

Batimetria e Hidrodinâmica do Rio Amapá Pequeno e Lago da Enseada Grande: Subsídios à Gestão Hídrica Municipal

Carlos Henrique Medeiros de Abreu¹, Gilvan Portela Oliveira², Alaan Ubaiara Brito³ & Alan Cavalcanti da Cunha⁴

Resumo: Esta pesquisa teve como objetivo realizar o primeiro levantamento batimétrico e análise hidrodinâmica do rio Amapá Pequeno e do lago da Enseada Grande (Município de Amapá – AP). Foram mapeados 7 km do rio em setembro de 2020, com uso de um ADCP RiverSurveyor M9, registrando profundidades de 0,5–5,82 m (média 3,13 m) e vazões de 2,2–320 m³/s em um ciclo de maré semidiurna, cujos picos de enchente são influenciados pela conexão com o rio Flexal e pela dinâmica oceânica. No lago, a batimetria registrou profundidade média de 6 m (com interpolação em trechos vegetados) e simulações de dispersão pontual de poluentes revelaram capacidade de diluição reduzida e pluma persistente após 72 h. Esses resultados subsidiam o planejamento e a segurança hídrica locais, reforçando a urgência de ações preventivas para proteger esse manancial vital ao abastecimento público municipal.

Palavras-Chave: Hidrodinâmica fluvial, Lago de captação, Dispersão de poluentes.

Abstract: This research aimed to carry out the first bathymetric survey and hydrodynamic analysis of the Amapá Pequeno River and the Enseada Grande Lake (Municipality of Amapá – AP). In September 2020, 7 km of the river were mapped using an ADCP RiverSurveyor M9, recording depths ranging from 0.5 to 5.82 meters (average of 3.13 meters) and flow rates from 2.2 to 320 m³/s during a semidiurnal tidal cycle, with flood peaks influenced by the connection with the Flexal River and ocean dynamics. In the lake, bathymetry revealed an average depth of 6 meters (with interpolation in vegetated areas), and point-source pollutant dispersion simulations indicated reduced dilution capacity and a persistent plume after 72 hours. These findings support local water resource planning and safety, reinforcing the urgency of preventive actions to protect this vital source for the municipality's public water supply.

Keywords: River hydrodynamics, Reservoir lake, Pollutant dispersion.

INTRODUÇÃO

Na zona estuarina amazônica, o processo de urbanização desordenado vem afetando negativamente os indicadores de saneamento básico, sendo este um problema persistente com graves reflexos à saúde pública (Araújo et al., 2021). Esse quadro também reflete historicamente a falta de investimentos no setor de saneamento em todo o território nacional. Por exemplo, atualmente apenas cinco capitais brasileiras apresentam índices de atendimento de abastecimento de água superiores a 90%, e somente três capitais tratam mais de 80% do esgoto coletado (BRASIL, 2023; Viegas et al., 2021).

O estado do Amapá é caracterizado por uma extensa rede hidrográfica que integra ambientes fluviais, lacustres e estuarinos de alta relevância socioambiental. Contudo as características de saneamento básico observados a nível nacional, se repetem ou são piores nos seus 16 municípios,

1) Colegiado de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Amapá, Macapá, Amapá, Brasil. carlos.abreu@ueap.edu.br

2) Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá–IEPA, Macapá, Amapá, Brasil. gilvanp36@gmail.com

3) Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá, Brasil. aubrito@unifap.br

4) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá, Brasil. alancunha@unifap.br

apresentando índices sanitários alarmantes quanto ao acesso à rede de esgoto, por exemplo, com apenas 11% de cobertura (BRASIL, 2023; Sousa et al., 2021; Viegas et al., 2021).

Nesse contexto, o município de Amapá-AP apresenta índices críticos de saneamento. De acordo com o SNIS (BRASIL, 2023), a cobertura de esgoto é de apenas 9,03%, sem qualquer tratamento dos efluentes coletados (em geral são lançados *in natura* no Rio Amapá Pequeno). Localizado às margens do rio Amapá Pequeno, com características morfológicas e hidrodinâmicas pouco conhecidas, o município é ainda interligado ao rio Flexal, influenciado pelas marés do rio Amazonas (Figura 1). O abastecimento de água potável provém do Lago da Enseada, o que torna essencial a compreensão do seu comportamento físico e da sua vulnerabilidade à poluição difusa ou pontual (Cunha; Brito, 2022).

Dessa forma, o rio Amapá Pequeno e o lago da Enseada Grande constituem-se elementos estratégicos para a dinâmica e segurança hídrica para o abastecimento urbano do município de Amapá/AP. A ausência de estudos técnicos atualizados sobre esses corpos hídricos limita o planejamento de intervenções (por exemplo a ameaça do processo de salinização pelo Rio Flexal), o monitoramento ambiental e a gestão integrada dos recursos hídricos e saneamento ambiental na região. Portanto, são necessárias ferramentas de pesquisa e simulações numéricas que subsidiem minimamente o planejamento que visem a conservação do manancial, o qual é estratégico e único, de modo a promover o manejo sustentável da bacia hidrográfica (Figura 1).

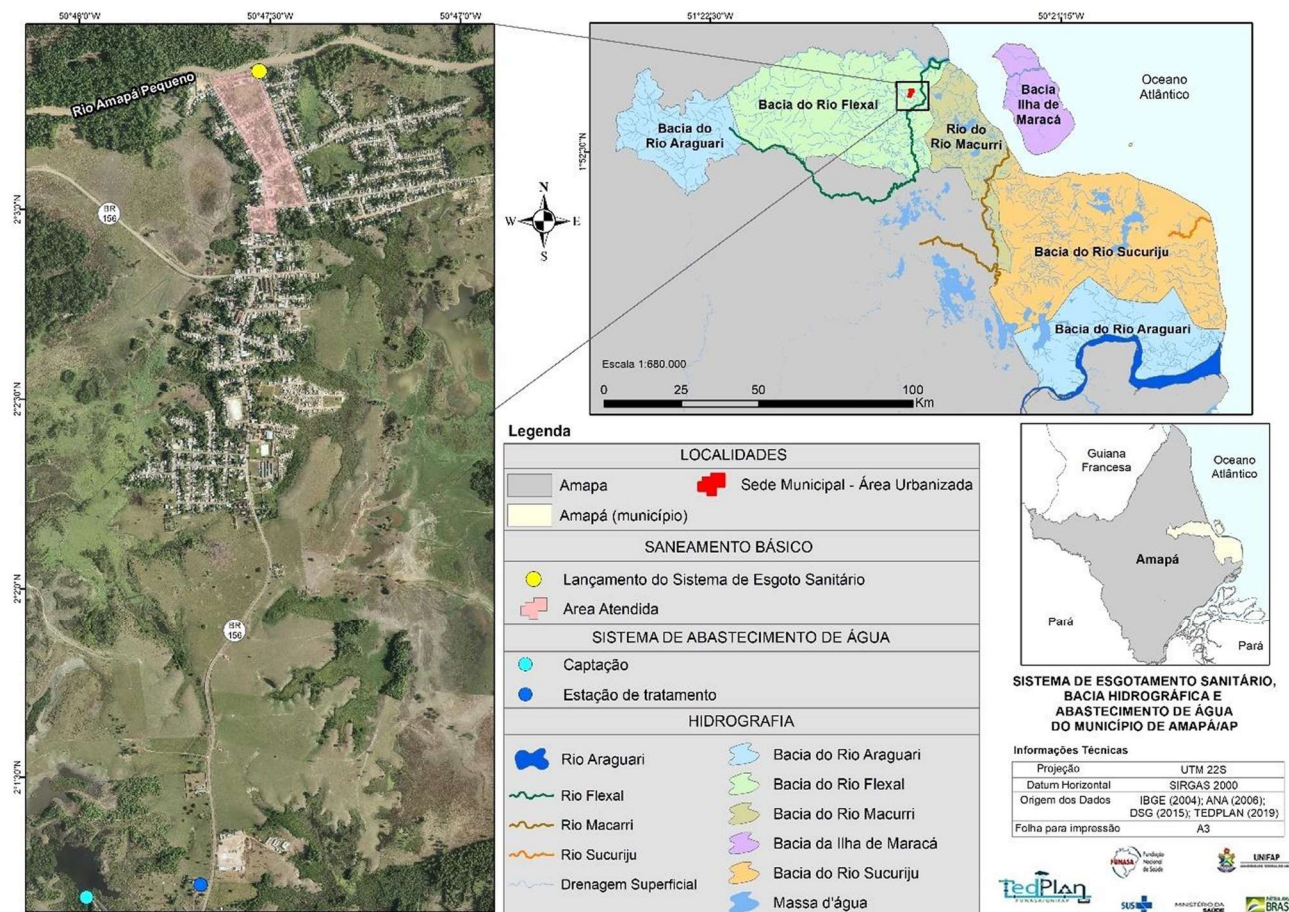
A principal hipótese da pesquisa foi verificar se as plumas de poluentes permaneciam mais do que 24, 48 e 72 no corpo hídrico lacustre em função da baixa precipitação sazonal (setembro) e a influência salobra do Rio Flexal a jusante. Assim, o presente estudo tem como objetivo caracterizar pela primeira vez batimetricamente e hidrodinamicamente o rio Amapá Pequeno e o Lago da Enseada, utilizando tecnologias acústicas (ADCP). Além disso, elaborou-se um cenário numérico de dispersão de plumas de poluentes (coliformes fecais – UFCs nos referidos corpos d'água, representando também uma carga hipotética plausível se incluindo uma vazão de efluente doméstico urbano). A base de análise foi o software SisBaHiA (Rosman, 2018), por meio do qual um modelo dispersivo Lagrangeano foi acoplado ao modelo hidrodinâmico pré-calibrado, simulando a dinâmica de contaminação no lago da Enseada Grande, que abastece a população do município de Amapá/AP.

MÉTODOS

Campanha experimental

O presente levantamento foi conduzido no município de Amapá-AP, abrangendo dois ambientes distintos: o canal principal do rio Amapá Pequeno, com cerca de 7 km de extensão, e o lago da Enseada Grande, que abastece a cidade. Ambos os sistemas apresentam forte influência hídrica sazonal, vegetação marginal densa e conectividade variável com o rio Flexal (Figura 1).

Figura 1: Mapa da área de estudo no Rio Amapá Pequeno e proximidades com o Lago da Enseada no município de Amapá-AP. Observe a bacia do Rio Flexal e adjacentes - Araguari, Macacoari, Sucuriju e Maracá (Insular).



Fonte Cunha; Brito, 2022.

As medições foram realizadas por meio de duas campanhas experimentais em agosto e setembro de 2020 onde foi utilizado o perfilador acústico de corrente River Surveyor M9 da SonTek (ADCP), com transdutores posicionados a 0,5 m da lâmina d'água, acoplado a embarcação leve (voadeira). O sistema foi operado por notebook com software dedicado e GPS integrado, permitindo medições em tempo real de profundidade, vazão e velocidade da corrente (Figuras 2 e 3).

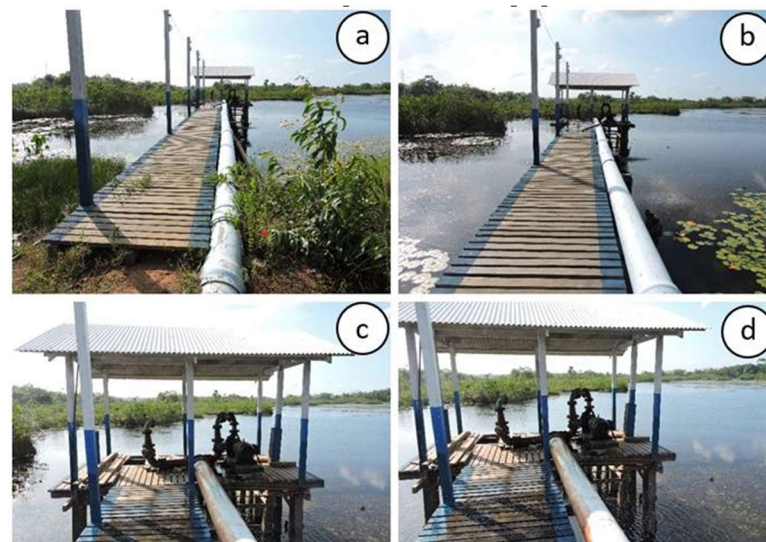
Na primeira etapa (agosto-2020), foram realizadas medições de vazão e levantamento batimétrico no rio Amapá Pequeno (Figura 2a,b). Na seção de referência, com 30 metros de largura, foram realizadas 77 medições de forma a abranger a perfilagem de correntes em todo o ciclo de maré, pois o mesmo está conectado indiretamente e o Rio Amazonas, pelo rio Flexal. Na segunda etapa (setembro-2020), foram feitas medições batimétricas no lago da Enseada Grande, além da observação dos possíveis pontos de lançamento de poluentes.

Figura 2: a) Foto da rede de drenagem superficial da área urbana na sede municipal de Amapá (no destaque o Rio Amapá Pequeno e à sua margem esquerda a orla da cidade; b) Foto do experimento com o ADCP preso com suporte à lateral da embarcação durante a campanha batimétrica.



Fonte: Cunha; Brito, 2022.

Figura 3: Foto da adutora de água bruta (visão em direção ao Lago de Captação e sistema de bombeamento da ETA-AP a frente; a) visão a esquerda do Lago; b) visão à direita do Lago; c) visão aproximada do sistema motobomba de captação e d) visão detalhada do sistema de visão do sistema de bombeamento e proteção do equipamento.



Fonte: Cunha; Brito, 2022.

Simulação de dispersão de poluentes (SisBaHiA) no lago Enseada Grande

As leituras de batimetria do lago da Enseada Grande foram processadas com software SonTek Hydro Surveyor e complementadas com interpolação espacial através do software Surfer (Golden Software-versão 20) para suprir lacunas em áreas com vegetação densa e posteriormente inseridos no modelo. Com base em observações locais, a simulação da pluma de poluente utilizou lançamento de duas fontes pontuais hipotéticas (vazão: $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$; concentração: 10^8) e avaliadas em três intervalos de tempo: 24h, 48h, 72h e em uma estação de monitoramento virtual próxima à estação de captação

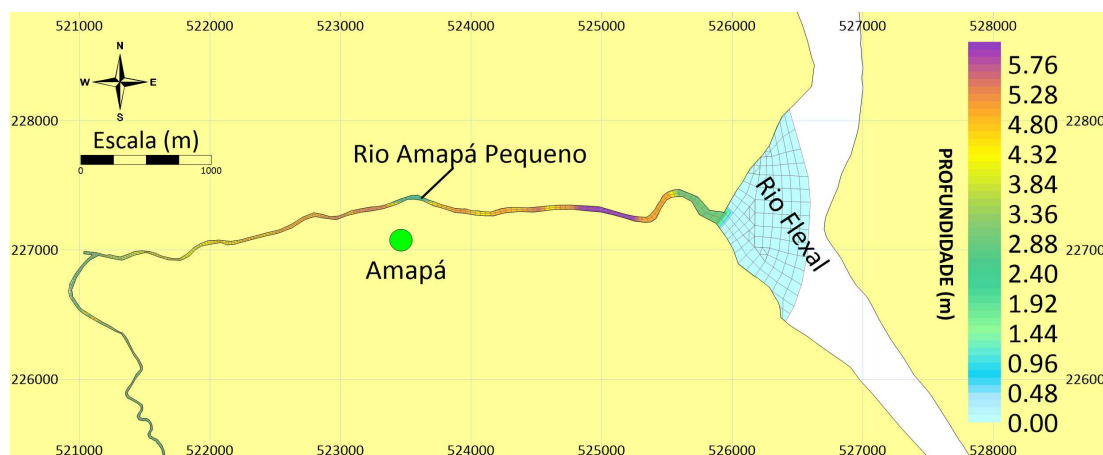
de água do município (Figura 3a,c,d e d). Os padrões de dispersão foram analisados com base no deslocamento e concentração relativa da pluma (Abreu et al.,2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados experimentais: Levantamento batimétrico e medição de vazão do rio Amapá Pequeno

O levantamento batimétrico realizado no rio Amapá Pequeno foi realizado até a sua conexão com o rio Flexal e abrangeu um trecho de aproximadamente 7 km de extensão, percorrendo zonas com diferentes níveis de acessibilidade e cobertura vegetal (Figura 4). Os dados coletados com o ADCP indicaram profundidades variando de 0,5 m a 5,82 m, com média de 3,13 m, evidenciando trechos de remanso, áreas de maior declividade do leito e zonas de fundo irregular. O mapa gerado (Figura 4) a partir desses dados revela a complexidade da morfologia do canal e fornece subsídios fundamentais para compreender o escoamento fluvial, capacidade de autodepuração e a retenção de sedimentos, identificando zonas mais propensas à erosão ou assoreamento em função das características hidrodinâmicas locais.

Figura 4: Batimetria e morfologia do rio Amapá Pequeno



Em determinados setores, não foi possível obter leitura direta do equipamento (raso), o que exigiu o uso de interpolação espacial para preenchimento das lacunas batimétricas. Um dos motivos foi devido ao nível mais baixo do rio Amapá pequeno que, em alguns pontos, não permitiu realizar o procedimento de batimetria de forma segura, sendo necessário aguardar novo ciclo da maré até que o nível da água atingisse o nível ideal (Figura 5). Essa característica mostra a conexão do rio Amapá Pequeno com o Rio Flexal, que é afetado diretamente pelo Rio Amazonas e Atlântico e seu comportamento dinâmico em relação a variação de maré.

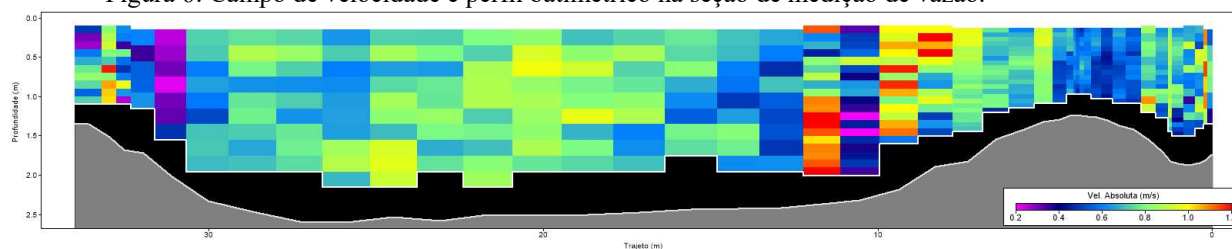
Figura 5: Água no nível mais baixo durante os levantamentos.



Medições de vazão e comportamento hidrodinâmico do rio Amapá Pequeno

As medições de vazão no rio Amapá Pequeno foram realizadas em uma seção de referência com 30 metros de largura (Figura 5), localizada próxima à sede urbana do município. A campanha ocorreu entre os horários de 07h00 e 21h40. Contudo, com observado na Figura 6, foi necessário ser interrompida próximo às 14h, sendo retomada às 19h30. Isso porque o nível do rio ficou abaixo do limite seguro para uso do ADCP. Essa é uma característica da variante do nível do rio, e que pode ter elevações significativas em períodos mais chuvosos (tendência às macro-marés nesta região).

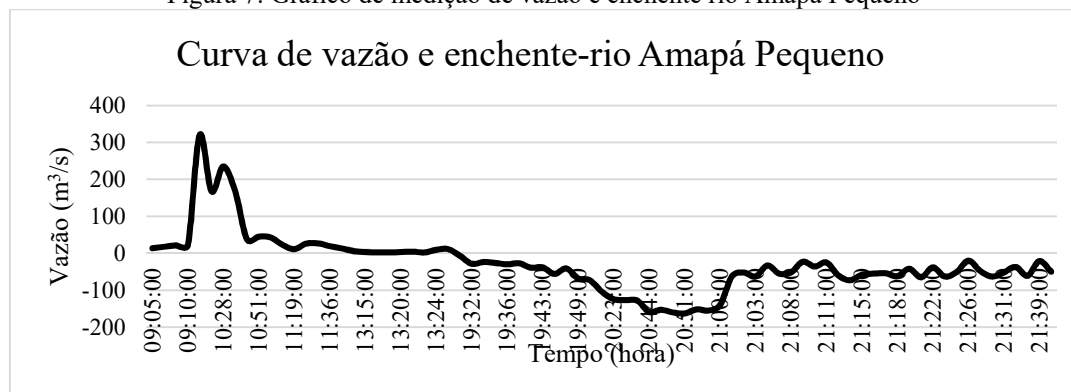
Figura 6: Campo de velocidade e perfil batimétrico na seção de medição de vazão.



Os dados registrados revelaram vazão máxima de 320 m³/s, com média de 48 m³/s ao longo do período observado (período seco ou menos chuvoso) (Sousa e Cunha, 2010). Houve oscilações significativas na descarga líquida, atribuídas à dinâmica de maré-fluvial e provavelmente à complexa geometria do canal. A vazão mínima medida foi de 2,2 m³/s, indicando forte variabilidade ao longo do ciclo hidrológico observado.

A análise do comportamento hidrodinâmico mostrou duas fases distintas de enchente e vazante, com valores negativos de até -160 m³/s durante a reversão do fluxo (enchente). Essa inversão, embora comum no estuário amazônico sob influência de meso e macro-marés, apresentou as seguintes particularidades: a) período prolongado de escoamento quase nulo, possivelmente decorrente de desconexão temporária entre o rio Amapá Pequeno e o rio Flexal, b) potencialização da baixa precipitação do período seco (ou menos chuvoso) (Figura 7). Também é possível observar que entre as 20h e 21h, ocorreu um aumento no valor da enchente indicando o aumento do nível do rio Flexal e consequentemente a “entrada” de água no rio Amapá Pequeno. Contudo, este valor de enchente tende a estabilizar devido a uma menor diferença de níveis entre os dois rios.

Figura 7: Gráfico de medição de vazão e enchente rio Amapá Pequeno

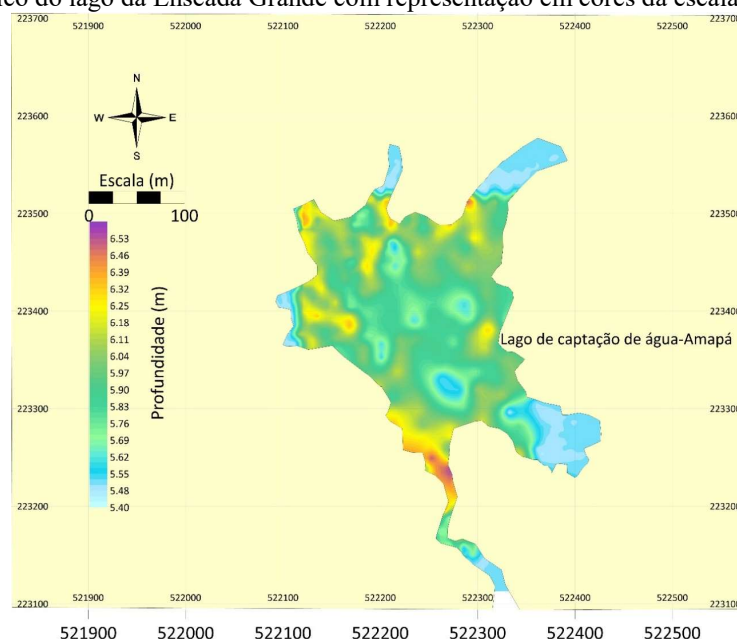


Batimetria do lago da Enseada Grande

O levantamento batimétrico realizado no lago da Enseada Grande — principal ponto de captação de água potável do município do Amapá — revelou uma profundidade média de 6 metros, com variações influenciadas por vegetação submersa e irregularidades no fundo. A coleta de dados com o perfilador acústico ADCP permitiu o mapeamento de grande parte da área alagada, embora algumas regiões apresentassem falhas devido à obstrução por macrófitas aquáticas, exigindo interpolação espacial para preenchimento dos dados faltantes.

A morfologia do lago apresenta formato alongado, com declividade suave nas margens e acúmulo de sedimentos nas áreas mais rasas. Essas características podem influenciar na circulação interna da água e favorecer zonas de retenção de contaminantes — fator especialmente relevante para a segurança da captação (Cunha; Brito, 2022). O mapeamento gerado a partir dos dados batimétricos representa uma importante base técnica para o monitoramento da qualidade da água, o planejamento de ações de desassoreamento e a definição de zonas de proteção sanitária no entorno do reservatório (Figura 8).

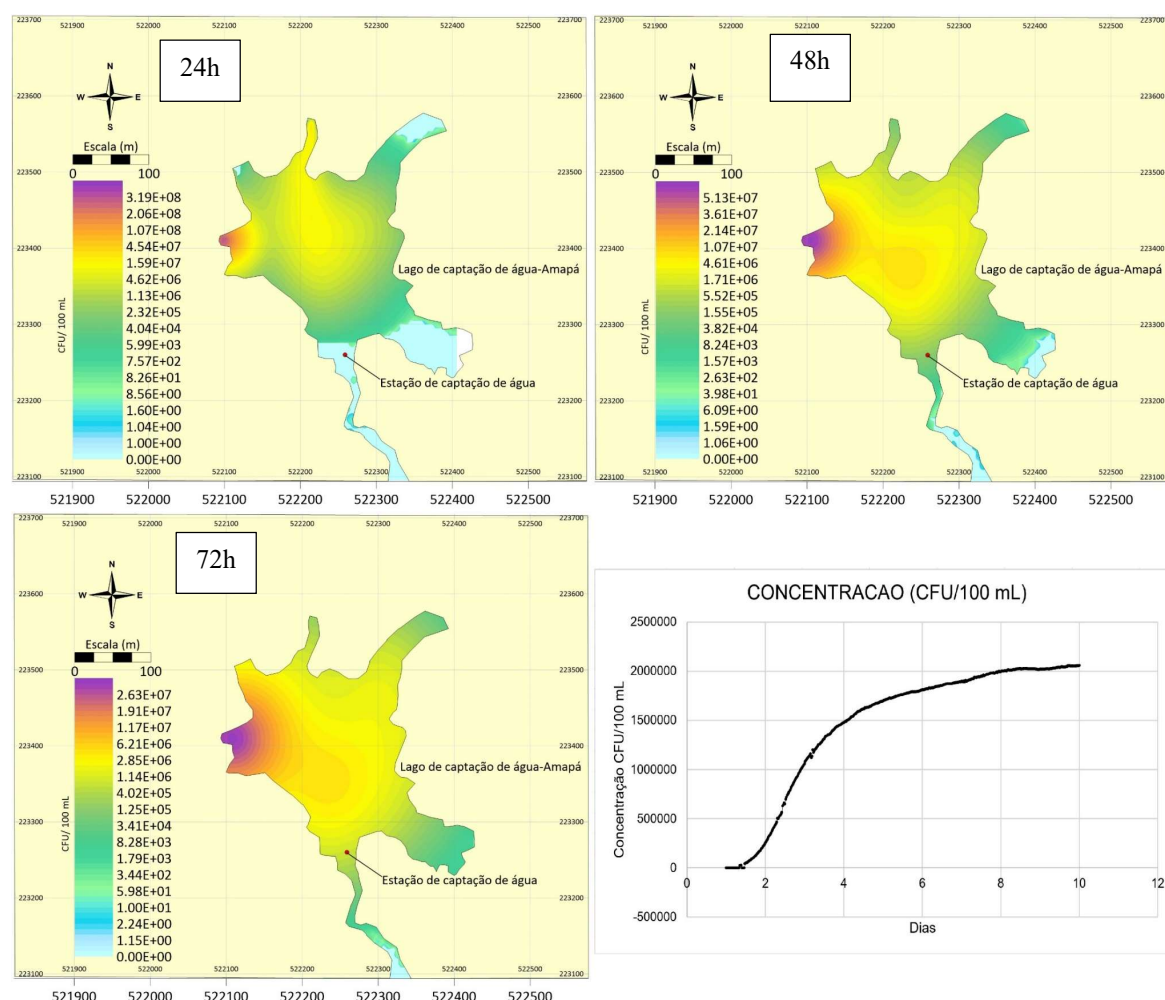
Figura 8: Mapa batimétrico do lago da Enseada Grande com representação em cores da escala de profundidade.



Simulação de dispersão de poluentes no lago

A simulação de dispersão de poluentes no lago da Enseada Grande teve como objetivo avaliar a capacidade de diluição e o comportamento de plumas contaminantes em um ambiente de captação de água (Figura 9 e Figura 3a, b, c e d). Foram inseridas duas fontes pontuais de poluentes (P1 e P2), cada uma com vazão de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e concentração inicial de 10^8 , posicionadas em locais distintos do lago. A análise considerou sete intervalos de tempo após o início do lançamento: 24h, 48h e 72h. Além disso, foi colocada um ponto de monitoramento de variação de concentração de CFU no exato ponto de captação de água do município do Amapá.

Figura 9: Simulações de dispersão de poluentes no lago Enseada Grande nos intervalos de 24, 48 e 72 h. Ao fundo, o gráfico da resposta da evolução da concentração de coliformes totais (CFU) no tempo.



Os resultados indicaram baixa dispersão horizontal e persistência da pluma no lago ao longo do tempo. Mas as áreas de concentração elevada estavam próximas às fontes mesmo após 72 horas. A morfologia do lago, associada à vegetação marginal e à ausência de renovação significativa da água (baixa interação e influência com o rio Amapá Pequeno), pode ter contribuído com a retenção prolongada dos poluentes simulados (CFU). Esse comportamento evidencia a relativa vulnerabilidade do sistema de captação a partir do manancial Lago da Enseada. Por exemplo, frente a possíveis eventos de contaminação pontual ou difusa nas proximidades do manancial (fazenda de gado e zona

periurbana da cidade de Amapá). Além disso, há um potencial agravante, relacionado com períodos de baixa pluviosidade ou fluxo reduzido (incluindo-se as mudanças do clima e problemas com eventos extremos de seca. No presente caso, o experimento ocorreu no período crítico de seca, onde o rio Amapá Pequeno estava com baixo nível de água onde o barco do experimento estava sem condições de navegabilidade durante uma fase da maré (Figura 5).

No ponto de monitoramento é possível observar que, possivelmente, somente a partir de 10 dias, pode correr uma estabilização na concentração do poluente segundo os cenários das simulações (Figura 9). Contudo, apresentando ainda um valor elevado quando se considera um manancial lacustre para a captação de água para população, o qual está circunscrito por bacias sob ameaça de poluição pela agropecuária e pela insegurança hídrica, devido às ameaças de processos de salinização iminente (Figura 1).

CONCLUSÃO

O presente estudo forneceu uma caracterização inédita e detalhada do comportamento hidrodinâmico e morfológico do rio Amapá Pequeno e do lago da Enseada Grande (conhecido como “Poção”), ambos localizados no município de Amapá-AP.

O perfilamento acústico realizado com um ADCP permitiu identificar profundidades médias da ordem de 3,13 m no eixo longitudinal do rio Amapá Pequeno, com padrões de escoamento de enchente e vazante atípicos. Ou seja, em seu curso, as vazões registradas variaram em uma amplitude entre 2,2 m³/s e 320 m³/s no ciclo semidiurno de maré, enquanto a batimetria do lago a ele conectado foi da ordem 6 m em média, porém com relativamente baixa capacidade de autodepuração.

A análise dos dados revelou também a existência de dois picos de escoamento com intensidade significativa e um intervalo de uma possível “desconexão hidrológica” do rio Amapá Pequeno com o rio Flexal. Esse raciocínio sugere uma influência sazonal do ciclo hidrológico e da geomorfologia da batimetria, influenciando a sua conectividade interfluvial.

Por outro lado, no lago da Enseada Grande, as simulações de dispersão de poluentes demonstraram baixa capacidade de diluição e persistência da pluma por até 72 horas, evidenciando a vulnerabilidade do sistema de captação de água frente a fontes pontuais de contaminação.

Os resultados obtidos reforçam a importância do monitoramento contínuo desses corpos hídricos, mas também oferecem subsídios técnicos importantes para o planejamento de ações de saneamento básico e ambiental dos mananciais. Especialmente em relação à proteção do principal manancial de captação da sede municipal do município de Amapá.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi apoiado pelo CNPq: Processo nº 314830/2021-9, Projeto Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) - TEDPLAN (06/2018) /FUNASA.

REFERÊNCIAS

ABREU, Carlos Henrique Medeiros de; ARAÚJO, Elizandra Perez; CUNHA, Helenilza Ferreira Albuquerque; TEIXEIRA, Marcelo; CUNHA, Alan Cavalcanti da. *Domestic sewage dispersion scenarios as a subsidy to the design of urban sewage systems in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil*. PeerJ, [S.l.], v. 12, e16933, 2024. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.16933>.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2022. Brasília: Ministério das Cidades, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/snis>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CUNHA e BRITO (Orgs) 2022: *Diagnóstico Técnico-Participativo (DT)*. In: *Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Amapá– AP: Produto C (342 pag.)*. Projeto Tedplan. Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). https://saneamento.unifap.br/wp-content/uploads/2022/12/DTP-Ap_NICT.pdf

ROSMAN PCC. 2018. *Referência Técnica do SisBaHiA-Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. In: Programa COPPE, Engenharia Oceânica. 1. Rio de Janeiro: Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, 1-426.

VIEGAS, C. J. T.; SILVA, T. S.; CUNHA, H. F. A.; CUNHA, A. C. *Sistema de esgotamento sanitário e casos de diarreia em Macapá-AP'*. Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais, v. 12, p. 304-316, 2021