doi: 10.5123/S2176-6223202501747

Análise de águas recreacionais de praias do município de Soure, no Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Amazônia brasileira*

Analysis of recreational waters from beaches in Soure, Marajó Archipelago, Pará State, Brazilian Amazon

Larissa Conceição da Conceição[1], Sandra da Silva Rogério[1], Thalia Modesto Maria[1], Danielle Rodrigues de Deus[2], Dielle Monteiro Teixeira[3], Edivaldo Costa Sousa Junior[4], Denise Suéllen Amorim de Sousa Santos[5], Amilton Cesar Gomes da Costa[6], Neuton Trindade Vasconcelos Junior[7], Elivam Rodrigues Vale[5], Adaelson Campelo Medeiros[6], Kelson do Carmo Freitas Faial[7], Bruno Santana Carneiro[5], Luana Silva Soares[3], Mônica Cristina de Moraes Silva[8], Jones Anderson Monteiro Siqueira[1,8]

[1] *Universidade da Amazônia, Curso de Bacharelado em Biomedicina, Belém, Pará, Brasil*
[2] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Virologia, Laboratório de Bioinformática, Ananindeua, Pará, Brasil*
[3] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Virologia, Laboratório de Vírus Gastroentéricos, Ananindeua, Pará, Brasil*
[4] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Parasitologia, Laboratório de Epidemiologia em Leishmanioses, Ananindeua, Pará, Brasil*
[5] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Microbiologia Ambiental, Ananindeua, Pará, Brasil*
[6] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Indicadores Físico-Químicos, Ananindeua, Pará, Brasil*
[7] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Saúde Ambiental, Ananindeua, Pará, Brasil*
[8] *Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Virologia, Laboratório de Virologia Ambiental, Ananindeua, Pará, Brasil*

RESUMO

OBJETIVO: Avaliar a qualidade da água de duas praias de Soure, no estado do Pará, Brasil, durante um período de anomalia climática em 2024, com ênfase em análises bacteriológicas, virais, físico-químicas e de metais, considerando a influência das águas oceânicas na zona costeira paraense. MATERIAIS E MÉTODOS: As praias do Pesqueiro e da Barra Velha foram selecionadas por sua relevância turística. As coletas ocorreram em julho e setembro, correspondendo, respectivamente, às temporadas de alta e baixa visitação. As amostras foram submetidas a análises físico-químicas e microbiológicas, à detecção do marcador viral crAssfago e a uma abordagem metagenômica para caracterização da diversidade viral e bacteriana. RESULTADOS: Em julho, ambos os pontos apresentaram níveis de bactérias termotolerantes dentro dos limites legais, enquanto, em setembro, os valores ultrapassaram o permitido. Sulfato e cloreto exibiram concentrações significativamente superiores ao limite de referência (≤ 250,0 mg/L) em todas as amostras coletadas. O oxigênio dissolvido foi mais elevado em julho e extremamente baixo em setembro, período em que também se observou maior turbidez. A análise metagenômica revelou uma ampla variedade microbiana, com predomínio bacteriano. As famílias virais mais prevalentes foram *Kyanoviridae*, *Autographiviridae* e *Straboviridae*. Entre as bactérias, destacaram-se as famílias *Vibrionaceae* e *Paracoccaceae*, predominantes nas praias do Pesqueiro e Barra Velha, respectivamente. CONCLUSÃO: Os resultados evidenciam a influência de fatores sazonais e antrópicos sobre a qualidade da água na região, ressaltando a necessidade de intensificar estudos ambientais na Amazônia, dada sua complexidade ecológica e crescente pressão de grandes empreendimentos.

Palavras-chave: Saúde Ambiental; Microbiologia da Água; Virologia Ambiental; Química da Água.

* O presente estudo é oriundo do Trabalho de Conclusão de Curso de Larissa Conceição da Conceição, Sandra da Silva Rogério e Thalia Modesto Maria, intitulado "*Avaliação dos indicadores de contaminação ambiental em praias do município de Soure, mesorregião do Marajó, Pará*", sob orientação do Prof. Dr. Jones Anderson Monteiro Siqueira, apresentado à Faculdade de Biomedicina da Universidade da Amazônia, em 2024.

Correspondência / Correspondence:
Jones Anderson Monteiro Siqueira
Instituto Evandro Chagas (SVSA/MS), Seção de Virologia
Rodovia BR-316 km 7, s/n. Bairro: Levilândia. CEP: 67030-000 – Ananindeua, Pará, Brasil
E-mail: jonessiqueira@iec.gov.br

ABSTRACT

OBJECTIVE: To evaluate the water quality of two beaches in Soure, Pará State, Brazil, during a climatic anomaly in 2024, focusing on bacteriological, viral, physicochemical, and metal analyses, considering the influence of oceanic waters on the Pará coastal zone. MATERIALS AND METHODS: Pesqueiro and Barra Velha beaches were selected due to their tourism relevance. Sampling was carried out in July and September, corresponding to the high and low tourist seasons, respectively. Samples underwent physicochemical and microbiological analyses, as well as detection of the viral marker crAssphage, and a metagenomic approach to characterize both viral and bacterial diversity. RESULTS: In July, both sites showed thermotolerant bacterial levels within legal limits, while in September, values exceeded the permitted thresholds. Sulfate and chloride concentrations were significantly higher than the reference limit (≤ 250.0 mg/L) in all samples. Dissolved oxygen levels were higher in July and extremely low in September, when turbidity was also greater. Metagenomic analysis revealed a broad microbial diversity, with bacterial dominance. The most prevalent viral families were *Kyanoviridae*, *Autographiviridae*, and *Straboviridae*. Among bacteria, *Vibrionaceae* and *Paracoccaceae* were predominant at Pesqueiro and Barra Velha beaches, respectively. CONCLUSION: The findings demonstrate the influence of seasonal and anthropogenic factors on water quality in the region, highlighting the need to intensify environmental research in the Amazon, given its ecological complexity and increasing pressure from large-scale developments.

Keywords: Environmental Health; Water Microbiology; Environmental Virology; Water Chemistry.

INTRODUÇÃO

A segurança nas praias e a saúde pública dependem cada vez mais de fatores climáticos. O aquecimento das águas, as mudanças nos padrões de precipitação, as secas prolongadas e a elevação do nível do mar modulam a persistência, a mobilização e a proliferação de microrganismos indicadores de contaminação e patogênicos, particularmente bactérias entéricas e vibriões, afetando diretamente a qualidade das águas recreativas. Esses mecanismos têm sido descritos em diversas regiões costeiras ao redor do mundo e estão associados à ampliação dos riscos à saúde decorrentes do aquecimento dos oceanos[1,2].

Na Amazônia, o ano de 2023 foi marcado por seca e calor extremos, com níveis de água excepcionalmente baixos e anomalias térmicas recordes, condições que se mantiveram em 2024. Essa configuração hidrometeorológica altera a vazão dos rios e a salinidade nas zonas estuarinas e costeiras, criando janelas de maior suscetibilidade à contaminação fecal e à presença de patógenos oportunistas em áreas de banho[3,4].

Na costa amazônica do Arquipélago do Marajó, a hidrodinâmica estuarina já evidenciou a intrusão e a descarga salina, moduladas pelas marés dos rios Amazonas e Pará, fenômenos que tendem a se intensificar com a redução da vazão fluvial e a elevação do nível do mar, gerando impactos físicos, químicos e ecológicos em praias e manguezais. Modelagens recentes indicam que pequenas variações no nível médio do mar podem amplificar a intrusão e alterar os gradientes de salinidade no estuário amazônico[5-7].

Esse cenário climático e ambiental é agravado por vulnerabilidades locais. Em Soure, no estado do Pará, a Praia do Pesqueiro situa-se em um ambiente costeiro sensível, com dinâmica morfológica ativa e alta vulnerabilidade à erosão. Além disso, déficits históricos de saneamento aumentam os riscos à balneabilidade durante períodos chuvosos ou de ressacas. Essas vulnerabilidades, combinadas com o aumento do turismo, reforçam a necessidade de gestão e monitoramento contínuos[8-10].

Do ponto de vista da saúde pública, indicadores bacterianos de contaminação fecal são sensíveis às variações ambientais; contudo, não refletem toda a dimensão microbiológica das águas das praias, que podem abrigar outros agentes de risco à saúde da comunidade local. Nesse contexto, a presença de bactérias e vírus entéricos em águas recreativas pode ser avaliada por meio de abordagens complementares, como a biologia molecular e a metagenômica, a fim de aprimorar a compreensão dos ecossistemas aquáticos em cenários de mudanças climáticas[11-13].

Diante da escassez de estudos voltados ao monitoramento ambiental no Arquipélago do Marajó, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água de duas praias de Soure, considerando parâmetros físico-químicos, microbiológicos e de metais, bem como a diversidade viral e bacteriana durante um período de anomalia climática, quando a influência das águas oceânicas foi mais intensa na região costeira do Pará.

MATERIAIS E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Trata-se de um estudo transversal realizado na Reserva Extrativista Marinha de Soure, uma Unidade de Conservação Federal. A pesquisa foi autorizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), sob o número 96950-1.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido no município de Soure (Figura 1), localizado a leste da Ilha do Marajó, no estado do Pará. Considerada a maior cidade do arquipélago marajoara, situa-se à margem esquerda do rio Paracauari, com população de 24.204 habitantes distribuída em uma área de 2.857,349 km^2. O Produto Interno Bruto municipal é de R$ 9.389,68[14], e suas principais atividades econômicas são a pesca, o extrativismo e a pecuária[15].

Fonte: LABGEO/SEEPI/IEC/SVSA/MS.

Figura 1 – Localização do município de Soure, na Ilha do Marajó, estado do Pará, Brasil, demonstrando os pontos de coleta nas praias do Pesqueiro (PT01) e da Barra Velha (PT02), situadas na Área de Conservação Federal Reserva Extrativista Marinha de Soure

O município apresenta desafios estruturais no saneamento, com cerca de 91,29% da população atendida por abastecimento de água, mas sem dados disponíveis sobre esgotamento sanitário no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento[16]. A ausência de rede coletora de esgoto e o uso recorrente de valetas para escoamento pluvial evidenciam a precariedade da infraestrutura sanitária[17]. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal é de 0,62, indicando nível médio de desenvolvimento[18].

O clima local é quente e úmido, classificado como Ami segundo Köppen, com temperatura média anual de 27 °C e precipitação em torno de 3.000 mm, concentrada entre janeiro e junho, especialmente de março a maio. O período mais seco ocorre de julho a dezembro[19,20].

A paisagem costeira é dominada por manguezais, ecossistemas intertidais que atuam como zonas de transição entre os ambientes terrestre e marinho, compostos por espécies como *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinans*, além da ocorrência menos frequente de *Avicennia schaueriana*[21,22]. Nas áreas de transição predominam gramíneas, herbáceas e palmeirais pioneiros, compondo um mosaico ecológico típico das planícies costeiras amazônicas[21,23].

Em relação às atividades turísticas, o município é conhecido por suas praias de grande apelo natural e paisagístico, como Céu, Cajú-Una, Goiabal, Garrote, Pesqueiro e Barra Velha[24]. As praias do Pesqueiro e de Barra Velha, localizadas a 10,3 km e 3,5 km do centro urbano, respectivamente, apresentam paisagens que mudam conforme os ritmos das marés da Baía do Marajó e são formadas por areia fina e pequenas piscinas naturais. Por serem as praias de maior atração turística da região, principalmente durante o verão amazônico[25], foram escolhidas para a presente pesquisa.

COLETA DAS AMOSTRAS

Foram coletadas quatro amostras de água: duas na praia do Pesqueiro (PT01: -0,6619871/-48,4789939 e -0,658858/-48,4812257) e duas na Barra Velha (PT02: -0,719546/-48,490926 e -0,719714/-48,4906954). A primeira coleta foi realizada na última semana de julho de 2024 (PT01: 09h40; PT02: 11h07, dia 28), período de alta temporada, quando comumente se observa intensa atividade de banhistas na localidade. A segunda coleta ocorreu em setembro de 2024 (PT01: 07h45; PT02: 08h35, dia 29), período de baixa atividade turística na região.

De cada praia, foram coletados 6 L de água a 10 m da faixa de areia, a uma profundidade de aproximadamente 30 cm da lâmina d'água, utilizando béquer esterilizado de 250 mL. As amostras foram acondicionadas em frascos esterilizados de 1 L, com tampa rosqueada, e transportadas em caixa isotérmica contendo gelo ralado, a aproximadamente 8 °C. No momento da coleta, a temperatura da água foi verificada antes de seu acondicionamento.

Os dados sobre as condições meteorológicas (temperatura, umidade e pluviosidade) nos dias de coleta foram obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia[26]. As amostras foram submetidas a análises físico-químicas, microbiológicas, de metais e virológicas, bem como à caracterização metagenômica

do microbioma e viroma, incluindo controles negativos (água ultrapura) para monitoramento de contaminação.

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Com sonda multiparamétrica (Hanna®, modelo HI9829), utilizou-se 1 L de água bruta para análise dos seguintes parâmetros gerais da qualidade da água: pH, condutividade elétrica, salinidade e oxigênio dissolvido (OD). A turbidez foi medida com um turbidímetro (Hach Portugal, modelo 2100). Para caracterizar a carga particulada e dissolvida nas amostras, foram analisados os sólidos totais dissolvidos (STD) e os sólidos totais em suspensão (STS). Também foi verificada a alcalinidade relacionada à capacidade tamponante das amostras. O indicador de carga orgânica DQO (demanda química de oxigênio) foi analisado para refletir a matéria orgânica presente nos ecossistemas investigados.

Alguns íons inorgânicos e elementos-traço de importância química e sanitária foram quantificados: cloreto, sulfato, fluoreto e lítio. O fósforo total, considerado um nutriente inorgânico que influencia processos eutrofizantes, também foi medido.

PARÂMETROS DE METAIS

A determinação de metais totais e dissolvidos foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), para os elementos alumínio, bário, cálcio, cobalto, cobre, cromo, ferro, potássio, magnésio, manganês, sódio, níquel e zinco.

PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS

O número mais provável (NMP/100 mL) de coliformes totais, termotolerantes e *Escherichia coli* foi determinado pelo método 9222D[27], utilizando o substrato cromogênico definido (ONPG-MUG) e o *kit* Colillert 18®/Sistema Quanti-Tray® 2000 (IDEXX Laboratories Inc.).

INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS

As análises seguiram os critérios de detecção, precisão, faixas dinâmicas lineares e interferências descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24ª ed.)[27]. Os resultados foram interpretados conforme as Resoluções CONAMA nº 357/2005[28] (classificação dos corpos de água superficiais e padrões para lançamento de efluentes) e nº 274/2000[29] (critérios de balneabilidade).

Para variáveis fora dos limites de referência, aplicou-se o teste de Bartlett para comparação multivariada entre cenários, utilizando o *software* BioEstat 5.0[30]. As seguintes hipóteses foram testadas: H_0 – Os quatro cenários amostrados (Praia do Pesqueiro e Barra Velha, julho e setembro) não diferiram quanto ao perfil multivariado formado pelas condicionantes ambientais analisadas; e H_1 – Ao menos um dos cenários amostrados diferiu quanto ao perfil conjunto das variáveis avaliadas. Foram adotados intervalo de confiança de 95%, erro amostral de 5% e significância estatística para $p < 0,05$.

FLOCULAÇÃO ORGÂNICA PARA ANÁLISE VIRAL

A concentração de partículas virais seguiu o método de floculação orgânica[31], com modificações. Na primeira etapa, 1 L de amostra foi adicionado a um béquer estéril e mantido sob agitação magnética. A amostra foi, então, submetida a um processo de acidificação (pH ≈ 3,5) com solução de ácido clorídrico (HCl), visando à aderência das partículas virais possivelmente dispersas na amostra, e foi adicionada a 20 mL de leite orgânico desnatado e acidificado. Em seguida, a amostra foi mantida sob agitação por 16 h e decantação natural (repouso) por 30 h à temperatura ambiente.

Posteriormente, procedeu-se à centrifugação/eluição, na qual foram retirados 100 mL de sedimento do fundo do béquer com o auxílio de uma pipeta sorológica e depositados em dois tubos Falcon® de 50 mL cada, que foram submetidos à centrifugação a 3.500 × g, por 20 min, para formação de um *pellet*. O sobrenadante foi desprezado, e o *pellet* foi eluído em 4 mL de solução de tampão fosfato (pH 7,5) para desprendimento das partículas virais.

EXTRAÇÃO DE ÁCIDOS NUCLEICOS

A extração foi conduzida na plataforma Maxwell® (Promega®), utilizando *beads* magnéticas contidas no *kit* Maxwell® RSC PureFood GMO and Authentication Kit. O procedimento foi realizado conforme o manual do fabricante, com adaptações. Primeiramente, foram adicionados 40 µL de Proteinase K, 800 µL de tampão CTAB e 400 µL da amostra de água concentrada. Após vigorosa agitação dos componentes, os microtubos foram levados ao banho-maria a 65 °C por 30 min, visando à ativação das enzimas e à digestão celular e do capsídeo viral.

Após a incubação, o material lisado foi centrifugado a 16.000 × g para separar o produto sólido do líquido clarificado. Este último foi transferido (1.000 µL) para cartuchos compatíveis com a plataforma de extração automatizada MX3031 e misturado com 300 µL do tampão de lise. Por fim, iniciou-se o processo de purificação do ácido nucleico por meio de lavagens sucessivas. O DNA purificado foi eluído em 100 µL de tampão de eluição e estocado a -30 °C até a aplicação das técnicas diagnósticas de biologia molecular para detecção viral.

PCR EM TEMPO REAL

Esta técnica de amplificação foi conduzida com o objetivo de detectar o genoma do bacteriófago crAssfago, apontado como um indicador viral de contaminação fecal interessante em ambientes aquáticos contaminados.

O material genético extraído das quatro amostras coletadas neste estudo foi adicionado a uma mistura (*mix*) de reagentes (DNA [5,0 µL] + Mix [15,0 µL]), conforme recomendado pelo *kit* comercial Go Taq probe RTqPCR Master Mix (Promega®), de acordo com os seguintes volumes e concentrações: água ultra-pura (3 µL), Go Taq probe qPCR Master Mix (10 µL [2X]), *primers* 056F1-*cross*/056R1-*cross* (0,5 µL [20 pmol],

cada), sonda 056P1-*cross* (FAM-MGB) (1,0 µL [10 pmol])[32], e GoScript RT Mix (0,5 µL [5 u/µL]).

Após o preparo da *mix*, as amostras foram submetidas à plataforma QuantStudio 5 (Applied Biosystems®) para a condução da termociclagem, iniciando-se com a ativação da enzima a 95 °C por 2 min, seguida de 40 ciclos de amplificação a 95 °C por 15 s (desnaturação) e 60 °C (anelamento/extensão) por 1 min.

ANÁLISE METAGENÔMICA

O ácido nucleico total, extraído das amostras de água previamente concentradas por floculação orgânica, foi agrupado em dois *pools*, um para cada praia, contendo as coletas de julho e setembro. Em seguida, foram utilizados na síntese da primeira fita de cDNA, por meio do *kit* SuperScript™ VILO™ cDNA Synthesis (Invitrogen®). A segunda fita de cDNA foi então sintetizada com o *kit* Second Strand cDNA Synthesis (Invitrogen®). As bibliotecas genômicas foram construídas com os *kits* Ion Xpress™ Plus Fragment Library (ThermoFisher Scientific®) e Ion Xpress™ Barcode Adapters 1-96 (Thermo Fisher Scientific®), e sua qualidade foi avaliada por meio do Qubit™ dsDNA HS (ThermoFisher Scientific®) e do Sistema de Eletroforese Automatizado 2100 Bioanalyzer (Agilent®).

Posteriormente, as bibliotecas foram quantificadas utilizando o *kit* Ion Library Quantitation TaqMan™ (ThermoFisher Scientific®), diluídas até atingir uma concentração de 100 pmol e agrupadas em *pools*, os quais foram então diluídos para uma concentração final de 30 pmol antes do processo de enriquecimento e carregamento do *chip* no sistema Ion Chef, seguido do sequenciamento na plataforma Ion GeneStudio S5 (ThermoFisher Scientific®).

ANÁLISE DE BIOINFORMÁTICA

Os dados gerados foram inicialmente processados pelo Torrent Suite Software (Thermo Fisher Scientific®), responsável pelo *base calling*, filtragem de qualidade e multiplexação das leituras por *barcode*.

O *software* fastp v0.20.1, um pré-processador FASTQ[33], foi utilizado para a remoção de adaptadores e filtragem das leituras de baixa qualidade. A montagem das sequências foi realizada por *de novo*, utilizando o *software* MEGAHIT v1.2.9[34]. A classificação taxonômica foi conduzida em duas etapas com o *software* Kraken 2[35]. A triagem inicial para os vírus utilizou a base de dados pré-construída K2_viral e *cross-check* com PlusPFP-16, ambos disponíveis em https://benlangmead.github.io/aws-indexes/k2.

Os resultados gerados foram visualizados com a ferramenta interativa Krona Tools[36], e os gráficos foram gerados utilizando a função *ggplot2* do ambiente R[37]. Para as análises de bioinformática, todos os *softwares* foram empregados com seus parâmetros padrão. Os números de acesso para as leituras brutas estão disponíveis no *Sequence Read Archive* (SRA) do National Center for Biotechnology Information (NCBI): *Bioproject* (PRJNA1308617), *Biosample* (SAMN50705897 e SAMN50705898) e SRA (SRR35054419 e SRR35054418) para as praias do Pesqueiro (*Pool* 5) e Barra Velha (*Pool* 6).

RESULTADOS

Em todos os pontos coletados, nos meses de julho e setembro, as condições meteorológicas apresentaram céu predominantemente ensolarado, com temperaturas entre 27 °C e 29 °C e ausência de pluviosidade. A umidade relativa do ar variou de 76% a 82%, com percentuais mais elevados em julho (alta temporada) (79% e 82%) do que em setembro (baixa temporada) (76% em ambas as praias).

Quanto à dinâmica das marés, na praia do Pesqueiro, a coleta de julho ocorreu durante a vazante (baixa-mar) e a de setembro durante a enchente (preamar). Na praia da Barra Velha, ambas as coletas foram realizadas durante a maré alta.

De acordo com os dados físico-químicos (Tabela 1), o pH variou de 7,5 a 7,91, caracterizando águas alcalinas e dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (6,5 a 8,5) para águas salobras de Classe 1. A condutividade elétrica variou de 17.490 a 25.420 µS/cm e os sólidos totais dissolvidos, de 8.748 a 12.720 mg/L.

Os valores de OD oscilaram entre 0,95 e 4,81 mg/L, abaixo do valor mínimo estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 (≥ 5 mg/L), sendo mais elevados em julho. A turbidez apresentou valores superiores em setembro (7,37 e 9,57 UNT) em comparação com julho (0,38 e 0,82 UNT). Embora a legislação vigente não estabeleça limite específico para turbidez, o art. 21 (das condições da qualidade d'água) recomenda que esse parâmetro esteja virtualmente ausente.

Os sólidos totais em suspensão variaram de 13 a 25 mg/L, enquanto os níveis de alcalinidade estiveram entre 52 e 70 mg/L. A DQO foi determinada apenas em julho de 2024, com valores entre 3 e 26 mg/L. Em setembro, os valores ficaram abaixo do limite de quantificação do método (1,60 mg/L).

As concentrações de cloreto e sulfato foram elevadas, com variações de 4.935,89 a 7.373,84 mg/L e de 688,62 a 1.051,68 mg/L, respectivamente, embora tais íons não sejam exigidos para águas salobras de Classe 1, que preveem apenas a análise de sulfetos (como ácido sulfídrico não dissolvido) e cloro residual total (combinado ou livre), não investigados nesta pesquisa.

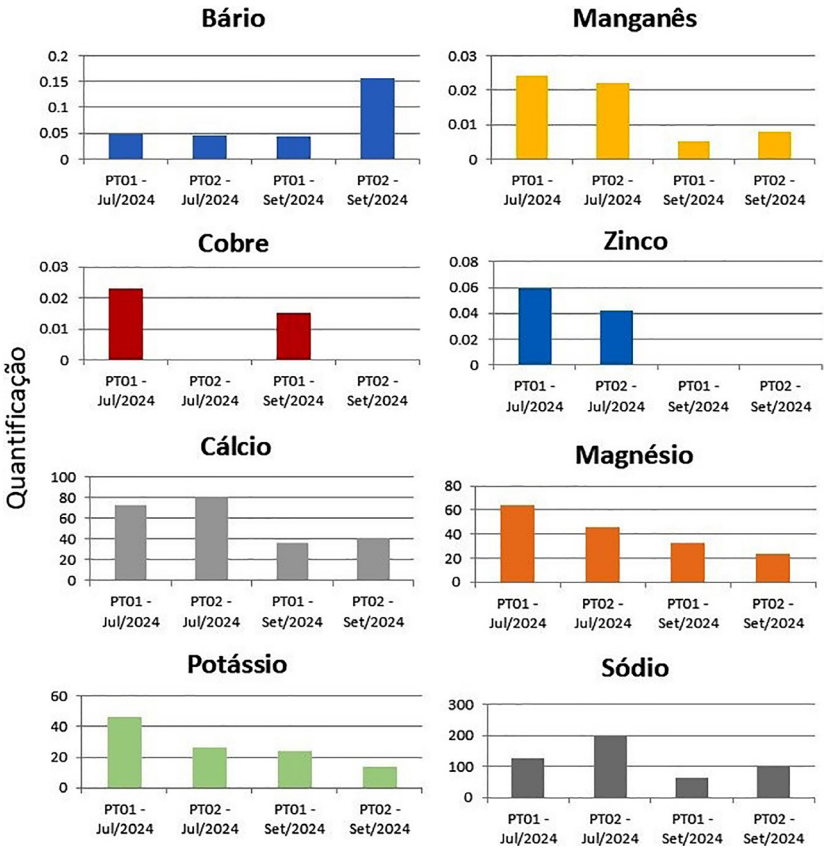
Os níveis de fósforo total permaneceram dentro dos padrões legais (Resolução CONAMA nº 357/2005), com valores de 0,02 mg/L em ambas as praias em julho de 2024 e, em setembro, abaixo do limite de quantificação do método (0,0057 mg/L).

As análises de metais indicaram conformidade com os valores máximos permitidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Alumínio, cromo, ferro e níquel não foram detectados, permanecendo abaixo dos limites de 0,1 mg/L, 0,05 mg/L, 0,3 mg/L e 0,025 mg/L, respectivamente. O cobalto, embora não previsto na resolução, foi analisado e não detectado. Os elementos quantificados estão apresentados na figura 2.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos observados em amostras de água coletadas nas praias do Pesqueiro e da Barra Velha, no município de Soure, Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Brasil, nos meses de julho e setembro de 2024

Parâmetros	Unidades	Coleta de julho/2024		Coleta de setembro/2024		Valores de referência
		Praia do Pesqueiro	Praia da Barra Velha	Praia do Pesqueiro	Praia da Barra Velha	
pH	–	7,91	7,67	7,53	7,5	6,5 a 8,5
Condutividade elétrica	µS/cm	25.420,00	20.870,00	19.280,00	17.490,00	NA
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	12.720,00	10.440,00	9.642,00	8.748,00	NA
Oxigênio dissolvido	mg/L	4,81	4,63	0,95	1,02	≥ 5,0
Salinidade	PSU	15,54	12,53	11,5	10,34	0,5 a 30
Turbidez	UNT	0,82	0,38	9,57	7,37	NA
STS	mg/L	25	15	16	13	NA
Alcalinidade	mg/L	70	56	52	57	NA
DQO	mg/L	26	3	< LQ	< LQ	NA
Cloreto	mg/L	5.218,13	4.935,89	7.373,84	6.731,57	NA
Sulfato	mg/L	714,78	688,62	1051,68	952,32	NA
Fósforo total	mg/L	0,02	0,02	< LQ	< LQ	≤ 0,124

µS/cm: Microsiemens por centímetro; mg/L: Miligramas por litro; PSU: Unidade prática de salinidade; UNT: Unidade nefelométrica de turbidez; NA (não se aplica): Quando não há previsão de análise do parâmetro aplicado a amostras de água salobra de Classe 1 (Resolução CONAMA nº 357/2005); STS: Sólidos totais em suspensão; DQO: Demanda química de oxigênio; < LQ = Abaixo do limite de quantificação (limiar de detecção para DQO = < 3 mg/L e fósforo = < 0,01 mg/L).



Bário, cobalto, cálcio, magnésio, potássio e sódio não estão previstos na Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salobras de Classe 1. Os demais metais (alumínio, cobre, cromo, ferro, manganês, níquel e zinco) são regulamentados pela legislação vigente.

Figura 2 – Concentração de metais observada em amostras de água coletadas nas praias do Pesqueiro e da Barra Velha, no município de Soure, Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Brasil, nos meses de julho e setembro de 2024

Tabela 2 – Indicadores microbiológicos observados em amostras de água coletadas nas praias do Pesqueiro e da Barra Velha, no município de Soure, Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Brasil, nos meses de julho e setembro de 2024

Parâmetros	Coleta de julho/2024		Coleta de setembro/2024		Valor de referência*
	Praia do Pesqueiro	Praia da Barra Velha	Praia do Pesqueiro	Praia da Barra Velha	
Coliforme total	2419,6	2419,6	> 2419,6	> 2419,6	NA
Coliforme termotolerante	26,9	45,7	6867	2755	≤ 2.500
E. coli	60,2	25,9	50	44,7	≤ 2.000

* Os valores máximos permitidos para coliformes termotolerantes em águas salobras de Classe 1, destinadas à recreação de contato primário, conforme a Resolução CONAMA nº 274/2000, são de 2.500 coliformes termotolerantes por 100 mL de amostra, considerando o valor da última amostragem. A *E. coli* pode ser determinada em substituição ao parâmetro "coliforme termotolerante" na proporção de 2.000/100 mL. Os coliformes totais não são descritos nessa resolução. Valores apresentados em NMP/100 mL (número mais provável por 100 mL de amostra). Método estatístico utilizado para quantificar microrganismos viáveis em amostras líquidas, com base na probabilidade de encontrar células bacterianas em diferentes diluições. NA: Não se aplica (quando não há previsão de análise do parâmetro conforme a legislação vigente adotada).

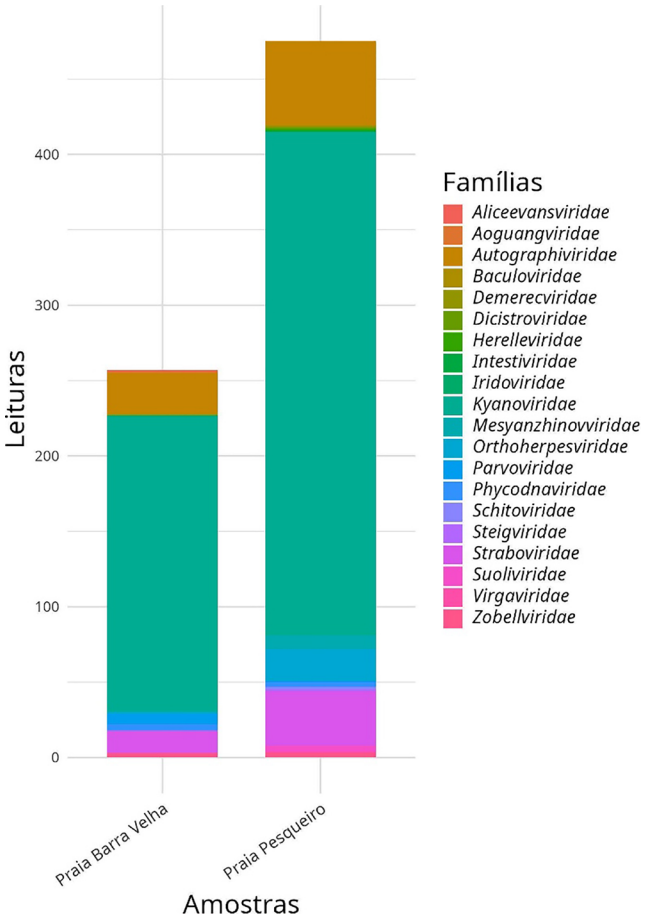


Figura 3 – Classificação das famílias virais identificadas por análise metagenômica em amostras de água coletadas nas praias do Pesqueiro e da Barra Velha, no município de Soure, Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Brasil, nos meses de julho e setembro de 2024

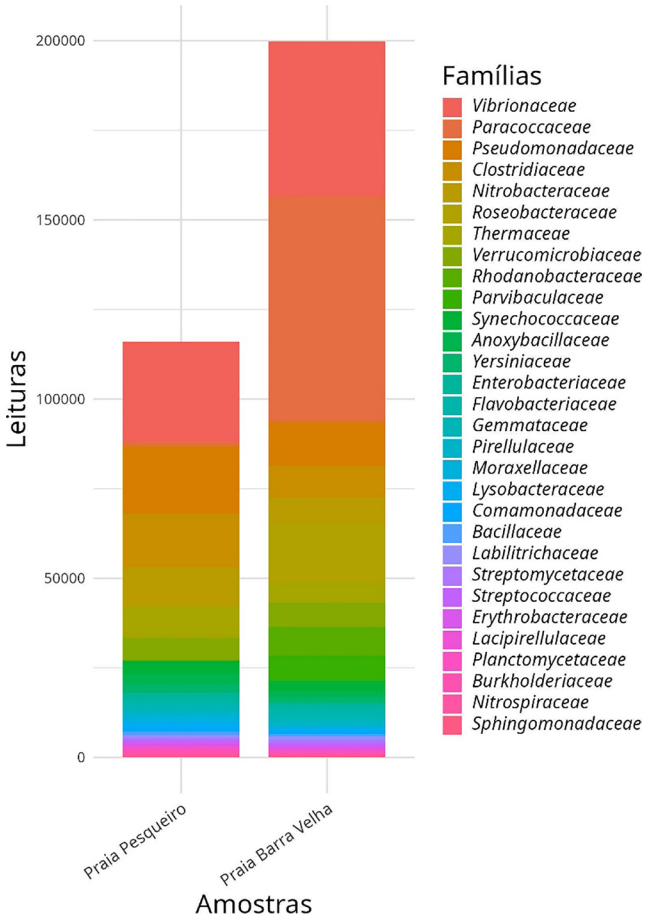


Figura 4 – Classificação das famílias bacterianas identificadas por análise metagenômica em amostras de água coletadas nas praias do Pesqueiro e da Barra Velha, no município de Soure, Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Brasil, nos meses de julho e setembro de 2024

Os níveis de coliformes totais foram menores em setembro do que em julho, embora não haja valores de referência estabelecidos para esse grupo bacteriano. Os coliformes termotolerantes atenderam aos padrões microbiológicos em julho, mas excederam os limites em ambas as praias em setembro. Em todos os pontos de coleta, os níveis de *E. coli* permaneceram dentro dos limites estabelecidos na Resolução CONAMA nº 274/2000, que define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras (Tabela 2).

Foi aplicado o teste de Bartlett às variáveis OD, turbidez, cloreto, sulfato e coliformes termotolerantes, que apresentaram divergências em relação ao perfil das variáveis avaliadas em pelo menos um dos

quatro cenários de coleta. Os resultados obtidos (Phi = 18,3348; p = 0,0004) indicaram significância estatística (p < 0,05).

A análise do indicador viral de contaminação fecal humana não evidenciou a presença do bacteriófago crAssfago nas praias analisadas em ambos os períodos de coleta. Contudo, a abordagem metagenômica detectou a presença de 475 *reads* representativas de 16 famílias virais na praia do Pesqueiro, sendo oito exclusivas desse ambiente. Na praia da Barra Velha, foram observadas 257 *reads*, representando 12 famílias virais, três delas exclusivas desse ecossistema. Em ambas as praias, as famílias virais mais prevalentes foram *Kyanoviridae* (70,3% e 75,9%), *Autographiviridae* (11,8% e 10,5%) e *Straboviridae* (7,6% e 5,8%) (Figura 3).

Na análise bacteriana, foi observada maior diversidade de famílias em ambos os ecossistemas. Na praia do Pesqueiro, foram detectadas 512 famílias (135.036 *reads*), sendo 44 observadas apenas nesse local, das quais as mais prevalentes foram *Vibrionaceae* (20,6%), *Pseudomonadaceae* (14,1%) e *Clostridiaceae* (10,9%). Na praia da Barra Velha, foram identificadas 535 famílias bacterianas (217.899 *reads*), 27 delas exclusivas desse ambiente, com predominância de *Paracoccaceae* (28,8%), *Vibrionaceae* (19,8%) e *Roseobacteraceae* (7,6%) (Figura 4).

Os dados de sequenciamento apresentaram número total de 2.844,231 e 3.833,020 pares de leitura, percentual de leituras descartadas inferior a 1% (0,696568863 e 0,747612828), comprimento médio de leitura de 192,1 pb e 186,3 pb, valores de N50 de 468 e 482, tamanho máximo de *contigs* de 12,329 e 11,143 e volume total de dados gerados de 1.1 Gb e 1.5 Gb para as praias do Pesqueiro e Barra Velha, respectivamente.

DISCUSSÃO

O monitoramento das condições ambientais em praias é importante para a preservação de ecossistemas costeiros, pois influencia diretamente a qualidade de vida das populações humanas e a saúde dos oceanos. No Brasil, devido à vasta extensão costeira e à diversidade de ecossistemas, os esforços nesse monitoramento enfrentam desafios complexos que combinam fatores naturais e antrópicos[38]. Além de proporcionar lazer, as praias são vitais para algumas funções ecológicas, como a regulação climática e a contribuição à alimentação humana. Em contraponto, são altamente suscetíveis a impactos ambientais, incluindo contaminação por efluentes, mudanças climáticas e atividades econômicas inadequadas[39].

A balneabilidade de corpos hídricos, definida como a capacidade de sustentar atividades recreativas seguras, é um indicador fundamental da qualidade ambiental das praias. Essa qualidade, no entanto, é frequentemente comprometida por ações humanas, como o despejo inadequado de efluentes domésticos e industriais, que elevam a concentração de microrganismos patogênicos e de poluentes químicos, afetando negativamente os ecossistemas aquáticos e a saúde pública[40].

A balneabilidade é influenciada por uma variedade de parâmetros ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar e pluviosidade. Temperaturas elevadas favorecem a proliferação de microrganismos, enquanto a umidade facilita a dispersão de partículas contaminantes, e a pluviosidade intensifica o transporte de poluentes de áreas urbanas e rurais para os corpos d'água[41,42].

Indicadores microbiológicos são amplamente empregados para avaliar a qualidade da água em praias, sendo os coliformes termotolerantes e a *E. coli* os mais utilizados para detectar contaminação fecal. Esses microrganismos são eficazes por estarem associados às fezes humanas e animais, permitindo inferir a presença de patógenos que podem causar doenças[43].

Neste estudo, os níveis de coliformes termotolerantes mantiveram-se dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 274/2000 no mês de julho. No entanto, em setembro, houve um aumento significativo, ultrapassando os limites recomendados, mesmo com a redução no fluxo de banhistas. Esse comportamento anômalo não pode ser explicado pelo aumento da pluviosidade, que intensificaria o escoamento de poluentes, já que não houve registro de chuva no período da coleta. Ainda assim, há possibilidade de que o escoamento de base, proveniente do lençol freático, de drenos ou de marés, tenha percolado e descarregado efluentes domésticos (fossas ou ligações irregulares) até igarapés e o estuário, alcançando a zona de banho durante a maré alta.

Embora o lançamento clandestino de esgoto seja plausível, não foram evidenciados indícios diretos dessa prática em campo, o que foi corroborado pela completa ausência de detecção de crAssfago. Contudo, deve-se considerar a variação temporal e de matriz das amostras, bem como os efeitos de diluição e do limite de detecção, que podem mascarar a presença de contaminação fecal humana.

É possível que a proximidade de manguezais, ecossistemas naturalmente ricos em matéria orgânica e microrganismos, tenha influenciado as taxas observadas, uma vez que aves, caranguejos e demais fauna típica desses ambientes contribuem para o aumento de coliformes, o que pode inflar as contagens de termotolerantes sem necessariamente elevar os níveis de *E. coli*[44].

O pico de coliformes termotolerantes acima do limite, enquanto *E. coli* permaneceu dentro do padrão, indica pulsos de contaminação fecal que a métrica adotada na pesquisa pode não ter captado integralmente, especialmente em águas salobras, onde enterococos seriam o indicador preferencial. Níveis elevados de indicadores fecais aumentam a probabilidade de doenças gastrointestinais e de infecções de pele ou de ouvido em banhistas, sobretudo quando coincidem com a ressuspensão de

sedimentos, como evidenciado pela maior turbidez em setembro. A explicação mais provável para a carga fecal observada é a ressuspensão causada pela maré e pelas ondulações, que liberam bactérias indicadoras de contaminação fecal retidas na areia, nos sedimentos e no material orgânico dos manguezais adjacentes. Isso explicaria o aumento das contagens mesmo na ausência de chuva e com menor fluxo de banhistas.

Embora os indicadores microbiológicos sejam amplamente utilizados, há uma demanda crescente por análises mais abrangentes que incluam parâmetros virais. O crAssfago é um bacteriófago específico para a contaminação fecal humana e representa um indicador promissor por sua resistência a condições adversas e alta especificidade. Apesar de não ter sido detectado nas amostras deste estudo, sua incorporação em legislações futuras pode aprimorar significativamente as estratégias de monitoramento e controle da poluição em águas costeiras[45,46].

A análise metagenômica apontou a família viral *Kyanoviridae* (anteriormente denominada *Myoviridae*)[47] como a mais abundante em ambas as praias. Vírus desse táxon possuem papel relevante no metabolismo do piruvato e na aquisição de energia por cianobactérias no meio ambiente, favorecendo o aumento dessas populações, sobretudo em ecossistemas de água doce com profundidades inferiores a 5 m em relação ao nível do mar[48,49,50]. Essa família já foi amplamente registrada em águas costeiras da Coreia do Sul e da Europa[51,52,53,54]. No Brasil, um estudo com amostras de água do mar, plâncton e bivalves em regiões costeiras da Baixada Santista, do Canal de São Sebastião e de Ubatuba identificou colífagos, incluindo representantes de *Myoviridae*, por meio de microscopia eletrônica e análises morfológicas clássicas[55].

No contexto amazônico-marajoara, este é o primeiro registro da abundância dessa família de bacteriófagos em águas recreacionais, constituindo informação inédita para comparações futuras e formulação de hipóteses sobre a estrutura e a dinâmica microbiana costeira sob diferentes regimes hidrodinâmicos e climáticos. O achado amplia o conhecimento sobre a microbiota costeira amazônica, onde a avaliação sanitária se apoia majoritariamente em indicadores bacterianos tradicionais, e reforça o valor de incorporar abordagens virais e metagenômicas aos protocolos de monitoramento ambiental[12].

Quanto à prevalência de famílias bacterianas, duas foram mais evidentes. Na paria do Pesqueiro, a família *Vibrionaceae* foi a principal, conhecida por sua relevância no equilíbrio dos ecossistemas marinhos e na recirculação do carbono orgânico. Seu principal gênero, o *Vibrio*, compreende um grupo de bactérias Gram-negativas móveis (devido à presença de um flagelo polar), anaeróbias facultativas e quimiorganotróficas, com alta capacidade de modificar sua composição genômica, principalmente em resposta a variações ambientais, sendo a maioria não patogênica para humanos[56]. Ainda que alguns tipos possam causar gastroenterite, infecções de ouvido ou feridas associadas à ingestão de frutos do mar ou ao contato com água contaminada[57], são necessários estudos adicionais para avaliar a presença de cepas patogênicas específicas do gênero *Vibrio* e possíveis riscos à saúde pública nas praias analisadas.

Na praia da Barra Velha, a família bacteriana mais comum foi a *Paracoccaceae*, comum em hábitats marinhos, mas também encontrada em solos e sedimentos. É um grupo de bactérias Gram-negativas com ampla diversidade metabólica, genotípica e fenotípica, o que lhes confere elevada adaptabilidade a condições ambientais extremas de temperatura, salinidade e pH[58,59]. O gênero *Paracoccus* abrange mais de 80 espécies com potencial para biorremediação de águas residuais, devido à capacidade de degradar contaminantes ambientais relevantes, como o Lindano ($[C_6H_6Cl_6]$), um biocumulativo de alta toxicidade aguda e crônica, muito utilizado na agricultura intensiva; e a Deltametrina ($[C_{22}H_{19}Br_2NO_3]$), um inseticida popular no Brasil e amplamente utilizado no mundo[60].

Embora a identificação de famílias *Kyanoviridae*, *Vibrionaceae* e *Paracoccaceae* seja ecologicamente informativa para a zona costeira amazônica, inferências em nível de espécie não são justificadas neste conjunto de dados, pois não foram recuperados genomas montados a partir de metagenomas (MAGs) com respaldo suficiente para tal resolução. Dessa forma, as interpretações aqui apresentadas são restritas ao nível taxonômico mais conservador, o de família, evitando-se associações indevidas entre funções ou patogenicidades e espécies específicas, na ausência de evidência genômica robusta.

A ausência de vírus patogênicos e de metais tóxicos em níveis detectáveis é um aspecto positivo dos resultados obtidos. No entanto, a detecção de metais como cálcio, magnésio, manganês e zinco em concentrações elevadas (ainda que dentro do preconizado na legislação) durante a alta temporada evidencia a influência do turismo e de outras atividades antrópicas sobre a qualidade da água[61]. Além disso, a elevação da turbidez em setembro compromete a penetração de luz e pode afetar negativamente a fotossíntese de algas e outros organismos aquáticos, impactando toda a cadeia trófica[62].

Na Resolução CONAMA nº 274/2000, a balneabilidade é definida exclusivamente por meio de indicadores microbiológicos; portanto, valores elevados de turbidez, isoladamente, não tornam a água "imprópria" para recreação. Embora não seja um critério legal, a turbidez é um traçador útil de ressuspensão e de partículas capazes de carregar e proteger microrganismos, sendo uma variável preditiva frequente em modelos de qualidade das águas recreacionais[63,64].

Neste estudo, na ausência de chuva e sob maré alta nas duas coletas de setembro, o aumento da turbidez indica o predomínio de forçantes hidrodinâmicas: maré (oscilações do nível do mar

causadas pela gravidade), ondulação (propagação de energia na superfície ocasionada pelos ventos) e/ou ressuspensão (levantamento de sedimentos do fundo do corpo d'água), em vez de escoamento superficial (quando a água da chuva escorre na superfície levando sedimentos para o corpo d'água), conforme relatado anteriormente em estuários amazônicos[65].

Na região, macromarés geram "máximos de turbidez" e ciclos de suspensão e deposição; assim, os níveis observados não comprometem a classificação das praias, mas ajudam a explicar as oscilações microbiológicas, especialmente na estação seca, em decorrência da ressuspensão induzida pela maré[66].

Os parâmetros inorgânicos, como cloretos e sulfatos, também são importantes na avaliação da qualidade da água. Em ambientes de água doce, concentrações elevadas desses íons podem indicar contaminação por efluentes domésticos ou industriais[67]. Já em áreas costeiras e águas salobras, tais valores refletem predominantemente características naturais, como a salinidade, o que se aplica aos resultados deste estudo. A severa estiagem observada na Região Amazônica em 2024 pode ter influenciado essas taxas devido ao maior fluxo de água do mar que invadiu a região do Marajó, especialmente em Soure, onde as amostras foram coletadas.

Essa hipótese é reforçada pelos valores de condutividade elétrica, variável que funciona como *proxy* de salinidade. Os achados deste estudo indicam mistura estuarina com forte influência marinha, corroborada pelos altos níveis de cloretos e sulfatos, muito superiores aos observados em águas doces e coerentes com diluição de água do mar. Na costa marajoara-amazônica, a intrusão salina e os gradientes de salinidade aumentam sob maré alta e baixa descarga fluvial (condições secas), alterando a condutividade elétrica e a concentração de íons maiores ao longo do ciclo de maré, como já demonstrado em canais do estuário amazônico e na Baía do Amazonas[65,68].

Os resultados estatísticos referentes a OD, turbidez, cloreto, sulfato e coliformes termotolerantes indicaram diferença multivariada significativa entre as quatro amostras, confirmando variações ambientais entre as praias e os meses. Essa diferença é compatível com os menores valores de OD e maior turbidez observados em setembro, indicando ressuspensão do corpo d'água e possível maior estresse oxidativo, além do pico de coliformes termotolerantes no mesmo mês. Variações de cloreto e sulfato também se mostraram coerentes com diferentes influências marítimas e tidais entre as praias avaliadas.

Em conjunto, a análise de Bartlett sustenta que as condições de maior risco sanitário ocorreram sob menor OD, maior turbidez e elevação dos indicadores fecais, sobretudo durante maré alta e ondulação intensa, conforme observado em setembro. Ressalta-se, entretanto, que o teste foi aplicado apenas às variáveis em desacordo com a legislação, conforme o critério técnico adotado neste estudo. Tal seleção direciona a análise e pode superestimar a significância observada, constituindo um viés de seleção amostral. Somado ao pequeno tamanho da amostra, esse fator limita inferências mais robustas sobre causalidade, devendo as conclusões serem tratadas como evidências de heterogeneidade das condições ambientais entre os momentos de coleta.

As observações indicam que o aquecimento das águas e a elevação do nível do mar intensificam, na zona costeira amazônica, a ocorrência de secas e a ação das marés, resultando em intrusão salina mais frequente, maior persistência da zona de máxima turbidez estuarina, aumento da condutividade elétrica e das concentrações de íons maiores, redução do OD e maior tempo de residência da água, isto é, permanência prolongada da massa d'água no trecho estuarino por redução do escoamento fluvial e circulação dominada por marés[3,4,6,7].

Águas mais quentes elevam a adequação ambiental para a proliferação de bactérias do gênero *Vibrio* e de outros microrganismos oportunistas, ampliando o risco sanitário quando esses fatores coincidem com pulsos de bactérias indicadoras de contaminação fecal mobilizadas da areia e do sedimento sob condições de maré e ondulação intensas, o que é coerente com as tendências associadas ao aquecimento global e à elevação do nível do mar[1].

Metais como bário e cobre, detectados em diferentes locais e períodos, sugerem a combinação de fatores geológicos e antropogênicos. A erosão de rochas locais e a influência de atividades humanas, como a navegação marítima, podem explicar esses padrões. No caso do cobre, sua detecção exclusiva na praia do Pesqueiro pode estar associada à morfologia local e ao transporte de sedimentos durante os ciclos de maré[69,21].

Embora os resultados deste estudo permitam a reflexão sobre a qualidade ambiental das praias avaliadas, há limitações a serem consideradas. O número reduzido de locais analisados e o curto período do monitoramento restringem a generalização dos resultados. Além disso, a exclusão de alguns parâmetros, como análises mais abrangentes (vírus gastroentéricos e oncogênicos) e a investigação de poluentes emergentes (fármacos, produtos de higiene pessoal e de limpeza doméstica, cosméticos, pesticidas, herbicidas e micro/nanoplásticos), limita a abrangência das conclusões.

Para aprimorar as avaliações futuras, recomenda-se ampliar o escopo de monitoramento, incluindo mais praias e períodos de análise mais longos, além de expandir o painel microbiológico, incorporando indicadores mais avançados, como enterococos, outros vírus e poluentes químicos complexos. A adoção do *checklist* MIxS-Water (GSC) (https://github.com/EnvironmentOntology/envo.wiki.git), com parâmetros como profundidade, salinidade e temperatura da água, pode maximizar a reprodutibilidade e a integração dos dados com bases internacionais.

Recomenda-se, ainda, a realização de inspeções sanitárias locais, com mapeamento de fossas, drenagens e possíveis pontos de lançamento clandestino de esgoto, bem como a inclusão de amostras de sedimentos e areia e amostragens em diferentes ciclos de maré (baixa e preamar). O registro de vento e ondulação permitiria distinguir pulsos de ressuspensão de descargas contínuas, sobretudo em águas turvas, aumentando a robustez das análises e gerando dados mais completos sobre a saúde ambiental do ecossistema, especialmente considerando sua configuração como reserva ambiental federal.

A incorporação de MAGs e a consequente resolução em nível de espécie poderão diferenciar táxons ambientais potencialmente patogênicos (como os da família *Vibrionaceae*), refinando a avaliação de riscos à saúde pública e apoiando protocolos de monitoramento que integrem marcadores microbianos.

A Amazônia, uma das regiões mais biodiversas do mundo, ainda apresenta lacunas significativas de conhecimento sobre contaminação hídrica. Um levantamento recente identificou apenas 179 estudos acadêmicos focados na qualidade da água na região, indicando a necessidade urgente de mais pesquisas científicas para subsidiar políticas públicas e estratégias de conservação[70].

A preservação das praias e de seus ecossistemas associados depende de esforços coordenados entre governo, organizações não governamentais e comunidades locais. Investimentos em infraestrutura de saneamento básico, monitoramento ambiental contínuo e educação pública são fundamentais para garantir a sustentabilidade desses recursos.

CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou uma análise preliminar da qualidade da água das praias do Pesqueiro e da Barra Velha do município de Soure, Ilha do Marajó, estado do Pará, considerando aspectos microbiológicos, virais, físico-químicos e de metais. Os resultados indicaram conformidade com os parâmetros de *E. coli* e com os indicadores virais de contaminação fecal humana, evidenciando boas condições gerais de balneabilidade nas áreas avaliadas.

Entretanto, foram observados desafios pontuais, como o aumento de coliformes termotolerantes no mês de baixa temporada e a elevação das concentrações de cloretos e sulfatos, possivelmente influenciados por fatores naturais e/ou antrópicos, como a seca na Amazônia, decorrente das mudanças climáticas globais.

A análise metagenômica revelou um amplo espectro de famílias virais e bacterianas em ambas as praias, refletindo a elevada variabilidade microbiológica e viral que compõe os ecossistemas aquáticos do arquipélago marajoara.

Este estudo contribui para o avanço da literatura científica ao incorporar análises detalhadas em uma região historicamente carente de dados microbiológicos e virais, fornecendo subsídios para o aprimoramento de políticas ambientais e estratégias de monitoramento na Amazônia costeira.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio técnico e científico fornecido pelas Seções de Virologia e de Meio Ambiente do Instituto Evandro Chagas (IEC) para a realização deste estudo. À Universidade da Amazônia, na pessoa da coordenadora Selly Lira, do Curso de Bacharelado em Biomedicina, pelo incentivo pedagógico concedido às discentes de graduação durante sua gestão. Ao ICMBio, pela autorização para a realização das análises microbiológicas dentro da área de conservação federal envolvida nesta pesquisa. Ao Laboratório de Geoprocessamento da Seção de Epidemiologia do IEC, pela elaboração do produto cartográfico apresentado neste artigo. Agradecimentos especiais aos editores e revisores deste trabalho, que muito contribuíram com suas recomendações para o aprimoramento do manuscrito.

APOIO FINANCEIRO

Este estudo foi financiado pelo IEC, Ministério da Saúde do Brasil. Os autores JAMS, DRD, DSASS e NTVJ receberam bolsa de pesquisa financiada pela Fundação de Apoio à Fiocruz (Fiotec/Fiocruz), projeto DIREX-003-FIO-24.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

LCC, SSR e TMM realizaram a coleta de campo, participaram das análises laboratoriais, interpretaram os dados e redigiram a versão original do manuscrito. DMT realizou as análises metagenômicas. DRD e ECSJ conduziram as análises de bioinformática. DSASS e ERV executaram as análises microbiológicas. ACGC e ACM realizaram as análises físico-químicas. NTVJ e KCFF conduziram as análises de metais. BSC supervisionou as análises realizadas na Seção de Meio Ambiente, e LSS supervisionou as análises na Seção de Virologia. MCMS participou da administração do projeto geral. JAMS participou da administração do plano de trabalho, das análises laboratoriais, interpretou os dados e escreveu/revisou a versão original do manuscrito.

REFERÊNCIAS

1 Baker-Austin C, Oliver JD, Alam M, Ali A, Waldor MK, Qadri F, et al. *Vibrio* spp. infections. Nat Rev Dis Primers. 2018 Jul;4(1):8.

2 Brandão J, Weiskerger C, Valério E, Pitkänen T, Meriläinen P, Avolio L, et al. Climate change impacts on microbiota in beach sand and water: looking ahead. Int J Environ Res Public Health. 2022 Jan;19(3):1444.

3 Espinoza JC, Jimenez JC, Marengo JA, Schöngart J, Ronchail J, Lavado-Casimiro W, et al. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. Sci Rep. 2024 Apr;14(1):8107.

4 Marengo JA, Cunha AP, Espinoza JC, Fu R, Schöngart J, Jimenez JC, et al. The drought of Amazonia in 2023–2024. Am J Clim Change. 2024;13(3):567-97.

5 Rosário RP, Bezerra MO, Vinzón SB. Dynamics of the saline front in the northern channel of the Amazon River – influence of fluvial flow and tidal range (Brazil). J Coast Res. 2009;56:1414-8.

6 Freitas PTA, Silveira OFM, Asp NE. Tide distortion and attenuation in an Amazonian tidal river. Braz J Oceanogr. 2012 Dec;60(4):429-46.

7 Crizanto JLP, Abreu CHM, Souza EB, Cunha AC. Modeling the impacts of sea level rise scenarios on the Amazon River estuary. Hydrology. 2024 Jun;11(6):86.

8 Pereira LCC, Pessoa RMC, Sousa-Felix RC, Dias ABB, Silva BRP, Costa RM. How sustainable are recreational practices on Brazilian Amazon beaches? J Outdoor Recreat Tour. 2024 Mar;45(3):100741.

9 Pereira RLMC, Mösso C, Pereira LCC. Assessment of vulnerability to erosion in Amazonian beaches. Geographies. 2025;5(3):29.

10 Menezes MOB, Macedo SRP, Corrêa SC, Farage ER. Efeitos da expansão urbana nas ilhas do baixo estuário do Amazonas: o caso de Soure, Arquipélago do Marajó. Rev Gest Costeira Integr. 2009 Jun;9(2):113-26.

11 Wade TJ, Sams E, Brenner KP, Haugland R, Chern E, Beach M, et al. Rapidly measured indicators of recreational water quality and swimming-associated illness at marine beaches: a prospective cohort study. Environ Health. 2010 Oct;9:66.

12 Bibby K, Crank K, Greaves J, Li X, Wu Z, Hamza IA, et al. Metagenomics and the development of viral water quality tools. NPJ Clean Water. 2019 Dec;2(1):9.

13 Girardi V, Demoliner M, Gularte JS, Spilki FR. 'Don't put your head under water': enteric viruses in Brazilian recreational waters. New Microbes New Infect. 2019 May;29:100519.

14 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro 2022: panorama [Internet]. Rio de Janeiro: IBGE; 2022 [citado 2024 nov 6]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html

15 Assis DMS, Tavares-Martins ACC, Beltrão NES, Sarmento PSM. Percepção ambiental em comunidades tradicionais: um estudo na Reserva Extrativista Marinha de Soure, Pará, Brasil. Ambient Soc. 2020;23:e01481.

16 Instituto Água e Saneamento. Municípios e saneamento: Soure (PA) [Internet]. 202? [2024 nov 6]. Disponível em: https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/pa/soure.

17 Menezes MOB, Macedo SRP, Corrêa SC, Farage ER. Efeitos da expansão urbana nas ilhas do baixo estuário do Amazonas: o caso de Soure, Arquipélago do Marajó. Rev Gest Costeira Integr. 2009 jul;9(2):113-26.

18 Infosanbas. Indicadores de saneamento e desenvolvimento: Soure – PA [Internet]. 202? [2024 nov 6]. Disponível em: https://infosanbas.org.br/municipio/soure-pa/.

19 Azevedo GCP, Camarão AP, Mesquita TC. Características dos sistemas de produção pecuários dos municípios de Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari, Ilha de Marajó – Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental; 2000. (Documentos, 53).

20 Lima AMM, Oliveira LL, Fontinhas RL, Lima RJS. Ilha do Marajó: revisão histórica, hidroclimatologia, bacias hidrográficas e propostas de gestão. Holos Environment. 2005 jun;5(1):65-80.

21 Vitelli AC. Geomorfologia costeira e morfologia praial de litoral influenciado por mesomaré (margem leste da Ilha do Marajó-PA) [trabalho de conclusão de curso]. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia; 2019.

22 Fernandes MEB, organizador. Os manguezais da costa norte brasileira. Vol. III. Bragança: Laboratório de Ecologia de Manguezal; 2016.

23 Rollnic M, Costa MS, Borba TAC, Carneiro AG, Mascarenhas ACC, Prestes YO, et al. Áreas de estudo – aspectos físicos e biológicos. In: Projeto Costa Norte – desenvolvimento de metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na margem equatorial brasileira [Internet]. v. 2. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis; 2020 [citado 2024 jun 6]. p. 269-321. Disponível em: http://projetocostanorte.eco.br/public/final_report/VOLUME%202/PCN_Vol2_Cap2_Area%20de%20Estudo_rev01.pdf.

24 Barreto EO, Lobato AS, Pereira PVV, Serra DRO. Caracterização do turismo de base comunitária em polos turísticos do estado do Pará. Rev Bras Ecotur. 2017 fev-abr;10(1):113-27.

25 Sousa MBP, Ranieri LA. Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. Rev Bras Geomorfol. 2023 set;24(3):e2350.

26 Instituto Nacional de Meteorologia. Portal INMET [Internet]. 2024 [citado 2024 jun 6]. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br.

27 American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, editors. Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th ed. Washington (DC): APHA Press; 2023.

28 Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 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 União, Brasília (DF), 2005 mar 18; Seção 1:58-63.

29 Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2001 jan 25; Seção 1:70-1.

30 Ayres M, Ayres Jr M, Ayres AL, Santos AS. BioEstat 5.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá; 2007.

31 Calgua B, Mengewein A, Grunert A, Bofill-Mas S, Clemente-Casares P, Hundesa A, et al. Development and application of a one-step low cost procedure to concentrate viruses from seawater samples. J Virol Methods. 2008 Nov;153(2):79-83.

32 Stachler E, Kelty C, Sivaganesan M, Li X, Bibby K, Shanks OC. Quantitative crAssphage PCR assays for human fecal pollution measurement. Environ Sci Technol. 2017 Aug;51(16):9146-54.

33 Chen S, Zhou Y, Chen Y, Gu J. fastp: an ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor. Bioinformatics. 2018 Sep;34(17):i884-90.

34 Li D, Luo R, Liu CM, Leung CM, Ting HF, Sadakane K, et al. MEGAHIT v1.0: a fast and scalable metagenome assembler driven by advanced methodologies and community practices. Methods. 2016 Jun;102:3-11.

35 Wood DE, Lu J, Langmead B. Improved metagenomic analysis with Kraken 2. Genome Biol. 2019 Nov;20(1):257.

36 Ondov BD, Bergman NH, Phillippy AM. Interactive metagenomic visualization in a Web browser. BMC Bioinformatics. 2011 Sep;12:385.

37 R Core Team. R: a language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing; 2022 [cited 2025 Apr 1]. Available from: https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf.

38 Lins-de-Barros FM, Francisco ABP, Silva LCB, Ribeiro PRM, Milczewski RS, Sousa REJ. Contribuições de monitoramentos participativos de praias arenosas para a gestão costeira integrada a partir do Projeto Mar à Vista (UFRJ) e da metodologia CoastSnap. Rev Costas. 2022;3:117-48.

39 Cabral ER, Dias JS, Gomes SC. Gestão ambiental em espaços de lazer e turismo: as praias urbanas da Amazônia brasileira. Rosa Ventos. 2015 abr-jun;7(2):269-87.

40 Lima RA. Influência da pluviosidade na balneabilidade das praias da Barra da Tijuca, município do Rio de Janeiro [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro; 2023.

41 Rabelo JS. Abundância e diversidade bacteriana na microcamada superficial e bioaerossóis marinhos na orla oceânica de Fortaleza, Ceará [monografia]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2017.

42 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Fundamentos do controle de poluição das águas [Internet]. São Paulo: CETESB; 2018 [citado 2018 dez 1]. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2018/11/Apostila-Fundamentos-do-Controle-de-Polui%C3%A7%C3%A3o-das-%C3%81guas-T3.pdf.

43 Lobato GJM, Martins ACCT, Lucas FCA, Morales GP, Rocha TT. Reserva Extrativista Marinha de Soure, Pará, Brasil: modo de vida das comunidades e ameaças ambientais. Biota Amazônia. 2014 dez;4(4):66-74.

44 Oliveira TJJ, Guitierrez LAL, Silva FL, Santos LFM, Amorim RG, Ferreira SGM, et al. Abastecimento de água e saneamento em populações ribeirinhas do Marajó: problemas e alternativas desenvolvidas pela comunidade Boa Esperança, Curralinho–PA. In: Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos; 2015 nov 22-27; Brasília. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos; 2015. p. 1-7.

45 Farkas K, Adriaenssens EM, Walker DI, McDonald JE, Malham SK, Jones DL. Critical evaluation of crAssphage as a molecular marker for human-derived wastewater contamination in the aquatic environment. Food Environ Virol. 2019 Jun;11(2):113-9.

46 Sabar MA, Honda R, Haramoto E. CrAssphage as an indicator of human-fecal contamination in water environment and virus reduction in wastewater treatment. Water Res. 2022 Aug;221:118827.

47 Turner D, Shkoporov AN, Lood C, Millard AD, Dutilh BE, Alfenas-Zerbini P, et al. Abolishment of morphology-based taxa and change to binomial species names: 2022 taxonomy update of the ICTV bacterial viruses subcommittee. Arch Virol. 2023 Jan;168(2):74.

48 Cai H, Zhou Y, Li X, Xu T, Ni Y, Wu S, et al. Genomic analysis and taxonomic characterization of seven bacteriophage genomes metagenomic-assembled from the Dishui Lake. Viruses. 2023 Sep;15(10):2038.

49 Shin JW, Kim KE, Park JS, Kim MJ, Lee TK, Kim YJ, et al. Metavirome insights into the diversity and potential pathogenic infection of *Chlamys farreri* in the coastal seas of the Republic of Korea. Pathogens. 2024 Oct;13(11):935.

50 Zhang H, Ruan Y, Kuzyakov Y, Sun H, Huang Q, Guo S, et al. Viruses facilitate energy acquisition potential by their bacterial hosts in rhizosphere of grafted plants. Plant Cell Environ. 2025 Jun;48(6):4599-610.

51 Gonzalez-Serrano R, Dunne M, Rosselli R, Martin-Cuadrado AB, Grosboillot V, Zinsli LV, et al. *Alteromonas* myovirus V22 represents a new genus of marine bacteriophages requiring a tail fiber chaperone for host recognition. mSystems. 2020 Jun;5(3):e00217-20.

52 Zheng X, Liu W, Dai X, Zhu Y, Wang J, Zhu Y, et al. Extraordinary diversity of viruses in deep-sea sediments as revealed by metagenomics without prior virion separation. Environ Microbiol. 2021 Feb;23(2):728-43.

53 Alexyuk MS, Bukin YS, Butina TV, Alexyuk PG, Berezin VE, Bogoyavlenskiy AP. Viromes of coastal waters of the North Caspian Sea: initial assessment of diversity and functional potential. Diversity. 2023 Jun;15(7):813.

54 Hwang J, Oh EG, Jin Y. Metagenomic analysis of seasonal variations in viral dynamics and diversity in seawater of Jeju Island, Republic of Korea. J Mar Sci Eng. 2024 Aug;12(9):1480.

55 Burbano-Rosero EM, Ueda-Ito M, Kisielius JJ, Nagasse-Sugahara TK, Almeida BC, Souza CP, et al. Diversity of somatic coliphages in coastal regions with different levels of anthropogenic activity in São Paulo State, Brazil. Appl Environ Microbiol. 2011 Jun;77(12):4208-16.

56 Canellas ALB, Lopes IR, Oliveira BFR, Laport MS. O gênero *Vibrio*: conceitos atuais e novas perspectivas. Rev Biol. 2022;22(1):14-31.

57 Leal IFC. Molecular identification and environmental screening for members of the *Vibrionaceae* family [dissertação]. Algarve: Universidade do Algarve; 2022.

58 Huang Z, Li M, Oren A, Lai Q. Genome-based analysis of the family *Paracoccaceae* and description of *Ostreiculturibacter nitratireducens* gen. nov., sp. nov., isolated from an oyster farm on a tidal flat. Front Microbiol. 2024 Apr;15:1376777.

59 Runzheimer K, Lozano C, Boy D, Boy J, Godoy R, Matus FJ, et al. Exploring Andean high-altitude lake extremophiles through advanced proteotyping. J Proteome Res. 2024 Mar;23(3):891-904.

60 Deng Y, Li CJ, Zhang J, Liu WH, Yu LY, Zhang YQ. Extensive genomic study characterizing three *Paracoccaceae* populations and revealing *Pseudogemmobacter lacusdianii* sp. nov. and *Paracoccus broussonetiae* sp. nov. Microbiol Spectr. 2024 Nov;12(11):e0108824.

61 Felício AR. Variação das concentrações de íons de ferro e manganês na água do mar em relação ao regime de marés [monografia]. Pontal do Paraná: Universidade Federal do Paraná; 2015.

62 Blotta KD, Guimarães LL, Braz EMQ, Magenta MAG, Ribeiro RB, Giordano F. Diagnóstico de manguezais periurbanos após 20 anos de impactos antrópicos. Res Soc Dev. 2021;10(1):e23610110657.

63 Fries JS, Characklis GW, Noble RT. Sediment-water exchange of *Vibrio* sp. and fecal indicator bacteria: implications for persistence and transport in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA. Water Res. 2008 Feb;42(4-5):941-50.

64 Heasley C, Sanchez JJ, Tustin J, Young I. Systematic review of predictive models of microbial water quality at freshwater recreational beaches. PLoS One. 2021 Aug;16(8):e0256785.

65 Asp NE, Gomes VJC, Ogston A, Borges JCC, Nittrouer CA. Sediment source, turbidity maximum, and implications for mud exchange between channel and mangroves in an Amazonian estuary. Ocean Dyn. 2016 Jan;66(2):285-97.

66 Bradshaw JK, Snyder B, Spidle D, Sidle RC, Sullivan K, Molina M. Sediment and fecal indicator bacteria loading in a mixed land use watershed: contributions from suspended sediment and bedload transport. J Environ Qual. 2021 May;50(3):598-611.

67 Costa GMM, Pontes AN, Pantoja DNSM, Pantoja NG, Cabral GS, Ribeiro HMC, et al. Caracterização da qualidade da água superficial nos distritos administrativos do município de Belém – PA. Cad Prudentino Geogr. 2022 jan-abr;1(44):120-37.

68 Yu D, Liu S, Li G, Zhong Y, Liang J, Shi J, et al. The river–sea interaction off the Amazon Estuary. Remote Sens. 2022 Feb;14(4):1022.

69 João JJ, Silva CS. Avaliação do grau de contaminação por metais tóxicos e a determinação da qualidade das águas da Lagoa Imaruí do complexo Lagunar. Braz J Develop. 2019 dez;5(12):29909-24.

70 Lins EAM, Cavalcanti FM, Paiva SC, Macêdo VMPM, Soares AJVM, Barbosa MS, et al. Monitoramento físico-químico de águas marinhas na costa pernambucana em Fernando de Noronha. Contrib Cienc Soc. 2024 Jan;17(1):3155-70.

Recebido em / Received: 27/6/2025
Aceito em / Accepted: 24/10/2025

Este artigo compõe a Seção Temática "Saúde e Meio Ambiente na Pan-Amazônia: Ciência, Território e Resistência em tempos de crise climática" em alusão à 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30).

Como citar este artigo / How to cite this article:

Conceição LC, Rogério SS, Maria TM, Deus DR, Teixeira DM, Sousa Junior EC, et al. Análise de águas recreacionais de praias do município de Soure, no Arquipélago do Marajó, estado do Pará, Amazônia brasileira. Rev Pan Amaz Saude. 2025;16:e202501747. Doi: https://doi.org/10.5123/S2176-6223202501747