



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA -**  
**PPGOC**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA**  
**HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE SEDIMENTAR DE**  
**UM LAGO AMAZÔNICO URBANO**

**Dissertação apresentada por:**

**MARCO ANTÔNIO VIEIRA CALLADO**

**Orientador: Prof Dr Marcelo Rollnic (UFPA)**

---

**BELÉM - PARÁ**

**2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA -**  
**PPGOC**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA**  
**HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE SEDIMENTAR DE**  
**UM LAGO AMAZÔNICO URBANO**

**Dissertação apresentada por:**

**MARCO ANTÔNIO VIEIRA CALLADO**

**Orientador: Prof Dr Marcelo Rollnic (UFPA)**

---

**BELÉM - PARÁ**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C156m Callado, Marco Antônio Vieira.  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA HIDRODINÂMICA  
E TRANSPORTE SEDIMENTAR DE UM LAGO AMAZÔNICO  
URBANO  
(BELÉM-PARÁ) / Marco Antônio Vieira Callado. — 2025.  
xiv, 45 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rollnic  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Oceanografia, Belém, 2025.

1. Oceanografia Física. 2. Ressuspensão Sedimentar.  
3. Estratificação Térmica. 4. Hidrodinâmica de Lagos. 5. Delft3D. I. Título.

CDD 551.462

---



**Universidade Federal Do Pará**

**Instituto De Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Oceanografia**

## **MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE SEDIMENTAR DE UM LAGO AMAZÔNICO URBANO**

**Dissertação Apresentada por:**

**MARCO ANTÔNIO VIEIRA CALLADO**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestrado em  
Oceanografia na Área de Processos Costeiros e Oceânicos e Linha da  
Pesquisa Processos em Sistemas Costeiros e Oceânicos**

**Data de aprovação: 17/04/2025**

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCELO ROLLNIC  
Data: 08/07/2025 12:57:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Marcelo Rollnic (Orientador  
– UFPA**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RENAN PEIXOTO ROSARIO  
Data: 18/06/2025 11:01:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário  
(Membro – UFPA)**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCIO MACHADO CINTRA  
Data: 18/06/2025 10:48:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Marcio Machado Cintra  
(Externo – UFRN)**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ADRIEL GUIMARAES CARNEIRO  
Data: 24/06/2025 08:50:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Dr. Adriel Guimarães Carneiro  
(Externo – PPGGF)**

Aos amores, risos e lágrimas,  
o que vale é abraçar as memórias da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço as memórias, carinhos e conhecimento adquiridos de todos que decidiram dedicar parte de suas vidas a mim. Aos amigos que adquiri durante o mestrado e aos que me acompanham desde antes desta etapa, em especial às memórias de Vilma e Margarida meus primeiros amigos de quatro patas.

À minha família, que mesmo sem compreender esta jornada, deu grande apoio. Me erguendo em momentos de desânimo e torcendo pelo sucesso de minhas decisões

Ao meu pai, Marcelo Callado, e minha mãe, Valéria Vieira, pela vida e carinho que me deram para que me fosse possível entender e ver o mundo, com os olhos e cabeça que tenho.

Às memórias das minhas avós Cristina e Elizabeth, pela simplicidade e sabedoria, possuindo um grande papel para que eu pudesse escolher alguma jornada

Aos meus grandes amigos de infância e arrisco dizer de vida, João, Ricardo, Vitor, Matheus, Yukio, Jacob. Obrigado pelas risadas e felicidades, sem vocês seria difícil demais.

Aos meus irmãos “primeiro grau” João e Sofia e meus irmãos de “segundo grau” Alfredo e Maria, por me fazer eu construir os gostos e momentos felicidades da vida infantil que vez ou outra recorro de nostalgia. Por me alegrar, irritar e cuidar de mim.

Ao meu grupo de graduação Daniel, Paulo e Fabricio e agora de mestrados Daniel e Fabricio, me acompanharam em todos os momentos da oceanografia, sendo impossível me encontrar sozinho em algum momento da oceanografia. Obrigado pelas conversas, risadas e devaneios.

Ao Laboratório de Pesquisa e Monitoramento Ambiental Marinho – LAPMAR, pelas amizades e conhecimentos, em especial ao Mauricio, Rafael, Thais, Adriel, Carol, Leandro, Gabriel e Zydanne, que se propuseram a me ajudar e ter a humildade de tirar um tempo.

Aos meus colegas de modelagem Ana, Iago e Thais, que me ajudaram com as análises e com discussões sobre o trabalho

Ao meu orientador Marcelo Rollnic, por me dar a oportunidade, me apoiar e confiar no meu potencial. Também por mostrar a descontração e soluções em frente a uma tarefa árdua durante reuniões e conversas.

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES- por me conceder a bolsa de mestrado e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAS - pelo financiamento do projeto “Diagnóstico dos Lagos: Água Preta e Bolonha para fins de Enquadramento de Corpos D’água”.

## RESUMO

Lagos são ambientes fundamentais para a qualidade de vida humana, uma vez que regulam o clima local, fornecem água potável e sustentam uma série de serviços ecossistêmicos. O monitoramento desses ecossistemas é crucial para compreender seu metabolismo e embasar estratégias eficientes de manejo dos seus recursos naturais. Este estudo tem como objetivo desenvolver um diagnóstico e prognóstico ambiental de um lago amazônico raso inserido em área urbana — o Lago Água Preta — por intermédio da aplicação da modelagem tridimensional da hidrodinâmica e do transporte sedimentar. Para a realização das simulações numéricas foi utilizado o modelo Delft3D-FLOW, abrangendo os períodos sazonais típicos da região: chuvoso e seco. As simulações foram alimentadas com dados meteorológicos e informações físicas do lago, como temperatura do ar, humidade do ar, nebulosidade, radiação solar, batimetria, temperatura da água, velocidade das correntes e vazões de entrada e saída. Dessa forma, foi construído um ambiente computacional capaz de representar com fidelidade os processos hidro-sedimentares do lago. A calibração do modelo foi realizada com uma série temporal de temperatura referente a um mês completo, enquanto a validação utilizou dados de corrente e perfis verticais de temperatura ao longo de quatro meses (dezembro, fevereiro, abril e junho). As simulações apresentaram bons indicadores estatísticos, evidenciando a confiabilidade do modelo. As maiores discrepâncias entre os dados simulados e observados ocorreram em pontos localizados nas margens mais próximas dos centros urbanos. Estas diferenças estão associadas à influência de atividades antrópicas, como o lançamento de efluentes domésticos, ou a própria morfologia afunilada do lago nesses locais, que pode gerar zonas de sombra térmica. A análise dos padrões de circulação e temperatura entre os períodos sazonais revelou diferenças relativamente pequenas. Destaca-se o aumento médio de até 2 °C na temperatura da água e de aproximadamente 0,02 m/s na velocidade das correntes no período mais quente. As maiores diferenças de entre as médias de temperatura ocorreram no ciclo diário do lago variando 3°C, com variação máxima de até 10°C. Devido o lago ser alimentado por um influxo de água artificial (*inflow*), este *inflow* é caracterizado por ser uma descarga intensa com elevada carga sedimentar. Por se tratar de um lago raso com profundidades máximas de até 4 metros, esta descarga é capaz de influenciar o metabolismo do lago como um todo, promovendo a ressuspensão de sedimentos de fundo, redistribuindo nutrientes para a coluna d'água. Ao adentrar no lago, as correntes de influxo são rapidamente desaceleradas, o que intensifica a sedimentação destes sedimentos em áreas próximas ao ponto *inflow*. Esse processo eleva a turbidez da água e modifica a dinâmica da biota local, resultando em um ambiente dominado por fitoplâncton e sujeito a processos de eutrofização e conseqüentemente diminui qualidade da água. Portanto, a partir do diagnóstico sugerido pela modelagem do Lago Água Preta, este estudo destaca a necessidade de ações contínuas de monitoramento e controle das influências antrópicas, a fim de prevenir a degradação progressiva do metabolismo do Lago Água Preta. Além de destacar a importância de lagos em geral, ainda mais quando inseridos em contexto urbanos.

**Palavras-chave:** oceanografia física; ressuspensão sedimentar; estratificação térmica; hidrodinâmica de lagos; delft3d

## ABSTRACT

Lakes are critical environments for sustaining human well-being, as they regulate local climate conditions, supply potable water, and underpin a wide range of ecosystem services. The continuous monitoring of these systems is essential for elucidating their metabolic processes and for informing effective management strategies for natural resources. This study aims to develop an environmental diagnosis and prognosis for a shallow Amazonian lake located in an urban area—Lago Água Preta—through the application of a three-dimensional numerical model of hydrodynamics and sediment transport. Numerical simulations were performed using the Delft3D-FLOW model, encompassing the region's seasonal periods: wet and dry seasons. The simulations were driven meteorological variables and physical parameters of the lake, such as air temperature, humidity, cloud cover, solar radiation, bathymetry, water temperature, current velocity, and the inflow/outflow rates. This comprehensive dataset allowed for the construction of a computational environment capable of accurately representing the hydro-sedimentary processes within the lake. Model calibration was performed using a one-month time series of water temperature from February (wet season), while validation was carried out with current data and vertical temperature profiles over four months (December, February, April, and June). The simulations presented good statistical indicators, demonstrating the model's reliability. The greatest discrepancies between simulation and observation occurred at points closer to the urban center. These differences are associated with the influence of anthropogenic activities, such as the discharge of domestic effluents, or with the narrow morphology of the lake in these areas, which can generate thermal shadow zones. The analysis of circulation and temperature patterns between seasonal periods revealed relatively small differences. Notably, there was an average increase of up to 2 °C in water temperature and approximately 0.02 m/s in current velocity during the warmer period. The most significant differences in average temperature occurred in the lake's daily cycle, varying by about 3°C, with a maximum variation of up to 10°C. Since the lake is fed by an artificial water inflow, this inflow is characterized by an intense discharge with a high sediment load. As it is a shallow lake with a maximum depth of up to 4 meters, this discharge is capable of influencing the lake's entire metabolism by promoting the resuspension of bottom sediments and redistributing nutrients into the water column. Upon entering the lake, the inflow currents are rapidly decelerated, intensifying sedimentation near the inflow point. This process increases water turbidity and alters the local biotic dynamics, resulting in an environment dominated by phytoplankton and prone to eutrophication processes, which consequently reduce water quality. Therefore, based on the diagnosis provided by the modeling of Lago Água Preta, this study highlights the need for ongoing monitoring and control of anthropogenic influences to prevent the progressive degradation of the lake's metabolism. It also underscores the importance of lakes in general, especially when located in urban contexts.

**Key words:** physical oceanography; sediment resuspension; thermal stratification; limnology; delft3d

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Mapa da Área de Estudo, evidenciando a APA de Belém o Parque Estadual do Utinga, os lagos que o englobam, o canal artificial que alimenta o lago Água Preta e a complexa rede hidrográfica entorno do sistema de lagos. Fonte: Autor .....                                                  | 8  |
| Figura 2: Dados meteorológicos inseridos nas simulações do lago Água Preta. A – Precipitação e temperatura do ar; B- Velocidade e direção dos ventos; C Umidade relativa do ar; Radiação solar.....                                                                                                   | 11 |
| Figura 3: Ilustração do Domínio discretizado, evidenciando a batimetria do lago, os pontos de amostragem e a entrada e saída de água do sistema.....                                                                                                                                                  | 16 |
| Figura 4: Rugosidade do domínio, evidenciando em vermelho as regiões em que a superfície do lago fica permanentemente cobertas por macrófitas.....                                                                                                                                                    | 18 |
| Figura 5 - Comparação entre a curva simulada e observada em fevereiro .....                                                                                                                                                                                                                           | 19 |
| Figura 6 - Correlação entre a temperatura observada e simulada, apresentando uma forte correlação positiva com $R^2 = 0,79$ e $p = 0,89$ .....                                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 7: Variação da velocidade das correntes do lago a 0,5m acima do leito do lago.                                                                                                                                                                                                                 | 21 |
| Figura 8: Setorização do lago Água Preta, em zona Oeste, Central e Leste em função das particularidades hidrodinâmicas de cada zona. ....                                                                                                                                                             | 24 |
| Figura 9: Velocidade Média dos meses fevereiro (chuvoso) e junho (seco), evidenciando os padrões de circulação do lago e as velocidades máximas associadas a entrada e saída de água no domínio .....                                                                                                 | 26 |
| Figura 10: Variação da temperatura no mês de fevereiro (chuvoso) em função da profundidade no eixo y e tempo no eixo x, onde para o melhor entendimento das variações espaciais do lago, essa análise ocorreu pela escolha de um ponto localizado conforme a setorização oeste, central e leste. .... | 30 |
| Figura 11: Variação da temperatura no mês de junho (seco) em função da profundidade no eixo y e tempo no eixo x, onde para o melhor entendimento das variações espaciais do lago, essa análise ocorreu pela escolha de um ponto localizado conforme a setorização oeste, central e leste.....         | 31 |
| Figura 12: Gradiente horizontal de temperatura na superfície e em profundidade, evidenciando também as diferenças entre os dois períodos sazonais da região seco (fevereiro) e chuvoso (junho). ....                                                                                                  | 32 |
| Figura 13: Transporte de sedimentos em suspensão em $m^3/s/m$ , evidenciando que a maior parte dos sedimentos correm na região central do lago por influência do inflow.                                                                                                                              | 35 |
| Figura 14: Diferença entre a batimetria inicial novembro e final setembro. Dada a diferença entre as batimetrias temos a imagem ampliada da batimetria de setembro em conjunto com os vetores de transporte que evidenciam para onde correm os sedimentos que saem do inflow. ....                    | 36 |

**LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Dados mensais da descarga do inflow, disponibilizados pela COSANPA .....                                                                                                                                                             | 10 |
| Tabela 2 - Valores de rugosidade calculados em função das particularidades de cada região do lago .....                                                                                                                                        | 17 |
| Tabela 3 - Correlação entre a simulação e os dados os perfis de CTD coletados nos pontos de A01 a A19. Evidenciando os pontos que possuem mais incertezas associadas a particularidades suas próprias particularidades A01, A09, A11, A17..... | 23 |

## SUMÁRIO

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>DEDICATÓRIA</b> .....                                                         | iv   |
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                                      | v    |
| <b>RESUMO</b> .....                                                              | vi   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                            | vii  |
| <b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....                                                | viii |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                                                    | ix   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                                        | 1    |
| <b>2 JUSTIFICATIVA</b> .....                                                     | 5    |
| <b>3 OBJETIVOS</b> .....                                                         | 6    |
| 3.1 OBJETIVO GERAL.....                                                          | 6    |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                  | 6    |
| <b>4 METODOLOGIA</b> .....                                                       | 7    |
| 4.1 ÁREA DE ESTUDO .....                                                         | 7    |
| 4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS .....                                                     | 10   |
| 4.3 DESCRIÇÃO DO MODELO.....                                                     | 12   |
| 4.4 DESCRIÇÃO DO MODELO DE FLUXO DE CALOR .....                                  | 12   |
| 4.5 DESCRIÇÃO DO MORFODINÂMICO E TRANSPORTE SEDIMENTAR                           | 13   |
| 4.6 CONFIGURAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE<br>ENTRADA DA SIMULAÇÃO ..... | 15   |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                            | 19   |
| 5.1 CALIBRAÇÃO .....                                                             | 19   |
| 5.2 VALIDAÇÃO .....                                                              | 20   |
| 5.3 SETORIZAÇÃO .....                                                            | 24   |
| 5.4 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO DO LAGO ÁGUA PRETA .....                               | 25   |
| 5.5 PADRÕES DE TEMPERATURA E ESTRATIFICAÇÃO .....                                | 28   |
| 5.6 TRANSPORTE E SEDIMENTAÇÃO DO LAGO ÁGUA PRETA .....                           | 34   |
| <b>6 CONCLUSÃO</b> .....                                                         | 37   |
| <b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                                              | 39   |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                         | 40   |

## 1. INTRODUÇÃO

Lagos são corpos de água continentais sem comunicação direta com o mar. Estes ambientes possuem propriedades físicas, químicas e biológicas únicas, com quantidade de sais reduzidas em relação a água do mar. Exceto por lagos localizados em locais áridos ou sujeitos a um longo período seco, pois a taxa de evaporação é maior que a de precipitação, deixando as águas destes corpos hídricos mais concentradas (Esteves 2011, Bhateria & Jain 2016).

Ambientes lacustres possuem dimensões variadas, podendo ser extensos, pequenos, rasos ou profundos. A mudança de morfologia destes cria características singulares dependendo da dimensão destes corpos hídricos (Xu *et al.* 2022). Conforme sua origem, lagos podem ocorrer em qualquer local de uma bacia fluvial. Mesmo não possuindo uma conexão direta com o mar, estes ambientes podem realizar as trocas de águas por meio de pontos de entrada (*inflow*) e saída de água (*outflow*). *Inflow e Outflow*. As trocas das águas podem ocorrer pela relação do lago com rios tributários (Zhang *et al.* 2016, Li *et al.* 2017), ou águas subterrâneas (Hunt *et al.* 2003), estes fluxos equilibram o balanço hídrico do sistema (Zhang *et al.* 2016, Xu *et al.* 2022, Hinegk *et al.* 2023).

Ao contabilizarmos o total de água disponível para o consumo humano, apenas 3% desta água é doce, onde apenas 0,06%, desta água doce é de fácil acesso, onde 87% de toda a água doce disponível em superfície é representada por lagos (Yao *et al.* 2023, Musie *et al.* 2023). Sendo assim, lagos possuem um importante papel na manutenção da biodiversidade e na qualidade de vida humana, sendo que a maior parte da água doce disponível na superfície da terra está presente nos lagos (Mammides 2020), contendo até 50% de toda a água superficial localizada em terra, onde 49% da água doce líquida está presente nestes ecossistemas (Bhateria & Jain 2016, Petersen *et al.* 2017).

No Brasil, onde ocorre a predominância de sistema fluviais, a atividade geológica das enormes redes hidrográficas é responsável pela formação da maioria dos lagos brasileiros, onde, suas origens acabam por ditar as características morfológicas e dimensionais. Estes são, em sua maioria, ecossistemas de pequeno porte e baixa profundidade, raramente com profundidades naturais superiores a 20 metros (Esteves 2011).

Estes lagos em sua maioria podem ser classificados como lagoas, quando comparados aos lagos Europeus de grande porte. Entretanto, podem ser classificados em cinco categorias distintas, como: Lagos Amazônicos, Lagos do Pantanal Matogrossense; Lagos e lagunas costeiras que podem contornar a costa Nordeste ao Sul brasileiro; Lagos formados ao longo de rios de médio e grande porte; Lagos artificiais de represas e açudes.

Lagos amazônicos, são distinguidos como de várzea ou terra firme. Estes, tendem adjacentes a um curso de rio, como o lago Balbina (Alsdorf *et al.* 2001), sua formação também pode ser associada também a planícies de inundação como os lagos Calado (MacIntyre & Melack 1988) e o lago grande de Curai (Bonnet *et al.* 2008). Quando estes ambientes são sujeitos aos processos de industrialização e urbanização, ocorre uma tendência ao aumento da concentração de metais potencialmente tóxicos e das descargas de poluentes (Wang *et al.* 2019, Mishra *et al.* 2023). Neste sentido, estes corpos hídricos podendo ser classificados como lagos urbanos, quando sujeitos a influências dos centros urbanos, mesmo que ainda não haja definição clara para lagos urbanos (Cheng *et al.* 2021).

Sendo indispensáveis para os centros urbanos que os rodeiam, lagos promovem uma variedade de serviços ecossistêmicos, como, principalmente, o fornecimento de água para atividade domésticas e industriais (Schirpke *et al.* 2023), manutenção da biodiversidade ocorrente neste ecossistema, regulação do microclima urbano (Zhao *et al.* 2023). Ademais, geram serviços e experiências culturais, oportunidades educacionais, inspiracionais, espirituais e simbólicas (Hossu *et al.* 2019, Schirpke *et al.* 2023).

Quando inseridos em zonas metropolitanas, os lagos contribuem para a melhoria de dois grandes parâmetros atrativos para o conforto e saúde, sendo eles a temperatura e umidade do ar. Além disso, estes ecossistemas são capazes de reduzir impactos adversos, como os eventos de extremo calor gerados pelas das ilhas de calor urbanas, problemática esta que aumenta o estresse termal para os residentes e resulta na morbidade e mortalidade da população (Zhao *et al.* 2023). Portanto, estes corpos hídricos são capazes de diminuir a temperatura e aumentar da umidade do ar, devido sua alta taxa de evaporação e forte capacidade térmica durante o dia. Estes são dois grandes fatores que geram conforto e saúde nas zonas urbanas (Zhao *et al.* 2023, Jandaghian & Colombo 2024).

Dada importância destes ambientes, e as variáveis que podem degradar seu metabolismo, a influência antrópica sobre estes sistemas reflete em impactos negativos.

Impactos estes, que afetam a qualidade de vida dos centros urbanos como um todo. Ao tratar-se de lagos rasos, as influências antrópicas tornam-se mais evidentes por serem mais vulneráveis e terem repostas mais rápidas aos processos biológicos, químicos e climáticos (Piccioni *et al.* 2021, Zhou *et al.* 2022, Zingel *et al.* 2025).

Um importante parâmetro para verificar o metabolismo de lagos rasos, seria o grau de turbidez das águas, que está intrinsicamente ligado a ressuspensão de sedimentos (Wei *et al.* 2021, Yu *et al.* 2023). Lagos com alta carga sedimentar em suspensão tendem a ser suscetíveis a serem dominados por fitoplanctons que, por sua vez, podem liberar substâncias tóxicas para a biota local, que geram odor e diminuem a qualidade da água e por conseguinte sua potabilidade (Scheffer 2007). Sedimentos em suspensão trazem nutrientes para a coluna d'água que aceleram os processos de decomposição de matéria orgânica consumindo rapidamente o oxigênio disponível na coluna d'água (Scheffer 2007, Li 2025), resultando na anoxia das camadas mais profundas dos lagos (Grochowska 2020).

A ressuspensão e deposição dos sedimentos, ocorrem de forma mais frequente em lagos rasos devido suas baixas profundidades (Tang *et al.* 2020), onde a ação dos ventos consegue ser suficiente para transmitir energia da superfície do lago para o fundo perturbando a dinâmica em profundidade (Bailey & Hamilton 1997, Zhang & Chen 2023, Xue *et al.* 2025). Além disso, lagos relacionados a rios que possuem altas cargas sedimentares enriquecem o ambiente de nutrientes podendo acelerar processos de eutrofização (Bhagowati *et al.* 2019). Sendo assim, para entender o metabolismo do lago é necessário, primariamente entender sua circulação e como ela pode afetar na qualidade de água (Xue *et al.* 2025). Há uma grande preocupação em relação a elevada turbidez capaz de alterar toda a biota e dinâmica biológica, física e química do ambiente.

Ao notar a pressão sofrida sobre ambientes, pesquisas foram executadas com intuito de realizar diagnósticos (Jin *et al.* 2007, Liu *et al.* 2021), monitoramento (Babaousmail & Ojara 2025, Godoy *et al.* 2025) e restauração (Naselli-Flores 2008, Jin *et al.* 2022, Li *et al.* 2025) sobre esses ambientes para otimizar os processos de monitoramento e até a restauração destes, até sobre como entender os processos de mudanças climáticas e respostas de lagos como alternativa a estas alterações (Meerhoff 2012, Woolway *et al.* 2020, Woolway *et al.* 2022).

A modelagem numérica desempenha um papel fundamental na compreensão da dinâmica de lagos, especialmente no que diz respeito à circulação da água e ao transporte de sedimentos. Contudo, por se tratar de ambientes lênticos com circulação predominantemente lenta, muitos estudos optaram pelo uso de modelos verticais unidimensionais, que representam apenas a variação das propriedades ao longo da coluna d'água. Essa abordagem, embora útil em certos contextos, limita a análise espacial e temporal dos processos, comprometendo uma compreensão mais abrangente da dinâmica lacustre (Baracchini *et al.* 2020).

Apesar de sua baixa energia, esses ecossistemas apresentam batimetria e topografia complexas, que influenciam diretamente na hidrodinâmica e nos padrões de transporte de substâncias. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de se aplicar modelos tridimensionais que permitam representar com maior precisão as interações físicas nesses ambientes (Liu *et al.* 2021).

Diante disso, o presente trabalho propõe a aplicação do modelo tridimensional Delft3D-Flexible Mesh (Delft3D-FM) ao Lago Água Preta, com o objetivo de investigar os processos de sedimentação e erosão, desenvolvendo um diagnóstico e um prognóstico da dinâmica hidrossedimentar do sistema. Essa abordagem busca oferecer uma nova perspectiva sobre o funcionamento do lago e contribuir para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos urbanos na região amazônica.

## 2. JUSTIFICATIVA

Lagos urbanos de pequeno porte e baixa profundidade, como o Lago Água Preta (Belém – PA), desempenham um papel essencial no equilíbrio ambiental e na qualidade de vida das populações urbanas, ao fornecerem serviços ecossistêmicos fundamentais, como regulação do microclima, abastecimento hídrico, suporte à biodiversidade e oferta de espaços culturais e recreativos. No entanto, esses ambientes vêm sofrendo crescente pressão antrópica, especialmente em áreas densamente urbanizadas, o que tem contribuído para a degradação da qualidade da água e comprometimento da integridade ecológica desses ecossistemas.

A suscetibilidade de lagos rasos aos processos de ressuspensão de sedimentos, somada à sua morfologia e à proximidade com áreas urbanas, intensifica os efeitos de impactos como o aporte de nutrientes, poluição difusa e mudanças climáticas. Tais processos podem desencadear fenômenos como a eutrofização, redução do oxigênio dissolvido e proliferação de organismos potencialmente tóxicos, comprometendo tanto a saúde ambiental quanto o bem-estar da população.

Apesar da relevância dos lagos urbanos amazônicos, como o Lago Água Preta, ainda são escassos estudos que aplicam nestes ambientes a modelagem numérica tridimensional. Essa abordagem permite simular e prever o comportamento hidrodinâmico e o transporte de sedimentos, oferecendo subsídios técnicos e científicos fundamentais para o diagnóstico e prognóstico do ambiente, o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas voltadas à conservação e recuperação de corpos hídricos urbanos.

Diante disso, este trabalho possui intuito de aprofundar o conhecimento sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em um lago urbano amazônico. Além de contribuir para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento, gestão ambiental e mitigação de impactos. Portanto, a utilização da modelagem numérica tridimensional, possui papel fundamental para a compreensão integrada dos processos ocorrentes em lagos, servindo como alicerce para a estudos de uma gestão e modelagem dos recursos hídricos de lagos urbanos.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GERAL**

Gerar um diagnóstico do Lago Água Preta (Belém – PA), por meio da aplicação da modelagem numérica tridimensional da dinâmica hidrossedimentar, com foco na simulação dos processos de circulação, alterações na batimetria.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Desenvolver a modelagem numérica do Lago Água Preta utilizando o módulo Delft3D-Flow, representando de forma tridimensional sua dinâmica hidro-sedimentar.

Analisar a variação térmica do lago ao longo do período estudado, com ênfase nos processos de estratificação térmica e sua relação com a hidrodinâmica.

Investigar os padrões de circulação e de correntes no lago, considerando a influência da sazonalidade climática da região e das características morfométricas do corpo hídrico.

Avaliar os padrões meteorológicos locais e seus efeitos sobre os resultados das simulações hidrossedimentares realizadas.

Verificar, a partir do diagnóstico gerado, a necessidade de ações de restauração ambiental, bem como sugerir possíveis alternativas de manejo para o Lago Água Preta.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

O Lago Água Preta reside dentro de uma Área de Proteção Ambiental (APA), cercada pelo ambiente urbano da cidade de Belém, chamada de Parque Estadual do Utinga. Esta APA, foi criada possuindo como objetivo principal a preservação da potabilidade das águas dos lagos Bolonha e Água Preta, também fornecendo um espaço propício ao lazer e ao desenvolvimento de ecológicas e científicas (Pará 2013). Estes dois lagos formam um sistema lacustre que abastece 65% da cidade de Região Metropolitana de Belém, o que representa cerca de 2 milhões de habitantes.

Este sistema de lagos foi modificado artificialmente para que os lagos consigam abastecer a região, ou seja, há um controle do fluxo de água, monitorado pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará – COSANPA, que manipula a entrada e saída de água para dentro destes lagos até chegar à estação de tratamento de água.

Sendo assim, pode-se dizer que o sistema é formado por três grandes corpos hídricos: o Rio Guamá, Lago Água Preta e o Lago Bolonha (Figura 1). Para manter o nível de água constante, a COSANPA utiliza o rio Guamá como entrada de água para o lago Água Preta (inflow), onde este influxo artificial varia em função dos períodos sazonais, chegando a 7 m<sup>3</sup>/s nos períodos de estiagem e 3 m<sup>3</sup>/s nos chuvosos. Posteriormente, as águas do Lago Água Preta passam para o lago Bolonha (outflow) a partir de uma canalização artificial sem bombeamento que por fim chega à estação de tratamento.

Além disso, o lago Água Preta é classificado com um lago raso, com profundidade máxima de 4 metros, e de porte pequeno, cerca de 7.2 km<sup>2</sup>, resulta em um volume de cerca de 9,905,000 m<sup>3</sup> (Thomaz 2002, Pará 2013). Diante disto, gera-se grande preocupação ao receber o aporte do rio Guamá para dentro do lago, uma vez que o rio Guamá possui alta carga sedimentar em suspensão (de Oliveira 2021). Estes sedimentos em suspensão são transportados para o lago que, por sua vez, sedimentam no leito do lago, acelerando o processo de assoreamento do lago.

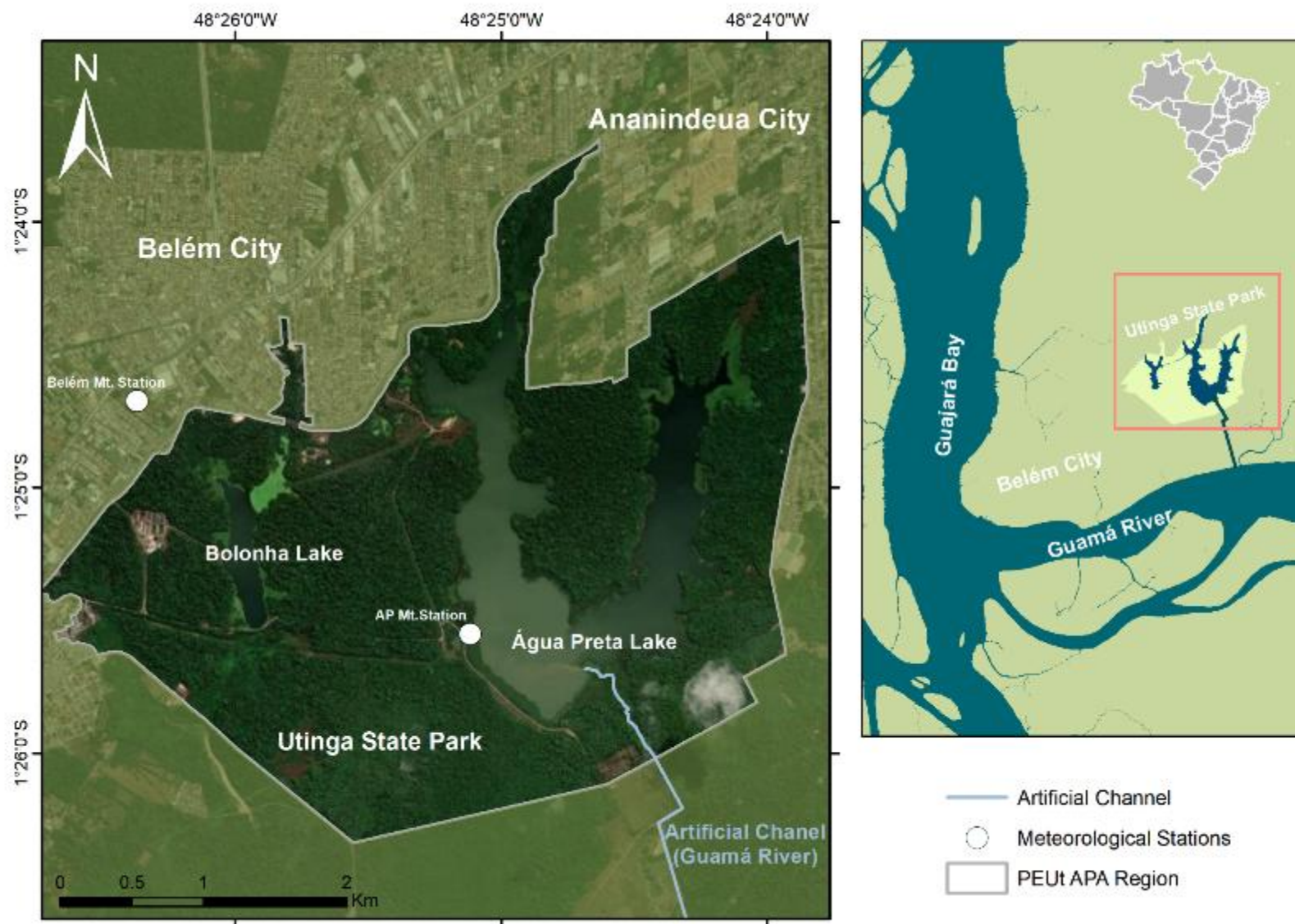


Figura 1 - Mapa da Área de Estudo, evidenciando a APA de Belém o Parque Estadual do Utinga, os lagos que o englobam, o canal artificial que alimenta o lago Água Preta e a complexa rede hidrográfica entorno do sistema de lagos. Fonte: Autor

Os parâmetros meteorológicos da região possuem características particulares em relação ao ambiente urbano em seu entorno. Devido ser uma área de cobertura vegetal extensa, há a formação de um microclima local, que varia entre duas zonas climáticas Am e Af. Sendo Am, definido como um clima tropical de monções e Af o mesmo da cidade de Belém (Pará 2013), que seria um clima pertencente a classe tropical, sem ocorrência de inverno estacional (Bastos *et al.* 2002, Segep 2012, Brasil *et al.* 2021).

Nessa região, encontram-se dois períodos sazonais: período chuvoso (dezembro a maio) e período seco (junho a novembro). No período chuvoso, o regime de chuvas é originado a partir da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), em conjunto aos efeitos de mesoescala, como as linhas de instabilidade formadas no nordeste do Pará, que adentram a região, e são responsáveis pela chuva no período seco (Bastos *et al.* 2002, Oliveira *et al.* 2016).

## 4.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

O PEUt possui uma estação linimétrica própria que foi implementada pelo Observatório da Costa Amazônica – OCA em novembro de 2023. Sendo assim, parte dos parâmetros utilizados nas simulações foram tanto desta estação, quanto da estação de Belém, a 3km de distância do Lago Água Preta (Figura 1), monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Onde ambas as estações coletam dados meteorológicos sobre a mesma altura, ou seja, a 2 metros da superfície onde a estação está fixada.

Os dados de entrada para forçar a simulação foram primariamente meteorológicos, sendo eles a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%), velocidade e direção dos ventos (m/s), obtidos pela estação do OCA e radiação solar ( $\text{J}/\text{m}^2.\text{s}$ ), precipitação (mm/dia) e nebulosidade (%), obtidas pela estação do INMET para o período de novembro 2023 a outubro 2024 (Figura 2). Este período foi escolhido em função de abranger a sazonalidade que ocorre na região, ou seja, a estação seca e chuvosa. Para descrever a morfologia do lago foi realizado o levantamento batimétrico do lago (Figura 3), utilizando uma Ecossonda acoplada a um GPS Garmin, modelo Chartplotter Echomap UHD 62CV em novembro de 2023.

Os valores de entrada e saída de água foram obtidos pela COSANPA, sendo esses valores adaptados para que as simulações hidrodinâmicas refletissem de maneira mais precisa a realidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados mensais da descarga do *inflow*, disponibilizados pela COSANPA

| Meses  | Vazão<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | Meses  | Vazão<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |
|--------|------------------------------------|--------|------------------------------------|
| nov/23 | 20                                 | mai/24 | 16                                 |
| dez/23 | 19                                 | jun/24 | 18                                 |
| jan/24 | 16                                 | jul/24 | 19                                 |
| fev/24 | 14                                 | ago/24 | 20                                 |
| mar/24 | 14                                 | set/24 | 20                                 |
| abr/24 | 14                                 | out/24 | 19                                 |

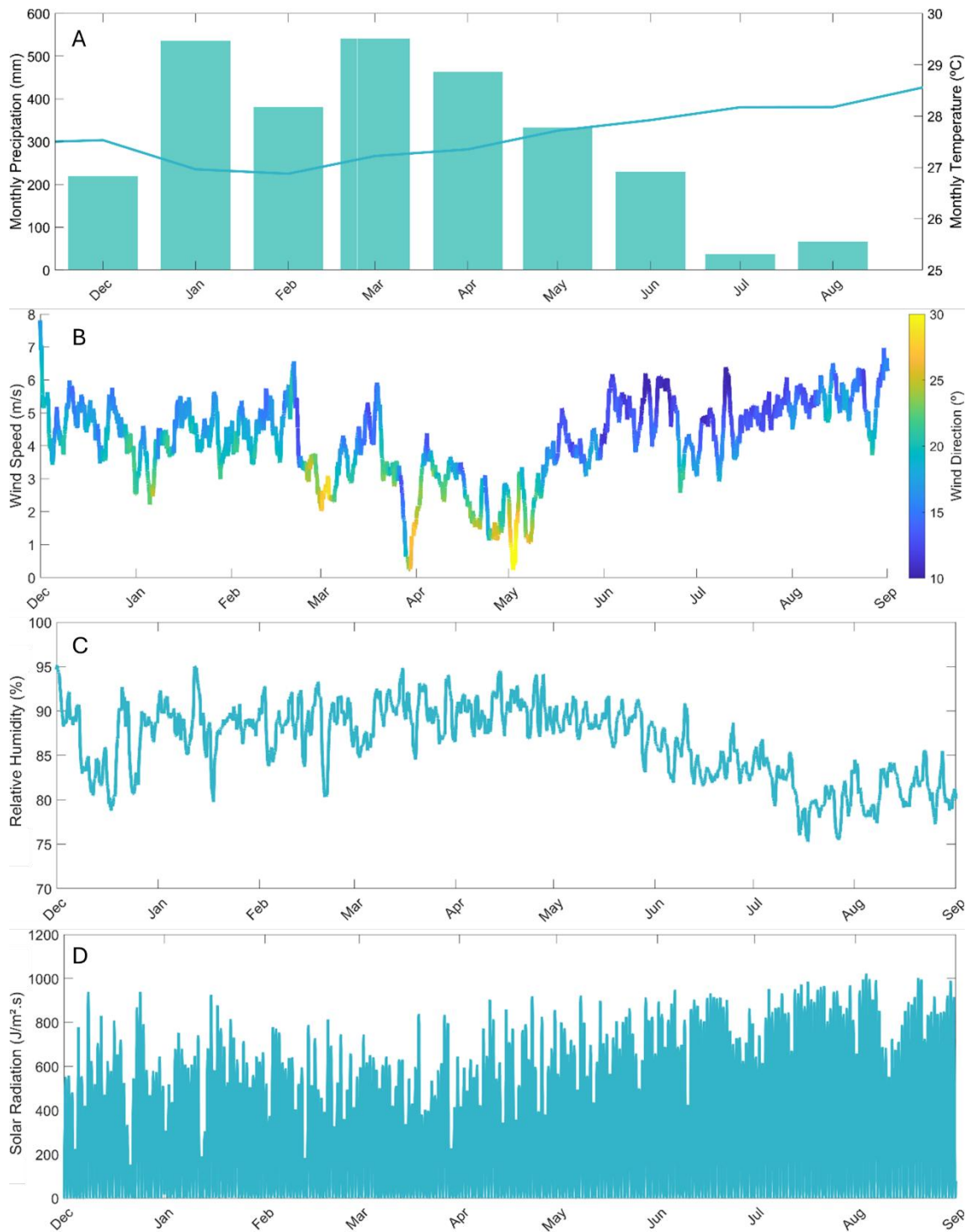


Figura 2: Dados meteorológicos inseridos nas simulações do lago Água Preta. A – Precipitação e temperatura do ar; B- Velocidade e direção dos ventos; C Umidade relativa do ar; Radiação solar.

Para a calibração das simulações foi utilizada uma série temporal de temperatura, coletada a partir de um sensor de nível de água, modelo Solinist LevelLogger 5, instalado no A17 (fevereiro 2024).

A simulação foi posteriormente validada por meio de perfis de temperatura coletados mensalmente com um CTD modelo SBE 19plus V2 SeaCAT Profiler, em 19 pontos do lago, com uma taxa de amostragem de 4 Hz. Adicionalmente, foi utilizada duas séries temporais de correntes obtidas a partir de um correntômetro INFINITY-EM, com medições realizadas nos pontos A08 e A13 (Figura 3), 0,5m acima do leito do lago, ao longo de um dia.

A temperatura foi o principal parâmetro utilizado na calibração e validação da hidrodinâmica do lago, uma vez que o corpo d'água apresenta nível controlado e constante ao longo do ano, além de uma circulação lenta, com velocidade máxima de aproximadamente 0,31 m/s (Santos *et al.* 2015), sujeita a rápidas flutuações de direção. Dessa forma, a temperatura responde às variações nos parâmetros de circulação e qualidade da água, sendo amplamente utilizada na calibração e validação de simulações hidrodinâmicas e de qualidade da água em lagos rasos. Estudos anteriores demonstraram essa abordagem em diferentes sistemas lacustres, como os lagos Otter, Minnesota, EUA (Herb & Stefan 2004), Okeechobee, Flórida, EUA (Jin & Ji 2005) e Créteil, Paris, França (Soulignac *et al.* 2017).

#### 4.3. DESCRIÇÃO DO MODELO

As simulações foram desenvolvidas no modelo Delft3D-Flow, um modelo numérico capaz de resolver equações diferenciais não lineares em um domínio discretizado (Deltares 2024). Para forçar o movimento no fluido simulado, o modelo utiliza forçantes externas para gerar um padrão de circulação do fluxo, dependendo da forçante.

Este modelo foi utilizado devido sua abrangente área de atuação e por obter bons resultados durante a validação de modelos hidrodinâmicos de lagos profundos (Barachini 2020), rasos (Liu 2020) e urbanos (Soulignac *et al.* 2017).

#### 4.4. DESCRIÇÃO DO MODELO DE FLUXO DE CALOR

A simulação utilizou o modelo de fluxo de calor 1 (fluxo absoluto, radiação solar total) intrínseco ao modelo D3D. Seus componentes do balanço de calor são calculados pelo D3D através de uma área de superfície livre (Hassan et al 2017, Deltares 2024). O balanço de calor é determinado com base na radiação incidente, na radiação de retorno, na evaporação e na convecção. A evaporação e a convecção são processos influenciados pela temperatura do ar e da água, pela umidade relativa e pela velocidade do vento. Essas

variáveis são utilizadas como dados de entrada nas simulações do Lago Água Preta (equação 1).

---


$$Q_{total} = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co}, \quad 1$$


---

Esta equação resolve o balanço o de calor considerando a radiação incidente

Onde:

- $Q_{sn}$  radiação solar incidente líquida (ondas curtas)
- $Q_{an}$  radiação atmosférica incidente líquida (onda longa)
- $Q_{br}$  radiação de volta (onda longa)
- $Q_{ev}$  fluxo de calor evaporativo (calor latente)
- $Q_{co}$  fluxo de calor convectivo (calor sensível).

Sendo,  $Q_{sn}$  a radiação solar incidente líquida

Usando esta equação, calculamos o fluxo de calor na superfície livre do corpo d'água. Portanto, é possível calcular a variação de temperatura da superfície do lago (equação 2) e, por continuidade, a temperatura nas camadas mais profundas.

---


$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q_{total}}{\rho_w c_p \Delta z_s} \quad 2$$


---

Onde:

- $Q_{total}$  fluxo total de calor através da interface ar-superfície ( $J/m^2s$ )
- $c_p$  capacidade calorífica específica da água do mar ( $=3930 Jkg^{-1} K$ )
- $\rho_w$  densidade específica da água ( $kg/m^3$ )
- $\Delta z_s$  espessura da camada superior (m)

Assumindo que o modelo de fluxo de calor negligencia a troca de calor com o fundo, o modelo pode levar a uma superestimação da temperatura da água, especialmente em áreas rasas (como no nosso caso de estudo).

#### 4.5. DESCRIÇÃO DO MORFODINÂMICO E TRANSPORTE SEDIMENTAR

O módulo transporte sedimenta do D3D, utiliza dois tipos de sedimentos, coesivo e não coesivo. Neste estudo, foi utilizado sedimentos coesivos, dados como silte /ou argila que são comuns em ambientes de baixa hidrodinâmica, como lagos. Este modulo incorpora, além do transporte, erosão e deposição nas simulações.

Para o transporte de sedimentos em suspensão em três dimensões é calculado a partir da solução da equação do balanço de massa para sedimentos em suspensão (Lesser 2014, Deltares 2024), descrito pela (equação 3):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad 3$$

Onde:

- $c$  Concentração de massa da fração de sedimento  $i$  (kg/m<sup>3</sup>)
- $\varepsilon_{s,x}, \varepsilon_{s,y}$  e  $\varepsilon_{s,z}$  Difusividades turbulentas da fração de sedimento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  (m<sup>2</sup>/s)
- $u, v$  e  $w$ : Componentes da velocidade do fluxo nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  (m/s)
- $w_s$  Velocidade de sedimentação da fração de sedimento (m/s)

A batimetria do corpo hídrico é sobscrita a cada passo de tempo em função das trocas das cargas sedimentares em suspensão e de fundo, multiplicadas pelo fator de escalonamento morfológico (*MORFAC*), capaz de acelerar os processos morfológicos da simulação (Roy 2016; Deltares 2024). Onde primeiro é calculado variação da carga sedimentar ( $M_b$ ) no leito (equação 4), para assim resolver a atualização da batimetria (equação 5).

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = MORFAC \left( -\frac{\partial S_{b,c,x}}{\partial x} - \frac{\partial S_{b,c,y}}{\partial y} \right) \quad 4$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{MORFAC}{1-p} \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{b,c,x}}{\partial x} + \frac{\partial S_{b,c,y}}{\partial y} \right) \quad 5$$

Onde:

- $M_b$  massa sedimentar integrada no leito (kg/m<sup>2</sup>)
- MORFAC* fator de escalonamento morfológico (-)
- $S_{b,c,x}$  e  $S_{b,c,y}$  carga sedimentar de fundo transportada pelas correntes
- $Z_b$  variação do nível do leito

|        |                                                        |
|--------|--------------------------------------------------------|
| $p$    | porosidade, ou fração de água do volume total do leito |
| $\rho$ | densidade específica do sedimento (kg/m <sup>3</sup> ) |

#### 4.6. CONFIGURAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO

As simulações ocorreram de novembro 2023 a setembro 2024, em um passo de tempo de 1 minuto. Esse período foi escolhido com intuito de abranger os períodos seco e chuvoso que regem a sazonalidade do lago Água Preta. Além disso, foram realizadas alterações nos dados meteorológicos de ventos e radiação solar.

Devido o modelo de fluxo de calor 1 do D3D considerar a nebulosidade como um parâmetro constante, foi realizada a moda deste parâmetro para ser utilizado nas simulações (75%). Contudo, devido estarmos tratando de uma região amazônica, ou seja, de alta nebulosidade, foi necessário multiplicar a radiação solar por 1,8 para que as simulações representem de forma mais acurada os dados reais.

Para os dados de vento, foi verificado que os dados de entrada para o D3D necessitam estar a 10 metros da superfície (U10). Sendo assim, foi aplicada a equação descrita por Allen *et al.* 1998, que assume um comportamento logarítmico do perfil de intensidade do vento, onde sua velocidade aumenta de acordo com a altura, levando, também, em consideração a rugosidade do solo ou grau de obstrução (equação 6). Ademais, devido a estação meteorológica realizar suas medições em terra, não sobre a superfície do lago, a magnitude dos ventos foi multiplicada por um fator de 1,5, este fator foi descrito como uma adaptação dos dados reais para modelagem de lagos por Lick (1976) e Resio & Vincent (1977).

---


$$v_2 = v_1 \times \left( \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \right) \quad 6$$


---

Sendo,  $v_1$  e  $h_1$  a velocidade e altura do vento obtida pelo instrumento e  $v_2$  a velocidade a ser transposta a uma nova altura  $h_2$ . Esse cálculo varia em função do tipo de solo em que o vento está em contato, criando assim um coeficiente de rugosidade  $z_0$ , descrito por Monteith, & Unsworth, 2013.

Nas simulações, o valor inserido para o coeficiente de arrasto do vento foi de 0,003 conforme Chen *et al.* 2020, que ajusta o coeficiente de arrasto, assumindo um valor empírico de 0,003 para lagos rasos e largos.

O domínio do Lago Água Preta, foi discretizado em uma malha estruturada, possuindo elementos de 20x20 m e 10 camadas verticais do tipo sigma (Figura 3), ou seja, que variam seu tamanho conforme a batimetria e a superfície livre (Deltares, 2024).

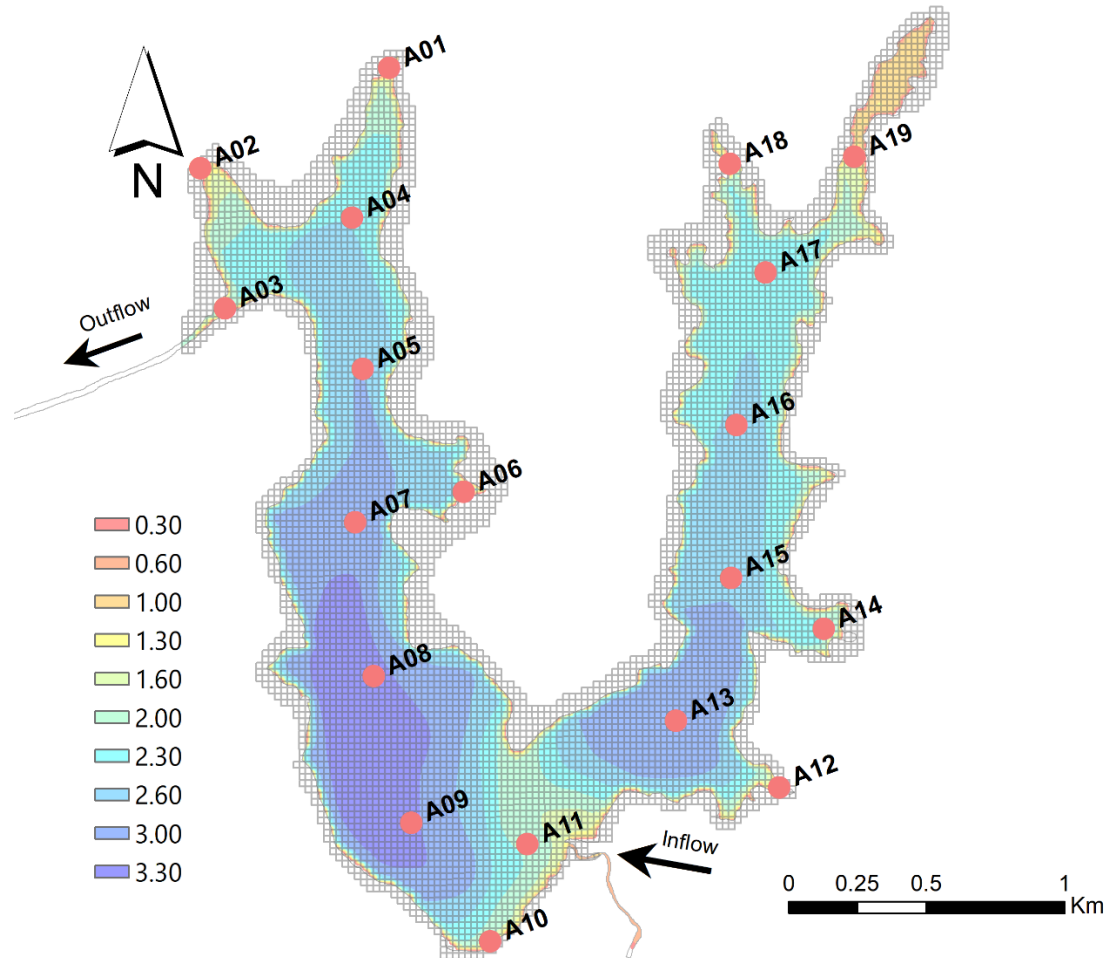


Figura 3 - Ilustração do Domínio discretizado, evidenciando a batimetria do lago, os pontos de amostragem e a entrada e saída de água do sistema.

Na fronteira de superfície livre do domínio simulado, o movimento é gerado pela tensão de cisalhamento do vento na superfície da água e pela magnitude da tensão de cisalhamento é definida na (equação 7) como:

$$|\tau_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad 7$$

Onde:

- $|\tau_s|$  Magnitude da tensão de cisalhamento do vento
- $\rho_a$  Densidade do Ar
- $C_d$  Coeficiente de Arrasto do vento, dependente de  $U_{10}$
- $U_{10}$  Velocidade dos ventos 10 metros acima da superfície

No limite de *inflow* foi admitida a serie temporal disponibilizada pela COSANPA, onde foi utilizado um fator de multiplicação de 5, para que as simulações refletissem melhor aos dados reais (Tabela 2). A temperatura de água e a carga sedimentar que adentram o sistema foram assumidos empiricamente como 29°C e 0,2 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Por assumirmos que o nível do lago é constante durante o período de simulação, o limite de *outflow* foi configurado como nível de água, onde o nível de água é constante (0 metros) durante todo o período de simulação, sendo assim, comportando-se como um limite resposta ao *inflow*.

Os valores de rugosidade do fundo foram discretizados no domínio das simulações, determinados a partir do cálculo do coeficiente de manning (equação 8). Utilizando a metodologia descrita por Arcement & Scheneider (1989) que leva em consideração as características granulometrias do sedimento de fundo, do tipo de vegetação e o grau de obstrução do corpo hídrico (Phillips & Tadayon, 2006), para determinar a rugosidade. Após a discretização da rugosidade pela particularidade de cada domínio, os valores de rugosidade foram interpolados no domínio do modelo (Figura 4), representados na Tabela 2.

$$n = (nb + n1 + n2 + n3 + n4) m \quad 8$$

Onde *nb* é o valor equivalente ao tipo de granulometria do sedimento de fundo; *n1* o fator de correção para os efeitos de irregularidades de fundo; *n2* o tamanho e forma da seção transversal do lago; *n3* valor estimado para o grau de obstrução do lago; *n4* é o valor atribuído para o tipo de vegetação e; *m* o valor equivalente para o meandramento do sistema não aplicável para sistemas lacustres, logo *m* = 1.

Tabela 2 - Valores de rugosidade calculados em função das particularidades de cada região do lago

| Região                                        | Rugosidade (n) |
|-----------------------------------------------|----------------|
| Região com predominância de macrófitas        | 0,03           |
| Região com predominância de sedimento arenoso | 0,025          |
| Região com sedimento areno-lamoso             | 0,018          |
| Região com sedimento lamoso                   | 0,016          |

Fonte: Autor

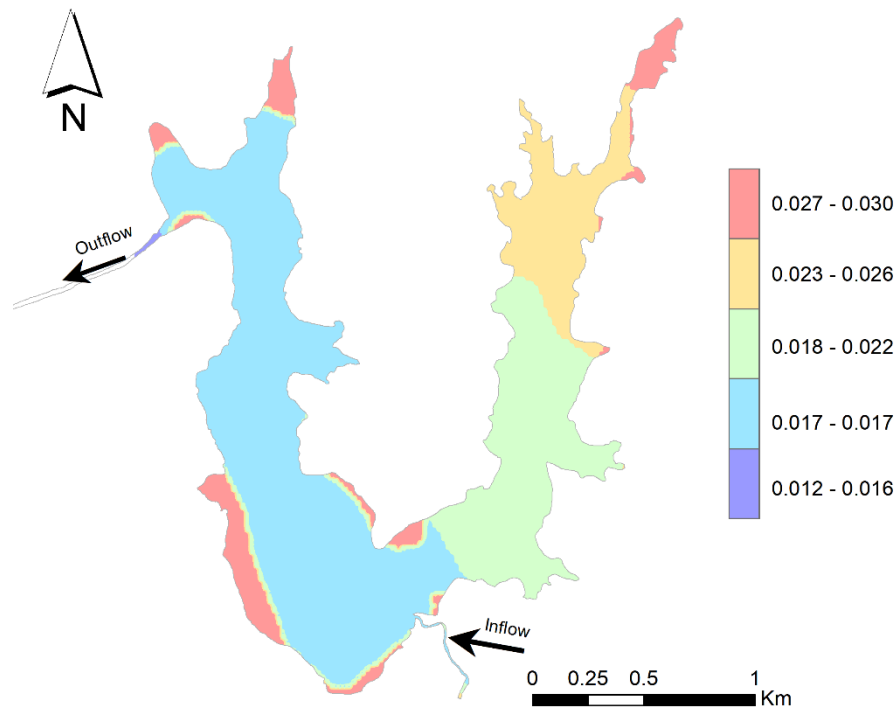


Figura 4 - Rugosidade do domínio, evidenciando em vermelho as regiões em que a superfície do lago fica permanentemente cobertas por macrófitas.

Quatro métricas estatísticas foram aplicadas na etapa de calibração do modelo: (i) raiz do erro quadrático médio (RMSE) para análise de diferença entre os dados modelados e o real; (ii) correlação de Pearson ( $r$ ) para estimar o comportamento entre os dados reais e previstos; (iii) O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para testar a eficiência do modelo; (iv) e o Erro máximo absoluto (MAE) para quantificar o quanto a simulação difere dos dados observados. Estas métricas são comumente usadas para as etapas de validação e calibração de simulações de ambientes lacustres (Soulignac *et al.* 2017, Barachinni *et al.* 2020, Barachinni *et al.* 2020, Gasca-Ortiz *et al.* 2020, Wang *et al.* 2022, Napiorkoski *et al.* 2025).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. CALIBRAÇÃO

Durante a etapa de calibração no ponto A17, as métricas estatísticas em relação as curvas de temperatura (RMSE = 0,27°C e MAE = 0,87 °C), evidenciam que a simulação representa em ótima forma a temperatura do ambiente (Figura 5). Para que a simulação possua boa representatividade dos dados reais, é necessário que o índice MAE seja menor que 20% da variação máxima anual da temperatura do lago (Wang *et al.* 2023).

Portanto, no caso do lago Água Preta que apresenta durante a noite dos períodos chuvosos (fevereiro - abril), temperaturas mínimas de 25 °C e máximas de 34 °C, nos dias ensolarados do período secos (julho - outubro), os valores de MAE e RMSE não poderiam exceder a 2,0 °C.

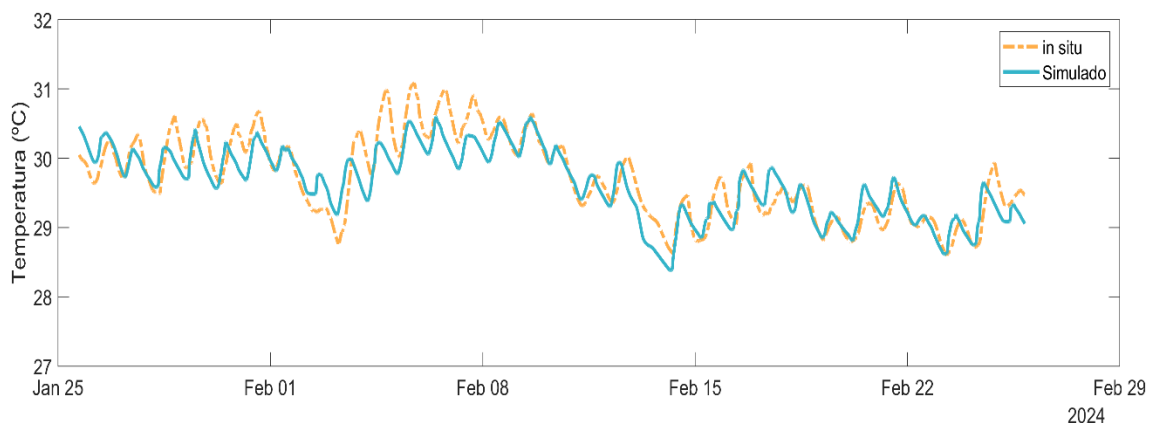


Figura 5 - Comparação entre a curva simulada e observada em fevereiro

Os valores de Pearson ( $\rho = 0,89$ ) e do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,79$ ), também apresentaram boas métricas ao representar os dados reais, onde, além do coeficiente de correlação, ao realizar uma curva de regressão, é possível verificar que os valores de temperatura possuem forte correlação positiva (Figura 6).

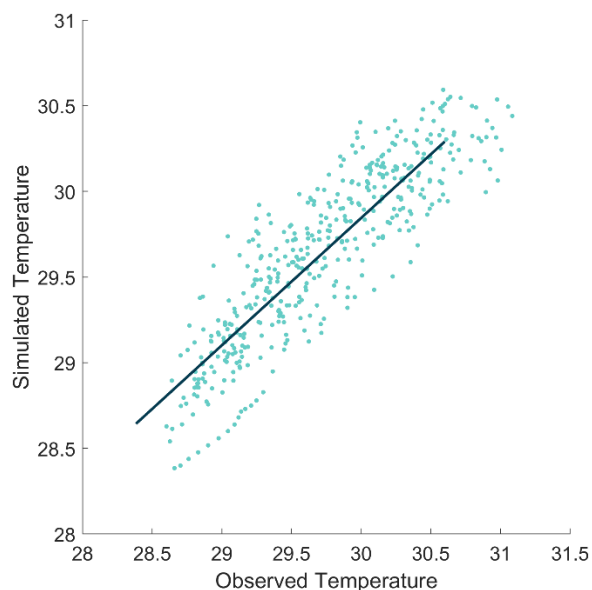


Figura 6 – Regressão Linear dos valores de temperatura observada e simulada, apresentando uma forte correlação positiva  $\rho = 0,89$  e um bom ajuste da curva de regressão  $R^2 = 0,79$ .

## 5.2. VALIDAÇÃO

Para as velocidades nos pontos A08 e A13, com finalidade de fazer a comparação entre os dados reais e simulados foram utilizados apenas os testes de RMSE e Pearson, onde os pontos apresentaram RMSE de 0.009 m/s e 0,012 m/s e  $\rho$  de 0.1 e 0.5, respectivamente. Como dito anteriormente, essas métricas estatísticas são baixas, o que é esperado em simulações de lagos rasos, por apresentarem fluxo lântico. Dito isto, são ambientes de fluxo instável, sujeitos a rápidas mudanças de velocidade pela ação de rajadas de vento e chuvas (Rasmussen & Badr 1979; Liu et al 2020). Ademais, o lago Água Preta possui em suas margens árvores altas que obstruem o fluxo do vento, resultando em uma leve superestimação dos valores de velocidade (Figura 7).

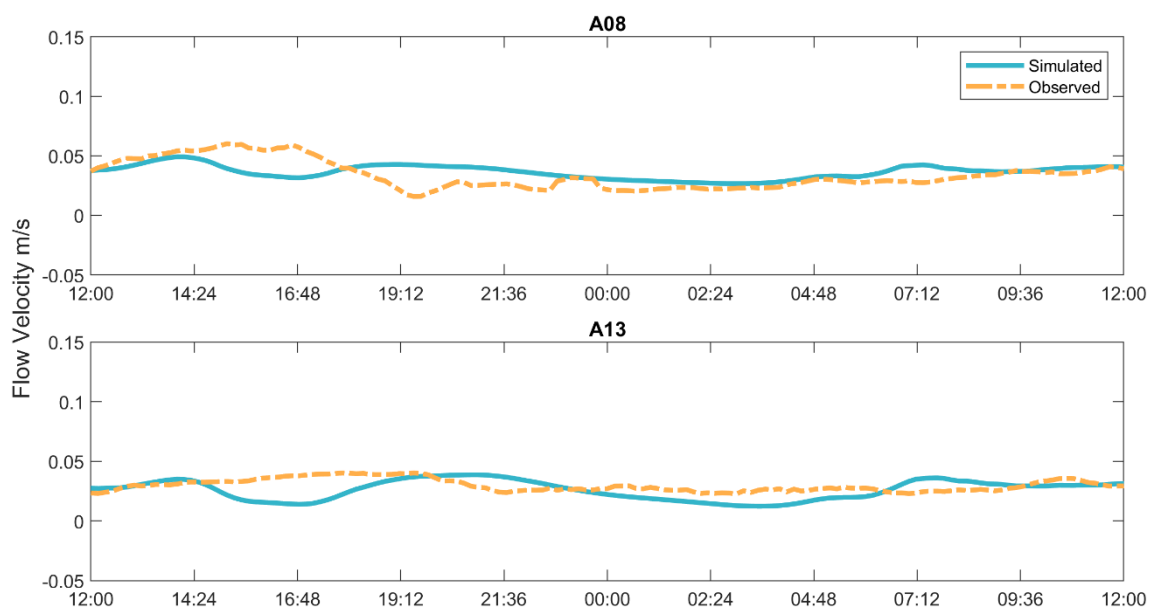


Figura 7 - Variação da velocidade das correntes do lago nos pontos de amostragem A08 e A13 a 0,5 metros acima do leito do lago.

Ao comparar os perfis de temperatura simulados e observados, dos pontos A01 ao A19, foi possível verificar que os maiores erros da simulação se encontram nos pontos A01, A09, A11, A19 (Tabela 3). Estas incertezas estão associadas a alterações antrópicas locais e a variáveis não inseridas nas simulações.

Os pontos de amostragem confinados ou próximos as margens, estão sujeitos a influências locais, capazes de alterar a dinâmica de temperatura pelo despejo de efluentes domésticos, as copas de árvores e pequenas nascentes locais. Como nos pontos A01 e A19, localizados nas extremidades norte do lago, onde ocorre as maiores diferenças de temperatura (Figura 3, Tabela 3). Estes pontos localizam-se em regiões abrigadas e morfologicamente afuniladas, mantendo o local sombreado pelas copas das árvores durante o dia. Além de estarem localizados em adjacência ao ambiente urbano sujeitos ao despejo de efluentes domésticos.

Os pontos A09 e A11 são os pontos mais próximos ao ponto de *inflow* para o lago, o que justifica os menores índices de correlação nestes pontos (Tabela 3). Pois o aporte artificial de água tem capacidade de perturbar a hidrodinâmica do sistema. Isto altera os padrões de circulação previamente estabelecidos naturalmente no sistema, resultando em alterações de temperatura e possivelmente nos parâmetros de qualidade de água.

Houve casos especiais onde as métricas de validação foram baixas. Nos pontos A01, A03 em dezembro e A17 em junho. As macrófitas flutuantes tenderam a se assentar nestas

regiões no Lago. Sendo assim, a superfície do lago nestes locais ficou coberta por esta vegetação, resultando em mudanças no comportamento do perfil de temperatura nestes locais.

Tabela 3 – Métricas estatísticas geradas entre a simulação e os dados os perfis de CTD coletados nos pontos de A01 a A19. Evidenciando os pontos que possuem mais incertezas associadas a particularidades suas próprias particularidades A01, A09, A11, A17.

| Pts | R     |      |       |       | RMSE (°C) |      |      |      | R <sup>2</sup> |      |      |      | MAE (°C) |      |      |      |
|-----|-------|------|-------|-------|-----------|------|------|------|----------------|------|------|------|----------|------|------|------|
|     | Dez   | Fev  | Jun   | Ago   | Dez       | Fev  | Jun  | Ago  | Dez            | Fev  | Jun  | Ago  | Dez      | Fev  | Jun  | Ago  |
| A01 | -0.05 | 0.85 | 0.82  | 0.96  | 0.78      | 0.78 | 0.87 | 0.34 | 0.00           | 0.72 | 0.68 | 0.91 | 0.98     | 1.31 | 1.16 | 0.39 |
| A02 | 0.95  | 0.85 | 0.94  | 0.83  | 0.80      | 0.26 | 0.42 | 0.26 | 0.91           | 0.74 | 0.89 | 0.69 | 0.91     | 0.43 | 0.64 | 0.28 |
| A03 | -0.29 | 0.86 | 0.99  | 0.96  | 0.24      | 0.41 | 0.57 | 0.37 | 0.08           | 0.73 | 0.99 | 0.91 | 0.27     | 0.70 | 0.75 | 0.50 |
| A04 | 0.91  | 0.79 | 0.41  | 0.36  | 0.25      | 0.39 | 0.69 | 0.41 | 0.83           | 0.63 | 0.17 | 0.13 | 0.33     | 0.51 | 1.19 | 0.45 |
| A05 | 0.98  | 0.86 | 0.97  | 0.47  | 0.24      | 0.46 | 0.43 | 0.25 | 0.96           | 0.74 | 0.94 | 0.22 | 0.29     | 0.49 | 0.69 | 0.35 |
| A06 | 0.92  | 0.86 | 0.86  | 0.69  | 0.40      | 0.41 | 0.62 | 0.51 | 0.84           | 0.74 | 0.74 | 0.48 | 0.56     | 0.46 | 0.97 | 0.63 |
| A07 | 0.90  | 0.91 | 0.84  | 0.89  | 0.38      | 0.60 | 0.50 | 0.55 | 0.82           | 0.82 | 0.70 | 0.80 | 0.47     | 0.72 | 0.97 | 0.91 |
| A08 | 0.95  | 0.96 | 0.86  | 0.91  | 0.55      | 0.66 | 0.39 | 0.47 | 0.90           | 0.91 | 0.74 | 0.83 | 0.65     | 0.71 | 0.69 | 0.62 |
| A09 | 0.73  | 0.69 | 0.97  | -0.30 | 0.52      | 0.75 | 0.19 | 0.32 | 0.53           | 0.48 | 0.93 | 0.09 | 0.56     | 0.91 | 0.30 | 0.41 |
| A10 | 0.97  | 0.99 | 1.00  | 0.93  | 0.37      | 0.63 | 0.59 | 0.46 | 0.93           | 0.97 | 0.99 | 0.86 | 0.48     | 0.68 | 0.82 | 0.75 |
| A11 | 0.95  | 0.31 | -0.65 | 0.94  | 0.50      | 0.52 | 0.08 | 0.56 | 0.90           | 0.10 | 0.42 | 0.89 | 0.62     | 0.68 | 0.12 | 0.72 |
| A12 | 0.94  | 0.99 | 0.94  | 0.86  | 0.25      | 0.81 | 0.26 | 0.18 | 0.87           | 0.98 | 0.88 | 0.73 | 0.38     | 0.87 | 0.43 | 0.24 |
| A13 | 0.94  | 0.95 | 0.91  | 0.98  | 0.35      | 0.67 | 0.40 | 0.14 | 0.88           | 0.90 | 0.82 | 0.95 | 0.72     | 0.75 | 0.60 | 0.24 |
| A14 | 0.84  | 0.88 | 0.80  | 0.98  | 0.21      | 0.50 | 0.30 | 0.48 | 0.70           | 0.77 | 0.63 | 0.97 | 0.34     | 0.71 | 0.56 | 0.72 |
| A15 | 0.98  | 0.87 | 0.92  | 0.67  | 0.35      | 0.51 | 0.44 | 0.29 | 0.96           | 0.76 | 0.84 | 0.45 | 0.64     | 0.61 | 0.65 | 0.50 |
| A16 | 0.87  | 0.88 | 0.88  | 0.90  | 0.43      | 0.57 | 0.49 | 0.31 | 0.75           | 0.78 | 0.77 | 0.82 | 0.68     | 0.94 | 0.73 | 0.53 |
| A17 | 0.99  | 0.92 | -0.19 | 0.95  | 0.18      | 0.10 | 0.87 | 0.56 | 0.97           | 0.85 | 0.04 | 0.90 | 0.33     | 0.18 | 2.04 | 0.83 |
| A18 | 0.96  | 0.55 | 0.89  | 0.89  | 0.56      | 0.77 | 0.44 | 0.20 | 0.93           | 0.30 | 0.80 | 0.80 | 0.96     | 1.40 | 0.63 | 0.41 |
| A19 | 0.56  | 0.65 | 0.99  | 0.98  | 0.74      | 0.62 | 0.53 | 0.93 | 0.32           | 0.42 | 0.97 | 0.96 | 1.07     | 1.16 | 0.60 | 1.34 |

### 5.3. SETORIZAÇÃO

Para organizar a apresentação e discussão dos resultados das simulações, o domínio foi seccionado em três áreas em função das particularidades de cada zona, sendo: Oeste a porção influenciada pelo *inflow* e *outflow*; Central, local que recebe diretamente o aporte de *inflow*, possuindo o fluxo de água mais intenso do sistema e as regiões mais profundas do lago; Leste, porção mais controlada do lago, sem um sistema que de entrada ou saída da água (Figura 8).

Os pontos de observação A07, A10 e A16, foram selecionados para a representação das porções Oeste, Central e Leste, respectivamente. Isso viabiliza o entendimento dos padrões de estratificação ao longo do tempo no sistema.

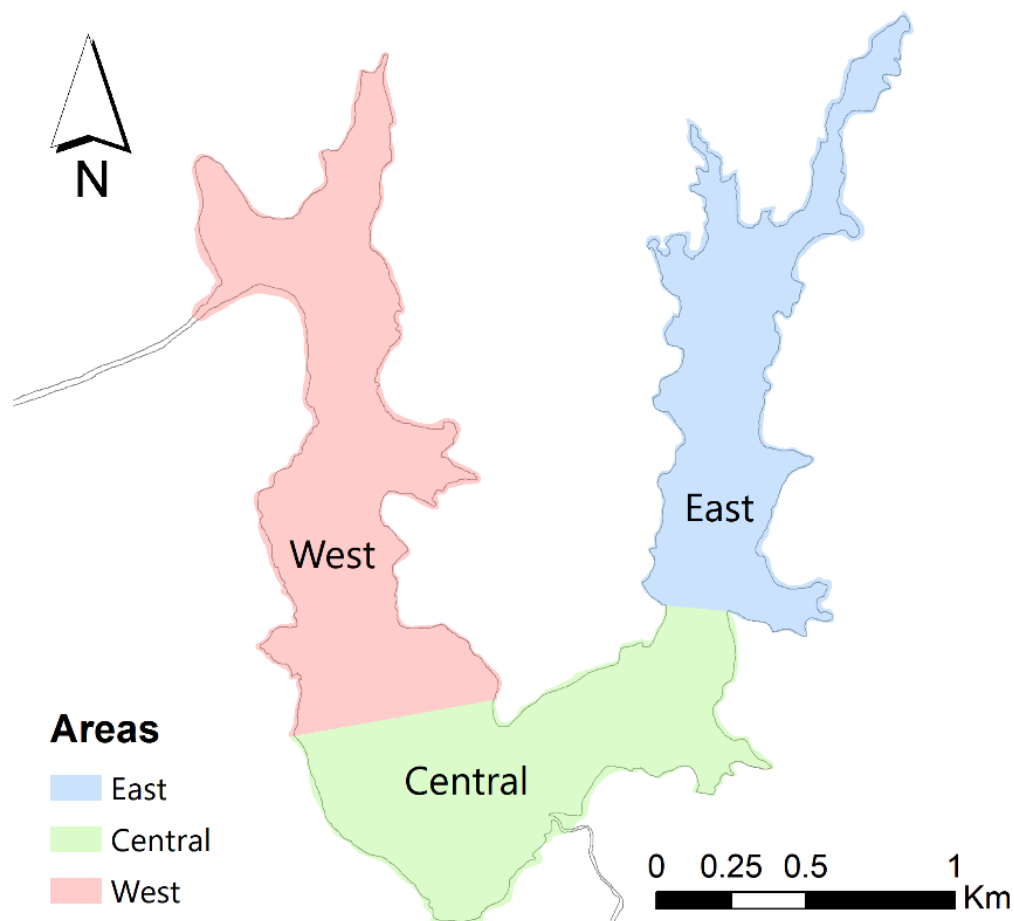


Figura 8 - Setorização do lago Água Preta, em zona Oeste, Central e Leste em função das particularidades hidrodinâmicas de cada zona.

#### 5.4. PADRÕES DE CIRCULAÇÃO DO LAGO ÁGUA PRETA

Dado a natureza lântica dos lagos, o fluxo presente nesse ambiente é de baixa magnitude, sendo primariamente resultado da ação do vento sobre as águas superficiais, apresentando um perfil vertical logarítmico (Tundisi & Tundisi, 2008).

A Figura 9 apresenta o padrão de circulação de superfície e fundo lago Água Preta entre os meses de fevereiro (chuvoso) e junho (seco) de 2024. Esses meses foram escolhidos por representarem a sazonalidade, e segundo o Santos *et al.* 2015 que evidencia os meses com menor e maior velocidade sendo fevereiro e junho, respectivamente.

A velocidade média da superfície variou entre 0 m/s e 0,19 m/s e, no fundo, entre 0 e 0,15 m/s. A partir disto, percebe-se que o domínio apresenta baixas velocidades em sua totalidade, com velocidades máximas associadas ao *inflow* e *outflow*.

O fluxo de água do *inflow* adentra o lago por um canal afunilado até chegar na região central do lago, este fluxo é desacelerado ao entrar em contato com as águas do domínio que são mais lentas que o fluxo do canal, direcionando o fluxo do *inflow* camadas mais profundas (Koue, 2023). Esta circulação forma na região central, correntes com comportamento semelhante a um vórtice, podendo evidenciar os locais que tendem a maior sedimentação. No *outflow*, o canal artificial entre os lagos Água Preta e Bolonha, aumentam da magnitude das correntes, explicado pelo desnível entre essas áreas, que pode chegar a 6 m, culminando em fluxo por gravidade (Holanda *et al.* 2011).

Os valores registrados mostram que o período chuvoso apresenta velocidades médias inferiores, quando comparado ao seco, decorrente do padrão de ventos locais e das características morfológicas do lago (Figura 9). Os ventos da região apresentam maiores intensidades em períodos de baixa precipitação, devido à influência da Zona de Convergência Intertropical na região (Bastos, 2002). Além disso, o lago Água Preta possui ampla região de *fetch*, resultando em maiores velocidades de corrente no período seco, uma vez que o vento é um dos agentes controladores do campo de corrente em sistemas lacustres.

Na região Leste, sem influência dos fluxos de *inflow* e *outflow*, as correntes médias de superfície e fundo, possuem 0,008 m/s e 0,001 m/s de velocidade, respectivamente.

Na região central e oeste, as velocidades médias são mais intensas de 0,02 e 0,009 m/s em superfície e 0,016 e 0,013 m/s em profundidade. A região oeste mostra um fluxo peculiar em relação as outras secções, formando um fluxo constante em profundidade, que interliga os pontos de inflow e outflow (Figura 9).

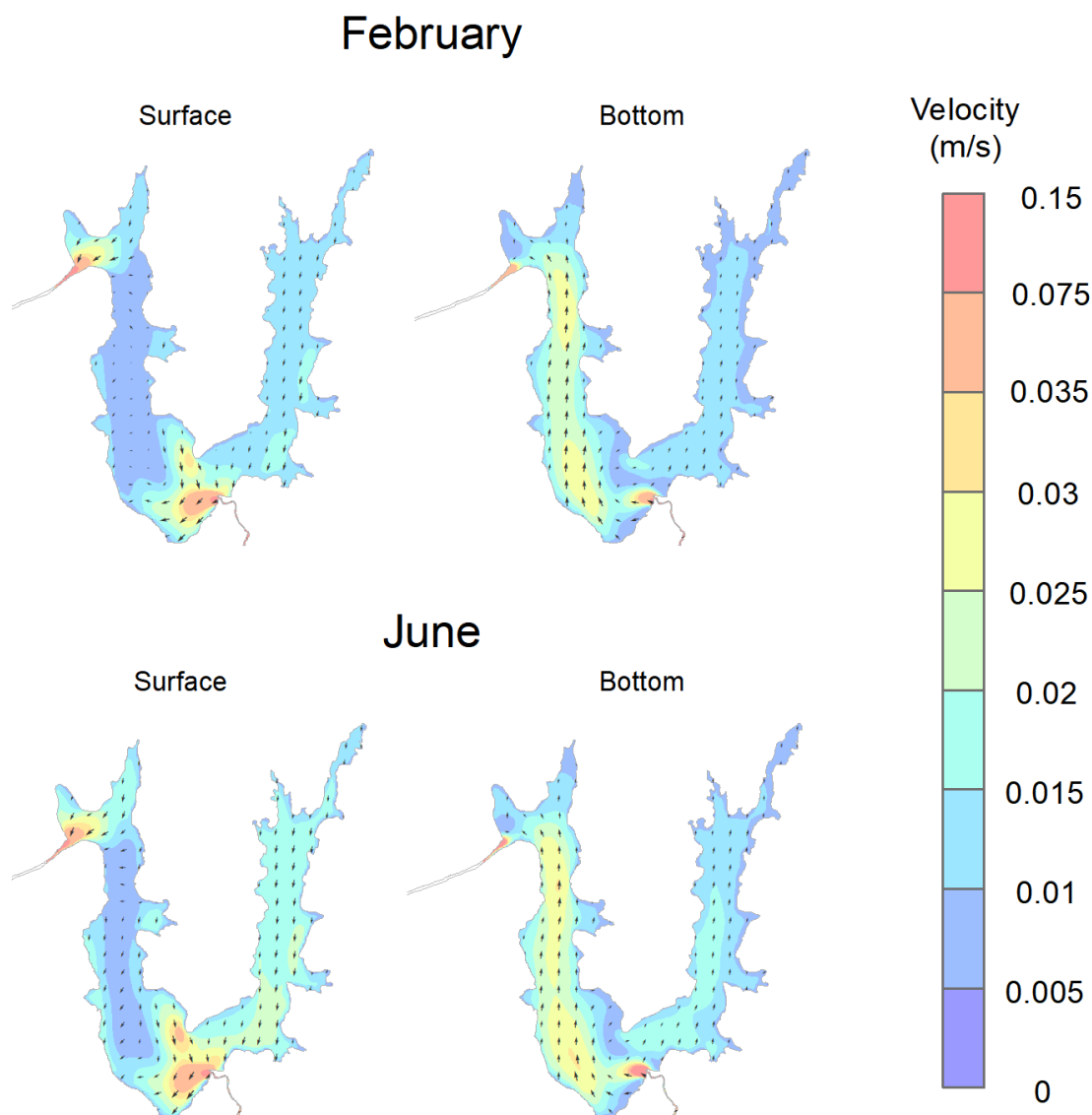


Figura 9 - Velocidade Média dos meses fevereiro (chuvoso) e junho (seco), 2024, evidenciando os padrões de circulação do lago e as velocidades máximas associadas a entrada e saída de água no domínio

Esse fluxo constante, por ocorrer no fundo do lago, pode promover a ressuspensão de sedimentos e matéria orgânica ao longo do trecho analisado. Esse processo pode resultar na liberação de substâncias anteriormente indisponíveis na coluna d'água devido ao seu aprisionamento nos sedimentos, como nutrientes, que podem ser assimilados por organismos locais, como as macrófitas, favorecendo seu desenvolvimento (Esteves,

2011). Além disso, a ressuspensão pode liberar gases provenientes da decomposição da matéria orgânica e influenciar parâmetros físico-químicos, como o pH, oxigênio dissolvido e potencial redox (Esteves 2011, Zhang 2023).

De maneira geral, não foram observadas variações significativas nos padrões horizontais de circulação entre os períodos analisados. Em junho, registraram-se velocidades superiores a 0,005 m/s em uma porção mais ampla do domínio, possivelmente associadas ao aumento da intensidade dos ventos e à predominância de ventos provenientes do Norte (10°-15°). Por outro lado, os menores valores de velocidade observados no lado oeste do lago em fevereiro são atribuídos à incidência de ventos de NNE (20°-25°) nesse período. Essa influência se deve à morfologia do lago, que apresenta corredores orientados no sentido norte-sul, ampliando a zona de atuação dos ventos de origem setentrional. Nesse contexto, as velocidades horizontais do lago Água Preta exibiram um comportamento relativamente uniforme ao longo dos períodos simulados, com variações pontuais de intensidade ao longo das estações do ano.

As velocidades máximas do lago ocorrem na superfície, devido à ação dos ventos, que geram correntes superficiais por meio do estresse turbulento, transmitindo energia verticalmente através da interação entre as camadas adjacentes da coluna d'água. Essa energia se dissipa progressivamente, de modo que as camadas mais profundas são influenciadas pelo substrato, resultando na perda de velocidade devido ao atrito gerado pelo fluxo em contato com o fundo (Zhang & Chen 2023, Torma & Wu 2019, Wüest & Lorke 2003). Esse fenômeno dá origem a um perfil vertical de velocidade que se assemelha a uma curva logarítmica.

No entanto, por se tratar de um lago raso, com profundidade máxima de aproximadamente 4 metros, a atenuação da velocidade nas camadas mais profundas é menos expressiva. Assim, quando as correntes horizontais interagem com o leito, forma-se um fluxo diferencial em profundidade. Esse fluxo pode apresentar magnitude semelhante ou até superior à das correntes superficiais, mas tende a se deslocar em sentido oposto ao fluxo predominante na superfície (Zhang & Chen 2023).

Esse fenômeno gera zonas de mínima velocidade horizontal, intensificando a velocidade vertical e promovendo a ressuspensão da camada superficial de sedimentos não consolidados. Como consequência, a coluna d'água é novamente enriquecida com

nutrientes, alterando parâmetros de qualidade da água, como turbidez, e impactando a ecologia do lago. O aumento da turbidez reduz a penetração luminosa em profundidade, dificultando o estabelecimento de macrófitas submersas (Zhang & Chen 2023). Em contrapartida, espécies emergentes, adaptadas à superfície, podem proliferar devido ao incremento da biodisponibilidade de nutrientes na coluna d'água. Esse processo pode favorecer a colonização excessiva do lago por determinadas espécies, resultando em um possível desequilíbrio da cadeia trófica (Jin *et al.* 2022).

### 5.5. PADRÕES DE TEMPERATURA E ESTRATIFICAÇÃO

As figuras Figura 10 e Figura 11 mostram o padrão esperado de um lago raso localizado em uma região equatorial. Ocorrendo uma leve estratificação térmica durante o dia com diferença média de 0.1°C e máxima de até 2 °C entre superfície e fundo, essa estratificação ocorre entre 12h e 14h, horário que apresenta as maiores temperaturas e índices de radiação diários. As maiores diferenças de temperatura são entre os períodos de dia e noite, com temperaturas mínimas de 29°C e máximas de 31°C. Em todo o período simulado entre seco chuvoso temos uma diferença máxima de até 10 °C, sendo o mínimo 26 °C e o máximo 36 °C.

As temperaturas mais baixas da simulação ocorreram em fevereiro, isto se deve a variação de temperatura do ar e a radiação solar incidente sobre a superfície do lago (Figura 10). O mês de junho apresentou as maiores temperaturas entre os períodos analisados, resultado pelo aumento da temperatura e radiação solar, promovendo maior aquecimento das camadas superficiais, e, conseqüentemente, difusão de calor para maiores profundidades (Figura 11).

Os pontos localizados nas áreas oeste (A08) e central (A10), possuem comportamentos similares. apresentando resfriamento mais acelerado no período da noite, por conta de esta apresentar área maior largura e ser influenciada fortemente pelo aporte de *inflow*, provocando uma maior intensidade na circulação deste local. A secção Leste (A16) evidenciou temperaturas mais baixas das zonas, pois a influência do *inflow* é mínima em relação as zonas Oeste e Central, que combinado ao padrão de ventos do sistema, provenientes do Norte-Nordeste, movimentam as águas para as outras zonas.

Nas três secções do lago, pôde-se observar a ausência de uma termoclina bem pronunciada nos quatro meses de análise, permanecendo com desestratificado durante a

maior parte do tempo, com estratificações diminutas nos períodos de maior intensidade solar. Em lagos rasos os ventos têm capacidade de misturar as camadas de superfície e fundo ocorrendo uma circulação total de entre as camadas. Entre o período seco e chuvoso de 2024, não houve grande diferença na intensidade dos ventos apenas 10° em sua direção indo de NE par NEE, logo o padrão de estratificação é o mesmo em ambos os períodos sazonais.

Sendo assim, o Lago Água Preta, de acordo com seu padrão de temperatura, é enquadrado como um lago polimitico, possuindo múltiplas circulações diárias, esta classificação é característica de rasos e de grande extensão (Esteves 2011).

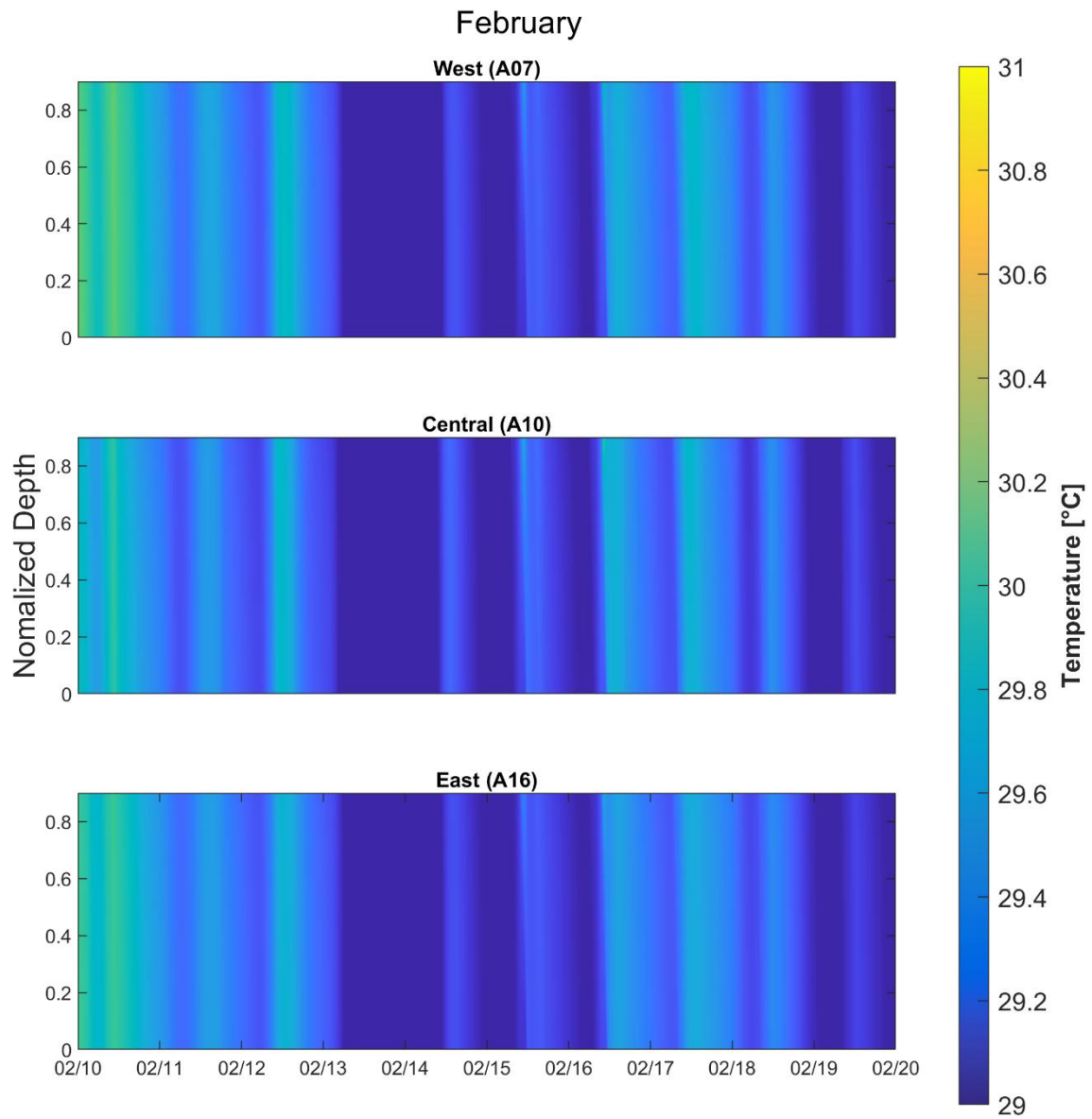


Figura 10 - Variação da temperatura no mês de fevereiro (chuvoso) em função da profundidade no eixo y e tempo no eixo x, onde para o melhor entendimento das variações espaciais do lago, essa análise ocorreu pela escolha de um ponto localizado conforme a setorização oeste, central e leste.

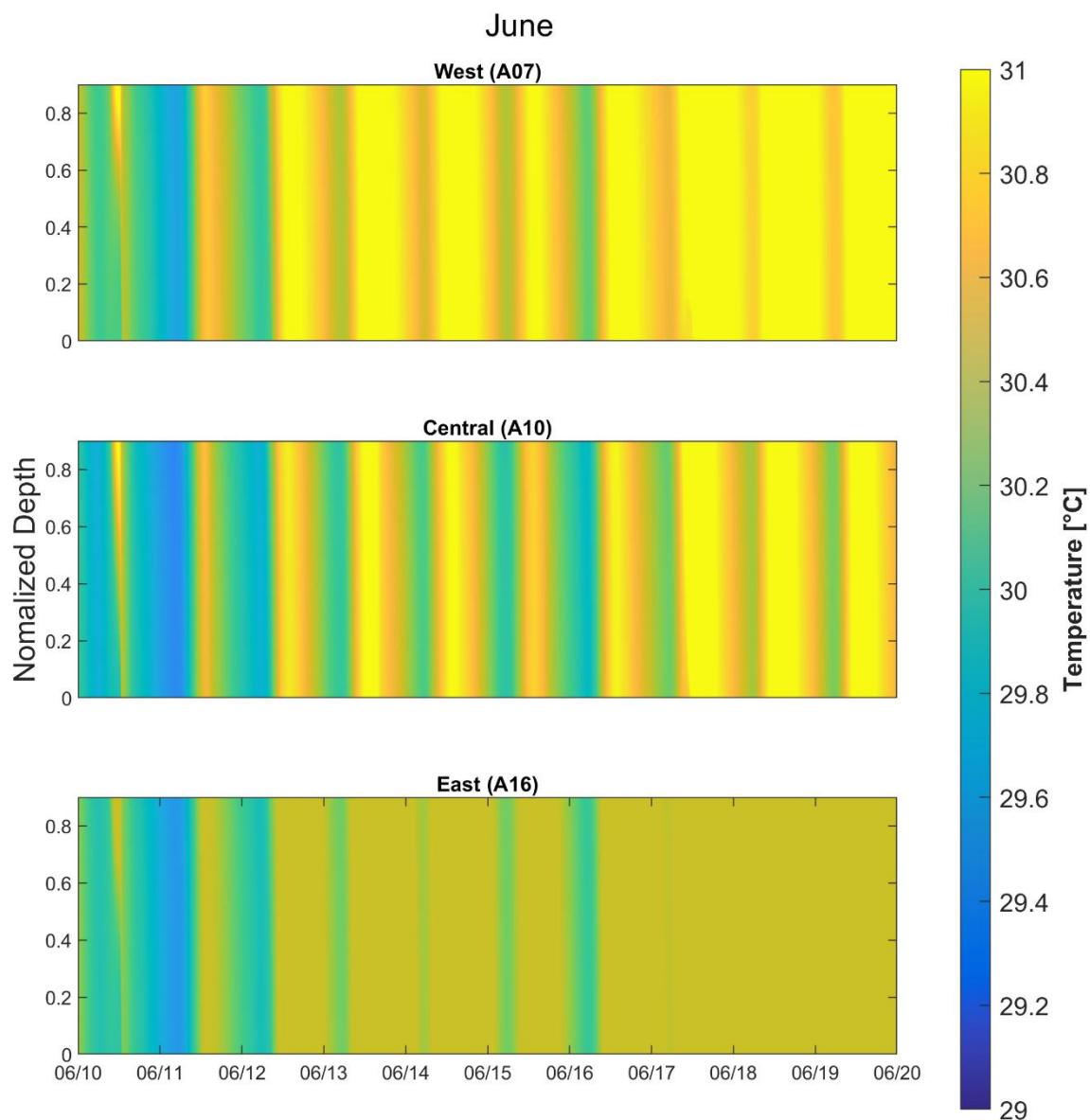


Figura 11 - Variação da temperatura no mês de junho (seco) em função da profundidade no eixo y e tempo no eixo x, onde para o melhor entendimento das variações espaciais do lago, essa análise ocorreu pela escolha de um ponto localizado conforme a setorização oeste, central e leste.

Fevereiro apresentou um padrão de distribuição praticamente homogêneo tanto horizontalmente quanto verticalmente com variações horizontais médias de  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  e verticais de  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Em contraste a junho que possui certa heterogeneidade nos gradientes horizontais de temperatura, onde as temperaturas médias mais elevadas estão concentradas no braço leste do lago, tanto em superfície quanto em profundidade.

Na região central, o aporte do rio Guamá gera um gradiente de temperatura, onde, quanto mais próximo do *inflow* a temperatura tende a diminuir em cerca de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , isto

ocorre em decorrência das configurações da simulação, onde a entrada de água foi definida a uma temperatura de 29 °C.

Na zona oeste do sistema, um gradiente de temperatura é formado do *inflow* ao *outflow*, em decorrência das velocidades mais baixas da zona, que tendendo a transferir menos calor entre as camadas, ao norte desta secção a temperatura diminui, pelo aumento da velocidade que promove trocas de calor com as correntes de saída (*Outflow*) evidenciando em águas mais frias deixando o domínio da simulação (Figura 12).

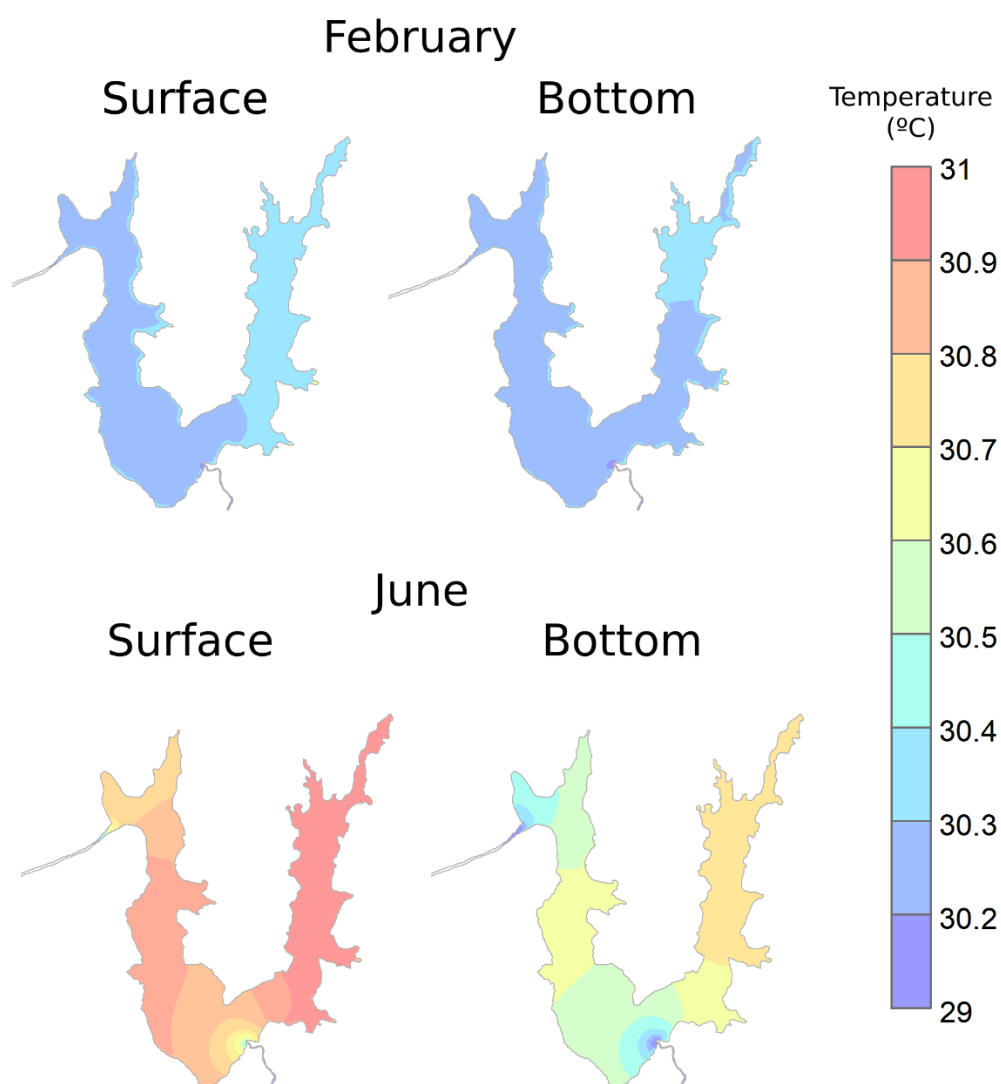


Figura 12 - Gradiente horizontal de temperatura na superfície e em profundidade, evidenciando também as diferenças entre os dois períodos sazonais da região seco (fevereiro) e chuvoso (junho).

A ocorrência da circulação total diária no lago tem diversas implicações para o metabolismo deste. Esse fenômeno permite a movimentação de substâncias e organismos que habitam o ambiente. Sodré (2007) demonstra que as concentrações de fósforo nas

camadas de superfície e fundo do lago Água Preta têm valores similares, sendo que, normalmente, lagos apresentam um acúmulo desse elemento principalmente nos sedimentos (Tundisi & Tundisi 2008). Isso sugere a circulação deste nutriente na coluna d'água, que é possibilitada pela desestratificação térmica do lago, levando a uma maior disponibilidade dessa substância.

Esse processo pode, portanto, contribuir para o processo de eutrofização do lago, com a circulação constante dos nutrientes. Outrossim, também influencia na permanência de metais potencialmente tóxicos na coluna d'água, os quais são encontrados em sedimentos localizados nas margens próximas às áreas de ocupação do lago (Carvalho 2001, Aviz 2022).

A partir desta dinâmica de temperatura, é possível afirmar que o lago Água Preta se encaixa no padrão de ambientes lacustres polimíticos, ou seja, estratificam várias vezes durante o ano. Além disso, por intermédio do comportamento hidrodinâmico do lago, o sistema apresentou circulação predominantemente dominada pela ação dos ventos, com fluxos contrários entre superfície e fundos (fluxo reverso), fenômeno característico de lagos rasos e largos, dominados pela intensidade e direção dos ventos (Zhang & Chen 2023).

As simulações evidenciaram uma setorização do lago em função das particularidades hidrodinâmicas de cada setor, as secções Central e Oeste, são fortemente influenciadas pelo bombeamento artificial de água para o dentro do lago, modificando a circulação e a temperatura do sistema. O setor Leste que apresenta fluxo e gradientes de temperatura mais homogêneos, sendo reflexo das variações da intensidade e direção dos ventos.

O setor Central e Oeste, por ser influenciada pelo bombeamento artificial do rio Guamá, possui uma rica carga sedimentar em suspensão que aumenta sua turbidez. Este fenômeno pode causar possíveis impactos no metabolismo do sistema, como a indisponibilidade de luz, o aumento excessivo de nutrientes em suspensão (podendo gerar eutrofização principalmente nas margens do lago), o desaparecimento da vegetação submersa, quando uma turbidez crítica é atingida, resultando em um lago turvo dominado por fitoplanctons (Scheffer 2007, Li 2025).

Quando um lago chega a um ponto crítico de turbidez, ele se torna resistente às alternativas da restauração, dificultando os processos de clareamento da água, como no

estabelecimento de macrófitas submersas que diminuem a turbidez e previnem os a ressuspensão de sedimentos (Scheffer *et al.* 1993, Scheffer & van Nes 2007, Li 2025). A mudança de na turbidez de algas pode resultar em blooms algais tóxicos, odor e perda significativa dos serviços ecossistêmicos, como a potabilidade de água (Hilt *et al.* 2017, Li 2025).

## 5.6. TRANSPORTE E SEDIMENTAÇÃO DO LAGO ÁGUA PRETA

A Figura 13 apresenta o transporte de sedimentos em suspensão em  $m^3/s$  por metro de largura de malha, ou seja, a unidade do transporte é dada por  $m^3/s/m$ . Nesta figura, pode-se observar, e confirmar, que em ambos os períodos sazonais seco e chuvoso, evidenciam que transporte sedimentar ocorre principalmente pela entrada do rio Guamá no Lago Água Preta.

Esta carga sedimentar proveniente do *inflow* do sistema tende a correr para o setor central ao setor oeste, devido a corrente formada entre os pontos de inflow e outflow, resultando que o lado oeste do lago possua águas mais turvas que o lado leste. Entre os períodos sazonais, não há grande diferença no transporte. Entretanto, há um pequeno contraste na forma que os sedimentos tendem a se espalhar. Em junho, pelo aumento da intensidade das correntes do lago, a carga sedimentar tende a se concentrar mais na região central, pois os vetores de velocidade do lago que vem do Norte, empurram a carga sedimentar para a região central. Contudo, em fevereiro temos a diminuição dessa velocidade, o que possibilita no maior espalhamento destes sedimentos em suspensão. Isto pode ser observado na ponta da nuvem de transporte na região mais ao leste, onde em fevereiro a o transporte tende a se direcionar ligeiramente mais para o leste.

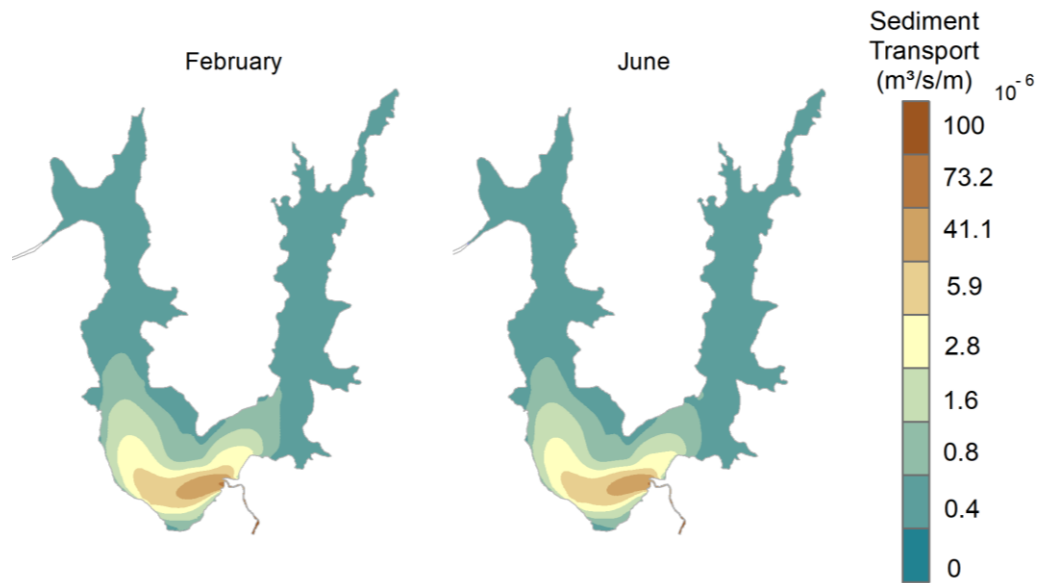


Figura 13 - Transporte de sedimentos em suspensão em  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , evidenciando que a maior parte dos sedimentos correm na região central do lago por influência do *inflow*.

A partir do transporte sedimentar no domínio, pode-se verificar a diferença entre as batimetrias evidenciando os locais onde ocorre a maior deposição de sedimentos no lago. As zonas com acúmulo mais significativo concentram-se predominantemente na região central do lago (Figura 14). Que variam podendo haver uma acreção local de sedimentos de até aproximadamente 1m na região próxima da entrada do Guamá. Além disso, o lago considerando todo seu domínio recebeu uma média de 0,05 m de elevação, segundo o a simulação morfodinâmica apresentada (Figura 14).

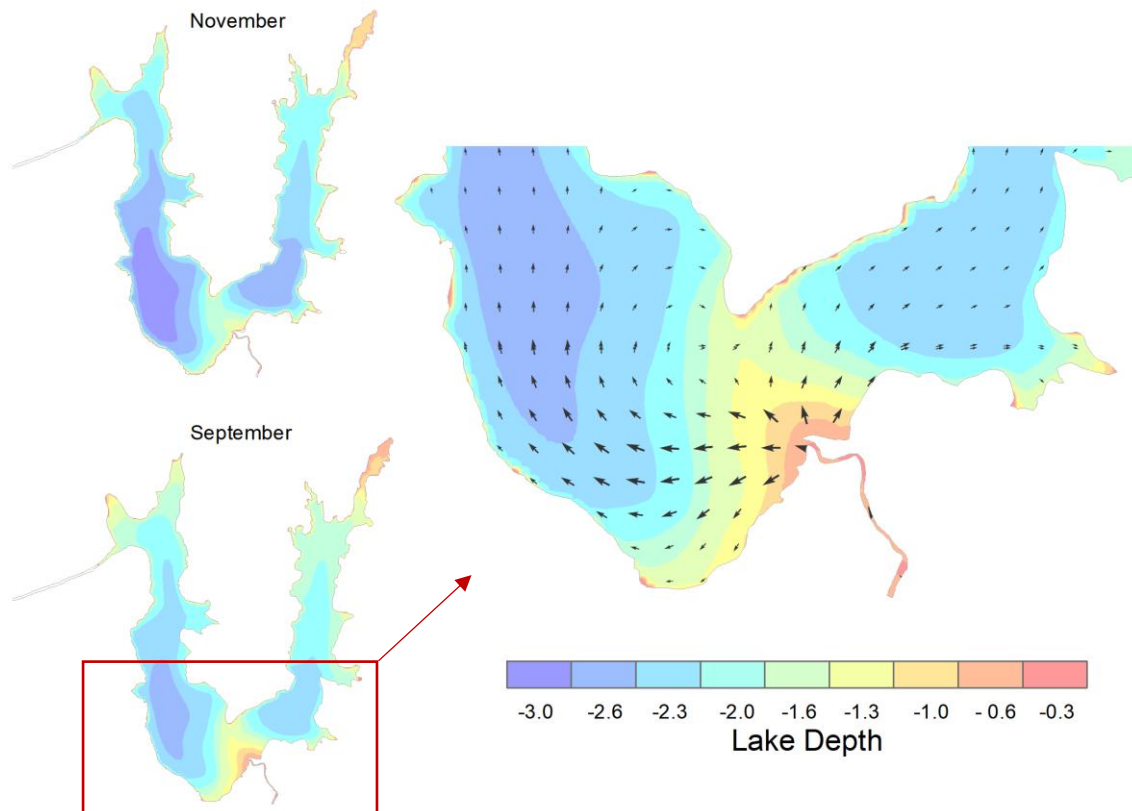


Figura 14 - Diferença entre a batimetria inicial novembro e final setembro. Dada a diferença entre as batimetrias temos a imagem ampliada da batimetria de setembro em conjunto com os vetores de transporte que evidenciam para onde correm os sedimentos que saem do *inflow*.

Essa deposição está associada ao comportamento do *inflow*, que apresenta alta carga sedimentar e velocidades elevadas em comparação com o restante do sistema. Ao adentrar o lago, esse fluxo sofre desaceleração considerável, promovendo uma redução na capacidade de transporte de sedimentos. Como resultado, ocorre a deposição preferencial na região central, especialmente nas proximidades do ponto de entrada do *inflow*, onde a energia do escoamento é dissipada mais rapidamente.

## 6. CONCLUSÃO

Foi desenvolvida a modelagem numérica tridimensional com Delft3D do lago Água Preta, simulando os padrões de circulação e sedimentação do Lago. As simulações apresentaram bons resultados na calibração e validação da temperatura tanto ao longo do tempo quanto em diferenças espaciais do sistema, as maiores disparidades nas métricas de calibração foram devido a particularidade de cada ponto.

O Lago água preta não apresentou grandes variações sazonais de temperatura e velocidade. Contudo, o período seco apresentou temperaturas e velocidades mais elevadas no lago como um todo. Devido a região ser equatorial, isto é, sujeita a leves flutuações de temperatura, essas variações são pequenas. Como o lago estudado possui profundidades baixas e está sujeito a intensa radiação solar ao longo do dia, a temperatura apresentou uma diferença máxima de 2°C entre superfície e fundo. Foi observado também o fenômeno do fluxo reverso no lago, dado como um fluxo em profundidade que possui direção oposta ao fluxo de superfície.

Em condições naturais, o lago é dominado majoritariamente pela ação dos ventos. Entretanto, partir da setorização do lago, a região central evidenciou que o intenso fluxo de entrada artificial do rio Guamá (*inflow*) no sistema possui capacidade de alterar os parâmetros de circulação e sedimentação do lago. Este processo aumenta a turbidez e a taxa de sedimentação nas proximidades do *inflow*, o que pode levar futuramente na degradação da qualidade de água do lago, re-disponibilizando nutrientes na coluna d'água e diminuição da taxa a de luminosidade que adentra o lago.

Isto pode resultar em um equilíbrio do sistema a um lago turvo e dominado por fitoplanctons, diminuindo a quantidade de macrófitas submersas no ambiente que servem para regular a coloração e transparência da água. Indicando que o lago Água Preta necessita de mais projetos de monitoramento, dada sua importância para a região metropolitana de Belém, promovendo serviços ecossistêmicos, na regulação do clima local e na disponibilidade de água potável. Sugerindo algumas medidas preventivas para a diminuição da turbidez deste ambiente seria na implantação de macrófitas submersas assim como uma melhor regulação na carga sedimentar que adentra artificialmente o lago.

Portanto, o presente trabalho evidencia o diagnóstico do lago Água Preta, evidenciando a necessidade sobre mais estudos sobre qualidade de água do lago,

aplicando também a modelagem numérica como ferramenta, assim prevendo novas soluções para o monitoramento deste lago que abastece a cidade de Belém.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstra que a modelagem numérica é uma ferramenta eficaz no monitoramento e controle da qualidade da água em ambientes lacustres. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de mais investigações voltadas ao manejo das entradas artificiais do Lago Água Preta, bem como à regulação da biota local, elementos essenciais para garantir a sustentabilidade ecológica do sistema.

Observa-se que o aumento da turbidez no lago representa uma preocupação relevante, pois pode comprometer a qualidade do recurso hídrico utilizado por diversas comunidades. Esse incremento na concentração de material em suspensão é frequentemente associado à poluição e tem o potencial de provocar impactos negativos no metabolismo aquático, afetando processos biogeoquímicos e a dinâmica ecológica do ecossistema.

Diante disso, recomenda-se o desenvolvimento de novos estudos e projetos que abordem o monitoramento contínuo, o controle das cargas de sedimentos, e a gestão integrada do Lago Água Preta, dada sua importância estratégica para a Região Metropolitana de Belém. Tais iniciativas contribuirão significativamente para a melhoria da qualidade da água e, conseqüentemente, para o bem-estar da população que utiliza este recurso para abastecimento, recreação e educação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrig. Drain. Report Modeling and Application. *Journal of Hydrology*, **285**: 19–40.
- Alsdorf, D., Birkett, C., Dunne, T., Melack, J., Hess, L. 2001. Water Level Changes in a Large Amazon Lake Measured with Spaceborne Radar Interferometry and Altimetry. *Geophysical Research Letters*, **28**: 2671–2674, doi:10.1029/2001GL012962.
- Arcement, G.J. & Schneider, V.R. 1989. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains; *U.S. Geological Survey: (Water Supply Paper 2339)*.
- Aviz, M.D. de, Souza, A.J.N. de, Coelho, A.O., Farias, F.F. de, Mendes, J.O.O., Oliveira, T.D.T.S. de, Pereira, J.A.R., Santos, M. de L.S. 2022. Sensoriamento remoto como ferramenta da estimativa do estado trófico de lago urbano na Amazônia (Belém, PA). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, **13**: 95–107, doi:10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0009.
- Babaousmail, H., Ojara, M.A. 2025. Evaluation of Historical Dry and Wet Periods over Lake Kyoga Basin in Uganda. *Water*, **17**: 1044, doi:10.3390/w17071044.
- Bailey, M.C., Hamilton, D.P. 1997. Wind Induced Sediment Resuspension: A Lake-Wide Model. *Ecological Modelling*, **99**: 217–228, doi:10.1016/S0304-3800(97)01955-8.
- Baracchini, T., Chu, P.Y., Šukys, J., Lieberherr, G., Wunderle, S., Wüest, A., Bouffard, D. 2020. Data Assimilation of in Situ and Satellite Remote Sensing Data to 3D Hydrodynamic Lake Models: A Case Study Using Delft3D-FLOW v4.03 and OpenDA v2.4. *Geoscientific Model Development*, **13**: 1267–1284, doi:10.5194/gmd-13-1267-2020.
- Baracchini, T., Hummel, S., Verlaan, M., Cimatoribus, A., Wüest, A., Bouffard, D. 2020. An Automated Calibration Framework and Open Source Tools for 3D Lake Hydrodynamic Models. *Environmental Modelling & Software*, **134**: 104787, doi:10.1016/j.envsoft.2020.104787.
- Bastos, T.X., Pacheco, N.A., Nechet, D. 2002. Aspectos Climáticos de Belém nos Últimos Cem Anos. *Belém: Embrapa Amazônia Oriental*. 29 p.
- Bhagowati, B., Ahamad, K.U. 2019. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecology & Hydrobiology*, **19**: 155–166, doi:10.1016/j.ecohyd.2018.03.002.
- Bhateria, R., Jain, D. 2016. Water Quality Assessment of Lake Water: A Review. *Sustain. Water Resour. Management.*, **2**: 161–173, doi:10.1007/s40899-015-0014-7.
- Bonnet, M.P., Barroux, G., Martinez, J.M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., Melack, J.M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J.G., Roux, E., Calmant, S., Kosuth, P., Guyot, J. L., Seyler, P. 2008. Floodplain Hydrology in an Amazon Floodplain Lake (Lago Grande de Curuaí). *Journal of Hydrology*, **349**: 18–30, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.10.055.
- Brasil, N.M. de Q.X., Neto, A.B.B., Paumgarten, A.É.A., Silveira, J.M. de Q.X., Silva, A.A. 2021. Análise multitemporal da cobertura do solo do Parque Estadual do Utinga, Belém, Pará/ Multitemporal analysis of the soil coverage of the Utinga State

- Park, Belém, Pará. *Brazilian Journal of Development*, **7**: 36109–36118, doi:10.34117/bjdv7n4-193.
- Carvalho, M. C. 2021 Investigação do registro histórico da composição isotópica do chumbo e da concentração de metais pesados em testemunhos de sedimentos no Lago Água Preta, região metropolitana de Belém-Pará. MS. Dissertation, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 93p.
- Chen, F., Zhang, C., Brett, M.T., Nielsen, J.M. 2020. The Importance of the Wind- Drag Coefficient Parameterization for Hydrodynamic Modeling of a Large Shallow Lake. *Ecological Informatics*, **59**: 101106, doi:10.1016/j.ecoinf.2020.101106.
- Cheng, N., Liu, L., Hou, Z., Wu, J., Wang, Q., Fu, Y. 2021. Pollution Characteristics and Risk Assessment of Surface Sediments in the Urban Lakes. *Environ Sci Pollut Res*, **28**: 22022–22037, doi:10.1007/s11356-020-11831-8.
- Cheng, X., Qu, M., Hu, Y., Liu, X., Mei, Y. 2025. Differences in Microbial Communities and Phosphorus Cycles between Rural and Urban Lakes: Based on Glyphosate and AMPA Effects. *Journal of Environmental Management*, **376**: 124577, doi:10.1016/j.jenvman.2025.124577.
- Chung, E.G., Bombardelli, F.A., Schladow, S.G. 2009, Sediment Resuspension in a Shallow Lake. *Water Resources Research*, **45**, doi:10.1029/2007WR006585.
- Deltares. 2024. *Delft3D-FLOW, User Manual*. Delft, Deltares. ver. 4.05. 753 p.
- Esteves, F. A. 1998. *Fundamentos de limnologia*. [S.l] Interciência.
- Godoy, L., Sáez, B., de la Fuente, A. 2025. Mixing Regimes in a Shallow Lake over the Past Five Decades: Application to Laguna Carén. *Water*, **17**: 1007, doi:10.3390/w17071007. 1.
- Grochowska, J., Augustyniak, R., Łopata, M., Tandyrak, R. 2020. Is It Possible to Restore a Heavily Polluted, Shallow, Urban Lake? *Applied Sciences*, **10**: 3698, doi:10.3390/app10113698.
- Hassan, A., Ismail, S., Elmoustafa, A., Khalaf, S. 2017. Evaluating Evaporation Rate from High Aswan Dam Reservoir Using RS and GIS Techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **21**, doi:10.1016/j.ejrs.2017.10.001.
- Herb, W.R., Stefan, H.G. 2004. Temperature Stratification and Mixing Dynamics in a Shallow Lake With Submersed Macrophytes. *Lake and Reservoir Management*, **20**: 296–308, doi:10.1080/07438140409354159.
- Hilt, S., Brothers, S., Jeppesen, E., Veraart, A.J., Kosten, S. 2017. Translating Regime Shifts in Shallow Lakes into Changes in Ecosystem Functions and Services. *BioScience*, **67**: 928–936, doi:10.1093/biosci/bix106.
- Hinegk, L., Adami, L., Piccolroaz, S., Amadori, M., Moretti, M., Tubino, M., Toffolon, M. 2023. Multidecadal Analysis of Lake Garda Water Balance. *Journal of Limnology*, **82**: doi:10.4081/jlimnol.2023.2144.
- Holanda, P. da S., Blanco, C.J.C., Cruz, D.O. de A., Lopes, D.F., Barp, A.R.B., Secretan, Y. 2011. Hydrodynamic Modeling and Morphological Analysis of Lake Água Preta: One of the Water Sources of Belém-PA-Brazil. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, **33**: 117–124, doi:https://doi.org/10.1590/S1678-58782011000200001.

- Hossu, C.A., Iojă, I.-C., Onose, D.A., Niță, M.R., Popa, A.-M., Talabă, O., Inostroza, L. 2019. Ecosystem Services Appreciation of Urban Lakes in Romania. Synergies and Trade-Offs between Multiple Users. *Ecosystem Services*, **37**: 100937, doi:10.1016/j.ecoser.2019.100937.
- Hunt, R.J., Haitjema, H.M., Krohelski, J.T., Feinstein, D.T. 2003, Simulating Ground Water-Lake Interactions: Approaches and Insights. *Groundwater*, **41**: 227–237, doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02586.x.
- James, R.Thomas., Martin, J., Wool, T., Wang, P.F. 1997. A Sediment Resuspension and Water Quality Model of Lake Okeechobee. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **33**: 661–678, doi:10.1111/j.1752-1688.1997.tb03540.x.
- Jandaghian, Z., Colombo, A. 2024. The Role of Water Bodies in Climate Regulation: Insights from Recent Studies on Urban Heat Island Mitigation. *Buildings*, **14**: 2945, doi:10.3390/buildings14092945.
- Jiang, M., Brereton, A., Beckler, J., Moore, T., Brewton, R.A., Hu, C., Lapointe, B.E., McFarland, M.N. 2025. Modeling Water Quality and Cyanobacteria Blooms in Lake Okeechobee: I. Model Descriptions, Seasonal Cycles, and Spatial Patterns. *Ecological Modelling*, **502**: 111018, doi:10.1016/j.ecolmodel.2025.111018.
- Jin, H., van Leeuwen, C.H.A., Van de Waal, D.B., Bakker, E.S. 2022. Impacts of Sediment Resuspension on Phytoplankton Biomass Production and Trophic Transfer: Implications for Shallow Lake Restoration. *Science of The Total Environment*, **808**: 152156, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152156.
- Jin, K.-R., Ji, Z.-G. Application and Validation of Three-Dimensional Model in a Shallow Lake. 2005. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **131**: 213–225, doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:5(213).
- Jin, K.-R., Ji, Z.-G., Thomas James, R. 2007. Three-Dimensional Water Quality and SAV Modeling of a Large Shallow Lake. *Journal of Great Lakes Research*, **33**: 28–45, doi:10.3394/0380-1330(2007)33[28:TWQASM]2.0.CO;2.
- Koue, J. 2023. Modeling the Effects of River Inflow Dynamics on the Deep Layers of Lake Biwa, Japan. *Environ. Process.*, **10**: 62, doi:10.1007/s40710-023-00673-4.
- Lesser, G.R., van Kester, J., Walstra, D.J.R., Roelvink, J.A. 2014. Three-Dimensional Morphological Modelling in Delft3D-FLOW.
- Li, B., Chen, D., Lu, J., Liu, S., Wu, J., Gan, L., Yang, X., He, X., He, H., Yu, J., Zhong, P., Tang, Y., Zhang, X., Du, Y., Su, Y., Guan, B., Chen, F., Li, K., Jeppesen, E., Liu, Z., 2025. Restoring Turbid Eutrophic Shallow Lakes to a Clear-Water State by Combined Biomanipulation and Chemical Treatment: A 4-Hectare in-Situ Experiment in Subtropical China. *Journal of environmental management*, **380**, 125061, doi:10.1016/j.jenvman.2025.125061.
- Li, Y., Zhang, Q., Werner, A.D., Yao, J., Ye, X. 2017. The Influence of River-to-Lake Backflow on the Hydrodynamics of a Large Floodplain Lake System (Poyang Lake, China). *Hydrological Processes*, **31**: 117–132, doi:10.1002/hyp.10979.
- Lick, W. 1976. Numerical modeling of lake currents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 4, **1**: 49-74,
- Liu, S., Ye, Q., Wu, S., Stive, M.J.F. 2018. Horizontal Circulation Patterns in a Large Shallow Lake: Taihu Lake, China. *Water*, **10**: 792, doi:10.3390/w10060792.

- Liu, S., Ye, Q., Wu, S., Stive, M.J.F. 2020. Wind Effects on the Water Age in a Large Shallow Lake. *Water*, **12**: 1246, doi:10.3390/w12051246.
- Liu, W.-C., Liu, H.-M., Yam, R.S.-W. 2021. A Three-Dimensional Coupled Hydrodynamic-Ecological Modeling to Assess the Planktonic Biomass in a Subalpine Lake. *Sustainability*, **13**: 12377, doi:10.3390/su132212377.
- Liu, Y., Zhong, R., Bao, A., Liu, T. 2021 Diagnostic Simulation of Water Age in Small Lake of Bosten Lake. *Water*, **13**: 1996, doi:10.3390/w13151996.
- MacIntyre, S., Melack, J.M. Frequency and Depth of Vertical Mixing in an Amazon Floodplain Lake (L. Calado, Brazil): With 5 Figures in the Text. 1988. *SIL Proceedings, 1922-2010*, **23**: 80–85, doi:10.1080/03680770.1987.11897906.
- Mammides, C. 2020. A Global Assessment of the Human Pressure on the World's Lakes. *Global Environmental Change*, **63**: 102084, doi:10.1016/j.gloenvcha.2020.102084.
- Meerhoff, M., Teixeira-de Mello, F., Kruk, C., Alonso, C., González-Bergonzoni, I., Pacheco, J.P., Lacerot, G., Arim, M., Beklioglu, M., Brucet, S., 2012, et al. 4 - Environmental Warming in Shallow Lakes: A Review of Potential Changes in Community Structure as Evidenced from Space-for-Time Substitution Approaches. In *Advances in Ecological Research*; Jacob, U., Woodward, G., Eds.; Global Change in Multispecies Systems Part 1; Academic Press; Vol. 46, pp. 259–349.
- Menchén, A., Espín, Y., Valiente, N., Toledo, B., Álvarez-Ortí, M., Gómez-Alday, J.J. 2020. Distribution of endocrine disruptor chemicals and bacteria in saline Pétrola Lake (Albacete, SE Spain) protected area is strongly linked to land use. *Applied Sciences*, **10**, 4017, doi:10.3390/app10114017.
- Mishra, J., Parashar, D.D., Kumar, D.R. 2023. Review of planning guidelines for urban lakes in India. *Journal of Positive School Psychology*, 555–562.
- Mishra, M., Singhal, A., Srinivas, R. 2023. Effect of Urbanization on the Urban Lake Water Quality by Using Water Quality Index (WQI). *Materials Today: Proceedings*, doi:10.1016/j.matpr.2023.06.357.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H. Micrometeorology. 2013. In *Principles of Environmental Physics*; Elsevier; pp. 289–320 ISBN 978-0-12-386910-4.
- Musie, W., Gonfa, G., 2023. Fresh Water Resource, Scarcity, Water Salinity Challenges and Possible Remedies: A Review. *Heliyon*, **9**, e18685, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e18685.
- Naselli-Flores, L. 2008. Urban Lakes: Ecosystems at Risk, Worthy of the Best Care. *Materials of the 12th World Lake Conference, Taal 2007*, 1333–1337.
- Oliveira, G. M. T. S., Oliveira, E. S., Santos, M. L. S., Melo, N. F. A. C., Krag, M. N. 2018. Concentrações de metais pesados nos sedimentos do lago Água Preta (Pará, Brasil). *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, **23(3)**: 599–605. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018152875>
- Oliveira, M. do C.F. de, Júnior, J.A. de S., Cruz, P.P.N. da, Filho, J.D.S. 2016 Climatologia Urbana da Cidade de Belém-Pará, através das Precipitações e Temperaturas do Ar, das Normais Climatológicas de 1941 a 1970, 1971 a 2000 e da Normal Provisória de 2001 a 2015 (Urban Climatology of the City of Belem-Pará-Brazil,

throughout...). *Revista Brasileira de Geografia Física*, **9**: 803–819, doi:10.26848/rbgf.v9.3.p803-819.

Oliveira, P.A., Blanco, C.J.C., Mesquita, A.L.A., Lopes, D.F., Furtado Filho, M.D.C. 2021. Estimation of Suspended Sediment Concentration in Guamá River in the Amazon Region. *Environ Monit Assess*, **193**: 79, doi:10.1007/s10661-021-08901-w.

Pará. 2013. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Revisão do Plano de Manejo do Parque Estadual do Utinga. Belém.

Petersen, L., Heynen, M., Pellicciotti, F. 2017. Freshwater Resources: Past, Present, Future. In *International Encyclopedia of Geography*; Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M.F., Kobayashi, A., Liu, W., Marston, R.A., Eds.; Wiley; pp. 1–11 ISBN 978-0-470-65963-2.

Phillips, J.V., Tadayon, S. 2006, Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona. *Scientific Investigations Report*, doi:10.3133/sir20065108.

Piccioni, F., Casenave, C., Lemaire, B.J., Le Moigne, P., Dubois, P., Vinçon-Leite, B. 2021. The Thermal Response of Small and Shallow Lakes to Climate Change: New Insights from 3D Hindcast Modelling. *Earth System Dynamics*, **12**: 439–456, doi:10.5194/esd-12-439-2021.

Qin, B., Zhang, Y., Zhu, G., Gao, G., 2023, Eutrophication Control of Large Shallow Lakes in China. *Science of The Total Environment*, **881**: 163494, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163494.

Rasmussen, H., Badr, H. M., 1979. Validation of numerical models of the unsteady flow in lakes. *Applied Mathematical Modelling*, **3**: 110-117.

Resio, D., Vincent, C., 1977. Estimation of winds over the great lakes. *J. Waterway Harbour. Coast. Eng. Div. ASCE*, **102**: 263–282, doi:10.1061/JWPCDX.0000027.

Roy, B., Haider, M.R., Yunus, A. 2016. A Study on Hydrodynamic and Morphological Behavior of Padma River Using Delft3d Model. *In proceedings of the 3rd international conference on civil engineering for sustainable development*, KUET, Khulna, Bangladesh. p.12

Santos, M.L.S., Saraiva, A.L.D.L., Pereira, J.A.R., Nogueira, P.F.R.D.S.M., Silva, A.C.D. 2015. Hydrodynamic Modeling of a Reservoir Used to Supply Water to Belem (Lake Agua Preta, Para, Brazil). *Acta Sci. Technol.* **37**: 353, doi:10.4025/actascitechnol.v37i3.25839.

Scheffer, M., Hosper, S.H., Meijer, M.-L., Moss, B., Jeppesen, E. 1993. Alternative Equilibria in Shallow Lakes. *Trends in Ecology & Evolution*, **8**: 275–279, doi:10.1016/0169-5347(93)90254-M.

Scheffer, M., van Nes, E.H. 2007. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, **584**: 455–466, doi:10.1007/s10750-007-0616-7.

Schirpke, U., Tasser, E., Ebner, M., Tappeiner, U. 2021. What can geotagged photographs tell us about cultural ecosystem services of lakes? *Ecosyst. Serv.*, **51**: 101354

- Segep - Secretaria Municipal de Coordenação Geral do Planejamento e Gestão. 2012. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO MUNICÍPIO DE BELÉM, v. 16.
- Sinyukovich, V.N., Georgiadi, A.G., Groisman, P.Y., Borodin, O.O., Aslamov, I.A. 2024. The variation in the water level of Lake Baikal and its relationship with the inflow and outflow. *Water*, **16**: 560, doi:10.3390/w16040560
- Sodré S dos V. 2007. Hidroquímica dos lagos Bolonha e Água Preta mananciais de Belém-PA. Dissertation in Portuguese. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Belém.
- Soulignac, F., Vinçon-Leite, B., Lemaire, B.J., Scarati Martins, J.R., Bonhomme, C., Dubois, P., Mezemate, Y., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Tassin, B. 2017. Performance assessment of a 3D hydrodynamic model using high temporal resolution measurements in a shallow urban lake. *Environ Model Assess*, **22**: 309–322, doi:10.1007/s10666-017-9548-4.
- Tang, C., Li, Y., He, C., Acharya, K. 2020. Dynamic behavior of sediment resuspension and nutrients release in the shallow and wind-exposed meiliang bay of Lake Taihu. *Science of The Total Environment*, **708**: 135131, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135131.
- Thomaz, S. M. 2002. Fatores ecológicos associados à colonização e ao desenvolvimento de macrófitas aquáticas e desafios de manejo. *Planta daninha*, v. **20**: 21-33.
- Tundisi, J. G., Tundisi, T. M. 2008. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Wang, M., Stokal, M., Burek, P., Kroeze, C., Ma, L., Janssen, A.B.G. 2019. Excess nutrient loads to Lake Taihu: Opportunities for nutrient reduction. *Science of The Total Environment*, **664**: 865–873, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.051. 1.
- Wei, G., Yang, Z., Liang, C., Yang, X., Zhang, S. 2022, Urban Lake scenic protected area zoning based on ecological sensitivity analysis and remote sensing: A case study of Chaohu Lake Basin, China. *Sustainability*, **14**: 13155, doi:10.3390/su142013155.
- Wei, Z., Xu, Y., Zhao, Y., Zhao, Y., Bai, L., Jiang, H., Wang, C. 2021. The settling of resuspended lake sediment related to physicochemical properties of particles of different sizes: implication for environmental remediation. *International Journal of Sediment Research*, **36**: 542–554, doi:10.1016/j.ijsrc.2020.11.005.
- Wen, C., Zhan, Q., Zhan, D., Zhao, H., Yang, C. 2021. Spatiotemporal evolution of lakes under rapid urbanization: a case study in Wuhan, China. *Water*, **13**: 1171, doi:10.3390/w13091171.
- Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nat Rev Earth Environ*, **1**: 388–403, doi:10.1038/s43017-020-0067-5.
- Woolway, R.I., Sharma, S., Smol, J.P. 2022. Lakes in hot water: the impacts of a changing climate on aquatic ecosystems. *BioScience*, **72**: 1050–1061, doi:10.1093/biosci/biac052.
- Xie, H., Ma, Y., Jin, X., Jia, S., Zhao, X., Zhao, X., Cai, Y., Xu, J., Wu, F., Giesy, J.P. 2024, Land use and river-lake connectivity: biodiversity determinants of lake ecosystems. *Environmental Science and Ecotechnology*, **21**: 100434, doi:10.1016/j.ese.2024.100434.

- Xie, Q., Ren, L., Yang, C. 2023. Regulation of water bodies to urban thermal environment: evidence from Wuhan, China. *Front. Ecol. Evol.*, **11**: doi:10.3389/fevo.2023.983567.
- Xu, Y., Cheng, X., Gun, Z. 2022. What drive regional changes in the number and surface area of lakes across the Yangtze River Basin during 2000–2019: human or climatic factors? *Water Resources Research*, **58**: e2021WR030616, doi:10.1029/2021WR030616.
- Xue, X., Storms, J., Zăinescu, F., Schuster, M., Wang, L., May, J.-H., Ng, Z.L., van der Vegt, H., Nutz, A., Bozetti, G., *et al.* 2025. Wind-driven hydrodynamic and depositional patterns in shallow lakes: an exploratory modelling approach based on an archetypal case of Lake Hulun. *Sedimentology*, doi:10.1111/sed.13265.
- Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J.-F., Wada, Y., Berge-Nguyen, M. 2023. Satellites Reveal Widespread Decline in Global Lake Water Storage. *Science*, **380**: 743–749, doi:10.1126/science.abo2812.
- Yu, Y., Yu, Z., Jiang, J., Wu, L., Feng, H. 2023. Assessing the impacts of fine sediment removal on endogenous pollution release and microbial community structure in the shallow lakes. *Sci Total Environ*, **897**: 165410, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165410.
- Zhang, C. & Chen, L. 2023. A review of wind-driven hydrodynamics in large shallow lakes: importance, process-based modeling and perspectives. *Cambridge Prisms: Water*, **1**, e16, doi:10.1017/wat.2023.14. 1.
- Zhang, Y., Zhu, J., Hu, W., Chen, Q., Peng, Z., Qin, H., Luo, J. 2024. Hydrodynamic effects and water environment improvement of topographic reconstruction in shallow lakes. *Journal of Hydrology*, **634**: 131125, doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131125.
- Zhang, Z., Huang, Y., Xu, C.-Y., Chen, X., Moss, E.M., Jin, Q., Bailey, A.M. 2016. analysis of Poyang Lake water balance and its indication of river–lake interaction. *SpringerPlus*, **5**: 1555, doi:10.1186/s40064-016-3239-5.
- Zhang, Z., Li, J., Luo, X., Li, C., Zhang, L. 2020. Urban lake spatial openness and relationship with neighboring land prices: exploratory geovisual analytics for essential policy insights. *Land Use Policy*, **92**: 104479, doi:10.1016/j.landusepol.2020.104479.
- Zhao, J., Ding, W., Xu, S., Ruan, S., Wang, Y., Zhu, S. 2021. Prediction of sediment resuspension in Lake Taihu using support vector regression considering cumulative effect of wind speed. *Water Science and Engineering*, **14**: 228–236, doi:10.1016/j.wse.2021.08.002.
- Zhao, L., Li, T., Przybysz, A., Liu, H., Zhang, B., An, W., Zhu, C. 2023 Effects of urban lakes and neighbouring green spaces on air temperature and humidity and seasonal variabilities. *Sustainable Cities and Society*, **91**: 104438, doi:10.1016/j.scs.2023.104438.
- Zhou, J., Leavitt, P.R., Zhang, Y., Qin, B. 2022. Anthropogenic eutrophication of shallow lakes: is it occasional? *Water Research*, **221**: 118728, doi:10.1016/j.watres.2022.118728.
- Zingel, P., Boveri, M., Agasild, H., Jeppesen, E. 2025 Preface: Secrets of shallow lakes—insights from research. *Hydrobiologia*, **852**: 283–288, doi:10.1007/s10750-024-05741-w.