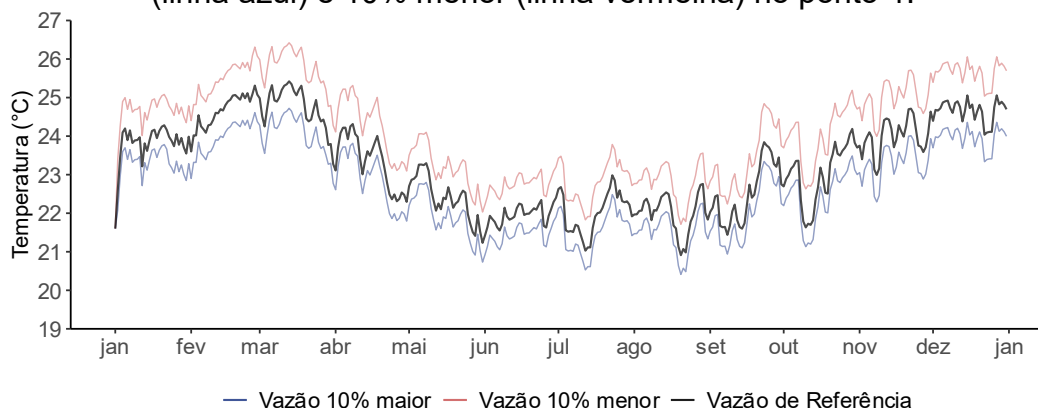
5.1.2 Análise de sensibilidade do modelo às variáveis de entrada

5.1.2.1 Vazão dos afluentes

A Figura 8 e a Figura 10 apresentam os resultados da temperatura da água na superfície obtidos na análise de sensibilidade quando a vazão de entrada dos afluentes foi alterada em mais ou menos 10% e 20%. A

Figura 9 e a Figura 11 apresentam os resultados de temperatura no fundo do reservatório para essas mesmas condições.

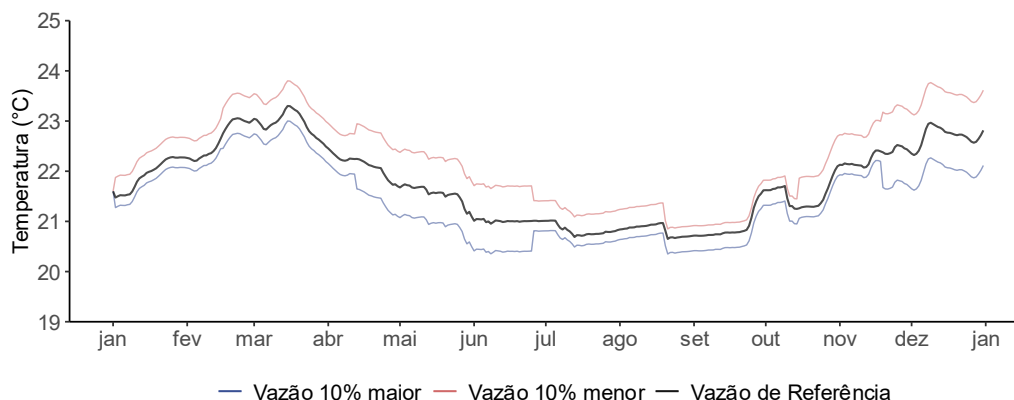
Figura 8 - Temperatura da superfície (0,5m) em simulações com vazões 10% maior (linha azul) e 10% menor (linha vermelha) no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

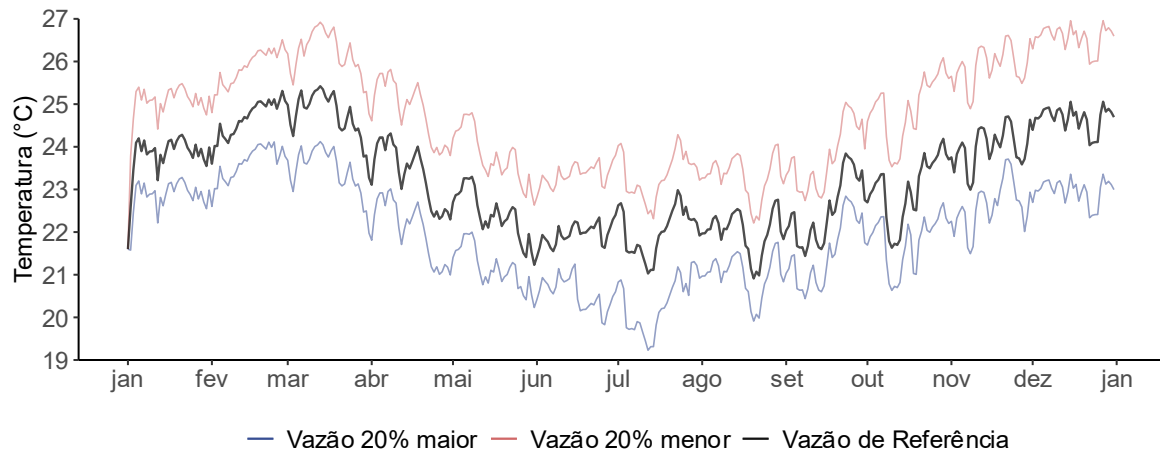
Nota-se que a redução dos valores de vazão afluente em 10% ocasionou maiores temperatura durante todo o período de simulação, tanto na superfície quanto no fundo do reservatório. Para esse cenário, a maior temperatura registrada na superfície (0,5 m) é de 26,42°C e mínima de 21,6°C e no fundo (9,5 m), o maior valor registrado é de 23,8°C no mês de março e mínima de 20,8°C no mês de junho. De forma contrária, o aumento dos valores de vazão em 10% causou menores valores de temperatura em todo período de simulação, tanto na superfície (0,5 m) com temperatura máxima de 24,72°C e mínima de 20,4°C, como no fundo do reservatório (9,5 m), sendo 23°C e 20,3°C a temperatura máxima e mínima registrada, respectivamente.

Figura 9 - Temperatura do fundo (9,5m) em simulações com vazões 10% maior (linha azul) e 10% menor (linha vermelha) no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

Figura 10 - Temperatura da superfície (0,5 m) em simulações com vazões 20% maior (linha azul) e 20% menor (linha vermelha) no ponto 4.

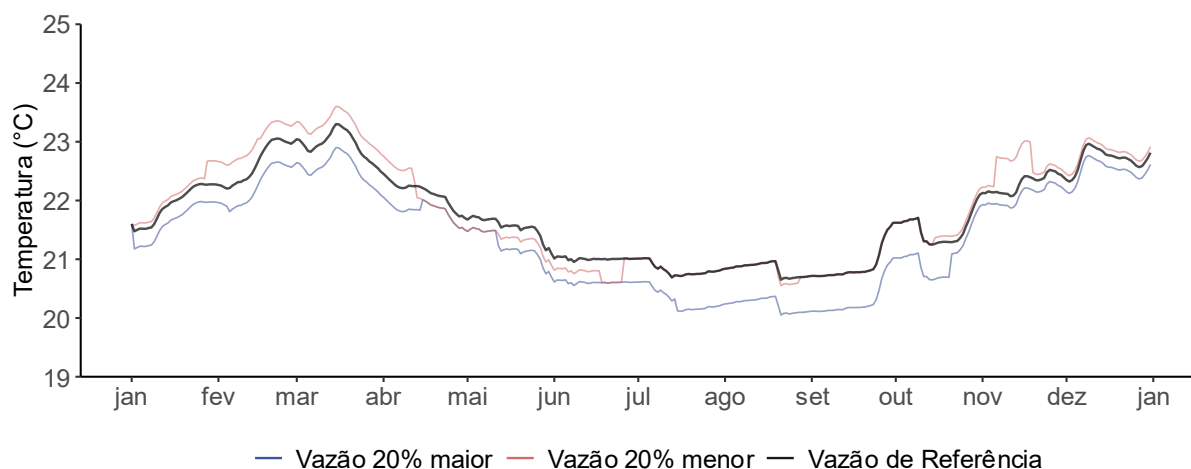


Fonte: Autora (2023)

De forma análoga, a redução dos valores de vazão em 20% ocasionou maiores temperaturas quando comparado com os valores de temperatura obtidos na calibração do modelo (simulação de referência). Para esse cenário, a temperatura máxima obtida foi de 26,9°C e mínima de 21,6°C. O aumento dos valores de vazão em 20% ocasionou menores valores de temperatura na superfície, com temperatura máxima de 24,1°C e mínima de 19,2°C.

No fundo do reservatório (Figura 11), a vazão 20% menor acarretou temperaturas semelhantes à temperatura obtida durante a calibração do modelo. É possível notar que nos meses de Abril a Junho, a temperatura ficou abaixo da temperatura simulada na calibração, com valores próximos aos obtidos quando a vazão foi acrescida 20%. Nos meses de Julho a Novembro, a temperatura se igualou a temperatura da calibração. Nesse cenário, a temperatura máxima obtida é de 22,9°C e a mínima de 20°C.

Figura 11 - Temperatura do fundo (9,5 m) em simulações com vazões 20% maior (linha azul) e 20% menor (linha vermelha) no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 12 apresenta os valores de RMSE obtidos na comparação entre os perfis de temperatura simulada, com acréscimo e diminuição dos valores de vazão, e os perfis de temperatura obtidos *in situ* para o ano de 2013.

Tabela 12 - RMSE(°C) obtido a partir da comparação entre o perfil de temperatura simulado e o perfil de temperatura *in situ*, mediante variações de 10% e 20% nas vazões de entrada, para o ano de 2013.

RMSE (°C)					
Data	Calibração	Vazão 10% mais	Vazão 10% menos	Vazão 20% mais	Vazão 20% menos
26/02/2013	1,69	1,7	1,61	1,72	1,62
14/03/2013	1,87	1,89	1,89	1,90	1,80
10/04/2013	1,24	1,28	1,00	1,30	1,02
02/05/2013	0,71	0,78	0,62	0,82	0,65
08/05/2013	0,72	0,78	0,62	0,80	0,65
10/05/2013	0,66	0,67	0,61	0,69	0,58
16/05/2013	0,49	0,51	0,37	0,53	0,32
17/05/2013	0,35	0,40	0,31	0,41	0,32
20/05/2013	0,52	0,55	0,52	0,54	0,50
22/05/2013	0,71	0,80	0,70	0,81	0,69
23/05/2013	0,81	0,85	0,76	0,84	0,72
27/05/2013	0,38	0,45	0,30	0,40	0,35
29/05/2013	0,69	0,72	0,62	0,75	0,60
03/06/2013	0,24	0,30	0,20	0,35	0,21
11/07/2013	0,48	0,50	0,40	0,52	0,39

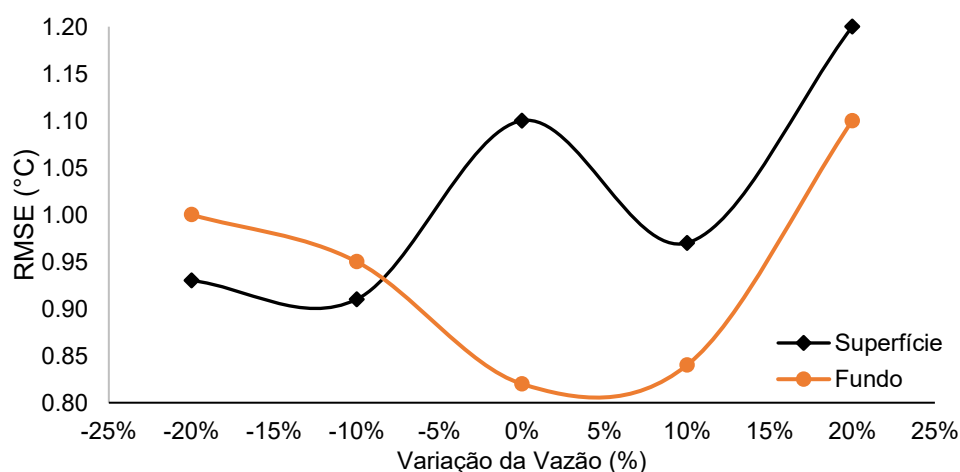
Data	Calibração	RMSE (°C)			
		Vazão 10% mais	Vazão 10% menos	Vazão 20% mais	Vazão 20% menos
17/09/2013	0,21	0,30	0,19	0,32	0,18
16/10/2013	0,59	0,62	0,52	0,65	0,50
13/11/2013	1,36	1,39	1,32	1,62	1,30
05/12/2013	1,27	1,34	1,25	1,35	1,22
MÉDIA	0.771	0.816	0.7085	0.841	0.699

Fonte: Autora (2023)

É possível observar que as alterações nos valores de vazão ocasionaram um RMSE de 1,9°C entre as temperaturas dos perfis, em Fevereiro, quando a vazão foi aumentada em 20%. O menor valor de RMSE registrado é de 0,18°C, no mês de Setembro, quando a vazão foi reduzida em 20%.

A Figura 12 mostra a sensibilidade do modelo à variação dos valores de vazão de entrada dos afluentes e RMSE (°C) calculado para as simulações no ano de 2013 na superfície e no fundo do reservatório.

Figura 12 - Análise de sensibilidade da alteração das vazões de entrada, no ano de 2013.



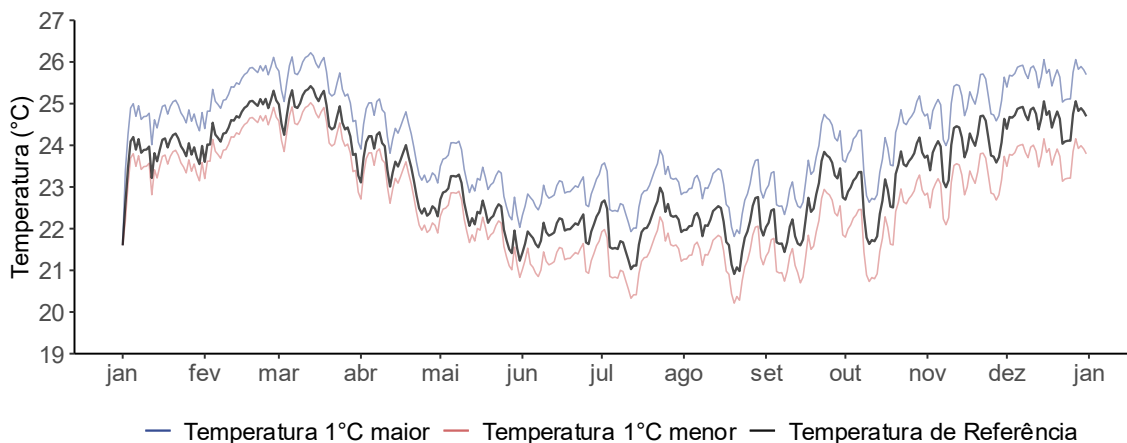
Fonte: Autora (2023)

Ao analisar as métricas é possível notar que a vazão acrescida 20% acarretou em maiores diferenças entre a temperatura simulada e a temperatura medida *in situ* na superfície e no fundo, durante o período de calibração do modelo. A diminuição da vazão em 10% e 20% ocasionou maiores erros na temperatura da água do fundo do reservatório, havendo uma diferença de 0,04°C entre as duas vazões nos dois cenários.

5.1.2.2 Temperatura da água dos afluentes

A Figura 13, a Figura 14, a Figura 15 e a Figura 16 apresentam os resultados obtidos nas simulações em que variou-se a temperatura da água dos afluentes em mais ou menos 1°C e 2°C.

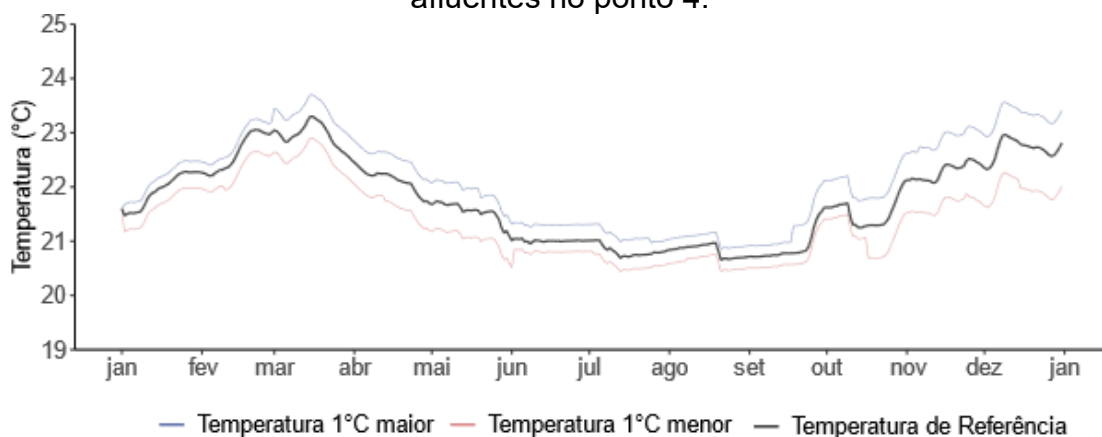
Figura 13 - Temperatura da água na superfície (0,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 1 °C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

A variação de 1°C a mais na temperatura da água dos afluentes ocasionou um aumento da temperatura da água na superfície durante todo o período de simulação. A temperatura máxima atingida é de 26,2°C e a mínima de 21,8°C. A variação de 1°C a menos resultou em temperaturas mais baixas que as obtidas durante o processo de calibração. A temperatura máxima obtida é de 25,02°C e mínima de 20,1°C.

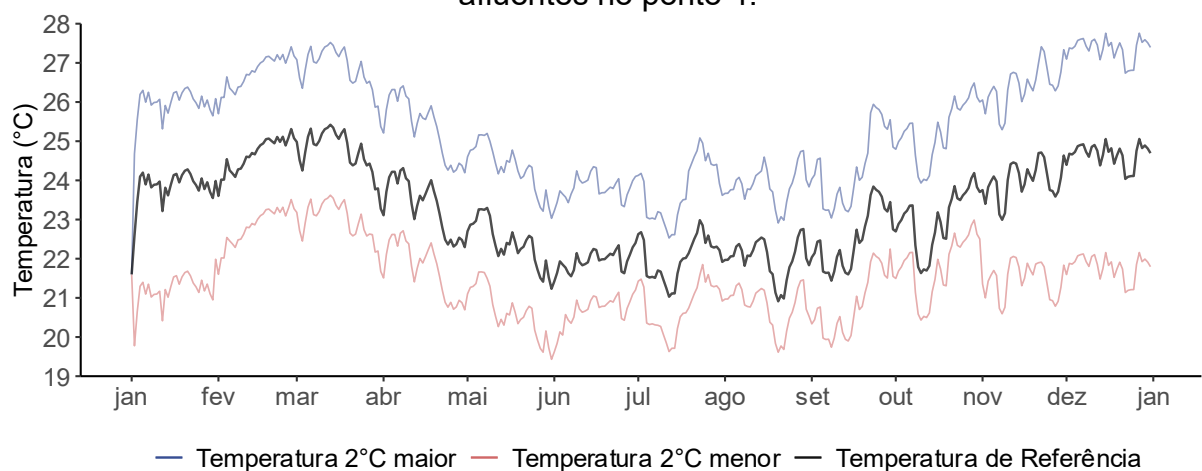
Figura 14 - Temperatura da água no fundo (9,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 1 °C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

A temperatura da água no fundo do reservatório (Figura 14) sofre maiores alterações quando a temperatura dos afluentes é acrescida de 1°C. Essa alteração pode ser observada durante todo o período, enquanto que, quando a temperatura é diminuída 1°C do valor inicial, a temperatura da água no fundo do reservatório diminui. A maior temperatura registrada nas simulações é de 23,7°C, quando há o acréscimo na temperatura, e 20,8°C quando há a diminuição da temperatura.

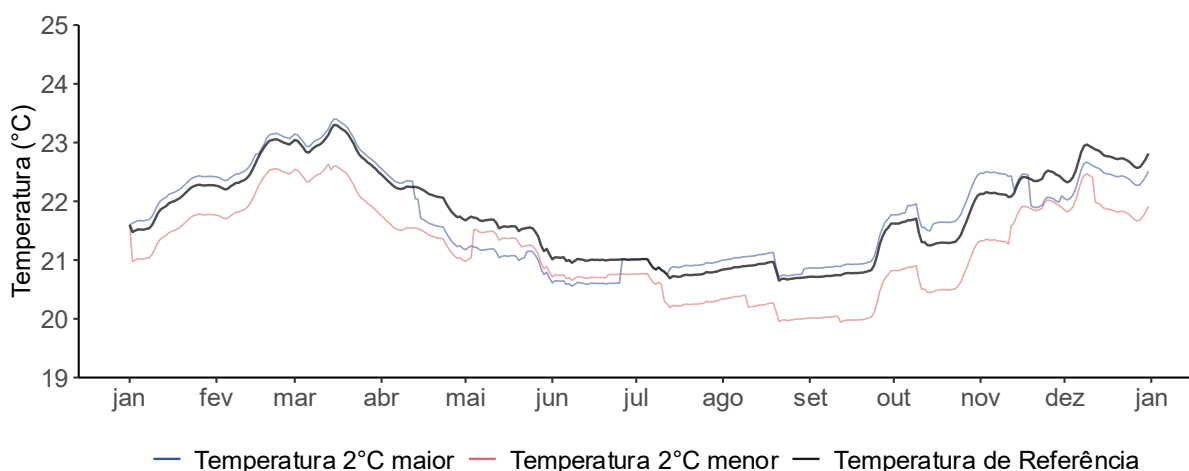
Figura 15 - Temperatura da água na superfície (0,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 2°C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

Para a variação em 2°C, a Figura 15 e a Figura 16 apresentam os resultados obtidos. A redução da temperatura da água em 2°C resultou em temperaturas menores quando comparadas à temperatura da água simulada durante a calibração para o mesmo período. No cenário de variação em 2°C, a temperatura máxima atingida é de 23,7°C e mínima de 19,5°C. Por outro lado, o aumento da temperatura em 2°C ocasionou um aumento nas temperaturas simuladas, com temperatura máxima de 27,7°C e mínima de 22,5°C.

Figura 16 - Temperatura da água no fundo (9,5 m) em simulações com variação de mais (linha azul) e menos (linha vermelha) 2°C na temperatura da água dos afluentes no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

No fundo do reservatório, pode-se observar a diminuição dos valores de temperatura da água quando a temperatura é tanto acrescida como diminuída 2°C do valor inicial. Durante os meses de julho a setembro, a temperatura da água no cenário de acréscimo de 2° C se iguala à temperatura da água simulada com o valor inicial. Entre os meses de julho a outubro é possível notar um decaimento da temperatura da água no cenário de simulação com diminuição da temperatura.

A Tabela 13 apresenta os valores de RMSE obtidos na comparação entre os perfis de temperatura simulado, com acréscimo e diminuição da temperatura da água dos afluentes, e os perfis de temperatura obtidos *in situ* para o ano de 2013.

Tabela 13 - RMSE(°C) obtido a partir da comparação entre o perfil de temperatura simulado e o perfil de temperatura *in situ*, mediante variações de acréscimo e diminuição da temperatura da água dos afluentes, para o ano de 2013.

RMSE (°C)					
Data	Calibração	Temperatura +1°C	Temperatura -1°C	Temperatura +2°C	Temperatura -2°C
26/02/2013	1,69	1,72	1,65	1,73	1,75
14/03/2013	1,87	1,92	1,82	1,94	1,98
10/04/2013	1,24	1,27	1,20	1,28	1,30
02/05/2013	0,71	0,82	0,70	0,75	0,92
08/05/2013	0,72	0,75	0,69	0,78	0,82
10/05/2013	0,66	0,65	0,59	0,69	0,75

Data	Calibração	RMSE (°C)			
		Temperatura +1°C	Temperatura -1°C	Temperatura +2°C	Temperatura -2°C
16/05/2013	0,49	0,52	0,45	0,53	0,58
17/05/2013	0,35	0,37	0,30	0,40	0,45
20/05/2013	0,52	0,58	0,49	0,55	0,60
22/05/2013	0,71	0,73	0,79	0,82	0,80
23/05/2013	0,81	0,83	0,88	0,86	0,82
27/05/2013	0,38	0,36	0,39	0,43	0,38
29/05/2013	0,69	0,67	0,73	0,75	0,77
03/06/2013	0,24	0,26	0,28	0,35	0,34
11/07/2013	0,48	0,53	0,56	0,54	0,59
14/08/2013	0,43	0,45	0,47	0,50	0,58
17/09/2013	0,21	0,25	0,28	0,30	0,37
16/10/2013	0,59	0,63	0,67	0,68	0,64
13/11/2013	1,36	1,42	1,49	1,50	1,58
05/12/2013	1,27	1,25	1,29	1,35	1,32
MÉDIA	0,771	0,799	0,786	0,836	0,867

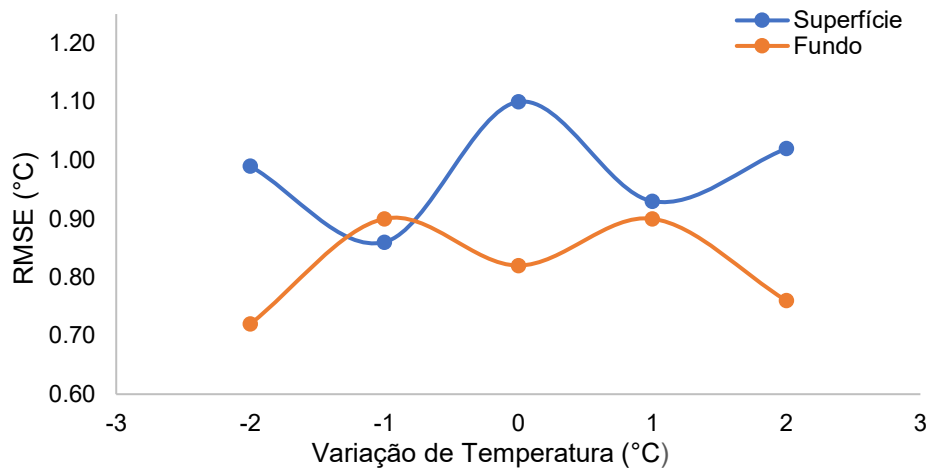
Fonte: Autora (2023)

No cenário de alterações em 1°C, o maior RMSE obtido é de 1,92°C no mês de março, com o acréscimo de 1°C na temperatura da água e o menor RMSE obtido foi de 0,25°, no mês de setembro, no mesmo cenário.

Na variação de 2°C, o maior RMSE obtido foi de 1,98°C em fevereiro, quando houve a diminuição da temperatura da água e o menor RMSE foi de 0,3°C no mês de setembro quando houve o acréscimo na temperatura da água.

A Figura 17 mostra a sensibilidade do modelo à variação dos valores de temperatura da água dos afluentes na superfície e no fundo do reservatório e RMSE (°C) calculado para as simulações no ano de 2013.

Figura 17 - Análise de sensibilidade da alteração da temperatura da água nos afluentes, no ano de 2013.



Fonte: Autora (2023)

A superfície do reservatório apresentou maior RMSE quando a temperatura da água dos afluentes foi acrescida 2°C. Para o fundo do reservatório, o cenário de redução de 2°C apresentou o menor RMSE (0,70°C).

É importante ressaltar que a análise de sensibilidade realizada para as vazões de entrada e para a temperatura da água dos afluentes consiste em uma análise preliminar, com limitações a serem consideradas. A limitação da análise a um único ponto de observação (Ponto 4) foi adotada com a premissa de que essa localização representa uma condição média do reservatório.

Ao analisar a influência dessas variáveis de entrada, observou-se que as mudanças impostas na vazão e na temperatura da água dos afluentes resultaram em comportamentos distintos na temperatura da água simulada ao longo do período de simulação. Na superfície do reservatório, tais alterações reproduziram variações constantes, resultando no aumento e na diminuição da temperatura ao longo do tempo. Por outro lado, no fundo do reservatório, foram observados casos em que o comportamento sofreu uma inversão ou uma aproximação da condição de referência, sugerindo a atuação de processos como a difusividade e a turbulência, que atuam na distribuição da temperatura em maiores profundidades.

Em relação ao desempenho do modelo frente a variações na temperatura da água dos afluentes, verificou-se que, em média, para variações $\pm 1^\circ\text{C}$, o erro obtido nos

resultados foi consideravelmente reduzido. Santiago; Silva; Andrade, (2022), ao estimar a temperatura da água a partir da temperatura do ar para os afluentes da Lagoa da Pampulha, obtiveram RMSE médio variando de 1,27°C a 2,07°C.

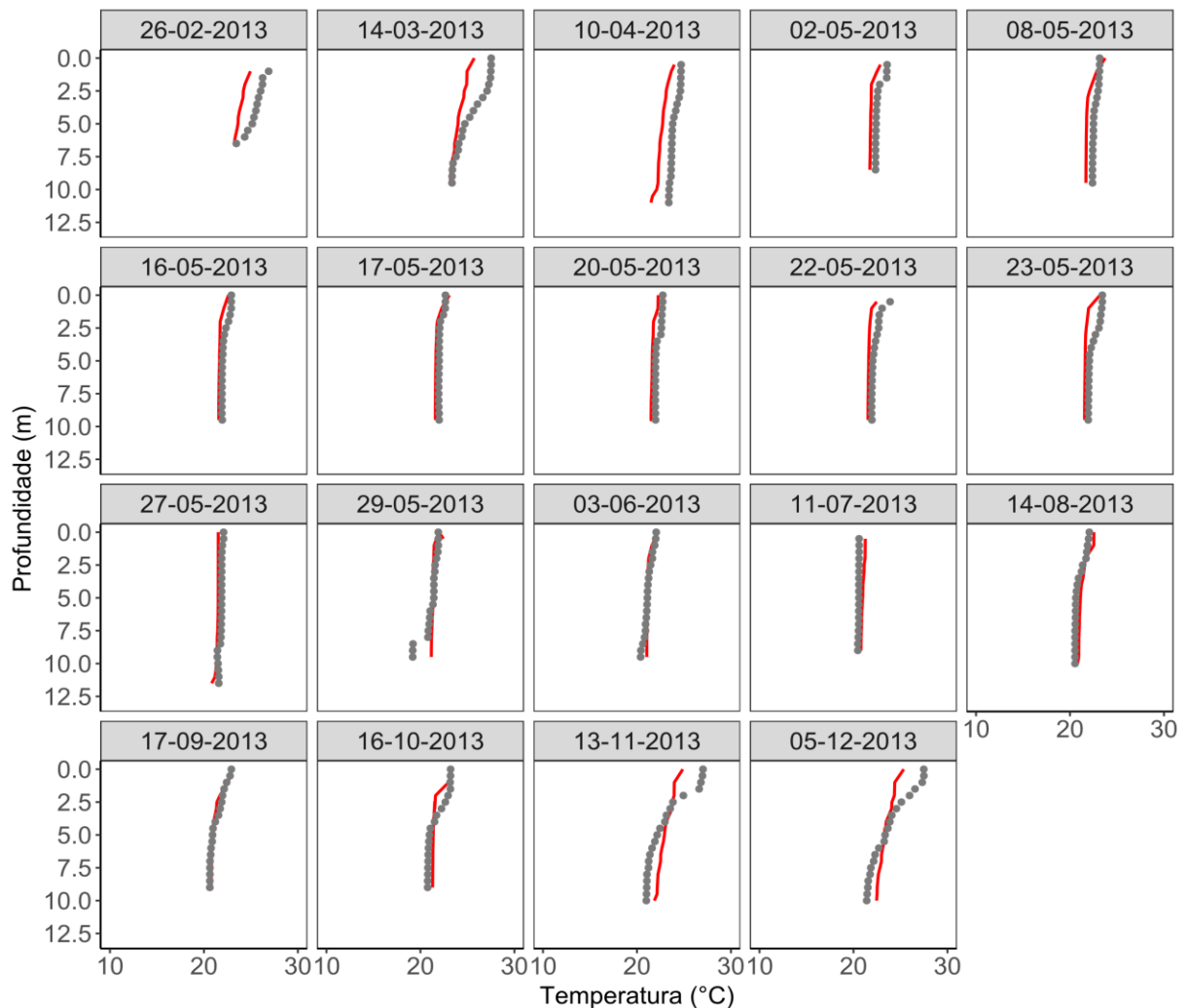
Ao observar dos resultados obtidos para variações de temperatura da água dos afluentes em $\pm 2^\circ\text{C}$, pode-se inferir que essa variação ocasionou um aumento no nas temperaturas simuladas, ao considerarmos o perfil térmico. Quando consideramos a superfície do reservatório, há uma redução dos valores de temperatura. Vale ressaltar que essas imprecisões obtidas nos resultados podem ter alterações substanciais na temperatura do reservatório, levando a incertezas sobre os eventos de mistura e estratificação, uma vez que, nesse estudo, considerou-se a diferença entre a superfície e o fundo do reservatório menores que 1°C para a ocorrência da mistura da coluna d'água.

Para o desempenho do modelo em relação às variações na vazão dos afluentes, verificou-se que, em média, o desempenho do modelo foi satisfatório nos cenários em que ocorreram reduções nas vazões, exceto na camada da superfície do reservatório. Qualitativamente, observou-se que variações de $\pm 10\%$ na vazão resultaram na redução do erro nas simulações. No entanto, quando as alterações na vazão foram maiores, observou-se um maior impacto na temperatura do fundo do reservatório.

5.1.3 Simulação da temperatura da água no período de calibração

A Figura 18 apresenta a comparação entre os perfis de temperatura medidos *in situ* e os perfis modelados, para cada campanha de campo no ano de 2013. As temperaturas observadas e simuladas no período de calibração estão indicadas no Apêndice B.

Figura 18 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido *in situ* (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para cada campanha de campo.



Fonte: Autora (2023)

Pode-se observar que nos meses iniciais e finais da simulação (Fevereiro, Março e Abril, Outubro, Novembro e Dezembro, respectivamente), as temperaturas simuladas apresentaram valores inferiores aos observados, não representando de forma clara os processos de estratificação durante esses períodos. Essa limitação é mais evidente nas camadas superficiais da coluna d'água, em que o modelo demonstrou maior dificuldade em capturar a dinâmica térmica observada. Isso pode estar relacionado a limitações na formulação do balanço de energia na interface ar-água, na resolução vertical das camadas superficiais e, ainda, à calibração de parâmetros sensíveis relacionados à troca de calor com a atmosfera (número de Dalton e coeficiente de arraste do vento). Contrastando com isso, resultados mais precisos foram obtidos durante a estação seca do ano (Maio a Setembro), quando as temperaturas estão

mais frias e a coluna d'água não apresenta grandes variações de temperatura entre as camadas.

A comparação de temperaturas simuladas com os dados observados em 6 campanhas (110 medidas de temperatura em diferentes profundidades) no período chuvoso, que compreende os meses de Outubro a Abril, obteve-se o RMSE médio de $1,30^{\circ}\text{C}$. Deve-se ressaltar que os meses de Fevereiro a Abril referem-se ao final da estação chuvosa do ano de 2012, enquanto que os meses de Outubro a Dezembro referem-se ao início da estação chuvosa do ano de 2013. No período seco, ao comparar as temperaturas simuladas com os dados observados em 14 campanhas, sendo 10 campanhas no mês de maio (268 medições de temperatura em diferentes profundidades) obteve-se o RMSE de $0,38^{\circ}\text{C}$.

Pode-se inferir que a diferença expressiva entre o RMSE dos dois períodos pode ter sido influenciada pelo maior número de dados durante o período seco, principalmente no mês de Maio, em dias próximos. Durante esse período, em que o balanço de calor é dominado pela atmosfera, as vazões de entrada e a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório são menores, ou seja, a coluna d'água apresentava um período mistura.

Ao representar bem os eventos de mistura, o modelo apresentou dificuldades em representar a estratificação da coluna d'água presente no período chuvoso. Durante esse período há uma maior incerteza nos valores de vazão. A análise de sensibilidade realizada anteriormente mostra que a diminuição dos valores de vazão acarretou um aumento da temperatura simulada (Figura 12). A partir dessa análise, pode-se inferir que a diminuição dos valores de vazão nos dados de entrada ocasionaria um melhor desempenho do modelo no período chuvoso.

Levando em consideração a profundidade, os resultados das métricas de desempenho no período de calibração, para temperatura da superfície, meio e fundo do reservatório estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Métricas de desempenho obtidas para diferentes profundidades na Lagoa da Pampulha.

Profundidade (m)	Dados utilizados (n)	Métrica		
		RMSE (°C)	MAE (°C)	R ²
0.5	19	1,10	1,22	0,88
2.5	20	1,00	1,01	0,90
5.5	20	0,57	0,32	0,82
9.5	15	0,82	0,68	0,41
Período completo	401	0,84	0,65	0,83

Fonte: Autora (2023)

A partir das métricas é possível observar que a subestimação dos processos de estratificação ocasionou maiores erros na superfície do reservatório (até 2,5 m). As maiores diferenças entre a temperatura observada e a temperatura simulada estão presentes nos meses de Novembro e Dezembro, nos quais o modelo não conseguiu representar bem a variação de temperatura entre o epilímnio e o metalímnio (Figura 18). A temperatura no meio e no fundo do reservatório foram simuladas com menores erros. Isso deve-se à melhor representação do modelo de temperaturas mais baixas e às pequenas variações de temperatura nessa parte da coluna d'água.

Na Tabela 15, é possível notar que os resultados obtidos no período de calibração do modelo estão consistentes com outros estudos levantados na literatura.

Tabela 15 - Métricas de desempenho obtidas em outros estudos utilizando Delft3D

Referência	Área de estudo	Análise	Métrica	Resultado
Amorim <i>et al.</i> , (2021)	Lago Hedberg (Brasil)	Temperatura da superfície	RMSE	0,86
		Temperatura do fundo	RMSE	0,43
Amorim <i>et al.</i> , (2021)	Reservatório Billings (Brasil)	Temperatura da superfície	RMSE	0,39
		Temperatura do fundo	RMSE	0,45
Barenzug, (2019)	Lago Stafa (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	RMSE	0,67
Barenzug, (2019)	Lago Stafa (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	MAE	0,47
Barenzug, (2019)	Lago Thalwil (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	RMSE	0,74
Barenzug, (2019)	Lago Thalwil (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	MAE	0,42
Barenzug, (2019)	Lago Lachen (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	RMSE	0,73
Barenzug, (2019)	Lago Lachen (Suíça)	Temperatura da coluna d'água	MAE	0,56

Referência	Área de estudo	Análise	Métrica	Resultado
Dissanayake; Hofmann; Peeters, (2019)	Upper Lake Constance (Alemanha)	Temperatura da coluna d'água	RMSE	0,49
Piccioni <i>et al.</i> , (2021)	Lago Champs-sur-Marne (França)	Temperatura da superfície	RMSE	1,00
		Temperatura do fundo	RMSE	0,96
Plec <i>et al.</i> , (2021)	Lagoa da Pampulha (Brasil)	Temperatura da superfície	RMSE	0,45
		Temperatura do fundo	RMSE	0,96
		Temperatura da superfície	R ²	0,63
		Temperatura do fundo	R ²	0,81
Rocha <i>et al.</i> , (2023)	Reservatório Pentecostes (Brasil)	Temperatura da coluna d'água	MAE	0,53
		Temperatura da coluna d'água	RMSE	0,57
		Temperatura da superfície	MAE	0,61
		Temperatura da superfície	RMSE	0,49
		Temperatura do fundo	MAE	0,53
		Temperatura do fundo	RMSE	0,35

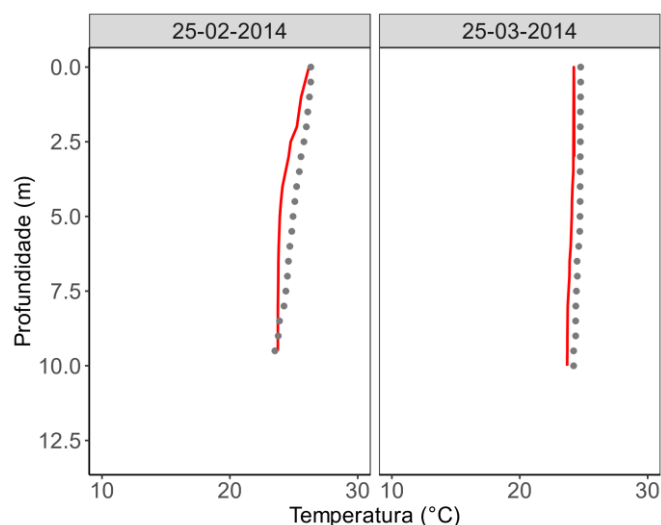
Fonte: Autora (2023)

5.1.4 Simulação da temperatura da água no período de validação

A validação do modelo hidrodinâmico foi realizada em dois períodos distintos. O primeiro (V1), de 01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014, representa o período chuvoso e o segundo (V2), de 10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015, representa o período seco.

A comparação entre os perfis de temperatura da água obtidos *in situ* e o perfis simulados para cada período é apresentada na Figura 19 e na Figura 20. As temperaturas observadas e simuladas no período de validação estão indicadas no Apêndice C.

Figura 19 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido *in situ* (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para as duas campanhas de campo em 2014.



Fonte: Autora (2023)

No primeiro período de validação, o modelo conseguiu representar de forma satisfatória a temperatura da água ao longo da coluna d'água no mês de Março. No mês de Fevereiro, é possível observar um aquecimento do modelo para a região do metalímnio (entre 2,5 m a 7,5 m), quando comparado aos dados observados.

Em relação à profundidade, as métricas de desempenho para superfície, meio e fundo do reservatório para o primeiro período da validação são apresentadas na Tabela 16.

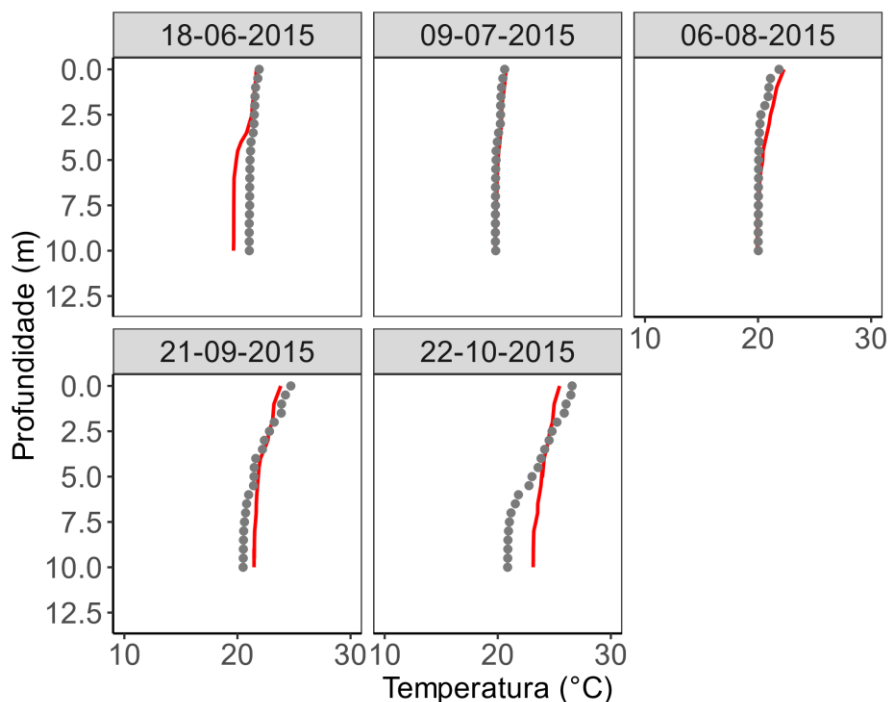
Tabela 16 - Métricas de desempenho para o primeiro período de validação (01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014).

Período	Profundidade (m)	Dados utilizados (n)	Métrica		
			RMSE (°C)	MAE (°C)	R ²
V1	0.5	2	0,49	0,24	
	2.5	2	0,81	0,66	
	5.5	2	0,84	0,70	
	9.5	2	0,38	0,15	
	Período completo	41	0,68	0,64	0,85

Fonte: Autora (2023)

De forma geral, o modelo representou satisfatoriamente a temperatura da água para o primeiro período de validação com RMSE médio de 0,68°C. Os maiores erros foram obtidos nas profundidades 2,5 m e 5,5 m, que foram representados no perfil de temperatura do mês de Fevereiro, na Figura 19.

Figura 20 - Comparação entre o perfil de temperatura obtido *in situ* (pontos cinza) e modelado (linha vermelha) para cada campanha de campo em 2015.



Fonte: Autora (2023)

No segundo período de validação, o modelo não conseguiu representar bem a variação de temperatura na coluna d'água nos meses de Agosto, Setembro e Outubro, havendo uma subestimação dos valores de temperatura. No mês de Junho, houve um aquecimento do modelo na temperatura das camadas do metalímnio e hipolímnio. Tal aquecimento não é observado no perfil de temperatura obtido *in situ*.

As métricas de desempenho para superfície, meio e fundo do reservatório para o segundo período da validação são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Métricas de desempenho para o segundo período de validação (10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015).

Período	Profundidade (m)	Dados utilizados (n)	Métrica		
			RMSE (°C)	MAE (°C)	R ²
V2	0.5	5	0,76	0,57	0,96
	2.5	5	0,44	0,19	0,94
	5.5	5	0,78	0,60	0,77
	9.5	5	1,26	1,59	0,19
	Período completo	105	0,90	0,65	0,72

Fonte: Autora (2023)

A partir das métricas por profundidade, é possível observar o maior erro entre as temperaturas na profundidade 9,5 m. A diferença expressiva e a baixa correlação entre as temperaturas nessa profundidade podem ser justificadas pela subestimação do modelo ao evento de estratificação ocorrido no dia 22/10. A profundidade de 2,5 m apresentou os menores erros, uma vez que, em todos os meses o modelo conseguiu representar bem a superfície do reservatório.

Durante os períodos de validação, assim como observado no período de calibração, o modelo conseguiu representar os eventos de mistura e dificuldade em representar os eventos de estratificação.

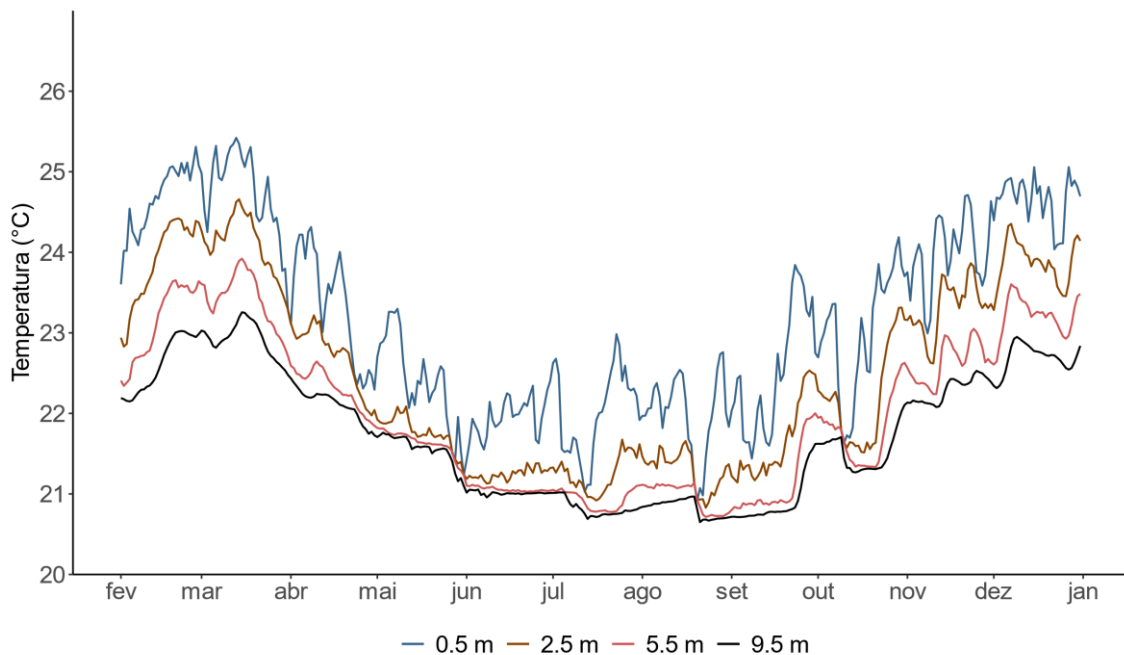
5.2 Comportamento térmico da Lagoa da Pampulha

Nesse tópico serão abordadas as variações espaciais e temporais do comportamento térmico da Lagoa da Pampulha para o período de calibração e para os dois períodos de validação, mencionados anteriormente. Será apresentada a caracterização da Lagoa da Pampulha através dos índices físicos, índice de Schmidt e Lake Number para o período de calibração.

5.2.1 Período de calibração

Após a calibração dos parâmetros, obteve-se a temperatura da água simulada em quatro profundidades (0,5 m, 2,5 m, 5,5 m e 9,5 m) próximo ao ponto de monitoramento *in situ*, que possui profundidade máxima de 12 metros (Figura 7). As análises a seguir referem-se a esse ponto.

Figura 21 - Temperatura média diária da água simulada no ponto 4 para as profundidades 0,5 m, 2,5 m, 5,5 m e 9,5 m no período de 01 de fevereiro de 2013 a 31 de dezembro de 2013.



Fonte: Autora (2023)

A Lagoa da Pampulha apresentou variações de temperatura em todas as profundidades apresentadas. Na superfície (0,5 m e 2,5 m), as temperaturas máxima e mínima simuladas podem ser observadas em março e agosto, atingindo 25,4°C e 20,8°C, respectivamente. Na profundidade intermediária (5,5 m) e no fundo do reservatório (9,5 m) as temperaturas máximas e mínimas simuladas são observadas nos meses de março e julho, respectivamente. A 5,5 m foram obtidas temperaturas máximas de 23,9° e mínima de 20,7°, enquanto para o fundo do reservatório, a máxima e mínima foi de, respectivamente, 23,2°C e 20,6°C.

É possível observar, na camada da superfície (0,5 m), localizada na interface água-ar, o declínio característico da temperatura durante a transição do período chuvoso (primavera-verão) para o período seco (outono-inverno), seguido por um aquecimento da superfície durante a transição do período seco para o período chuvoso, nos últimos meses do ano. Nas demais camadas, a variação de temperatura seguiu o mesmo padrão da camada da superfície, porém com menor amplitude.

Ao longo de todo período de calibração, a diferença máxima e mínima de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório é de 3,0°C no mês de setembro e de 0,08°C no mês Outubro, respectivamente.

Considerando que a estratificação entre as camadas é estável quando a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório é maior que 1°C (KERIMOGLU; RINKE, 2013; MAGEE; WU, 2017), a quantificação e a duração dos eventos de mistura e de estratificação na Lagoa da Pampulha durante o período de calibração é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 - Quantidade de eventos de mistura e estratificação na Lagoa da Pampulha para o ano de 2013.

Meses	Eventos de estratificação	Eventos de mistura
Fevereiro	28	0
Março	30	1
Abril	18	12
Maio	8	23
Junho	9	21
Julho	19	12
Agosto	23	8
Setembro	21	9
Outubro	23	8
Novembro	26	4
Dezembro	31	0
Total	236	98

Fonte: Autora (2023)

Em 334 dias de simulação foram quantificados 236 dias de estratificação e 98 dias de mistura. Os meses de Fevereiro, Março, Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro apresentaram condições estratificadas ao longo de toda sua duração, indicando que a estratificação da coluna d'água persistiu na maior parte dos dias. Com exceção dos meses de Julho e Agosto, os demais meses estão inseridos no período chuvoso, caracterizado pelo aumento da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e da radiação solar na maior parte dos dias (Figura 6). Por outro lado, os meses de Maio e Junho apresentaram a maior quantidade de dias de mistura da coluna d'água.

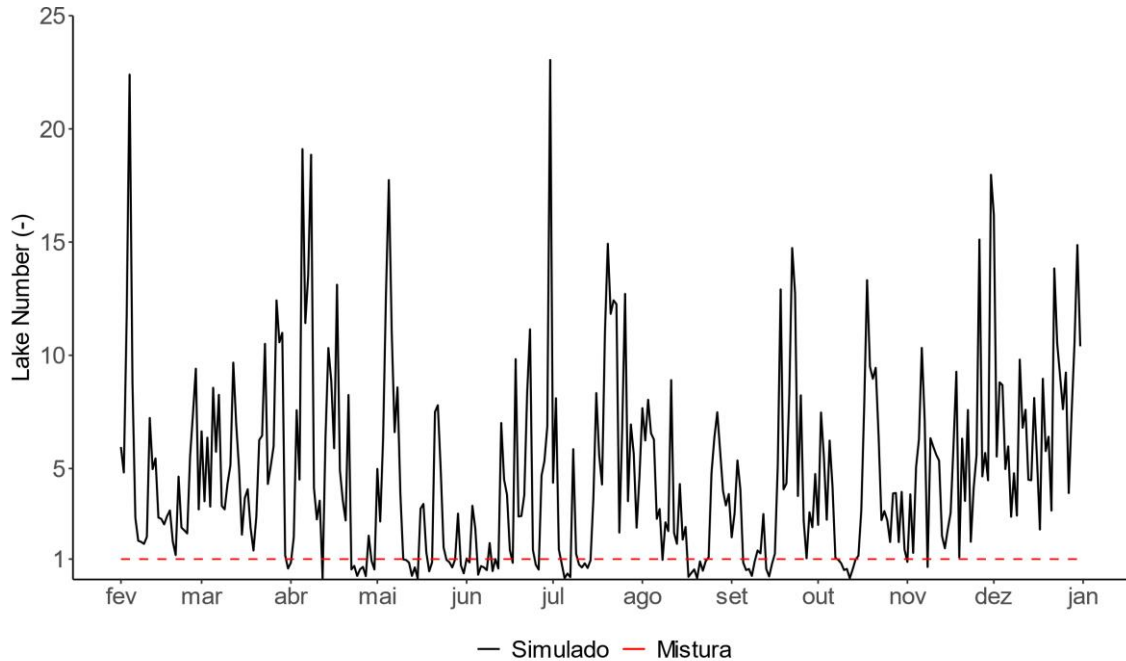
Na Lagoa da Pampulha, é possível observar que os processos de estratificação e mistura ocorrem de forma sazonal. Durante o período chuvoso, há uma maior ocorrência de dias em que a coluna d'água está estratificada, e essa estratificação é mantida ao longo dos dias, enquanto que os eventos de mistura ocorrem com maior frequência e maior duração durante o período seco.

Deus *et al.* (2013) utilizaram um modelo bidimensional para analisar o impacto da piscicultura na qualidade da água de um reservatório na Bahia. Os resultados indicaram que o número de eventos de estratificação foi maior durante os períodos de maior precipitação. Esse padrão foi observado nos meses de setembro a dezembro, em cada ano de simulação (2007-2011). Utilizando um modelo tridimensional acoplado a um modelo hidrológico para análise do tempo de detenção de um reservatório na China, Wu *et al.* (2017) verificaram que os eventos de estratificação e mistura no reservatório, no ano de 2010, ocorreram durante o verão e o inverno, respectivamente.

Para analisar a condição térmica da coluna d'água, o índice Lake Number e o índice da estabilidade de Schmidt e foram calculados para o período de calibração no ponto 4 do reservatório. Os valores obtidos estão apresentados na Figura 22 e na Figura 24, respectivamente.

O Lake Number (LN), definido por Imberger e Patterson (1981), é um índice quantitativo da estabilidade da coluna d'água. O valor abaixo de 1 para Lake Number significa que a estratificação do reservatório é fraca em relação às tensões cisalhantes provocadas pelo vento e possivelmente ocorrerá a mistura da coluna d'água.

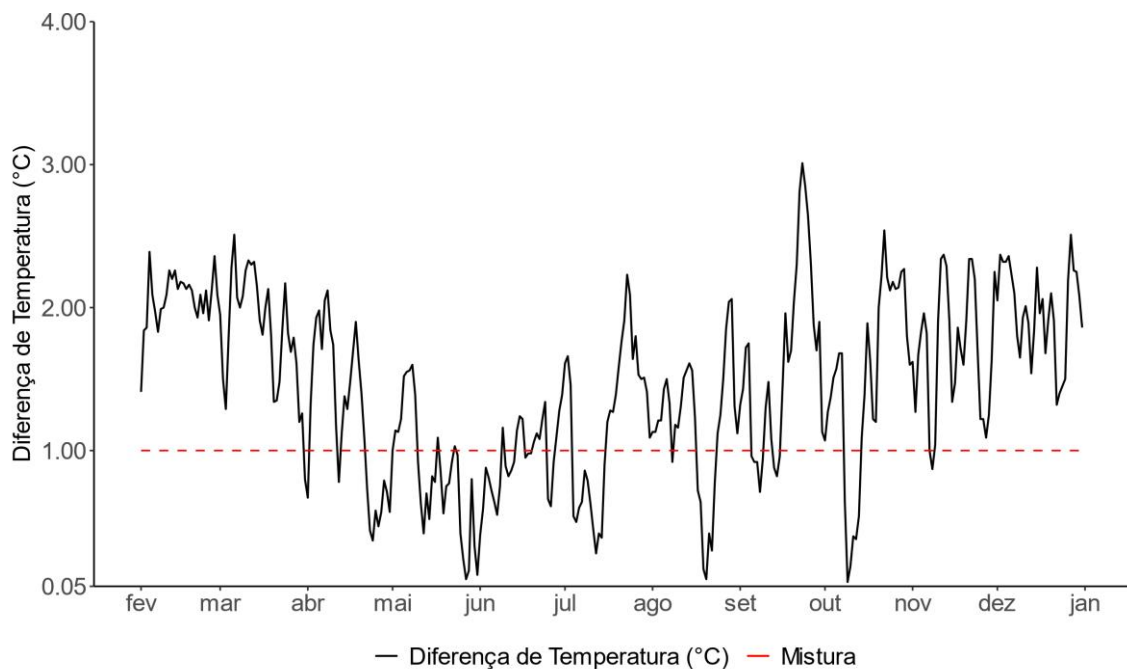
Figura 22 - Valores médios diários para o índice Lake Number no período de 01 de fevereiro a 31 de dezembro de 2013.



Fonte: Autora (2023)

A Figura 23 apresenta a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório no período de calibração.

Figura 23 - Diferença de temperatura simulada na superfície (0,5 m) e no fundo (9,5 m) para o período de calibração no ponto 4. A linha tracejada representa a condição de mistura com diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de 1°C.



Fonte: Autora (2023)

De acordo com a Figura 22 , é possível notar valores abaixo de 1 para LN nos meses de Março, Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro. Esses meses coincidem com os meses em que a diferença entre a superfície e o fundo do reservatório é menor que 1°C, apresentados na Figura 23.

Os maiores valores do Lake Number são registrados nos meses de Fevereiro, Abril, Setembro e Dezembro, ou seja, nesse período a coluna d'água possui tendência à forte estratificação. Nos meses de Setembro e Dezembro é possível observar que os valores de Lake Number coincidem com os máximos de diferença de temperatura entre a superfície e o fundo.

Analizando a quantidade de dias de mistura e de estratificação obtidos através da diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório e a quantidade de dias de mistura e de estratificação calculados a partir do LN, tem-se uma diferença nos resultados entre os dois métodos. Os valores obtidos para cada método estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Dias de estratificação e de mistura obtidos a partir de diferentes métodos de análise.

Método de análise		
Eventos	Diferença entre temperaturas	Lake Number
Nº de dias de Estratificação	236	264
Nº de dias de Mistura	98	70

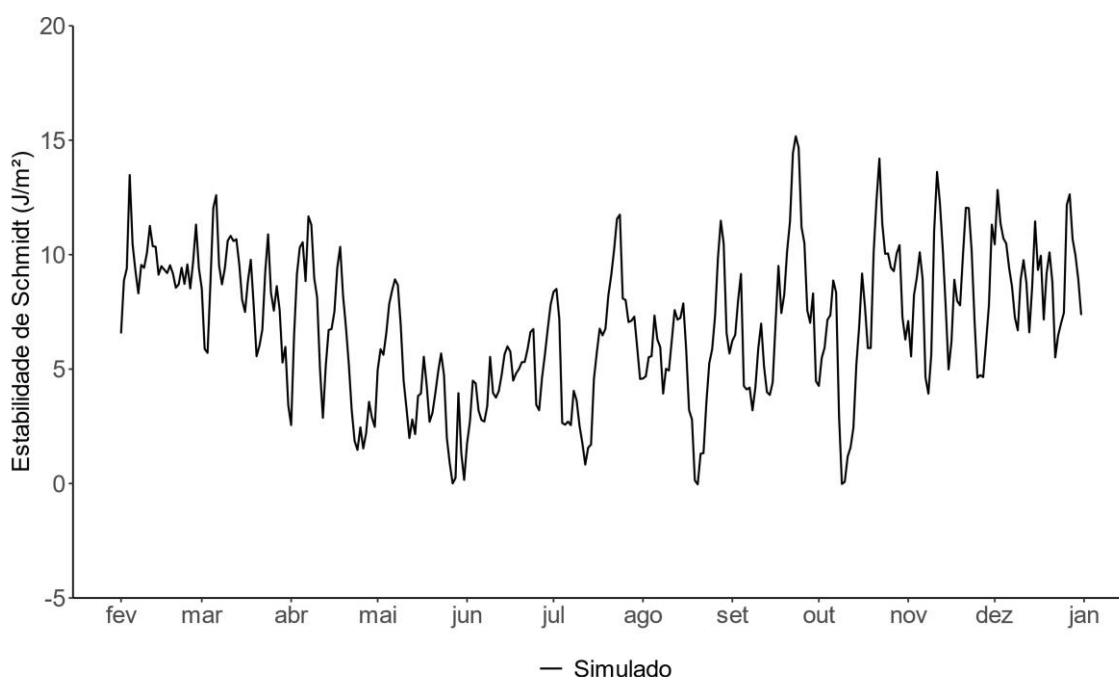
Fonte: Autora (2023)

Pode-se observar que o Lake Number tende a maximizar o número de dias de estratificação. Isso acontece porque o índice leva em consideração todas as camadas do reservatório, batimetria e a velocidade do vento para o cálculo do valor final. Logo, quando há o aquecimento das camadas da superfície e o resfriamento das outras camadas, o valor desse índice aumenta, indicando a ocorrência de um evento de estratificação (AMORIM, 2020).

Para o período, a estabilidade de Schmidt mostra as oscilações que ocorrem durante o dia e a noite, induzidas pelo aquecimento e resfriamento presentes nessa

alternância. É possível notar que a estabilidade de Schmidt apresenta uma oscilação semelhante ao padrão de variação da temperatura da superfície e do fundo do reservatório (Figura 21). Na Figura 21 é perceptível a redução da temperatura da superfície em três períodos distintos: Junho, Agosto e Outubro. Essa diminuição é responsável pela mistura da coluna d'água, que reduz o valor do índice de Schmidt. Nos meses antes desses eventos de mistura, a variação diária da estabilidade de Schmidt é de aproximadamente 12 J/m^2 , e nesses meses foi reduzido para 4 J/m^2 , 7 J/m^2 e 8 J/m^2 , respectivamente.

Figura 24 - Índice de estabilidade de Schmidt calculado a partir de temperaturas média diária simuladas durante no período de 01 de fevereiro a 31 de dezembro de 2013 no ponto 4.



Fonte: Autora (2023)

Resultados semelhantes foram obtidos por Plec *et al.* (2021) para a Lagoa da Pampulha. Os autores calcularam a estabilidade de Schmidt para o período de validação, nos meses de Maio e Junho de 2016 e obtiveram como resultado uma valores do índice de Schmidt em torno de 14 J/m^2 .

A frequência em que a estratificação e a mistura da coluna d'água ocorre é uma das formas de se classificar um reservatório (TUNDISI; TUNDISI, 2008). A partir dos resultados obtidos para o número de dias de mistura e estratificação tanto através da diferença entre temperaturas na superfície e no fundo, como por meio do Lake

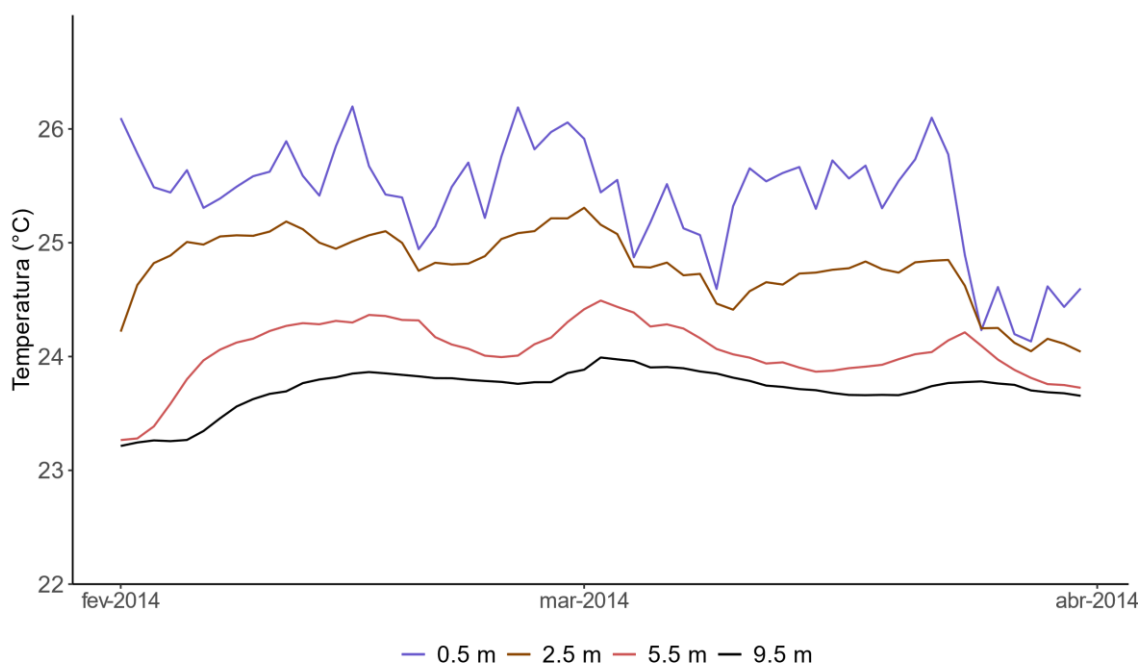
Number, pode-se inferir que a Lagoa da Pampulha se encaixa na classificação de reservatório polimítico.

Corpos d'água polimíticos são caracterizados por registrarem múltiplos períodos de mistura e estratificação ao longo do ano (ESTEVES, 2011). Na Lagoa da Pampulha ocorrem ciclos regulares de mistura e estratificação, independentemente da predominância de um sobre o outro. Essa variação sazonal do comportamento térmico sugere que o reservatório possui um regime dinâmico na temperatura, com a interação entre os processos de mistura e estratificação ao longo do ano. Vale ressaltar que esse comportamento é em relação a um ponto do reservatório (Ponto 4) e não à Lagoa como um todo.

5.2.2 Períodos de validação

A temperatura da água para o primeiro período de validação em quatro profundidades distintas no Ponto 4 está apresentada nas Figura 25.

Figura 25 - Temperatura da água simulada no ponto 4 para quatro profundidades diferentes durante o primeiro período de 01 de fevereiro de 2014 a 31 de março de 2014.



Fonte: Autora (2023)

O primeiro período de validação (V1) compreende 59 dias de simulação. É possível notar que durante esse período a coluna d'água não apresenta grandes variações de temperatura e a diferença de temperatura entre as camadas mantém a coluna d'água estratificada a maior parte do tempo. Nesse período, a temperatura máxima simulada na superfície foi de 26,2° C e no fundo de 23,9°C.

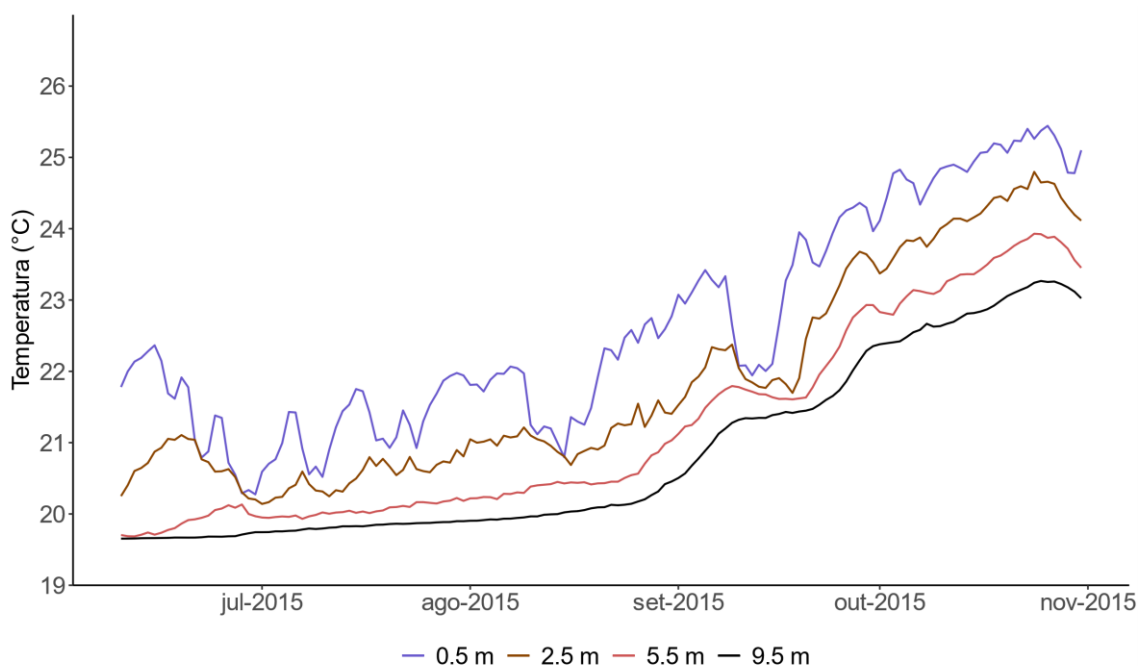
Nos dias finais da simulação é possível observar um resfriamento brusco na superfície do reservatório (0,5 m), que acarreta uma sequência de dias com eventos de mistura na coluna d'água. Durante esse período, também há uma variação nos valores de temperatura do ar e radiação solar e aumento na velocidade do vento (Figura 6), o que pode ter ocasionado o resfriamento da coluna d'água.

Van Emmerik *et al.* (2013) explicam que o resfriamento da camada superficial está relacionado à influência da temperatura e da radiação sobre a temperatura da água. Quando a temperatura do ar diminui, ocorre a transferência de calor da água para o ar, resultando no resfriamento da água e, conseqüentemente, na redução da taxa de transferência de calor sensível. De forma semelhante, quando a radiação solar diminui, menos energia está disponível para aquecer a camada superficial.

Os valores de temperatura da água dos afluentes utilizados nas simulações para validação do modelo estão relacionados com a temperatura do ar, ou seja, as vazões dos afluentes possuem a temperatura da água derivadas da temperatura do ar. A partir disso, a temperatura da superfície do reservatório é afetada diretamente pela redução da temperatura do ar e indiretamente por meio da entrada de vazões mais frias dos afluentes.

As temperaturas da água em quatro profundidades diferentes para o período de validação dois (V2), que compreende os meses do período seco, estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Temperatura da água simulada no ponto 4 para quatro profundidades diferentes durante o segundo período de 10 de junho de 2015 a 31 de outubro de 2015.



Fonte: Autora (2023)

No segundo período de validação (V2), que abrange 144 dias do ano de 2015, ocorrem principalmente eventos de estratificação, com a temperatura máxima na superfície atingindo 25,4 °C. Nos meses de julho, agosto e setembro, são observados eventos de mistura, com a temperatura da superfície alcançando 20,2 °C. Ao longo de todo esse período, a temperatura da superfície apresenta pequenas variações, porém, no mês de Outubro há um aumento na temperatura em todas as camadas, ao longo dos dias.

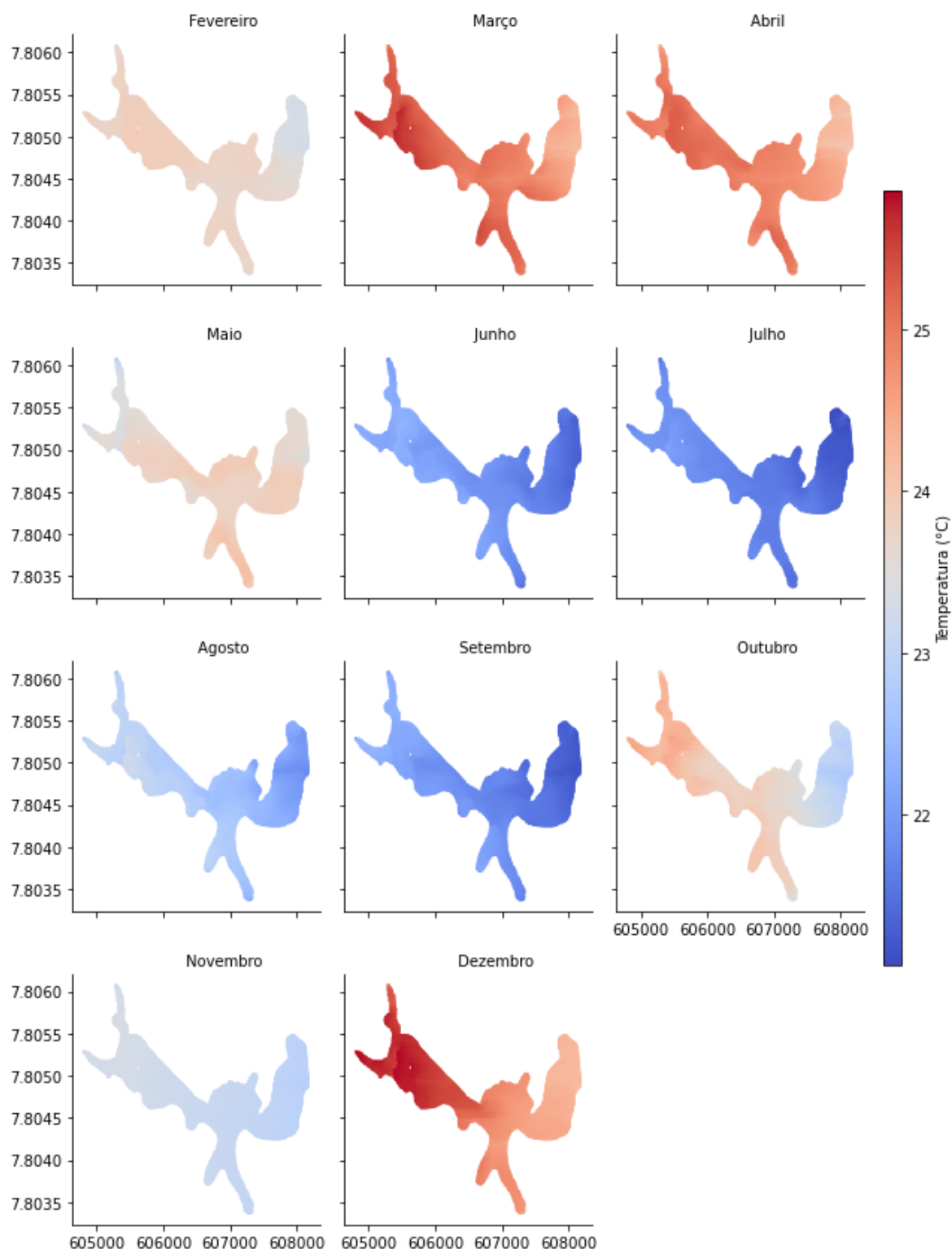
5.3 Comportamento hidrodinâmico

Abaixo estão apresentados os resultados obtidos através das simulações hidrodinâmicas para representação espacial da temperatura.

5.3.1 Espacialização da temperatura e da velocidade do fluxo na Lagoa da Pampulha

A Figura 27 apresenta a temperatura da água na superfície da Lagoa da Pampulha durante o ano de 2013, obtidas através de simulações hidrodinâmicas.

Figura 27 - Temperatura da superfície (0,5 m) na Lagoa da Pampulha simulada para os meses de fevereiro a dezembro de 2013.



Fonte: Autora (2023)

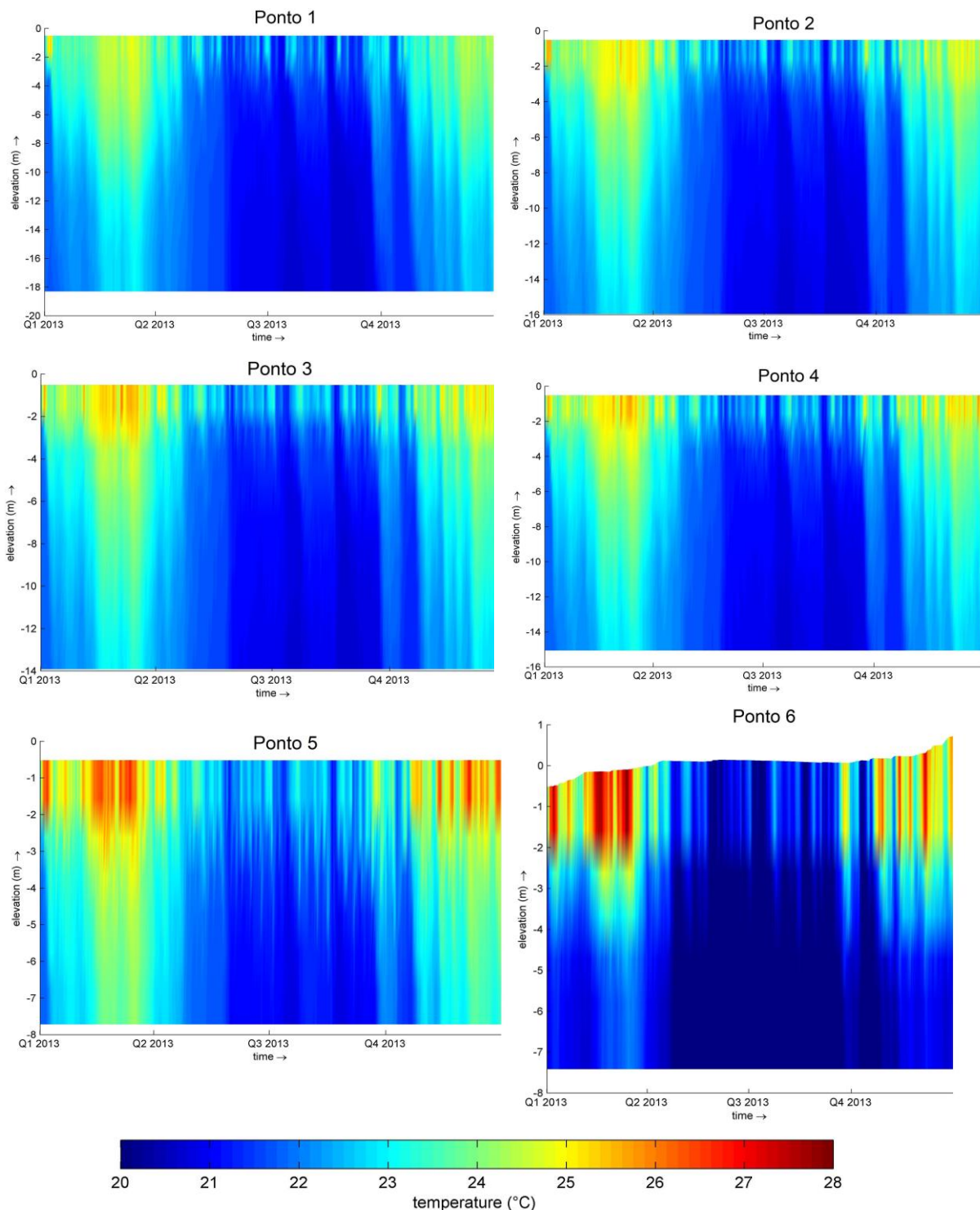
É possível observar que a temperatura da água na superfície varia de acordo com a região do reservatório. Em todos os meses apresentados, a região a jusante,

localizada no lado direito do reservatório, possui temperatura menor quando comparada à região a montante. Essa diferença de temperatura pode ser influenciada por diversos fatores como, profundidade, fluxo de água, ação dos ventos, entre outros. A circulação de água também é um fator que pode influenciar o resfriamento da superfície dessa região, uma vez que as águas que estão nessa região são advindas de outras áreas do reservatório. Durante o percurso, essas águas podem ter sido resfriadas por fatores como mistura com águas mais profundas ou por ação do vento.

Nas demais regiões do reservatório é possível observar variações de temperatura a medida que a profundidade varia. Nota-se que a temperatura na região mais a montante, próxima à Ilha dos Amores e nos braços dos córregos AABB e Olhos d'Água, a temperatura da água é maior em todos os meses. Essas regiões possuem profundidade máxima de 8 m e 5 m, respectivamente, enquanto que a região mais a jusante possui profundidade máxima de 17 m.

O modelo conseguiu representar bem as variações de temperatura entre os períodos seco e chuvoso. O mês de novembro, no entanto, aparece com a temperatura da superfície abaixo de 24° C em todo o reservatório. Pode-se inferir que a subestimação da temperatura da superfície (Figura 18), no período chuvoso, ocasionou esse comportamento em todo o reservatório. A Figura 28 apresenta o perfil de temperatura da coluna d'água em diferentes pontos do reservatório.

Figura 28- Perfil de temperatura da água simulada em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha.



Fonte: Autora (2023)

Comparando o perfil vertical de temperatura em todos os pontos, pode-se observar que o Ponto 1, localizado próximo à barragem, e o Ponto 2, localizado no estreitamento do reservatório, o Ponto 3, localizado entre os braços dos córregos

Tijuco e Mergulhão, e o Ponto 4, local do monitoramento *in situ* utilizado para o período de calibração possuem comportamento semelhantes. Apesar de estarem regiões com diferentes profundidades, o comportamento térmico representado pelos pontos apresentou grandes variações de temperatura ao longo do tempo, variando entre 20°C a 26°C.

Nos Pontos 5 e 6 é possível notar um comportamento térmico diferente dos demais pontos. No Ponto 5, localizado próximo à Ilha dos Amores, a temperatura da coluna d'água varia entre 24°C e 27°C, sendo possível notar um maior aquecimento na superfície no primeiro e no último trimestre do ano, quando comparado com os outros pontos. O Ponto 6, localizado no braço do córrego ABB, possui um comportamento térmico dinâmico ao longo do tempo, com temperaturas máximas de 28°C. É possível observar, também, o resfriamento da coluna d'água durante o período seco, apresentando temperaturas semelhantes (21°C) em todas as camadas.

A quantidade de dias em que ocorrem eventos de mistura e de estratificação, calculados a partir da diferença de temperatura entre a superfície o fundo do reservatório, para cada ponto, pode ser visto na Tabela 20. O Ponto 6 possui o maior número de dias de mistura, passando quase o ano todo nessa condição, totalizando 232 dias. A maioria dos eventos de estratificação estão concentrados nos meses de Fevereiro e Março. Além das variáveis meteorológicas apresentarem valores mais elevados, o nível d'água do reservatório está alto, quando comparado com os demais meses do ano. À medida que o nível d'água diminui, a coluna d'água fica sujeita à mistura pela ação do vento (BARBIERO; JAMES; BARKO, 1997).

Tabela 20 - Dias com eventos de estratificação em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha para o ano de 2013.

Meses	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Fevereiro	28	28	28	28	28	22
Março	30	31	30	30	27	22
Abril	20	19	20	18	17	17
Maio	17	15	19	6	18	9
Junho	16	14	24	4	24	4
Julho	21	18	22	21	22	8
Agosto	24	16	26	24	25	5
Setembro	24	19	28	24	25	5
Outubro	25	23	25	25	23	6
Novembro	28	28	28	26	24	3

Meses	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Dezembro	31	31	31	31	31	1
Total (dias)	264	242	281	238	264	102
Profundidade máxima (m)	19	16.6	13.8	9.5	8.1	7.3

Fonte: Autora (2023)

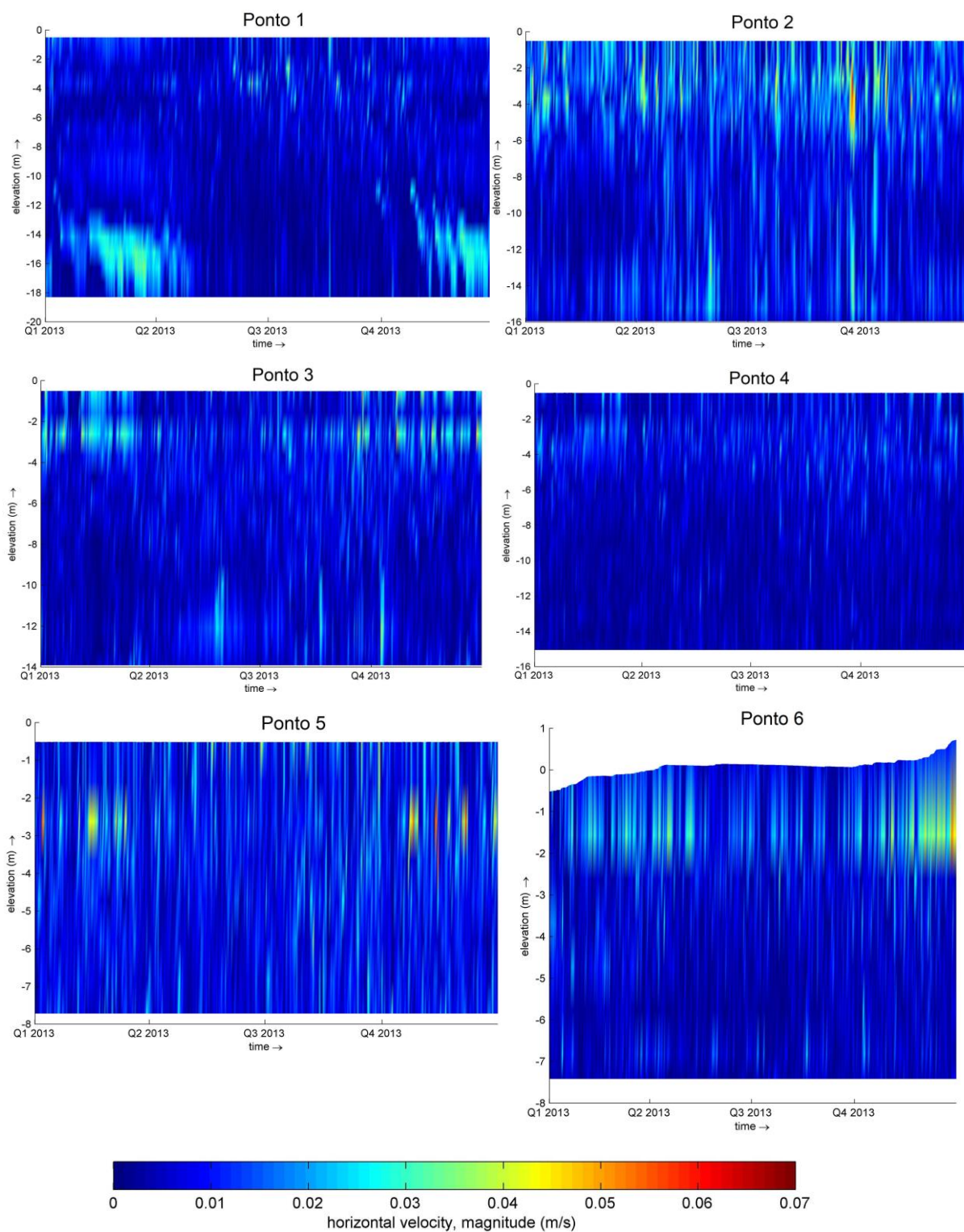
Na Figura 29, podemos observar que as maiores velocidades estão concentradas na superfície em todos os pontos. A alta velocidade nessas camadas pode ser explicada pelo fato de que a água está em contato direto com a atmosfera, onde é provável que haja maior exposição aos ventos e ao movimento das ondas (BULAT *et al.*, 2019).

O Ponto 2 apresenta maiores velocidades nos primeiros 2,0 metros da superfície. É possível observar também uma variação na velocidade ao longo do ano, havendo períodos com maiores velocidades. Quando comparado com outros pontos, a velocidade do fluxo nesse ponto é mais alta na superfície e no fundo. Pode-se inferir que esse ponto apresente tal característica devido a sua localização, próximo ao entroncamento que marca a transição de uma área mais rasa para uma área mais profunda da Lagoa.

A velocidade horizontal é influenciada por diversos fatores como o vento, a temperatura da água, a forma do lago e por eventos de estratificação. Durante períodos onde a temperatura do ar e a radiação solar são maiores, a temperatura da superfície do lago são mais altas e o gradiente de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio cria uma barreira, evitando a mistura vertical e limitando a troca de nutrientes e oxigênio entre as camadas. Essa diferença de densidade entre as camadas pode ocasionar correntes horizontais, denominadas como correntes de origem térmica ou ondas internas (ISHIKAWA *et al.*, 2021).

Gardner *et al.* (2019) explicam que a alta velocidade horizontal pode afetar diretamente de forma positiva ou negativa a qualidade da água de um corpo hídrico. Por um lado, o aumento da velocidade horizontal pode promover a mistura e a circulação da coluna d'água, ajudando a distribuir o oxigênio e nutrientes por todo o lago, contribuindo para a prevenção do acúmulo de poluentes. Por outro lado, a alta velocidade horizontal pode aumentar a quantidade de sedimentos e nutrientes na água, levando à proliferação de algas, diminuição da transparência da água e redução dos níveis de oxigênio, afetando diretamente a qualidade da água.

Figura 29 - Velocidade do fluxo simulada em diferentes profundidades em pontos distribuídos na Lagoa da Pampulha.



Fonte: Autora (2023)

6 CONCLUSÕES

O modelo hidrodinâmico tridimensional Delft3D foi calibrado e validado para a Lagoa da Pampulha, utilizando dados hidrológicos e meteorológicos de 2013. A partir disso, realizou-se simulações para a análise espaço-temporal do comportamento térmico do reservatório, bem como a análise de sensibilidade do modelo às alterações das variáveis de entrada.

Na análise de sensibilidade das variáveis de entrada referentes aos afluentes (vazões e temperatura), o modelo apresentou resultados satisfatórios para as simulações e conclui-se que a variação em 20% da vazão dos afluentes e o aumento de 2°C na temperatura da água afetam significativamente a temperatura da água na superfície do reservatório.

As variações nas vazões demonstraram um impacto significativo na temperatura do fundo do reservatório, enquanto que as variações na temperatura da água dos afluentes apresentaram maior impacto na temperatura da superfície. Os resultados obtidos em relação as variações na temperatura da água dos afluentes indicam que, para variações de $\pm 1^\circ\text{C}$, o modelo apresenta resultados menos imprecisos, ao contrário das variações de $\pm 2^\circ\text{C}$, em que foram observadas alterações significativas na temperatura simulada, especialmente quando consideradas as diferentes camadas do reservatório.

A partir disso, é crucial considerar as limitações desta análise, como a restrição a um único ponto de observação, que pode não representar completamente as variações espaciais do reservatório. Em estudos futuros, é necessário abordar uma maior diversidade de pontos de observação para obter uma compreensão mais abrangente dos padrões térmicos da Lagoa da Pampulha. Na utilização do modelo na simulação de cenários futuros, como os de mudanças climática, também deve ser considerado incertezas nos dados de entrada para a interpretação dos resultados obtidos.

Os resultados das simulações de calibração e validação mostraram um desempenho aceitável na reprodução das variações de temperatura na coluna d'água.

No período de calibração foi possível observar que o modelo conseguiu representar bem a temperatura ao longo da coluna d'água no período seco. Esse melhor desempenho do modelo no período seco pode ter sido consequência da maior

quantidade de dados disponíveis para calibração neste período e também de menores incertezas relacionadas às vazões afluentes no reservatório.

Durante o período chuvoso, o modelo não conseguiu acompanhar o aquecimento da superfície do reservatório e apresentou dificuldades em representar o perfil de estratificação térmica. A partir disso, seria recomendável testar diferentes estratégias de calibração, por exemplo, separadamente para o período chuvoso e para o período seco, com o objetivo de analisar as particularidades de cada período separadamente.

As simulações mostraram que a Lagoa da Pampulha se mantém em condições de estratificação na maior parte do ano, havendo um número reduzido de dias de mistura. No entanto, essa análise limita-se a apenas um ponto do reservatório, fazendo-se necessário haver a análise em outras regiões do reservatório, envolvendo o cálculo do índice da Estabilidade de Schmidt e Lake Number para essas regiões.

Na espacialização da temperatura da água na superfície da Lagoa da Pampulha, pode-se concluir que a distribuição da temperatura da água no reservatório é influenciada por fatores como a região, a profundidade e os fluxos de água. Na superfície, foi identificada uma variação térmica significativa entre as regiões a montante e a jusante. Por outro lado, nas regiões mais a montante, próximas à Ilha dos Amores e aos braços dos córregos AABB e Olhos d'Água, observou-se uma tendência de temperaturas mais elevadas.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS E RECOMENDAÇÕES

Para melhoria da compreensão dos processos hidrodinâmicos e da qualidade da água na Lagoa da Pampulha, sugere-se a incorporação de diferentes abordagens e métodos complementares para aumentar a precisão dos resultados, além de ampliar as possibilidades de aplicação prática das conclusões desse estudo.

Embora o modelo implementado tenha demonstrado resultados satisfatórios na calibração e na validação, a incerteza inerente aos dados de entrada e aos parâmetros de calibração podem impactar os resultados finais. Para lidar com essas incertezas e aumentar a robustez das previsões, recomenda-se a aplicação de métodos de análise de Monte Carlo ou técnicas bayesianas. Essas abordagens permitiriam a avaliação probabilística dos resultados, fornecendo uma visão mais detalhada sobre a

variabilidade dos parâmetros e, conseqüentemente, aumentando a confiabilidade dos dados para apoio à tomada de decisões.

Adicionalmente, é importante considerar o uso de modelos de qualidade da água acoplados ao modelo hidrodinâmico tridimensional já implementado. A utilização dessas ferramentas pode expandir a capacidade preditiva do modelo, permitindo a simulação não apenas das variáveis hidrodinâmicas de temperatura e velocidade de fluxo, mas também de parâmetros químicos e biológicos, essenciais para a análise da qualidade da água.

Outro aspecto relevante a ser considerado em futuros estudos é a realização de campanhas de monitoramento nictemeral que permitiriam a captura de dados ao longo de um ciclo diário completo. A realização desse tipo de monitoramento tem como objetivo complementar informações para as simulações numéricas, fornecendo uma avaliação mais detalhada das variações térmicas e hidrodinâmicas que ocorrem durante diferentes momentos do dia, especialmente em períodos críticos de estratificação e mistura. Com base nas análises apresentadas, a Lagoa da Pampulha se mantém estratificada durante a maior parte do ano, o que reforça a necessidade de um monitoramento contínuo e detalhado para avaliar melhor os ciclos de mistura e estratificação.

REFERÊNCIAS

- AFSHAR, A.; KAZEMI, H.; SAADATPOUR, M. Particle Swarm Optimization for Automatic Calibration of Large Scale Water Quality Model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. **Water Resources Management**, v. 25, n. 10, p. 2613–2632, ago. 2011.
- AL-ZUBAIDI, H. A. M.; WELLS, S. A. Analytical and Field Verification of a 3D Hydrodynamic and Water Quality Numerical Scheme Based on the 2D Formulation in CE-QUAL-W2. **Journal of Hydraulic Research**, v. 58, n. 1, p. 152–171, 2 jan. 2020.
- AMADORI, M.; GIOVANNINI, L.; TOFFOLON, M.; PICCOLROAZ, S.; ZARDI, D.; BRESCIANI, M.; GIARDINO, C.; LUCIANI, G.; KLIPHUIS, M.; VAN HAREN, H.; DIJKSTRA, H. A. Multi-Scale Evaluation of a 3D Lake Model Forced by an Atmospheric Model against Standard Monitoring Data. **Environmental Modelling & Software**, v. 139, p. 105017, maio 2021.
- AMIRKANI, M.; HADDAD, O. B.; ASHOFTEH, P.-S.; LOÁICIGA, H. A. Determination of the Optimal Level of Water Releases from a Reservoir to Control Water Quality. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 20, n. 2, p. 04015017, abr. 2016.
- AMORIM, L. F. **Hydrodynamics and Water Quality assessment of lakes bt thermal behaviour and modelling**. 2020. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- AMORIM, L. F.; MARTINS, J. R. S.; NOGUEIRA, F. F.; SILVA, F. P.; DUARTE, B. P. S.; MAGALHÃES, A. A. B.; VINÇON-LEITE, B. Hydrodynamic and Ecological 3D Modeling in Tropical Lakes. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 444, abr. 2021.
- BACHMANN, R. W.; SHARMA, S.; CANFIELD, D. E.; LECOURS, V. The Distribution and Prediction of Summer Near-Surface Water Temperatures in Lakes of the Coterminous United States and Southern Canada. **Geosciences**, v. 9, n. 7, p. 296, 5 jul. 2019.
- BARACCHINI, T.; HUMMEL, S.; VERLAAN, M.; CIMATORIBUS, A.; WÜEST, A.; BOUFFARD, D. An Automated Calibration Framework and Open Source Tools for 3D Lake Hydrodynamic Models. **Environmental Modelling & Software**, v. 134, p. 104787, dez. 2020.
- BARBIERO, R. P.; JAMES, W. F.; BARKO, J. W. The Effects of a Change in Withdrawal Operations on Phytoplankton and Nutrient Dynamics in Eau Galle Reservoir, Wisconsin (USA). **Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie**, v. 82, n. 4, p. 531–543, 1997.
- BARÇANTE, B.; NASCIMENTO, N. O.; SILVA, T. F. G.; REIS, L. A.; GIANI, A. Cyanobacteria Dynamics and Phytoplankton Species Richness as a Measure of Waterbody Recovery: Response to Phosphorus Removal Treatment in a Tropical Eutrophic Reservoir. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 106702, out. 2020.
- BARDOSSY, A.; SINGH, S. K. Robust Estimation of Hydrological Model Parameters. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 2008.

BARENZUG, K. **3D hydrodynamic modeling of Lake Zürich**. 2019. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Zurich, 2019.

BERTONE, E.; STEWART, R. A.; ZHANG, H.; O'HALLORAN, K. Analysis of the Mixing Processes in the Subtropical Advancetown Lake, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 67–79, mar. 2015.

BIRCH, S.; MCCASKIE, J. Shallow urban lakes: a challenge for lake management. *Em*: HARPER, D. M.; BRIERLEY, B.; FERGUSON, A. J. D.; PHILLIPS, G. **The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. p. 365–377.

BONNET, M.-P.; POULIN, M.; DEVAUX, J. Numerical Modeling of Thermal Stratification in a Lake Reservoir. Methodology and Case Study. **Aquatic Sciences**, v. 62, n. 2, p. 105, 2000.

BRACHT-FLYR, B.; FRITZ, S. C. Combining Lake Core Records with the Limnologic Model DYRESM-CAEDYM to Evaluate Lake Response during the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. **Journal of Paleolimnology**, v. 56, n. 1, p. 79–92, jun. 2016.

BRETT, M. T.; AHOPELTO, S. K.; BROWN, H. K.; BRYNESTAD, B. E.; BUTCHER, T. W.; COBA, E. E.; CURTIS, C. A.; DARA, J. T.; DOEDEN, K. B.; EVANS, K. R.; FAN, L.; FINLEY, J. D.; GARGUILO, N. J.; GEBREEYESUS, S. M.; GOODMAN, M. K.; GRAY, K. W.; GRINNELL, C.; GROSS, K. L.; HITE, B. R. E.; JONES, A. J.; KENYON, P. T.; KLOCK, A. M.; KOSHY, R. E.; LAWLER, A. M.; LU, M.; MARTINKOSKY, L.; MILLER-SCHULZE, J. R.; NGUYEN, Q. T. N.; RUNDE, E. R.; STULTZ, J. M.; WANG, S.; WHITE, F. P.; WILSON, C. H.; WONG, A. S.; WU, S. Y.; WURDEN, P. G.; YOUNG, T. R.; ARHONDITSIS, G. B. The Modeled and Observed Response of Lake Spokane Hypolimnetic Dissolved Oxygen Concentrations to Phosphorus Inputs. **Lake and Reservoir Management**, v. 32, n. 3, p. 246–258, 2 jul. 2016.

BRUCE, L. C.; FRASSL, M. A.; ARHONDITSIS, G. B.; GAL, G.; HAMILTON, D. P.; HANSON, P. C.; HETHERINGTON, A. L.; MELACK, J. M.; READ, J. S.; RINKE, K.; RIGOSI, A.; TROLLE, D.; WINSLOW, L.; ADRIAN, R.; AYALA, A. I.; BOCANIOV, S. A.; BOEHRER, B.; BOON, C.; BROOKES, J. D.; BUECHE, T.; BUSCH, B. D.; COPETTI, D.; CORTÉS, A.; DE EYTO, E.; ELLIOTT, J. A.; GALLINA, N.; GILBOA, Y.; GUYENNON, N.; HUANG, L.; KERIMOGLU, O.; LENTERS, J. D.; MACINTYRE, S.; MAKLER-PICK, V.; MCBRIDE, C. G.; MOREIRA, S.; ÖZKUNDAKCI, D.; PILOTTI, M.; RUEDA, F. J.; RUSAK, J. A.; SAMAL, N. R.; SCHMID, M.; SHATWELL, T.; SNORTHHEIM, C.; SOULIGNAC, F.; VALERIO, G.; VAN DER LINDEN, L.; VETTER, M.; VINÇON-LEITE, B.; WANG, J.; WEBER, M.; WICKRAMARATNE, C.; WOOLWAY, R. I.; YAO, H.; HIPSEY, M. R. A Multi-Lake Comparative Analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-Testing across a Global Observatory Network. **Environmental Modelling & Software**, v. 102, p. 274–291, abr. 2018.

BRUNETTI, FRANCO. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. [s.l.] Pearson - Prentice Hall, 2008. v. 1425 p.

BULAT, M.; BIRON, P. M.; LACEY, J. R. W.; BOTREL, M.; HUDON, C.; MARANGER, R. A Three-dimensional Numerical Model Investigation of the Impact of Submerged

Macrophytes on Flow Dynamics in a Large Fluvial Lake. **Freshwater Biology**, v. 64, n. 9, p. 1627–1642, set. 2019.

CHANUDET, V.; SMITS, J.; VAN BEEK, J.; BODERIE, P.; GUÉRIN, F.; SERÇA, D.; DESHMUKH, C.; DESCLOUX, S. Hydrodynamic and Water Quality 3D Modelling of the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR): Predictions and Results of Scenarios Related to Reservoir Management, Hydrometeorology and Nutrient Input. **Hydroécologie Appliquée**, v. 19, p. 87–118, 2016.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. Long Grove, Ill: Waveland Press, 2008. 844 p.

CHEN, H.; YAO, L.; FITRI, A. The Influence Mechanism Research of Inflow Temperature in Different Time Scale on the Water Temperature Structure. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 365, n. 1, p. 012058, 1 out. 2019.

CHEN, S. C.; LEI, C.; CAREY, C.; GANTZER, P. A.; LITTLE, J. C. A Coupled Three-dimensional Hydrodynamic Model for Predicting Hypolimnetic. **A coupled three-dimensional hydrodynamic model for predicting hypolimnetic**, n. 53, 2017.

COPPENS, J.; TROLLE, D.; JEPPESEN, E.; BEKLIOĞLU, M. The Impact of Climate Change on a Mediterranean Shallow Lake: Insights Based on Catchment and Lake Modelling. **Regional Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 62, jun. 2020.

COUTINHO, W. **EMPREGO DA FLOTAÇÃO A AR DISSOLVIDO NO TRATAMENTO DE CURSOS D'ÁGUA: Avaliação de Desempenho da Estação de Tratamento dos Córregos Ressaca e Sarandi Afluentes à Represa da Pampulha**. 2007. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CPRM. **Estudo hidrogeológico da bacia da Lagoa da Pampulha** 2001.

DALE, H. M.; GILLESPIE, T. Diurnal Fluctuations of Temperature near the Bottom of Shallow Water Bodies as Affected by Solar Radiation, Bottom Color and Water Circulation. **Hydrobiologia**, v. 55, n. 1, p. 87–92, jul. 1977.

DE GOEDE, E. D. Historical Overview of 2D and 3D Hydrodynamic Modelling of Shallow Water Flows in the Netherlands. **Ocean Dynamics**, v. 70, n. 4, p. 521–539, abr. 2020.

DEHBALAEI, N. Assessment of Ilam Reservoir Eutrophication Response in Controlling Water Inflow. p. 20, 2016.

DELTARES. Delft3D-FLOW User Manual. p. 710, 2020.

DEUS, R.; BRITO, D.; KENOV, I. A.; LIMA, M.; COSTA, V.; MEDEIROS, A.; NEVES, R.; ALVES, C. N. Three-Dimensional Model for Analysis of Spatial and Temporal Patterns of Phytoplankton in Tucuruí Reservoir, Pará, Brazil. **Ecological Modelling**, v. 253, p. 28–43, mar. 2013a.

DEUS, R.; BRITO, D.; MATEUS, M.; KENOV, I.; FORNARO, A.; NEVES, R.; ALVES, C. N. Impact Evaluation of a Pisciculture in the Tucuruí Reservoir (Pará, Brazil) Using

a Two-Dimensional Water Quality Model. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 1–12, abr. 2013b.

DISSANAYAKE, P.; HOFMANN, H.; PEETERS, F. Comparison of Results from Two 3D Hydrodynamic Models with Field Data: Internal Seiches and Horizontal Currents. **Inland Waters**, v. 9, n. 2, p. 239–260, 3 abr. 2019.

DJIHOUESSI, M. B.; AINA, M. P. A Review of Hydrodynamics and Water Quality of Lake Nokoué: Current State of Knowledge and Prospects for Further Research. **Regional Studies in Marine Science**, v. 18, p. 57–67, fev. 2018.

ESTEVEES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro, Brasil: Interciência / Finep, 2011.

FADEL, A.; LEMAIRE, B. J.; VINÇON-LEITE, B.; ATOUI, A.; SLIM, K.; TASSIN, B. On the Successful Use of a Simplified Model to Simulate the Succession of Toxic Cyanobacteria in a Hypereutrophic Reservoir with a Highly Fluctuating Water Level. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 26, p. 20934–20948, set. 2017.

FERNÁNDEZ CASTRO, B.; BOUFFARD, D.; TROY, C.; ULLOA, H. N.; PICCOLROAZ, S.; SEPÚLVEDA STEINER, O.; CHMIEL, H. E.; SERRA MONCADAS, L.; LAVANCHY, S.; WÜEST, A. Seasonality Modulates Wind-Driven Mixing Pathways in a Large Lake. **Communications Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p. 215, dez. 2021.

FRIESE, K.; SCHMIDT, G.; DE LENA, J. C.; ARIAS NALINI, H.; ZACHMANN, D. W. Anthropogenic Influence on the Degradation of an Urban Lake – The Pampulha Reservoir in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. **Limnologica**, v. 40, n. 2, p. 114–125, maio 2010.

GARDNER, J. R.; PAVELSKY, T. M.; DOYLE, M. W. The Abundance, Size, and Spacing of Lakes and Reservoirs Connected to River Networks. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 5, p. 2592–2601, 16 mar. 2019.

GAUDARD, A.; SCHWEFEL, R.; VINNÄ, L. R.; SCHMID, M.; WÜEST, A.; BOUFFARD, D. Optimizing the Parameterization of Deep Mixing and Internal Seiches in One-Dimensional Hydrodynamic Models: A Case Study with Simstrat v1.3. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 9, p. 3411–3423, 18 set. 2017.

GLOCK, K.; TRITTHART, M.; HABERSACK, H.; HAUER, C. Comparison of Hydrodynamics Simulated by 1D, 2D and 3D Models Focusing on Bed Shear Stresses. **Water**, v. 11, n. 2, p. 226, 29 jan. 2019.

GOLYJESWKI, O. W. **Simulation of thermal stratification using the 2DV (CE-QUAL-W2) and a 3D (Delft3D) model. The case study: Passaúna Reservoir**. 2020. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2020.

HAMILTON, D. P.; HOCKING, G. C.; PATTERSON, J. C. Criteria for Selection of Spatial Dimension in the Application of One- and Two-Dimensional Water Quality Models. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 43, n. 3–6, p. 387–393, mar. 1997.

HENDERSON-SELLERS, B. Calculating the Surface Energy Balance for Lake and Reservoir Modeling: A Review. **Reviews of Geophysics**, v. 24, n. 3, p. 625–649, ago. 1986.

HILLEBRAND, G.; KLASSEN, I.; OLSEN, N. R. B. 3D CFD Modelling of Velocities and Sediment Transport in the Iffezheim Hydropower Reservoir. **Hydrology Research**, v. 48, n. 1, p. 147–159, 1 fev. 2017.

HIPSEY, M. R.; BRUCE, L. C.; BOON, C.; BUSCH, B.; CAREY, C. C.; HAMILTON, D. P.; HANSON, P. C.; READ, J. S.; DE SOUSA, E.; WEBER, M.; WINSLOW, L. A. A General Lake Model (GLM 3.0) for Linking with High-Frequency Sensor Data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 1, p. 473–523, 29 jan. 2019.

HORN, L. R. **Determinação da curva-chave do Rio João Gualberto - Florianópolis, SC**. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

HUANG, L.; FANG, H.; REIBLE, D. Mathematical Model for Interactions and Transport of Phosphorus and Sediment in the Three Gorges Reservoir. **Water Research**, v. 85, p. 393–403, nov. 2015.

IDSO, S.B. **Limnology Oceanography**. [s.l.: s.n.]

IMBERGER, J.; PATTERSON, J. C. A DYNAMIC RESERVOIR SIMULATION MODEL - DYRESM: 5. *Em: Transport Models/Inland & Coastal Waters*. [s.l.] Elsevier, 1981. p. 310–361.

ISHIKAWA, M.; GONZALEZ, W.; GOLYJESWSKI, O.; SALES, G.; RIGOTTI, J. A.; BLENINGER, T.; MANNICH, M.; LORKE, A. **Effects of dimensionality on the performance of hydrodynamic models**. [s.l.] Hydrology, 20 set. 2021. . Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/preprints/gmd-2021-250/gmd-2021-250.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

Jl, Z.-C. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 89, n. 39, p. 366–366, 23 set. 2008.

JØRGENSEN, S. E. State-of-the-art Management Models for Lakes and Reservoirs. **Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use**, v. 1, n. 2, p. 79–87, out. 1995.

KERIMOGLU, O.; RINKE, K. Stratification Dynamics in a Shallow Reservoir under Different Hydro-Meteorological Scenarios and Operational Strategies: NONWINTER STRATIFICATION DYNAMICS. **Water Resources Research**, v. 49, n. 11, p. 7518–7527, nov. 2013.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R.; TRYGGVASON, G. **Fluid mechanics**. Amsterdam ; Boston: Elsevier/AP, 2016. 921 p.

LANG, Y.; HU, Z.; HAO, R.; LI, Y.; HAN, L. Comparative Study on Water Temperature Stratified Flow under Different Vertical Coordinate Systems in Delft3D. **Water**, v. 14, n. 17, p. 2737, 2 set. 2022.

LAP, B. Q.; MORI, K. A Two-Dimensional Numerical Model of Wind-Induced Flow and Water Quality in Closed Water Bodies. **Paddy and Water Environment**, v. 5, n. 1, p. 29–40, 7 fev. 2007.

LI, J.; YANG, W.; LI, W.; MU, L.; JIN, Z. Coupled Hydrodynamic and Water Quality Simulation of Algal Bloom in the Three Gorges Reservoir, China. **Ecological Engineering**, v. 119, p. 97–108, ago. 2018a.

LI, Y.; ZHANG, Q.; YE, R.; YAO, J.; TAN, Z. 3D Hydrodynamic Investigation of Thermal Regime in a Large River-Lake-Floodplain System (Poyang Lake, China). **Journal of Hydrology**, v. 567, p. 86–101, dez. 2018b.

LI, Z.; ZHU, D.; CHEN, Y.; FANG, X.; LIU, Z.; MA, W. Simulating and Understanding Effects of Water Level Fluctuations on Thermal Regimes in Miyun Reservoir. **Hydrological Sciences Journal**, p. 1–18, 9 fev. 2016.

LIU, C.; WANG, S.; WANG, L.; LIU, X.; ZHOU, H.; LI, B.; DU, Y. Characteristics and Driving Factors of Thermal Stratification Evolution in Daheiting Reservoir. **E3S Web of Conferences**, v. 261, p. 04010, 2021.

LIU, S.; YE, Q.; WU, S.; STIVE, M. Horizontal Circulation Patterns in a Large Shallow Lake: Taihu Lake, China. **Water**, v. 10, n. 6, p. 792, 15 jun. 2018.

LIU, S.; YE, Q.; WU, S.; STIVE, M. J. F. Wind Effects on the Water Age in a Large Shallow Lake. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1246, 27 abr. 2020.

LUO, L.; HAMILTON, D.; LAN, J.; MCBRIDE, C.; TROLLE, D. Autocalibration of a One-Dimensional Hydrodynamic-Ecological Model (DYRESM 4.0-CAEDYM 3.1) Using a Monte Carlo Approach: Simulations of Hypoxic Events in a Polymictic Lake. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 3, p. 903–913, 9 mar. 2018.

MAGEE, M. R.; WU, C. H. Response of Water Temperatures and Stratification to Changing Climate in Three Lakes with Different Morphometry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6253–6274, 11 dez. 2017.

MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C.; SCHOTTMAN, R. W. **Hydrodynamics and transport for water quality modeling**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 794 p.

MATOS, A. C. de S.; LEMOS, R. S.; SILVA, T. F. G.; ELEUTÉRIO, J. C.; NILO NASCIMENTO. Evolução do uso e ocupação do solo em mananciais de abastecimento metropolitano na região metropolitana de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. Em: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. [...]. Florianópolis: 2017.

MCMILLAN, H.; KRUEGER, T.; FREER, J. Benchmarking Observational Uncertainties for Hydrology: Rainfall, River Discharge and Water Quality. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 26, p. 4078–4111, 30 dez. 2012.

MESQUITA, J. B. de F.; LIMA NETO, I. E.; RAABE, A.; DE ARAÚJO, J. C. The Influence of Hydroclimatic Conditions and Water Quality on Evaporation Rates of a Tropical Lake. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125456, nov. 2020.

MICHAEL, A. **Tridimensional Hydrodynamic Modeling of Lake Geneva**. 2013. Unpublished, 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.25389.95203>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

NIELSEN, A.; TROLLE, D.; BJERRING, R.; SØNDERGAARD, M.; OLESEN, J. E.; JANSE, J. H.; MOOIJ, W. M.; JEPPESEN, E. Effects of Climate and Nutrient Load on the Water Quality of Shallow Lakes Assessed through Ensemble Runs by PCLake. **Ecological Applications**, v. 24, n. 8, p. 1926–1944, dez. 2014.

NOGUEIRA, M. M. **Elaboração da curva-chave dos Córregos Ressaca e Sarandi utilizando métodos computacionais**. 2015. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

OKHRAVI, S.; SOKÁČ, M.; VELÍSKOVÁ, Y. Three-Dimensional Numerical Modeling of Water Temperature Distribution in the Rozgrund Reservoir, Slovakia. **Acta Hydrologica Slovaca**, v. 23, n. 2, p. 305–316, 8 dez. 2022.

PALMAN, L. E.; TRENTO, A. E.; ALVAREZ, A. M. Scalar Dispersion in the Salado River Through Tracers Test and Two-Dimensional Model. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 12, p. 513, dez. 2021.

PICCIONI, F.; CASENAVE, C.; BARAGATTI, M.; CLOEZ, B.; VINÇON-LEITE, B. Calibration of a Complex Hydro-Ecological Model through Approximate Bayesian Computation and Random Forest Combined with Sensitivity Analysis. **Ecological Informatics**, v. 71, p. 101764, nov. 2022.

PICCIONI, F.; CASENAVE, C.; LEMAIRE, B. J.; LE MOIGNE, P.; DUBOIS, P.; VINÇON-LEITE, B. The Thermal Response of Small and Shallow Lakes to Climate Change: New Insights from 3D Hindcast Modelling. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 2, p. 439–456, 30 abr. 2021.

PLEC, D. F.; SILVA, T. F. das G.; VINÇON-LEITE, B.; NASCIMENTO, N. Thermal Functioning of a Tropical Reservoir Assessed through Three-Dimensional Modelling and High-Frequency Monitoring. **RBRH**, v. 26, p. e15, 2021.

POLLI, B. A.; BLENINGER, T. Comparison of 1D and 3D Reservoir Heat Transport Models and Temperature Effects on Mass Transport. **RBRH**, v. 24, p. e30, 2019.

POPESCU, I. **Computational Hydraulics: Numerical Methods and Modelling**. Londres: IWA Publishing, 2014.

RAHBANI, M. A Comparison between the Suspended Sediment Concentrations Derived from DELFT3D Model and Collected Using Transmissometer – a Case Study in Tidally Dominated Area of Dithmarschen Bight. **Oceanologia**, v. 57, n. 1, p. 44–49, jan. 2015.

READ, J. S.; HAMILTON, D. P.; JONES, I. D.; MURAOKA, K.; WINSLOW, L. A.; KROISS, R.; WU, C. H.; GAISER, E. Derivation of Lake Mixing and Stratification Indices from High-Resolution Lake Buoy Data. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 11, p. 1325–1336, nov. 2011.

RIVERSON, J.; COATS, R.; COSTA-CABRAL, M.; DETTINGER, M.; REUTER, J.; SAHOO, G.; SCHLADOW, G. Modeling the Transport of Nutrients and Sediment Loads into Lake Tahoe under Projected Climatic Changes. **Climatic Change**, v. 116, n. 1, p. 35–50, jan. 2013.

ROCHA, S. M. G.; MOLINAS, E.; RODRIGUES, I. S.; LIMA NETO, I. E. Assessment of Total Evaporation Rates and Its Surface Distribution by Tridimensional Modelling and Remote Sensing. **Journal of Environmental Management**, v. 327, p. 116846, fev. 2023.

SABETI, R.; JAMALI, S.; JAMALI, H. H. Simulation of Thermal Stratification and Salinity Using the Ce-Qual-W2 Model (Case Study: Mamloo Dam). **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 7, n. 3, p. 1664–1669, 12 jun. 2017.

SANTIAGO, J. de S.; SILVA, T. F. das G.; ANDRADE, L. S. Comparação de métodos para modelagem da temperatura da água de rios a partir da temperatura do ar. Em: 2022, Caruaru, Pernambuco. [...]. Caruaru, Pernambuco: 2022.

SANTOS, K. D.; DE CASTRO, S. ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA PAMPULHA / BELO HORIZONTE-MG. v. 16, n. 1, p. 17, 2021.

SHARAF, N.; LEMAIRE, B. J.; FADEL, A.; SLIM, K.; VINÇON-LEITE, B. Assessing the Thermal Regime of Poorly Monitored Reservoirs with a Combined Satellite and Three-Dimensional Modeling Approach. **Inland Waters**, v. 11, n. 3, p. 302–314, 3 jul. 2021.

SHEN, Y.; ZHENG, Y.; KOMATSU, T.; KOHASHI, N. A Three-Dimensional Numerical Model of Hydrodynamics and Water Quality in Hakata Bay. **Ocean Engineering**, v. 29, n. 4, p. 461–473, abr. 2002.

SILVA, T. F. D. G.; VINÇON-LEITE, B.; GIANI, A.; FIGUEREDO, C. C.; PETRUCCI, G.; LEMAIRE, B.; SPERLING, E. V.; TASSIN, B.; SEIDL, M.; KHAC, V. T.; VIANA, P. S.; VIANA, V. F. L.; TOSCANO, R. A.; RODRIGUES, B. H. M.; NASCIMENTO, N. D. O. Modelagem da Lagoa da Pampulha: uma ferramenta para avaliar o impacto da bacia hidrográfica na dinâmica do fitoplâncton. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 95–108, mar. 2016.

SILVA, T. F. das G. **Suivi et modélisation de la dynamique des cyanobactéries dans les lacs urbains au sein de leur bassin versant**. 2014. Universidade Federal de Minas Gerais e Université Paris-Est, Belo Horizonte, 2014.

SOARES, L. M. V.; CALIJURI, M. do C. Deterministic Modelling of Freshwater Lakes and Reservoirs: Current Trends and Recent Progress. **Environmental Modelling & Software**, v. 144, p. 105143, out. 2021.

SOARES, L. M. V.; SILVA, T. F. das G.; VINÇON-LEITE, B.; ELEUTÉRIO, J. C.; LIMA, L. C. de; NASCIMENTO, N. de O. Modelling Drought Impacts on the Hydrodynamics

of a Tropical Water Supply Reservoir. **Inland Waters**, v. 9, n. 4, p. 422–437, 2 out. 2019.

SOULIGNAC, F.; ANNEVILLE, O.; BOUFFARD, D.; CHANUDET, V.; DAMBRINE, E.; GUÉNAND, Y.; HARMEL, T.; IBELINGS, B. W.; TREVISAN, D.; UITTENBOGAARD, R.; DANIS, P.-A. Contribution of 3D Coupled Hydrodynamic-Ecological Modeling to Assess the Representativeness of a Sampling Protocol for Lake Water Quality Assessment. **Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems**, n. 420, p. 42, 2019.

SOULIGNAC, F.; VINÇON-LEITE, B.; LEMAIRE, B. J.; SCARATI MARTINS, J. R.; BONHOMME, C.; DUBOIS, P.; MEZEMATE, Y.; TCHIGUIRINSKAIA, I.; SCHERTZER, D.; TASSIN, B. Performance Assessment of a 3D Hydrodynamic Model Using High Temporal Resolution Measurements in a Shallow Urban Lake. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 22, n. 4, p. 309–322, ago. 2017.

SPERLING, M. von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 2005.

STANSBY, P.; CHINI, N.; LLOYD, P. Oscillatory Flows around a Headland by 3D Modelling with Hydrostatic Pressure and Implicit Bed Shear Stress Comparing with Experiment and Depth-Averaged Modelling. **Coastal Engineering**, v. 116, p. 1–14, out. 2016.

TAKKOUK, S.; CASAMITJANA, X. Application of the DYRESM–CAEDYM Model to the Sau Reservoir Situated in Catalonia, Spain. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 27, p. 12453–12466, 8 jun. 2016.

TEIXEIRA, T. M. de N. **Modelagem Hidrodinâmica Tridimensional do Lago Paranoá para análise dos efeitos da operação do reservatório**. 2019. Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

TORRES, I. C.; RESCK, R. P.; PINTO-COELHO, R. M. Mass balance estimation of nitrogen, carbon, phosphorus and suspended solids in the urban eutrophic, Pampulha reservoir, Brazil. v. 19, n. 1, p. 79–91, 2007.

TORRIANO, F. Numerical Investigation of 3D Flow and Thermal Effects in a Disc-Type Transformer Winding. **Applied Thermal Engineering**, 2012.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.

VAN DER LINDEN, L.; DALY, R.; BURCH, M. Suitability of a Coupled Hydrodynamic Water Quality Model to Predict Changes in Water Quality from Altered Meteorological Boundary Conditions. **Water**, v. 7, n. 12, p. 348–361, 20 jan. 2015.

VAN EMMERIK, T. H. M.; RIMMER, A.; LECHINSKY, Y.; WENKER, K. J. R.; NUSSBOIM, S.; VAN DE GIESEN, N. C. Measuring Heat Balance Residual at Lake Surface Using Distributed Temperature Sensing: Measuring Lake Heat Balance

Residual Using DTS. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 11, n. 2, p. 79–90, fev. 2013.

VIANINI NETO, L. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. 2016. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

VINÇON-LEITE, B.; CASENAVE, C. Modelling Eutrophication in Lake Ecosystems: A Review. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 2985–3001, fev. 2019.

WAHL, B.; PEETERS, F. Effect of Climatic Changes on Stratification and Deep-water Renewal in Lake. Pdf. v. 59, p. 1035–1052, 1 abr. 2014.

WANG, L. Eutrophication Model for River-Type Reservoir Tributaries and Its Applications. v. 2, n. 1, p. 9, 2009.

WANG, Q.; LI, S.; JIA, P.; QI, C.; DING, F. A Review of Surface Water Quality Models. **The Scientific World Journal**, v. 2013, p. 1–7, 2013.

WANG, Y.; LIU, G.; ZHU, S.; HU, W.; ZHANG, H.; ZHOU, X.; PENG, Z. Assessment of Impacts of Water Transfer on Lake Flow and Water Quality in Lake Chaohu Using a Three-Dimensional Hydrodynamic-Ecological Model. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 46, p. 101333, abr. 2023.

WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 3a. ed. [s.l.] Academic Press, 2001. 2691 p.

WU, B.; WANG, G.; JIANG, H.; WANG, J.; LIU, C. Impact of Revised Thermal Stability on Pollutant Transport Time in a Deep Reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 671–687, abr. 2016.

WU, B.; WANG, G.; WANG, Z.; LIU, C.; MA, J. Integrated Hydrologic and Hydrodynamic Modeling to Assess Water Exchange in a Data-Scarce Reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 15–30, dez. 2017.

WÜEST, A.; LORKE, A. Small-Scale Turbulence and Mixing: Energy Fluxes in Stratified Lakes. *Em: Encyclopedia of Inland Waters*. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 628–635.

WUEST, A.; SCHMID, M. **Handbook of Environmental Fluid Dynamics**. Indiana: CRC Press, 2013. v. 2153–168 p.

XUE, P.; SCHWAB, D. J.; HU, S. An Investigation of the Thermal Response to Meteorological Forcing in a Hydrodynamic Model of Lake Superior: HYDRODYNAMIC SIMULATION OF LAKE SUPERIOR. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 120, n. 7, p. 5233–5253, jul. 2015.

YE, X.; ANDERSON, E. J.; CHU, P. Y.; HUANG, C.; XUE, P. Impact of Water Mixing and Ice Formation on the Warming of Lake Superior: A Model-guided Mechanism Study. **Limnology and Oceanography**, v. 64, n. 2, p. 558–574, mar. 2019.

ZAMANI, B.; KOCH, M.; FAKHERI-FARD, A.; MORIDI, A. Prediction and Analysis of Eutrophication in a Reservoir Using Three-Dimensional Modeling: Application to the Planned Abolabbas Reservoir, Iran. p. 9, 2014.

ZAMANI, B.; KOCH, M.; HODGES, B. R.; FAKHERI-FARD, A. Pre-Impoundment Assessment of the Limnological Processes and Eutrophication in a Reservoir Using Three-Dimensional Modeling: Abolabbas Reservoir, Iran. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, v. 6, n. 1, p. 48–61, 2 jan. 2018.

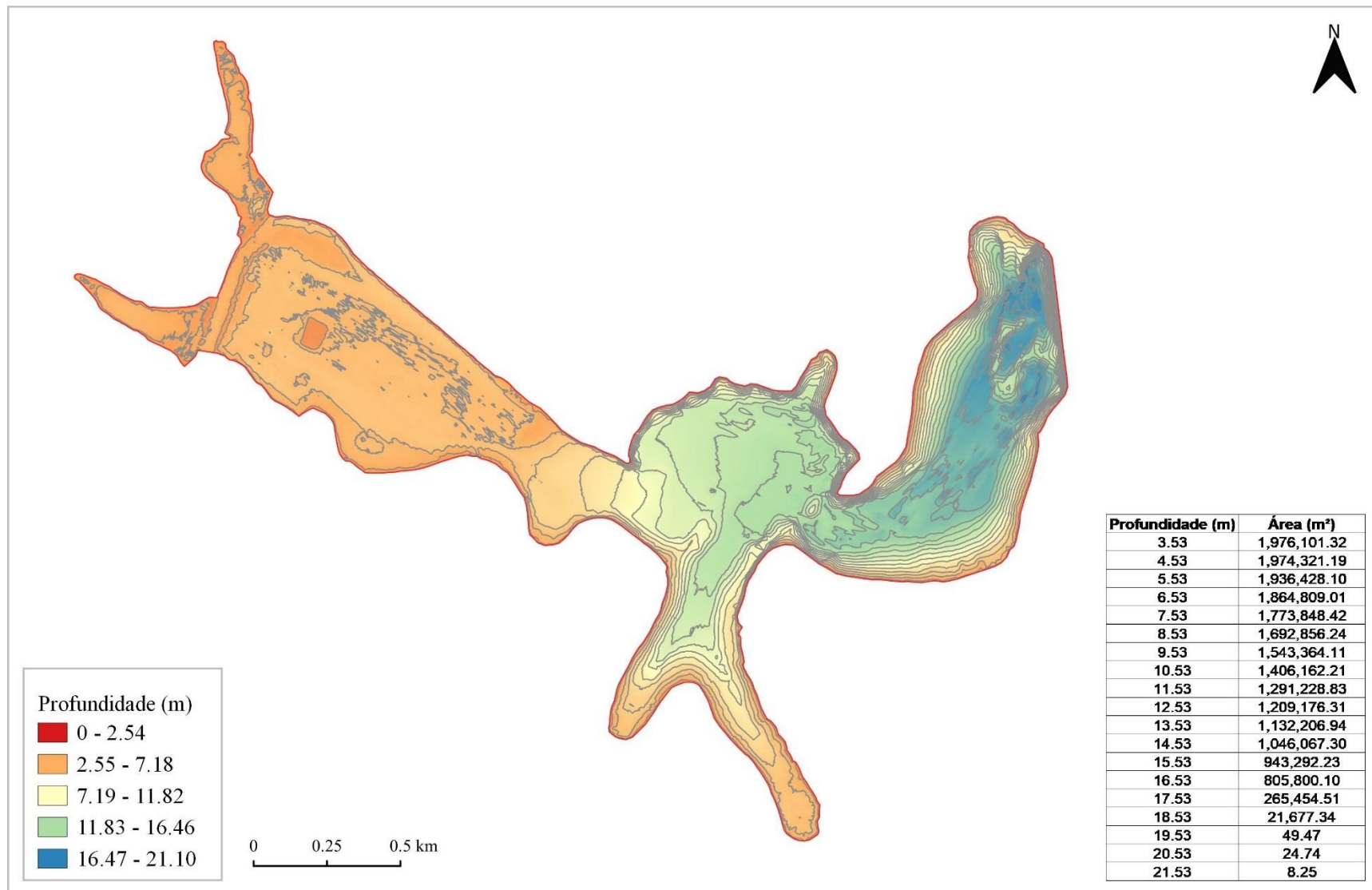
ZHANG, F.; ZHANG, H.; BERTONE, E.; STEWART, R.; LEMCKERT, C.; CINQUE, K. Numerical Study of the Thermal Structure of a Stratified Temperate Monomictic Drinking Water Reservoir. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 30, p. 100699, ago. 2020.

ZHANG, Y.; GAO, X.; SUN, B.; LIU, C.; LI, B.; LIU, X. Tracking Thermal Structure Evolution: An Objective Practice in a Stratified Reservoir Based on High-Frequency Measurements. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 39, p. 100989, fev. 2022.

ZHAO, L.; LI, Y.; ZOU, R.; HE, B.; ZHU, X.; LIU, Y.; WANG, J.; ZHU, Y. A Three-Dimensional Water Quality Modeling Approach for Exploring the Eutrophication Responses to Load Reduction Scenarios in Lake Yilong (China). **Environmental Pollution**, v. 177, p. 13–21, jun. 2013.

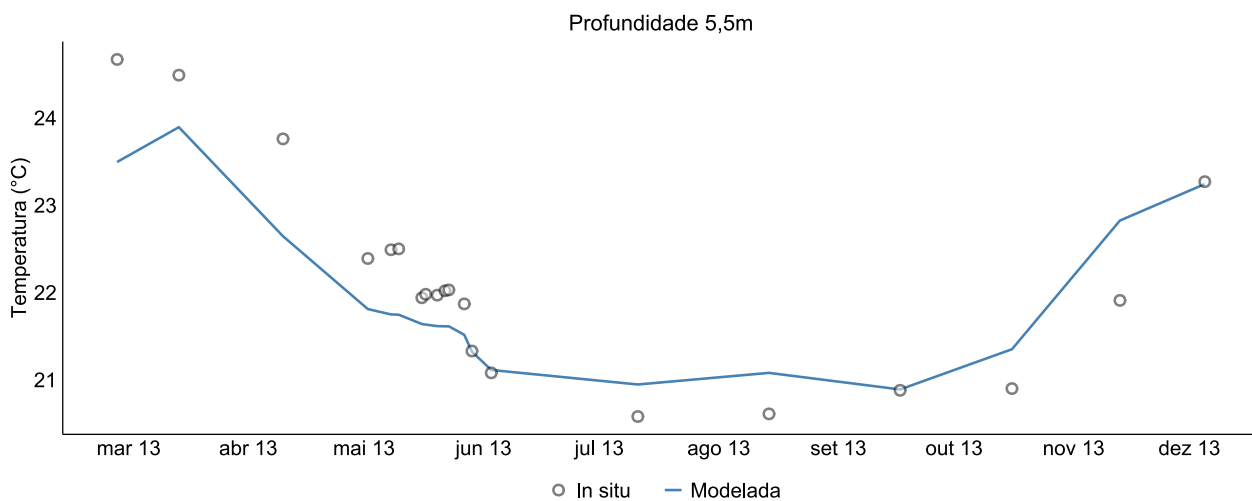
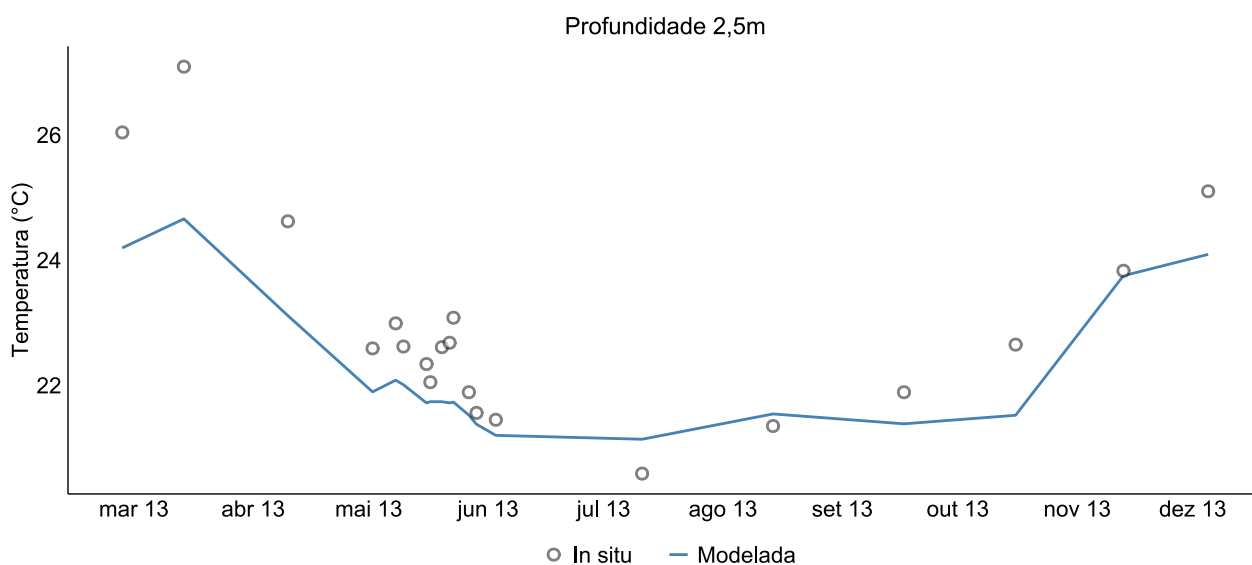
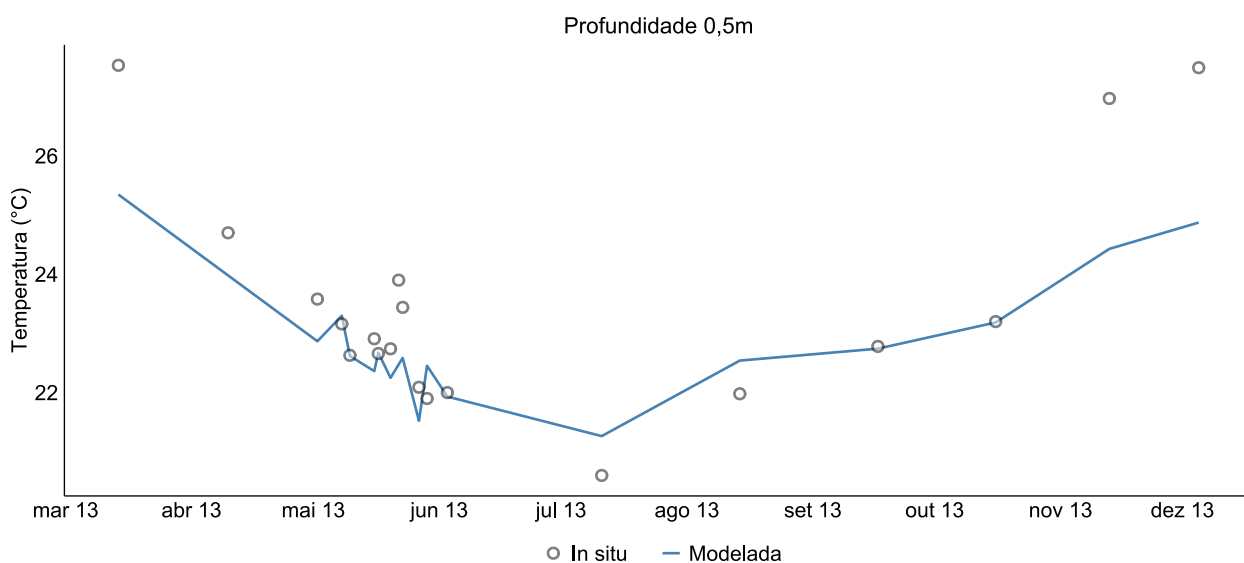
ZHAO, L.; ZHANG, X.; LIU, Y.; HE, B.; ZHU, X.; ZOU, R.; ZHU, Y. Three-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Model for TMDL Development of Lake Fuxian, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 24, n. 8, p. 1355–1363, ago. 2012.

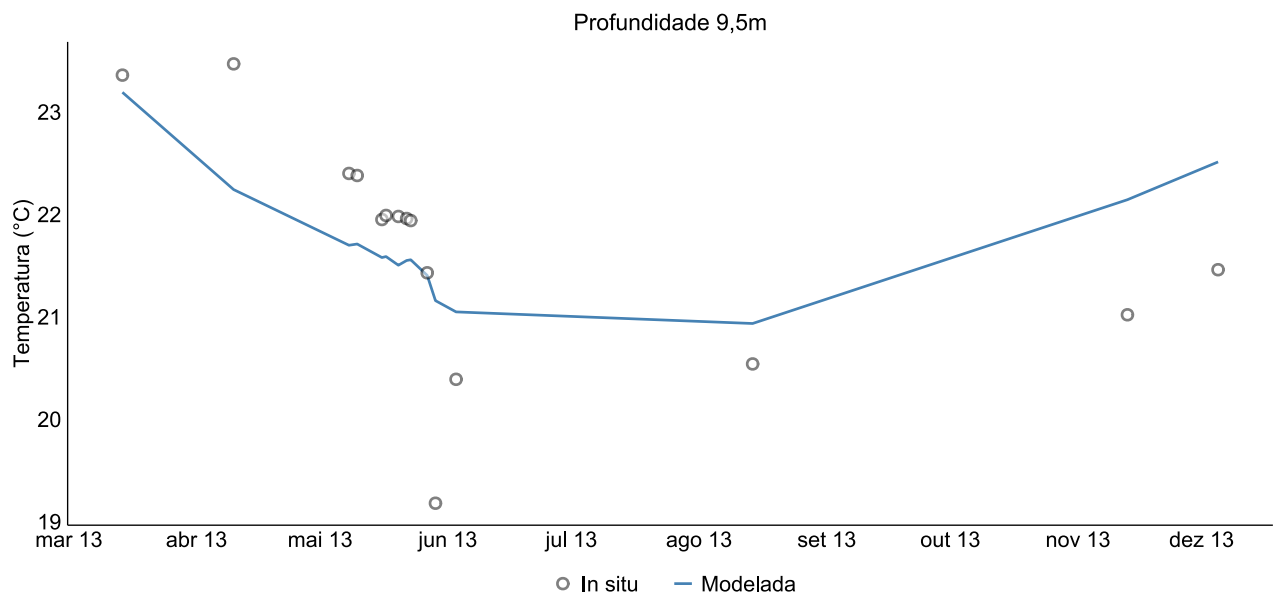
APÊNDICE A – CURVA HIPSONÔMETRICA DA LAGOA DA PAMPULHA PARA O ANO DE 2013



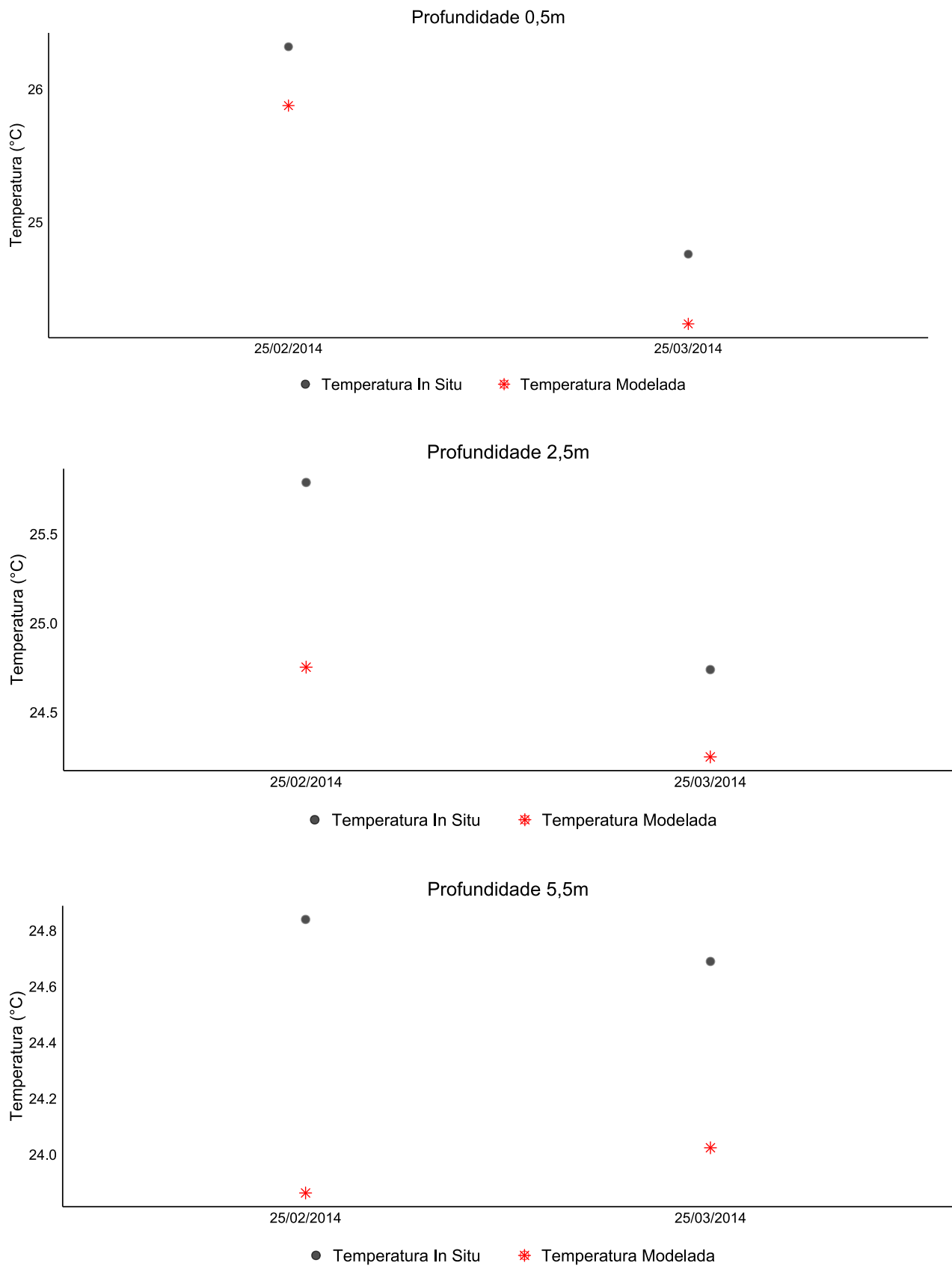
Fonte: Autora (2023)

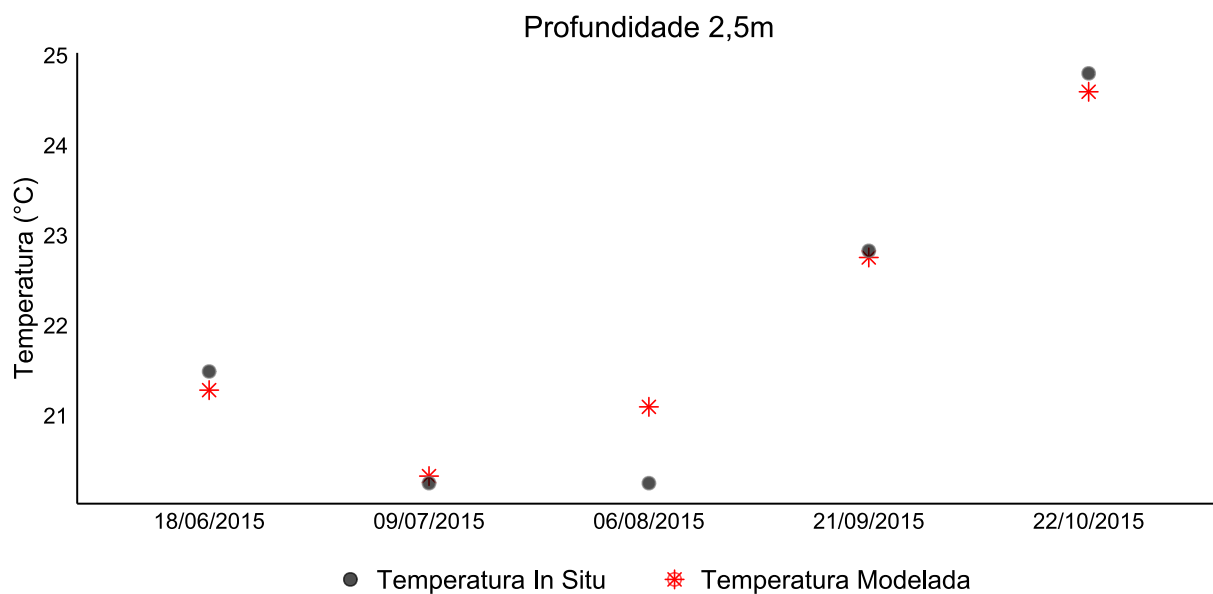
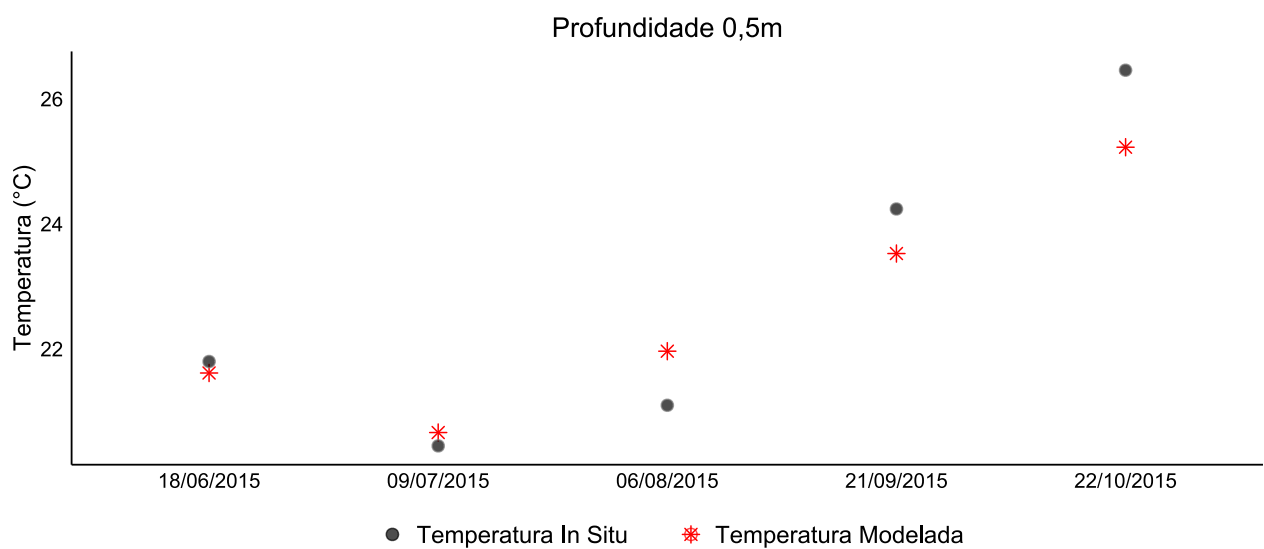
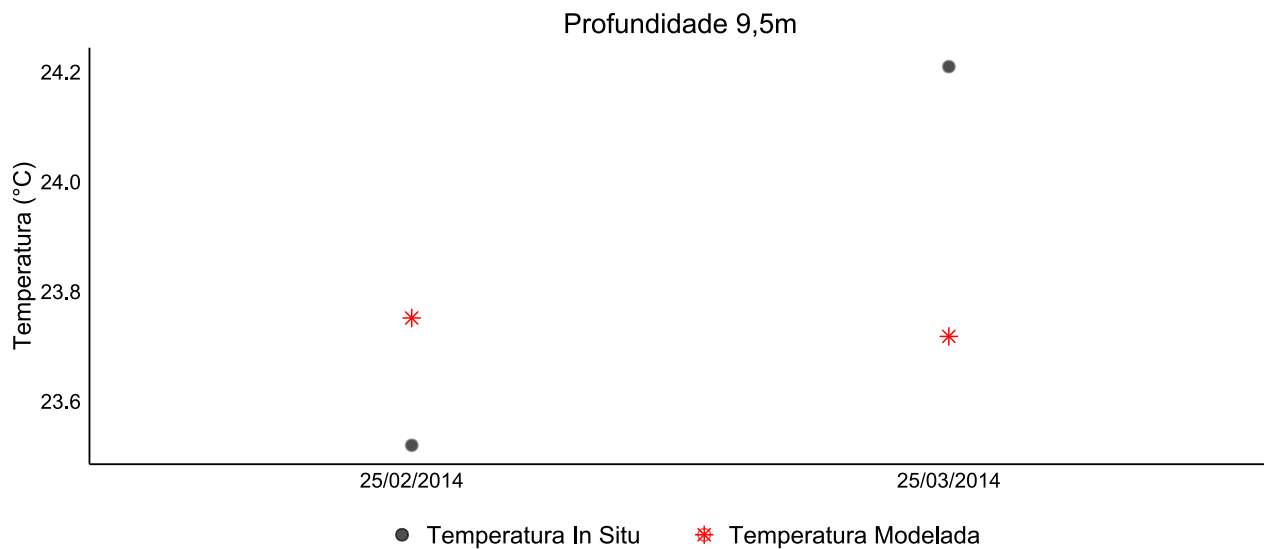
APÊNDICE B – TEMPERATURAS OBSERVADAS E SIMULADAS PARA O PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (2013)

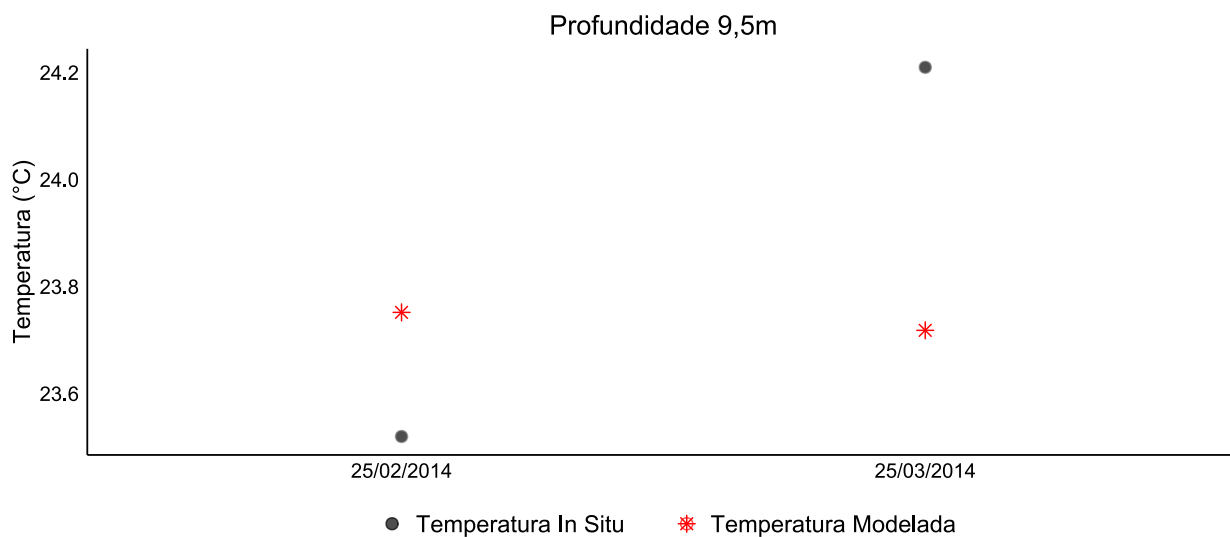
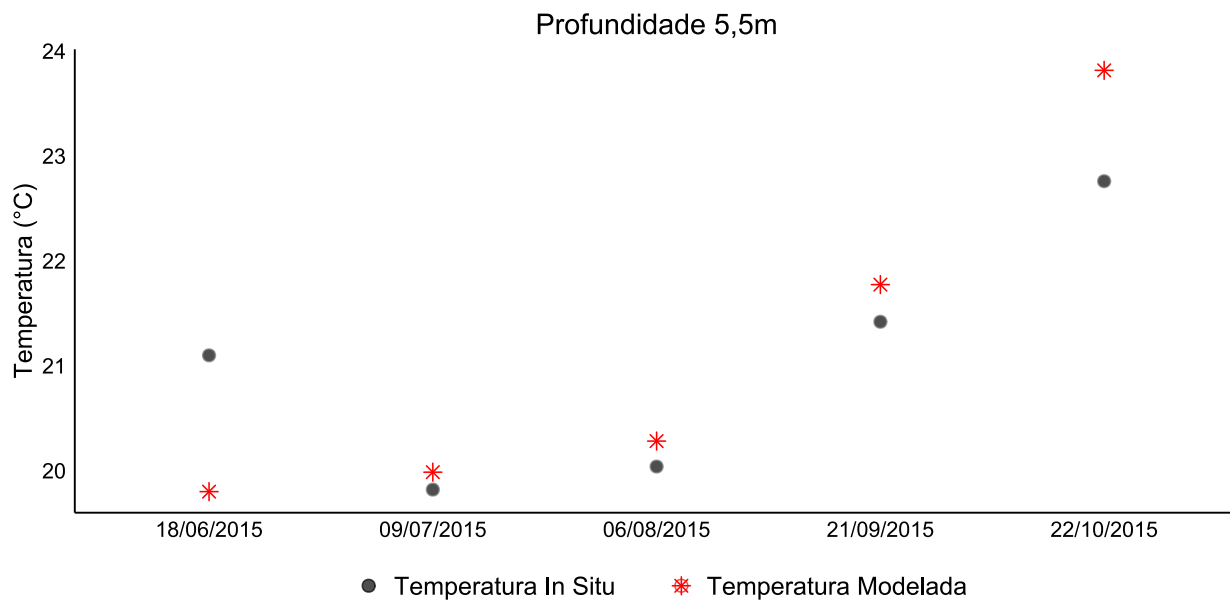




APÊNDICE C - TEMPERATURAS OBSERVADAS E SIMULADAS PARA OS PERÍODOS DE VALIDAÇÃO (2014 e 2015)







APÊNDICE D – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO X TEMPERATURA DA COLUNA D'ÁGUA

