

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DINÂMICA DA SALINIDADE NO CANAL NORTE DO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS (AMAPÁ) SOB INFLUÊNCIA DA MARÉ E DA DESCARGA FLUVIAL EM REGIME DE BAIXA VAZÃO

Wagner José Pinheiro Costa¹; Marcos Henrique de Abreu Martins² & Admilson Moreira Torres³

Abstract: This study investigates the spatial variability of physicochemical parameters, with a particular focus on salinity, in the fluvio-estuarine stretch of the North Channel of the Amazon River during the 2024 dry season — a period marked by unprecedented global temperature records. Sixteen surface water samples were collected between November 28 and December 2, during a phase of notably reduced river discharge. Parameters analyzed included pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), turbidity, and salinity. The results revealed a pronounced transition from freshwater in the Bay of Macapá to brackish waters in the Bailique Archipelago region, evidencing the progression of saltwater intrusion. Salinity levels reached up to 6.7 PSU, accompanied by elevated EC (up to 12,120 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and TDS (up to 6,030 mg/L). The pH remained slightly alkaline (7.8–8.3), while turbidity varied in response to local sediment dynamics. The primary drivers of coastal salinization in the Bailique area were identified as the combined effects of diminished fluvial discharge and the action of semi-diurnal spring tides, which reached amplitudes of up to 3.8 meters and facilitated the upstream penetration of saline water. The findings underscore the region's high vulnerability to salinization under drought conditions, which are being intensified by climate change. In light of these results, the study highlights the urgent need for continuous environmental monitoring and the development of public policies aimed at enhancing the adaptive capacity of local riparian communities to evolving hydrological regimes.

Resumo: Este estudo investiga a variabilidade espacial de parâmetros físico-químicos, com ênfase especial na salinidade, no trecho flúvio-estuarino do Canal Norte do rio Amazonas durante a estação seca de 2024 — um período marcado por recordes inéditos de temperatura global. Foram coletadas dezesseis amostras de água superficial entre os dias 28 de novembro e 2 de dezembro, durante um período de vazão fluvial notavelmente reduzida. Os parâmetros analisados incluíram pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), turbidez e salinidade. Os resultados revelaram uma transição acentuada de águas doces na Baía de Macapá para águas salobras na região do Arquipélago do Bailique, evidenciando o avanço da intrusão salina. Os níveis de salinidade alcançaram até 6,7 PSU, acompanhados por elevações na CE (até 12.120 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e nos STD (até 6.030 mg/L). O pH manteve-se ligeiramente alcalino (7,8–8,3), enquanto a turbidez variou em resposta à dinâmica sedimentar local. Os principais fatores que impulsionaram a salinização costeira na área do Bailique foram identificados como a combinação entre a redução da descarga fluvial e a ação das marés semidiurnas de sizígia, que atingiram amplitudes de até 3,8 metros e favoreceram a penetração de água salina rio acima. Os resultados ressaltam a alta vulnerabilidade da região à

1) Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA, AP, 68.903-419, Brasil, costa.wjp@gmail.com

2) Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA, AP, 68.903-419, Brasil, marcoshenriquedeabreu@gmail.com

3) Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA, AP, 68.903-419, Brasil, admilson.m.torres@gmail.com

salinização durante eventos de estiagem, agravados pelas mudanças climáticas. Diante desses achados, o estudo destaca a urgência de um monitoramento ambiental contínuo e da formulação de políticas públicas voltadas a fortalecer a capacidade adaptativa das comunidades ribeirinhas locais frente aos regimes hidrológicos em transformação.

Palavras-Chave - Canal Norte do rio Amazonas; Parâmetros Físico-Químicos; Forçantes Naturais

1. INTRODUÇÃO

O ano de 2024 registrou o maior aumento de temperatura global desde 1850, atingindo 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, conforme destacado pelo relatório *Copernicus Global Climate Highlights*. Esse cenário tem impactado diretamente os regimes hidrológicos, especialmente em regiões sensíveis como a Bacia Amazônica, onde eventos extremos de secas e enchentes alteram significativamente a vazão fluvial e a dinâmica estuarina. O rio Amazonas desempenha um papel crucial nesse contexto, contribuindo com aproximadamente 20% da água doce despejada no Oceano Atlântico, com uma vazão média anual de 209.000 m³/s em Óbidos, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020).

A sazonalidade da descarga fluvial é marcante, com picos de 290.000 m³/s durante as cheias em junho e mínimos de 130.000 m³/s na estiagem em novembro. Durante os períodos de seca, a intrusão salina avança significativamente, alcançando até 50 km da costa, enquanto na cheia, a pluma estuarina se estende por cerca de 300 km mar adentro, formando uma zona de baixa salinidade (< 35 PSU) com espessura de 5 a 10 metros (Geyer *et al.*, 1996). O estuário do rio Amazonas é um ambiente dinâmico, onde a interação entre as marés mesomareais (com amplitudes de 2 a 4 metros) e a descarga fluvial molda processos erosivos, deposicionais e de salinização, especialmente no arquipélago do Bailique, no Amapá, onde a intrusão de sal atualmente é um problema ambiental crítico, afetando os ecossistemas e a qualidade da água para as comunidades locais.

A interação entre variáveis climáticas, descarga hídrica e dinâmicas de marés, aliada a ações antrópicas, tem acelerado modificações na foz do rio Amazonas, como as registradas no arquipélago do Bailique. Essa região tem enfrentado crescentes dificuldades de acesso à água doce, impactando social, ambiental e economicamente suas comunidades. Dada à escassez de conhecimento científico sobre este trecho flúvio-estuarino do Canal Norte, este estudo visa analisar a variação espacial de parâmetros físico-químicos das águas superficiais e a influência da descarga fluvial e da maré, em regime de baixa vazão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

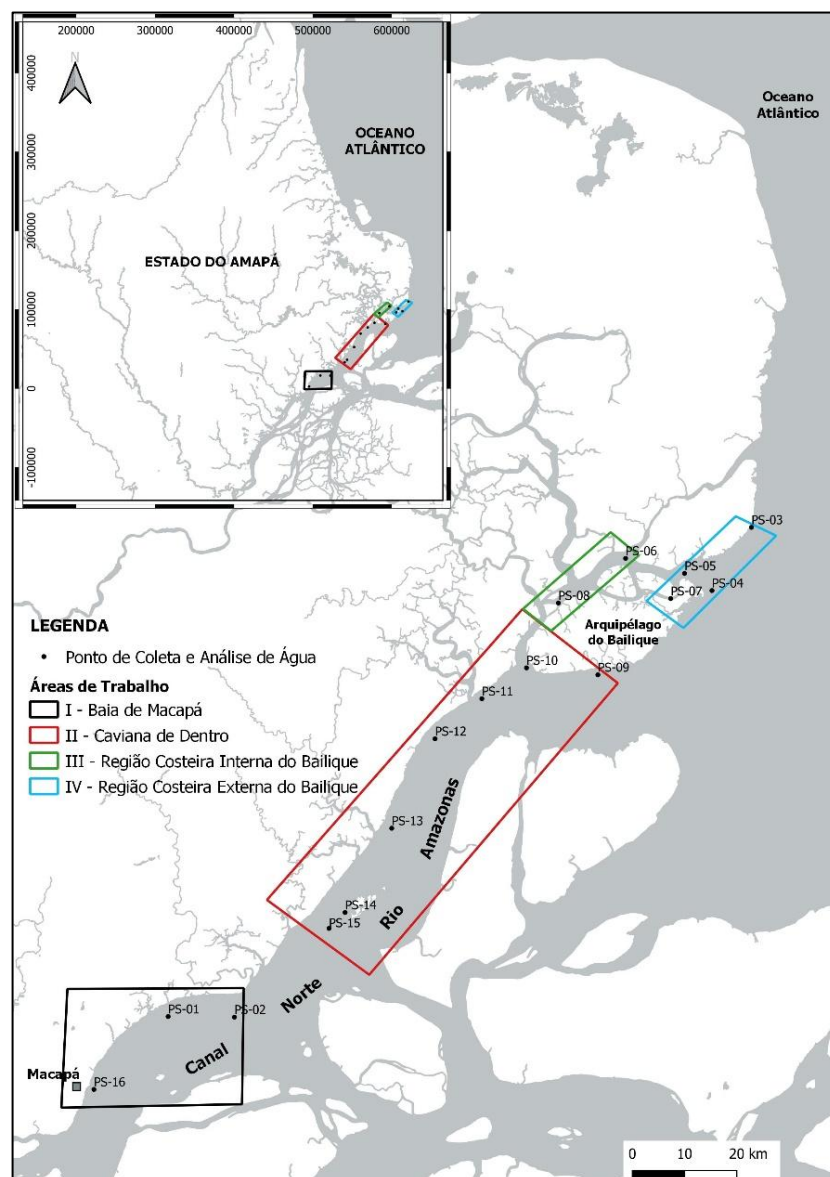
A área de estudo abrange o trecho flúvio-estuarino do Canal Norte do rio Amazonas, estendendo-se da Baía de Macapá até o arquipélago do Bailique (Figura 1).

2.2 Amostragem e Análise de Dados

A campanha de campo ocorreu entre 28 de novembro e 02 de dezembro de 2024, no final da estiagem, quando a vazão do rio Amazonas é reduzida. Foram coletadas 16 amostras de água superficial durante o período de enchente de maré. Os pontos amostrais foram geolocalizados com

GPS e-trex. Os parâmetros medidos em campo incluíram pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) (medidos com Sonda Multiparâmetros Multifunction JQ 006), turbidez (medida com turbidímetro Policontrol AP 2000) e salinidade (medida com refratômetro Vorex VX100 SG).

Figura 1 - Localização dos pontos amostrais de coletas (PS-01 a PS-016) nas áreas de estudo ao longo do estuário do Canal Norte do rio Amazonas: Área I- Baía de Macapá; Área II- Caviana de Dentro; Área III- Região Costeira Interna do Bailique; e Área IV- Região Costeira Externa do Bailique.



A análise do comportamento da descarga líquida do rio Amazonas foi realizada a partir dos dados hidrológicos da Estação de Óbidos (Código da Estação:17050001), disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológicas - Versão WEB pela Agência Nacional de Águas – ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), para série histórica compreendida entre janeiro de 1968 e abril de 2024. A modelagem da dispersão de salinidade foi realizada utilizando polígonos de Voronoi no software QGIS Desktop 3.16.2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variação Espacial dos Parâmetros Físico-Químicos

Os resultados apresentados na Tabela 1 demonstraram uma clara variação espacial nos parâmetros físico-químicos ao longo do Canal Norte do rio Amazonas.

Tabela 1 - Variação dos dados (mínimo e máximo) de pH, Turbidez, STD, CE e Salinidade no trecho flúvio-estuarino do Canal Norte do Rio Amazonas, no período de estiagem (nov/2024). Veja comparação com valores médios para as áreas Beira do Amazonas e Bailique de Guedes *et al.* (2024); rio Amazonas em Óbidos (Sánchez *et al.*, 2015) e o padrão de água doce de classe 2 estabelecido pela resolução CONAMA n° 357/2005.

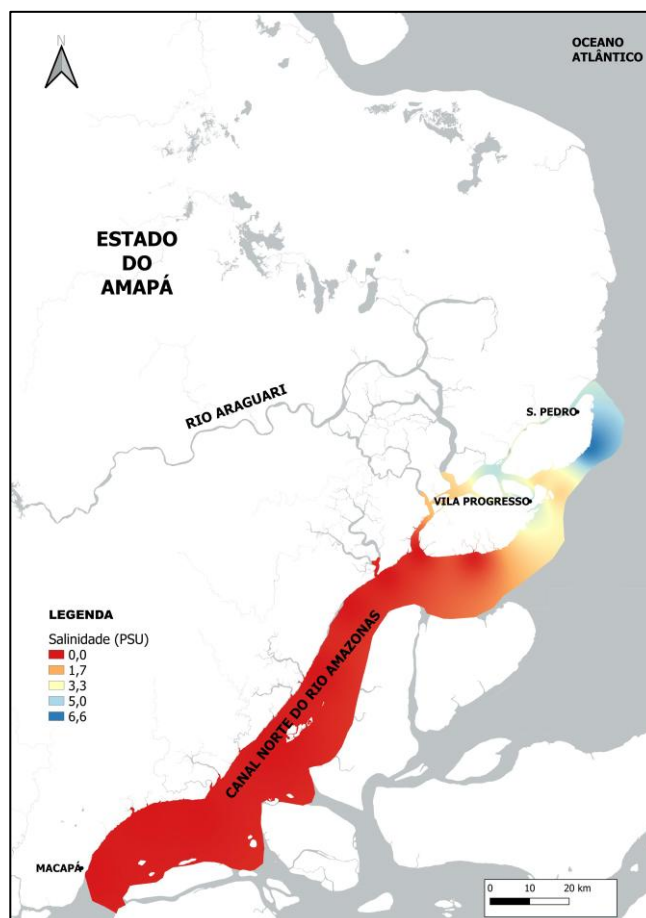
Área	Nome da Localidade	pH	Turbidez (NTU)	STD (mg L ⁻¹)	CE (μS cm ⁻¹)	Salinidade (PSU)
I	Baía de Macapá	7,82-8,33	25,1-38,6	48-53	96-106	0,0
II	Caviana de Dentro	7,92-8,36	33,3-55,5	43-123	86-247	0-0,1
III	Região Costeira Interna do Bailique	7,82-7,98	43,0-82,5	2.189-4.500	4.399-9.045	2,2-4,6
IV	Região Costeira Externa do Bailique	7,46-8,02	31,3-63,6	2.500-6.030	5.033-12.120	2,5-6,7
I + II	Beira do Amazonas (out/2021) *	7,4	7,83	19,5	68,1	0,03
III + IV	Bailique (out/2021) *	8,23	224,33	286	4.386,67	2,33
	Rio Amazonas em Óbidos **	6,9		63 ±11	51 ±13	
	Água Doce de classe 2 (CONAMA, 2005)	6,0 a 9,0	Até 100	< 500		≤0,5

* Guedes *et al.* (2024)

** Sánchez *et al.* (2015)

Como observado na Figura 2, as áreas mais distantes da desembocadura (Baía de Macapá) apresentaram valores de salinidade típicos de água doce (< 0,5 PSU) e baixos valores de sólidos totais dissolvidos (STD) e de condutividade elétrica (CE). Já nas áreas próximas ao arquipélago do Bailique, observou-se uma salinidade média de até 6,7 PSU, caracterizando ambientes oligohalinos e mesohalinos, conforme a classificação de Venice (1959), com elevadas concentrações de STD (até 6.030 mg/L) e CE (até 12.120 μS/cm).

Figura 2 - Distribuição espacial da salinidade no trecho flúvio-estuarino do Canal Norte do rio Amazonas, em período de baixa vazão (estiagem). A legenda de cores indica a salinidade em parte por mil (PSU).



Por meio da Tabela 2, nota-se que apenas os parâmetros STD e CE possuem uma perfeita correlação linear ($= 1$). É possível verificar que entre os parâmetros STD e Salinidade e CE e Salinidade existe uma relação linear positiva muito forte ($\sim 0,999$). Os resultados mostram ainda que existe uma correlação linear positiva fraca entre STD e Turbidez ($\sim 0,206$), CE e Turbidez ($\sim 0,206$) e Salinidade e Turbidez ($\sim 0,181$). Mostram também que existe uma relação linear negativa moderada entre STD e pH ($\sim -0,580$), CE e pH ($\sim -0,580$) e Salinidade e pH ($\sim -0,560$); e uma relação linear negativa fraca entre Turbidez e pH ($\sim -0,222$).

Tabela 2- Matriz de correlação de Pearson para os parâmetros avaliados.

	pH	Turbidez	STD	CE	Salinidade
pH	1				
Turbidez	-0,22253	1			
STD	-0,58035	0,205667	1		
CE	-0,58036	0,205561	1	1	
Salinidade	-0,56007	0,181008	0,998744	0,99874	1

O pH variou de 7,8 a 8,3, caracterizando águas levemente alcalinas. A correlação negativa entre pH e salinidade indica que a variação do pH é menos influenciada pela salinização. Os valores medidos (6,0-9,0) estão dentro da faixa permitida pela Resolução CONAMA 357.

Os valores de turbidez foram relativamente baixos, com máxima de 82,5 NTU, na desembocadura do Canal do Gurijuba (Área III), indicando origem fluvial do material particulado, sugerindo forte relação com processos sedimentares locais, como a ressuspensão de sedimentos pela maré, especialmente na zona de desembocadura. Os valores permaneceram dentro do limite de 100 NTU estabelecido pelo CONAMA 357 para águas doces de Classe 2.

3.2 Influência das Forçantes Naturais (Descarga Fluvial, Maré e Ventos)

A descarga fluvial do rio Amazonas, medida em Óbidos e considerando as contribuições dos rios Tapajós e Xingu, é um fator fundamental no controle da variação espacial de parâmetros físico-químicos das águas superficiais. Os dados apresentados no 50º Boletim de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas - SAH AMAZONAS - indicaram que, durante o período de estiagem de 2024, a estação de Óbidos registrou a menor cota histórica (-121 cm). A partir dos dados do SGB (2024), estimou-se que o volume de água que adentrou o estuário, no período de coleta e análises das águas deste estudo, variou de 75.381 a 77.841 m³/s. Estudos anteriores (Silva, 2009) indicam que, no período de seca, o volume de água no estuário é 58,13% menor que no período chuvoso, e o volume que passa pelo Canal Norte é 61,10% do volume do período chuvoso, demonstrando a redução na capacidade de diluição da salinidade.

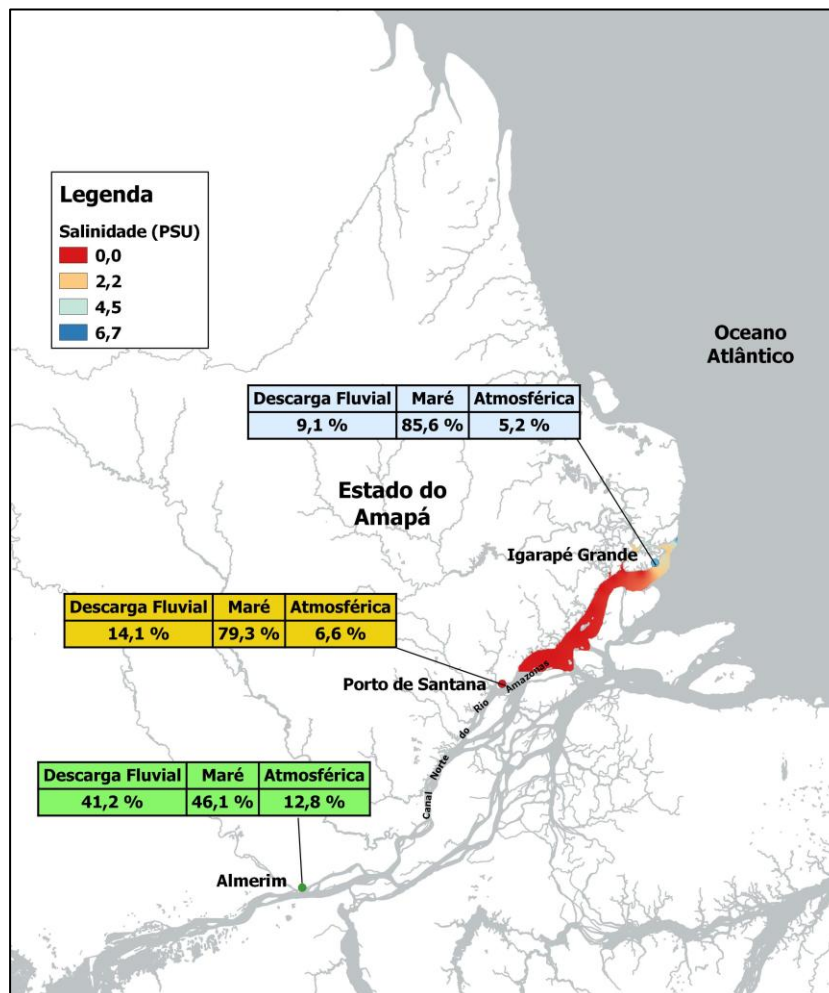
Devido à baixa descarga, a salinização avança cerca de 65 km da foz do rio Amazonas em direção a região costeira do Bailique (vide áreas III e IV na Figura 1). Na Figura 2 é perceptível a tendência crescente de salinidade da Baía de Macapá em direção à foz do rio Amazonas.

A influência da forçante de maré também é crucial. A amplitude da maré no arquipélago do Bailique (Igarapé Grande do Curuá) é 1,6 vezes maior do que aquela medida na baía de Macapá, confirmando a predominância da mesomaré, com características semidiurnas, no trecho flúvio-estuarino do Canal Norte. Durante os dias de coleta, a amplitude de maré variou de 2,4 m (Porto de Santana) a 3,8 m (Igarapé Grande do Curuá, Bailique), indicando a influência das marés de sizígia na intrusão salina. Picos de maré alta são os momentos de máxima influência oceânica, propiciando a salinização.

Fassoni-Andrade *et al.* (2023) mostraram que o limite da influência das marés no rio Amazonas varia com a sazonalidade da vazão, alcançando mais de 800 km rio adentro no período de baixa vazão. Estudos anteriores (Coulet *et al.*, 2025) mostraram que, à medida que se avança em direção à foz, a influência das marés aumenta, enquanto a da descarga fluvial diminui (Figura 3). Na área de estudo, as marés representam até 86% da variação do nível das águas, enquanto a vazão fluvial e os ventos respondem por apenas 9% e 5%, respectivamente.

Coulet *et al.* (2025) mostraram que, em comparação com a área mais interna do Canal Norte (Porto de Santana), a influência atmosférica (ventos fortes) é menos significativa próximo a foz do Amazonas (arquipélago do Bailique).

Figura 3 - Comportamento das forçantes da descarga fluvial, de maré e atmosférica (ventos) na área de estudo, a partir dos dados de COULET *et al.* (2025). Note que, entre Porto de Santana e o Igarapé Grande (arquipélago do Bailique), a salinidade aumentou com o aumento da amplitude das marés.



4. CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou a transição de ambientes límnicos (água doce) nas áreas internas (Baía de Macapá e Caviana de Dentro) para ambientes salobros oligohalinos a mesohalinos nas áreas da foz oceânica (arquipélago do Bailique) no Canal Norte do rio Amazonas, durante o período de baixa vazão.

A intrusão salina é claramente refletida no aumento da condutividade elétrica e dos sólidos totais dissolvidos em direção à foz, parâmetros que apresentaram uma forte correlação positiva com a salinidade. A turbidez, por outro lado, é mais influenciada pela sedimentação do que pelos outros parâmetros físico-químicos.

Todos os parâmetros analisados apresentaram valores dentro dos padrões de qualidade da Resolução CONAMA 357 para águas doces, exceto pelos valores de STD nas áreas da foz, que excederam o limite, indicando a intrusão salina.

Durante condições de maré de sizígia no período de estiagem, o trecho flúvio-estuarino do Canal Norte do rio Amazonas — estendendo-se da Baía de Macapá ao arquipélago do Bailique — apresenta

flutuações destacadas de salinidade, impulsionadas pela redução da descarga fluvial e pela intensificação da influência das forças de maré oceânicas.

O agravamento do acesso à água doce na região e o aumento progressivo da salinidade no Bailique, nos últimos anos, destaca a vulnerabilidade da região às mudanças hidrológicas e climáticas e reforçam a necessidade de políticas de monitoramento contínuo da descarga fluvial, maré e salinização em face das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA pelo apoio logístico concedido para execução do trabalho de campo. Agradecemos aos técnicos do Núcleo de Pesquisas Aquáticas (NUPAQ), José Roberto Santos Pantoja (Chico) e Sérgio Kléber dos Santos pela ajuda no trabalho de campo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2020). *Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 1 maio 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, n.º 53, 18 mar. 2005, pp. 58 - 63.

COULET, P.; DURAND, F.; FASSONI ANDRADE, A.; KHAN, M.J.U.; TESTUT, L.; TOUBLANC, F.; SANTOS, L.G.; MOREIRA, D.M.; AZEVEDO, A. (2025). “*Dynamics of Yearly Maximum Water Levels in the Amazon Estuary*”. *Estuaries and Coasts* 48:54 (2025) <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01483-7>

GEYER, W. R., BEARDSLEY, R. C., LENTZ, S. J., CANDELA, J., LIMEBURNER, R., JOHNS, W. E., ... & SOARES, I. D. (1996). “*Physical oceanography of the Amazon shelf*”. *Continental Shelf Research*, 16(5-6), pp. 575 - 616.

GUEDES, J.N.; BRITO, D.C.; MALCHER, J.A.S; CUNHA, A.C.; SILVA, G.A. (2024). “*Influência sazonal na qualidade da água e salinização na foz do rio Amazonas/AP*”. *Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas*. n.º 16: ISSN: 2177-1642.

SÁNCHEZ, L. S. H., HORBE, A. M. C., MOQUET, J.-S., SONDAG, F., & GUYOT, J.-L. (2015). “*Variação espaço-temporal do material inorgânico dissolvido na bacia Amazônica*”. *Acta Amazônica*, 45(2), pp. 175 - 186. https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext%26pid=S0044-59672015000200175%26lng=en%26tlng=en

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). (2024). “50° *Boletim Hidrológico da Bacia do Amazonas – Sistemas de Alerta Hidrológico (SAH)*”, disponíveis em <https://www.sgb.gov.br/sace/amazonas>. Acesso em: 25 fevereiro 2025.

VENICE SYSTEM (1959). “*The final resolution of the symposium on the classification of brackish waters*”. *Archo Oceanography Limnology*, 11: 243-248.