ReGeo ISSN: 2177-3246

HETEROGENEIDADE ESPACIAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA DO RIO MACACOARI, AMAZÔNIA ORIENTAL

SPATIAL HETEROGENEITY OF WATER QUALITY IN THE MACACOARI RIVER BASIN, EASTERN AMAZON

HETEROGENEIDAD ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO MACACOARI, AMAZONÍA ORIENTAL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-100

Data de submissão: 01/08/2026 **Data de publicação:** 15/09/2026

Andrea Clementina Almeida Macedo
Mestre em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
E-mail: andreaclementina02@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2912-4077
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4372950869592302

Jéssica Caroline Evangelista Vilhena
Doutora em Biodiversidade Tropical
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5785-1349
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4949551510725993

Cassiane da Silva Videira
Mestre em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Orcid: https://orcid.org/0009-0007-6874-3555
Lattes: http://lattes.cnpq.br/0778998031094850

Fabricio Henrique Leite Luz
Graduando em Química
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7333137332663284

Danielly Rodrigues Santos
Graduando em Química
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6702924106039401

Suzane Rodrigues de Oliveira
Mestre em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3657-0641
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1347364753336263

Karina Cardoso Valverde
Doutora em Engenharia Química
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4518-8900
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6152994413893554

Alexandro Cezar Florentino
Doutor em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
E-mail: alexandrocezar@unifap.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8880-9618
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6152994413893554

RESUMO
O presente estudo avaliou a heterogeneidade espacial da qualidade da água na bacia do rio Macacoari, afluente da margem esquerda do rio Amazonas no estado do Amapá, por meio da integração de parâmetros físico-químicos, análises estatísticas univariadas e multivariadas e Índice de Qualidade da Água (IQA) adaptado. Foram amostrados 18 pontos distribuídos longitudinalmente ao longo da bacia, incluindo setores definidos a priori como com e sem influência direta do rio Amazonas. Os parâmetros físico-químicos apresentaram ampla variabilidade espacial, com diferenças significativas entre os setores para pH, temperatura, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio, condutividade elétrica, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira após correção de Benjamini–Hochberg. Os dois primeiros componentes da Análise de Componentes Principais explicaram conjuntamente 76,3% da variância, enquanto os três primeiros responderam por 84,8%. A Análise de Agrupamento Hierárquico separou os pontos em três compartimentos principais: P1–P9, P10 e P11–P18. Os pontos da porção inferior apresentaram maior mineralização, turbidez, oxigenação, amônia, cloreto e cor verdadeira, configurando um gradiente hidroquímico espacial compatível com maior conectividade hidrológica com o rio Amazonas. O IQA adaptado variou de 60,2 a 88,1, com média de 72,0 ± 8,8, sendo 14 pontos (77,8%) classificados com qualidade boa e quatro (22,2%) com qualidade ótima. Embora o setor sob influência direta do rio Amazonas tenha apresentado IQA médio numericamente superior, não foi observada diferença significativa entre os setores (U = 15,0; p = 0,0945). Os resultados demonstram marcada heterogeneidade espacial na bacia e indicam que a conectividade com o rio Amazonas está associada à organização hidroquímica da porção inferior, ressaltando a necessidade de monitoramento em diferentes fases do ciclo hidrológico.

Palavras-chave: Qualidade da Água. Rio Macacoari. Rio Amazonas. Bacia Amazônica. Análise Multivariada.

ABSTRACT
This study assessed the spatial heterogeneity of water quality in the Macacoari River basin, a left-bank tributary of the Amazon River in Amapá State, Brazil, by integrating physicochemical parameters, univariate and multivariate statistical analyses, and an adapted Water Quality Index (WQI). Water samples were collected at 18 sites longitudinally distributed throughout the basin, including sectors defined a priori as with and without direct influence from the Amazon River. Physicochemical parameters showed marked spatial variability, with significant differences between sectors for pH, temperature, dissolved oxygen, oxygen saturation, electrical conductivity, turbidity, ammonia, chloride, and true color after Benjamini–Hochberg correction. The first two principal components jointly explained 76.3% of the total variance, whereas the first three accounted for 84.8%. Hierarchical Cluster Analysis separated the sampling sites into three main groups: P1–P9, P10, and P11–P18. Sites

in the lower basin showed higher mineralization, turbidity, oxygenation, ammonia, chloride, and true color, defining a spatial hydrochemical gradient consistent with greater hydrological connectivity with the Amazon River. The adapted WQI ranged from 60.2 to 88.1, with a mean of 72.0 ± 8.8; 14 sites (77.8%) were classified as good and four (22.2%) as excellent. Although the sector directly influenced by the Amazon River showed a numerically higher mean WQI, no significant difference was detected between sectors (U = 15.0; p = 0.0945). These results demonstrate marked spatial heterogeneity across the basin and indicate that connectivity with the Amazon River is associated with the hydrochemical organization of its lower sector, highlighting the need for monitoring across different phases of the hydrological cycle.

Keywords: Water Quality. Macacoari River. Amazon River. Amazon Basin. Multivariate Analysis.

RESUMEN

Este estudio evaluó la heterogeneidad espacial de la calidad del agua en la cuenca del río Macacoari, un afluente de la margen izquierda del río Amazonas en el Estado de Amapá, Brasil, mediante la integración de parámetros fisicoquímicos, análisis estadísticos univariados y multivariados e Índice de Calidad del Agua (ICA) adaptado. Se recolectaron muestras de agua en 18 sitios distribuidos longitudinalmente en toda la cuenca, incluyendo sectores definidos a priori como con y sin influencia directa del río Amazonas. Los parámetros fisicoquímicos mostraron una variabilidad espacial marcada, con diferencias significativas entre sectores para pH, temperatura, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, conductividad eléctrica, turbidez, amoníaco, cloruro y color verdadero después de la corrección de Benjamini–Hochberg. Los dos primeros componentes principales explicaron conjuntamente el 76,3% de la varianza total, mientras que los tres primeros representaron el 84,8%. El Análisis de Conglomerados Jerárquico separó los sitios de muestreo en tres grupos principales: P1–P9, P10 y P11–P18. Los sitios en la cuenca inferior mostraron mayor mineralización, turbidez, oxigenación, amoníaco, cloruro y color verdadero, definiendo un gradiente hidrogeoquímico espacial consistente con mayor conectividad hidrológica con el río Amazonas. El ICA adaptado varió de 60,2 a 88,1, con una media de 72,0 ± 8,8; 14 sitios (77,8%) se clasificaron como bueno y cuatro (22,2%) como excelente. Aunque el sector directamente influenciado por el río Amazonas mostró una media del ICA numéricamente superior, no se detectó diferencia significativa entre sectores (U = 15,0; p = 0,0945). Estos resultados demuestran una heterogeneidad espacial marcada en toda la cuenca e indican que la conectividad con el río Amazonas está asociada con la organización hidrogeoquímica de su sector inferior, destacando la necesidad de monitoreo en diferentes fases del ciclo hidrológico.

Palabras clave: Calidad del Agua. Río Macacoari. Río Amazonas. Cuenca Amazónica. Análisis Multivariado.

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica constitui o maior sistema hidrográfico do planeta e desempenha papel central nos ciclos hidrológico, energético e biogeoquímico em escalas regional e global. Além de responder por aproximadamente 20% da descarga continental de água doce para os oceanos, o sistema amazônico integra rios, planícies de inundação, áreas úmidas, águas subterrâneas e fluxos atmosféricos que conectam os Andes, as terras baixas amazônicas e o oceano Atlântico, formando um sistema hidroclimático de elevada complexidade e relevância socioecológica (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Beveridge *et al.*, 2024; Jenkins *et al.*, 2025).

Além de sua magnitude hidrológica, os ecossistemas aquáticos amazônicos exercem funções fundamentais na ciclagem e transporte de carbono e nutrientes, na manutenção de uma biodiversidade de água doce excepcional e na provisão de água, alimento, transporte e outros serviços ecossistêmicos dos quais dependem milhões de pessoas (Athayde *et al.*, 2025; Anderson *et al.*, 2025; Jenkins *et al.*, 2025). A própria organização espacial da biodiversidade amazônica está estreitamente relacionada à evolução e à dinâmica dos sistemas fluviais, incluindo processos de conectividade, transporte de sedimentos e pulsos sazonais de inundação (Ribas *et al.*, 2025). Apesar dessa relevância, os ambientes aquáticos ainda recebem proporcionalmente menor atenção científica e conservacionista quando comparados aos ecossistemas terrestres da Amazônia, permanecendo importantes lacunas de conhecimento, sobretudo em rios menores, tributários e igarapés (Jenkins *et al.*, 2025; Almeida *et al.*, 2026).

Essa lacuna torna-se particularmente relevante diante da velocidade das transformações ambientais em curso na Amazônia. Nas últimas décadas, desmatamento, expansão agropecuária, urbanização, mineração, implantação de infraestrutura e alterações hidrológicas passaram a modificar processos ecológicos em taxas superiores àquelas associadas à dinâmica natural de longo prazo da região (Albert *et al.*, 2023). A conversão de florestas em pastagens e outros usos modifica propriedades do solo, escoamento superficial, processos biogeoquímicos e transferência de materiais para os sistemas aquáticos, com consequências sobre temperatura, turbidez, condutividade, nutrientes e qualidade da água (Thomaz *et al.*, 2020). Estudos recentes realizados em diferentes setores da Amazônia confirmam que alterações no uso e cobertura da terra podem modificar significativamente as características hidroquímicas das águas superficiais e aumentar a vulnerabilidade ecológica de rios e igarapés (Cabrera *et al.*, 2023; Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

Na Amazônia Oriental, essas pressões assumem especial importância devido à coexistência de áreas relativamente preservadas com zonas submetidas à expansão agropecuária, mineração, ocupação urbana e transformação da vegetação ripária. Na bacia do rio Itacaiúnas, por exemplo, modificações

na cobertura da terra, mineração artesanal, geologia e sazonalidade foram associadas a alterações na composição hidrogeoquímica das águas superficiais, evidenciando a interação entre fontes geogênicas e antrópicas na determinação da qualidade da água (Salomão *et al.*, 2023; 2025). Da mesma forma, análises conduzidas em escala regional demonstraram que rios amazônicos inseridos em áreas protegidas e com maior cobertura florestal apresentam, em determinadas condições hidrogeoquímicas, menores valores de turbidez e condutividade elétrica quando comparados a setores mais antropizados (Zanin *et al.*, 2024).

No estado do Amapá, evidências recentes também demonstram que os sistemas aquáticos estão sujeitos à combinação de processos naturais e diferentes pressões antrópicas. Estudos realizados na bacia do rio Araguari identificaram relações entre alterações da paisagem, concentração de metais, toxicidade da água e riscos à biota aquática, enquanto investigações subsequentes demonstraram a ocorrência de contaminantes inorgânicos na água e em organismos aquáticos (Viana *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022). Em ambientes aquáticos urbanos de Macapá, a presença e a bioacumulação de metais em peixes também evidenciam a vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos regionais diante do crescimento urbano e da limitada infraestrutura de saneamento (Souza *et al.*, 2025). Esses resultados reforçam a necessidade de ampliar o monitoramento para outras bacias hidrográficas do estado, especialmente aquelas submetidas à expansão da agricultura, pecuária e silvicultura e, consequentemente, a rápidas mudanças no uso e cobertura da terra.

Nesse contexto, a bacia hidrográfica do rio Macacoari constitui um sistema estratégico para compreender a heterogeneidade espacial da qualidade da água na Amazônia Oriental. Localizada no estado do Amapá e conectada hidrologicamente ao rio Amazonas, a bacia apresenta mosaicos de ambientes naturais e áreas submetidas a diferentes formas de uso do solo, incluindo atividades agropecuárias e ocupação humana (Vaz, 2021). Embora informações específicas sobre essa bacia ainda sejam limitadas, estudos desenvolvidos em outros sistemas amazônicos demonstram que a substituição da cobertura florestal, a exposição dos solos e o aumento do escoamento superficial podem intensificar o transporte de partículas, nutrientes e elementos químicos para os cursos d'água, produzindo respostas espacialmente heterogêneas nos parâmetros de qualidade da água (Thomaz *et al.*, 2020; Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

Além das pressões locais, a porção inferior da bacia do rio Macacoari encontra-se sujeita à conectividade hidrológica com o rio Amazonas, que representa um importante fator de controle da heterogeneidade hidroquímica desse setor da bacia. O sistema amazônico transporta grandes volumes de água, sedimentos, nutrientes e matéria orgânica entre diferentes compartimentos da bacia e o oceano Atlântico, e essa conectividade constitui um dos processos fundamentais para o funcionamento

ecológico dos ambientes aquáticos amazônicos (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Beveridge *et al.*, 2024; Anderson *et al.*, 2025). Rios amazônicos de águas brancas, particularmente aqueles associados à drenagem andina e ao canal principal do rio Amazonas, distinguem-se pela elevada carga de sedimentos e materiais dissolvidos, podendo modificar as características físico-químicas de ambientes hidrologicamente conectados durante diferentes fases do ciclo hidrológico (Jenkins *et al.*, 2025). Assim, a conectividade entre o rio Macacoari e o rio Amazonas constitui uma condição particularmente relevante para compreender como processos regionais interagem com controles locais na determinação da qualidade da água. A composição físico-química das águas amazônicas resulta, portanto, da interação entre múltiplos controles naturais e antropogênicos. Geologia, intemperismo, precipitação, sazonalidade hidrológica, cobertura vegetal e processos biogeoquímicos estabelecem condições hidrogeoquímicas naturais, enquanto desmatamento, agricultura, pecuária, mineração, urbanização e lançamento de efluentes podem modificar esses padrões e gerar sinais adicionais de perturbação ambiental (Salomão *et al.*, 2023; Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025). Essa sobreposição dificulta interpretações baseadas exclusivamente na comparação direta com valores normativos, uma vez que concentrações naturalmente elevadas de determinados elementos e características intrínsecas das águas amazônicas podem ser confundidas com sinais de contaminação ou degradação. Por essa razão, estudos recentes têm enfatizado a necessidade de considerar condições hidrogeoquímicas de referência, sazonalidade e contexto espacial na interpretação da qualidade das águas amazônicas (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

O monitoramento integrado de parâmetros físico-químicos constitui, nesse cenário, uma ferramenta fundamental para identificar gradientes espaciais, reconhecer potenciais fontes de alteração e estabelecer condições de referência para a gestão de bacias hidrográficas (Salomão *et al.*, 2025). No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece padrões de qualidade para diferentes classes de águas superficiais e constitui importante referência normativa para a avaliação ambiental (Brasil, 2005). Entretanto, em sistemas amazônicos caracterizados por elevada heterogeneidade hidrogeoquímica, a interpretação desses padrões deve considerar as condições naturais da bacia, especialmente para variáveis fortemente controladas por geologia, matéria orgânica, regime hidrológico e transporte de sedimentos (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

Diante da elevada dimensionalidade dos dados gerados em programas de monitoramento, abordagens estatísticas multivariadas têm sido progressivamente incorporadas à avaliação da qualidade da água na Amazônia. Técnicas como Análise de Componentes Principais (PCA) e análise de agrupamento permitem identificar variáveis dominantes, relações entre parâmetros e agrupamentos espaciais que dificilmente seriam reconhecidos a partir da interpretação isolada de cada variável (Costa

et al., 2020; Salomão *et al.*, 2025). Aplicações recentes em bacias da Amazônia brasileira confirmam a utilidade dessas ferramentas para discriminar influências naturais e antrópicas e identificar gradientes hidrogeoquímicos e áreas de maior vulnerabilidade (Mesquita *et al.*, 2026).

De forma complementar, os índices de qualidade da água permitem sintetizar conjuntos complexos de variáveis em indicadores de interpretação mais direta. Contudo, a escolha dos parâmetros, pesos e funções de transformação pode modificar substancialmente o resultado do índice, tornando necessária sua adequação às características ambientais do sistema avaliado. Na Amazônia brasileira, abordagens baseadas em métodos quimiométricos já demonstraram que a seleção regionalmente orientada de variáveis pode aumentar a capacidade discriminatória dos índices de qualidade da água (Costa *et al.*, 2020). Dessa forma, a interpretação conjunta do IQA com os parâmetros individuais e técnicas multivariadas oferece uma abordagem mais robusta do que a utilização isolada do índice.

Apesar dos avanços recentes no conhecimento sobre os ecossistemas aquáticos amazônicos, tributários de menor porte e sistemas hidrográficos regionais permanecem insuficientemente estudados, especialmente na Amazônia Oriental, onde importantes lacunas persistem quanto à influência combinada da heterogeneidade ambiental, das pressões locais e da conectividade com grandes rios (Jenkins *et al.*, 2025; Almeida *et al.*, 2026). Nesse cenário, partiu-se da hipótese de que a conectividade com o rio Amazonas, associada aos gradientes ambientais existentes ao longo da bacia, produz heterogeneidade espacial mensurável nas características físico-químicas da água do rio Macacoari. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a heterogeneidade espacial da qualidade da água na bacia do rio Macacoari por meio da integração de parâmetros físico-químicos, Índice de Qualidade da Água e análises estatísticas univariadas e multivariadas. Especificamente, buscou-se caracterizar a variabilidade espacial dos parâmetros físico-químicos, identificar padrões hidroquímicos entre os setores da bacia, avaliar as diferenças entre locais com e sem influência direta do rio Amazonas e determinar o IQA dos diferentes pontos amostrais.

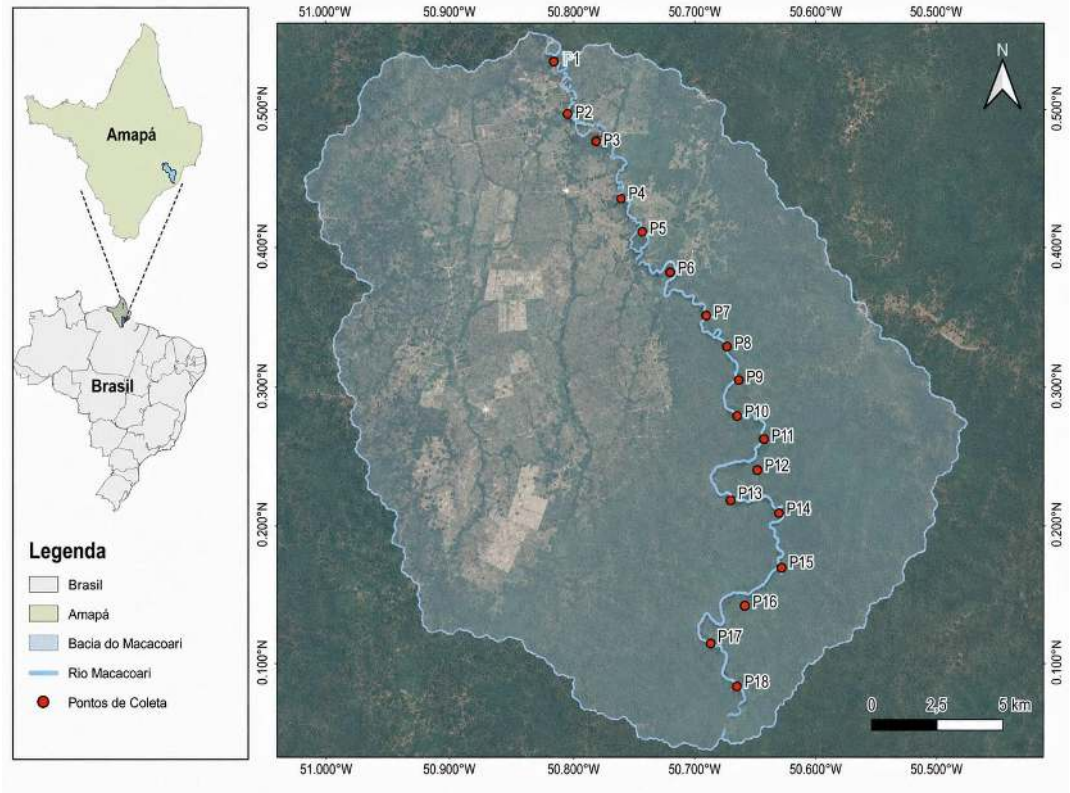
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Macacoari está localizada na porção sudeste do estado do Amapá, na Amazônia Oriental brasileira, e integra a macrorregião hidrográfica amazônica. O rio Macacoari constitui um afluente da margem esquerda do rio Amazonas e atua como divisor natural entre os municípios de Macapá e Itaubal. A região apresenta ecossistemas de várzea, campos inundáveis, savanas amazônicas e formações florestais de terra firme, além de áreas submetidas à expansão

agropecuária, monoculturas e pastagens (IBGE, 2012; Vaz, 2021). O clima regional é tropical úmido, com temperatura média anual próxima de 27 °C e precipitação anual superior a 2.500 mm, concentrada principalmente entre janeiro e junho (INMET, 2020). A dinâmica hidroambiental é condicionada pela sazonalidade pluviométrica, pelo pulso de inundação e pela conectividade hidrossedimentológica com o rio Amazonas. Foram estabelecidos 18 pontos amostrais distribuídos longitudinalmente ao longo do canal principal do rio Macacoari (Tabela 1), abrangendo os setores superiores, médios e inferiores da bacia. Os pontos foram codificados de P1 a P18 e georreferenciados com receptor Global Navigation Satellite System (GNSS), utilizando o sistema geodésico SIRGAS 2000. Para a comparação entre setores, P1–P13 foram considerados sem influência direta do rio Amazonas e P14–P18 sob influência direta (Figura 1).

Figura 1. Localização da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.



Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos pontos de amostragem de água distribuídos ao longo da bacia hidrográfica do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.

Ponto	Latitude decimal	Longitude decimal	Latitude (GMS)	Longitude (GMS)
P1	0,57779336	-50,79610899	0°34'40,06" N	50°47'45,99" O
P2	0,55131220	-50,78756637	0°33'04,72" N	50°47'15,24" O
P3	0,53893230	-50,76778909	0°32'20,16" N	50°46'04,04" O
P4	0,51096492	-50,76127318	0°30'39,47" N	50°45'40,58" O
P5	0,49273085	-50,75230715	0°29'33,83" N	50°45'08,31" O
P6	0,47630452	-50,73757838	0°28'34,70" N	50°44'15,28" O
P7	0,45743832	-50,72221473	0°27'26,78" N	50°43'19,97" O
P8	0,44743563	-50,70861278	0°26'50,77" N	50°42'31,01" O
P9	0,43401086	-50,69931219	0°26'02,44" N	50°41'57,52" O
P10	0,41774005	-50,70500130	0°25'03,86" N	50°42'18,00" O
P11	0,41351214	-50,69194286	0°24'48,64" N	50°41'30,99" O
P12	0,39686152	-50,69330276	0°23'48,70" N	50°41'35,89" O
P13	0,38156205	-50,70739556	0°22'53,62" N	50°42'26,62" O
P14	0,37766123	-50,68288414	0°22'39,58" N	50°40'58,38" O
P15	0,35365217	-50,68001768	0°21'13,15" N	50°40'48,06" O
P16	0,33864558	-50,69912196	0°20'19,12" N	50°41'56,84" O
P17	0,32361298	-50,71685230	0°19'25,01" N	50°43'00,67" O
P18	0,30238383	-50,70494157	0°18'08,58" N	50°42'17,79" O

Fonte: Elaborada pelos autores

2.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES LABORATORIAIS

As coletas de água foram realizadas em julho de 2024, durante o período de transição entre a estação chuvosa e a estação seca. O delineamento amostral foi estruturado para representar gradientes ambientais e hidrológicos, incluindo trechos com diferentes níveis de influência da vegetação natural, das atividades agropecuárias e da conectividade com o rio Amazonas. Em cada ponto, amostras de água superficial foram coletadas a aproximadamente 0,3 m de profundidade, em frascos de polietileno previamente descontaminados com solução ácida e enxaguados com água ultrapura, conforme o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). As amostras destinadas às análises laboratoriais foram acondicionadas em caixas térmicas sob refrigeração e transportadas ao laboratório.

Os parâmetros mensurados in situ incluíram pH, temperatura da água, oxigênio dissolvido, porcentagem de saturação de oxigênio e condutividade elétrica, determinados com sonda multiparâmetro portátil HI98194 (Hanna Instruments), previamente calibrada conforme as recomendações do fabricante. A turbidez foi quantificada em campo utilizando turbidímetro portátil 2100Q (Hach), sendo os resultados expressos em unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Em laboratório, foram determinados sólidos totais dissolvidos, por gravimetria após filtração e secagem a 180 °C; cor verdadeira, por espectrofotometria; amônia, pelo método do indofenol; cloreto, por

titulação argentométrica; e ferro total, manganês e alumínio por espectrofotometria de absorção atômica. As análises laboratoriais foram realizadas em triplicata, seguindo protocolos padronizados (APHA, 2017). Os procedimentos gerais de garantia e controle da qualidade analítica incluíram calibração instrumental, análise de brancos analíticos, réplicas laboratoriais e verificação da precisão.

2.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi calculado por meio de uma adaptação da metodologia proposta pela National Sanitation Foundation e adotada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017). O índice foi obtido pelo produto ponderado das notas de qualidade atribuídas a cada parâmetro, conforme a Equação 1:

$$IQA = \prod_{i=1}^{n} (q_i)^{w_i} \quad (1)$$

em que q_i corresponde à nota de qualidade do i-ésimo parâmetro, w_i representa o peso atribuído ao parâmetro de acordo com sua importância relativa na composição do índice. As funções utilizadas para obtenção dos valores de q_i são apresentadas na Tabela Suplementar S1, de modo a assegurar a reprodutibilidade do cálculo. Para o IQA adaptado, foram considerados dez parâmetros. A porcentagem de saturação de oxigênio dissolvido recebeu peso de 0,17 e o pH, de 0,12. Amônia, ferro, manganês e alumínio receberam peso de 0,10 cada; cor verdadeira, turbidez e cloreto, peso de 0,08 cada; e os sólidos totais dissolvidos (TDS), peso de 0,07. A soma dos pesos atribuídos foi igual a 1,00. Os valores finais do índice foram classificados em cinco categorias: ótima (80–100), boa (52–79), razoável (37–51), ruim (20–36) e péssima (0–19). Além da classificação individual dos pontos amostrais, os valores do IQA foram comparados entre os setores sem influência direta do rio Amazonas (P1–P13) e sob influência direta (P14–P18).

2.4 ANÁLISE DE DADOS

Foram calculadas estatísticas descritivas para os parâmetros físico-químicos, incluindo média, desvio padrão, mediana, valores mínimo e máximo e intervalo de confiança de 95% da média. Os resultados foram comparados aos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de Classe 2 (Brasil, 2005). A normalidade das distribuições foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Para avaliar as diferenças entre os pontos sem influência direta do rio Amazonas (P1–P13; n = 13) e aqueles definidos a priori como sob influência direta (P14–P18; n = 5), foram utilizados testes para dois grupos

independentes. Para as variáveis que apresentaram distribuição compatível com a normalidade, foi empregado o teste t de Welch, enquanto o teste de Mann–Whitney foi utilizado para as variáveis que não atenderam ao pressuposto de normalidade. Considerando a realização simultânea de 13 comparações físico-químicas, os valores de p foram ajustados pelo procedimento de Benjamini–Hochberg para controle da taxa de falsas descobertas, sendo consideradas significativas as diferenças com p ajustado < 0,05. Para complementar a significância estatística, foram estimados os tamanhos de efeito pelo g de Hedges nas comparações paramétricas e pelo coeficiente de correlação rank-biserial nas comparações não paramétricas.

As associações entre os parâmetros físico-químicos foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson. Para fins de interpretação, foram destacadas as correlações fortes, definidas como $|r| \geq 0,70$. Os valores de p associados às correlações foram ajustados pelo procedimento de Benjamini–Hochberg para comparações múltiplas. A porcentagem de saturação de oxigênio foi mantida nas análises descritivas, nas comparações entre setores e na matriz de correlação, porém excluída das análises multivariadas devido à elevada redundância com a concentração de oxigênio dissolvido em mg L^{-1} ($r = 0,999$), evitando a ponderação duplicada da mesma informação hidroquímica. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada com 12 parâmetros físico-químicos, previamente padronizados para média zero e desvio padrão igual a um. Os componentes foram avaliados com base em seus autovalores, adotando-se o critério de Kaiser para retenção daqueles com autovalores superiores a 1. Os scores dos pontos amostrais e as cargas das variáveis (loadings) foram utilizados para interpretar os principais gradientes hidroquímicos, sendo os dois primeiros componentes empregados na representação gráfica por meio do biplot. A Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) foi conduzida utilizando o mesmo conjunto de 12 variáveis padronizadas empregado na PCA. As dissimilaridades entre os pontos amostrais foram calculadas pela distância Euclidiana, e a aglomeração foi realizada pelo método Ward.D^2. A estrutura do dendrograma foi utilizada para reconhecer os principais agrupamentos hidroquímicos e avaliar sua concordância com a organização espacial identificada pela PCA. Para o IQA adaptado, além da classificação individual dos 18 pontos amostrais, os valores foram comparados entre os setores P1–P13 e P14–P18. A normalidade foi novamente avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Como o grupo P1–P13 não atendeu plenamente ao pressuposto de normalidade, a comparação do IQA entre os dois setores foi realizada pelo teste de Mann–Whitney para amostras independentes, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R Core Team (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA

Os parâmetros físico-químicos analisados nos 18 pontos amostrais evidenciaram elevada heterogeneidade espacial ao longo da bacia do rio Macacoari, com diferenças expressivas na magnitude e na dispersão das variáveis avaliadas (Tabela 2). Amônia, turbidez, condutividade elétrica, alumínio, TDS, manganês, ferro e cor verdadeira apresentaram maior variabilidade entre os pontos, enquanto temperatura, pH e cloreto exibiram comportamento comparativamente mais homogêneo. Considerando que todos os pontos foram amostrados durante a mesma campanha, essas diferenças refletem principalmente a heterogeneidade espacial existente entre os compartimentos da bacia, compatível com a atuação conjunta de características hidrogeoquímicas, cobertura da terra e conectividade fluvial descritas para sistemas amazônicos (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

Tabela 2. Estatísticas descritivas dos parâmetros físico-químicos da água da bacia do rio Macacoari (n=18) e respectivos valores de referência, Estado do Amapá, Brasil.

Parâmetro	Média ± DP	IC95%	Mediana	Amplitude	CONAMA 357/2005 *
pH	5,90 ± 0,94	5,44–6,37	6,37	4,38–6,82	6,0–9,0
Temperatura (°C)	30,06 ± 0,83	29,65–30,47	30,25	28,90–31,30	—
Oxigênio dissolvido (mg L^{-1})	4,75 ± 1,69	3,91–5,59	4,2	2,80–8,90	≥ 5,0
Saturação de oxigênio (%)	63,02 ± 23,04	51,56–74,48	54,8	37,2–119,0	—
Condutividade elétrica (µS cm^{-1})	22,15 ± 17,13	13,63–30,67	10,75	4,93–49,50	—
Turbidez (UNT)	20,80 ± 18,55	11,57–30,02	16,15	3,68–66,10	≤ 100
TDS (mg L^{-1})	14,11 ± 10,13	9,07–19,15	7	5,00–29,00	≤ 500
Cor verdadeira (mg Pt L^{-1})	119,11 ± 72,79	82,91–155,31	108,5	33–282	≤ 75
Amônia (mg L^{-1})	0,17 ± 0,16	0,090–0,248	0,12	0–0,47	≤ 3,7*
Cloreto (mg L^{-1})	4,28 ± 0,80	3,88–4,68	4,3	3,10–5,9	≤ 250
Ferro (mg L^{-1})	0,50 ± 0,32	0,34–0,66	0,47	0,03–1,03	≤ 0,30
Manganês total (mg L^{-1})	0,11 ± 0,07	0,071–0,141	0,085	0,057–0,368	≤ 0,10
Alumínio (mg L^{-1})	0,037 ± 0,028	0,023–0,051	0,038	0,003–0,129	≤ 0,10

*Valores utilizados como referência para águas doces Classe 2 conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005.
Fonte: Elaborada pelos autores

O pH variou entre 4,38 e 6,82, com média de 5,90 ± 0,94, sendo que oito dos 18 pontos (44,4%) apresentaram valores inferiores a 6,0. Os menores registros ocorreram principalmente entre P2 e P9, nos setores superior e médio da bacia. A temperatura apresentou baixa variação espacial, oscilando entre 28,90 e 31,30 °C, com média de 30,06 ± 0,83 °C. Essa reduzida amplitude indica relativa estabilidade térmica durante a campanha, embora diferenças locais possam resultar de sombreamento, profundidade, horário de amostragem e exposição à radiação solar. A ocorrência de águas mais ácidas

nos setores superiores não deve ser interpretada isoladamente como evidência de degradação ambiental, uma vez que o pH dos sistemas amazônicos pode ser fortemente condicionado por características pedológicas, matéria orgânica dissolvida, geologia e interação água–solo. Estudos recentes demonstram que condições hidroquímicas de referência variam substancialmente entre diferentes compartimentos amazônicos, reforçando a necessidade de distinguir características naturais de alterações associadas ao uso da terra (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025). O oxigênio dissolvido variou entre 2,80 e 8,90 mg L^{-1}, com média de 4,75 ± 1,69 mg L^{-1}, enquanto a saturação oscilou entre 37,2 e 119,0%, com média de 63,02 ± 23,04%. Dez pontos (55,6%) apresentaram OD inferior ao valor de referência de 5,0 mg L^{-1}, concentrando-se predominantemente entre P1 e P10, enquanto os pontos da porção inferior apresentaram concentrações progressivamente maiores. A disponibilidade de oxigênio em sistemas tropicais resulta da interação entre temperatura, turbulência, circulação hídrica, fotossíntese e consumo respiratório, de modo que sua variação espacial não pode ser atribuída exclusivamente a fontes pontuais de poluição. A associação entre menores valores de OD nos setores superiores e maiores concentrações nos pontos inferiores constitui um dos componentes mais evidentes do gradiente hidroquímico observado ao longo do rio Macacoari.

A turbidez, a condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos apresentaram elevada variação espacial e comportamento predominantemente crescente em direção aos setores inferiores. A turbidez variou entre 3,68 e 66,10 UNT, com média de 20,80 ± 18,55 UNT, sendo os maiores valores registrados principalmente em P16, P17 e P18. Apesar dessa amplitude, nenhum ponto ultrapassou o valor de referência de 100 UNT. A condutividade elétrica oscilou entre 4,93 e 49,50 µS cm^{-1}, com média de 22,15 ± 17,13 µS cm^{-1}, apresentando menores valores nos setores superiores e aumento principalmente entre P11 e P18. Os TDS variaram entre 5,0 e 29,0 mg L^{-1}, com média de 14,11 ± 10,13 mg L^{-1}, permanecendo muito abaixo do valor de referência de 500 mg L^{-1}. Nos pontos diretamente influenciados pelo rio Amazonas, a concentração média de TDS foi de 23,00 ± 2,24 mg L^{-1}, comparativamente a 10,69 ± 9,90 mg L^{-1} nos demais pontos, correspondendo a aumento de 115,1%, embora essa diferença não tenha permanecido significativa após correção de Benjamini–Hochberg (p ajustado = 0,109). Em conjunto, turbidez, condutividade e TDS refletem diferenças na carga particulada e dissolvida e podem responder simultaneamente à mineralização natural, erosão, transporte de sedimentos e mistura entre massas de água com diferentes assinaturas hidroquímicas. Em sistemas amazônicos, esses processos são particularmente importantes em áreas conectadas a rios de águas brancas, caracterizados pelo elevado transporte de sedimentos e solutos (Zanin *et al.*, 2024; Jenkins *et al.*, 2025; Salomão *et al.*, 2025).

A cor verdadeira, a amônia e o cloreto também apresentaram padrões espaciais consistentes com maior diferenciação da porção inferior da bacia. A cor verdadeira variou entre 33 e 282 mg Pt L^{-1}, com média de 119,11 ± 72,79 mg Pt L^{-1}, sendo que 11 pontos (61,1%) apresentaram valores superiores a 75 mg Pt L^{-1}. Os maiores registros ocorreram principalmente nos setores intermediário e inferior, destacando-se P10, P15, P16, P17 e P18. A amônia variou entre valores não detectados e 0,47 mg L^{-1}, com média de 0,17 ± 0,16 mg L^{-1}, e as maiores concentrações foram registradas em P16–P18, permanecendo abaixo do valor de referência adotado. O cloreto apresentou valores entre 3,10 e 5,90 mg L^{-1}, com média de 4,28 ± 0,80 mg L^{-1}, permanecendo muito abaixo do limite de 250 mg L^{-1}, embora também tenha apresentado incremento em direção à porção inferior. Em sistemas aquáticos amazônicos, a cor verdadeira está fortemente relacionada à matéria orgânica dissolvida cromófora, incluindo substâncias húmicas provenientes da decomposição da matéria vegetal, podendo também refletir a formação de complexos dissolvidos com metais (Jenkins *et al.*, 2025). A amônia responde à mineralização da matéria orgânica, ao escoamento superficial e à dinâmica hidrológica, enquanto o cloreto apresenta comportamento relativamente conservativo e tende a responder principalmente aos processos de diluição, mistura de massas de água e aporte de solutos provenientes da drenagem (Drake *et al.*, 2021; Salomão *et al.*, 2025). Assim, o aumento simultâneo dessas variáveis na porção inferior reforça a existência de um gradiente hidroquímico espacial, embora os dados disponíveis não permitam atribuir esse padrão a uma fonte específica.

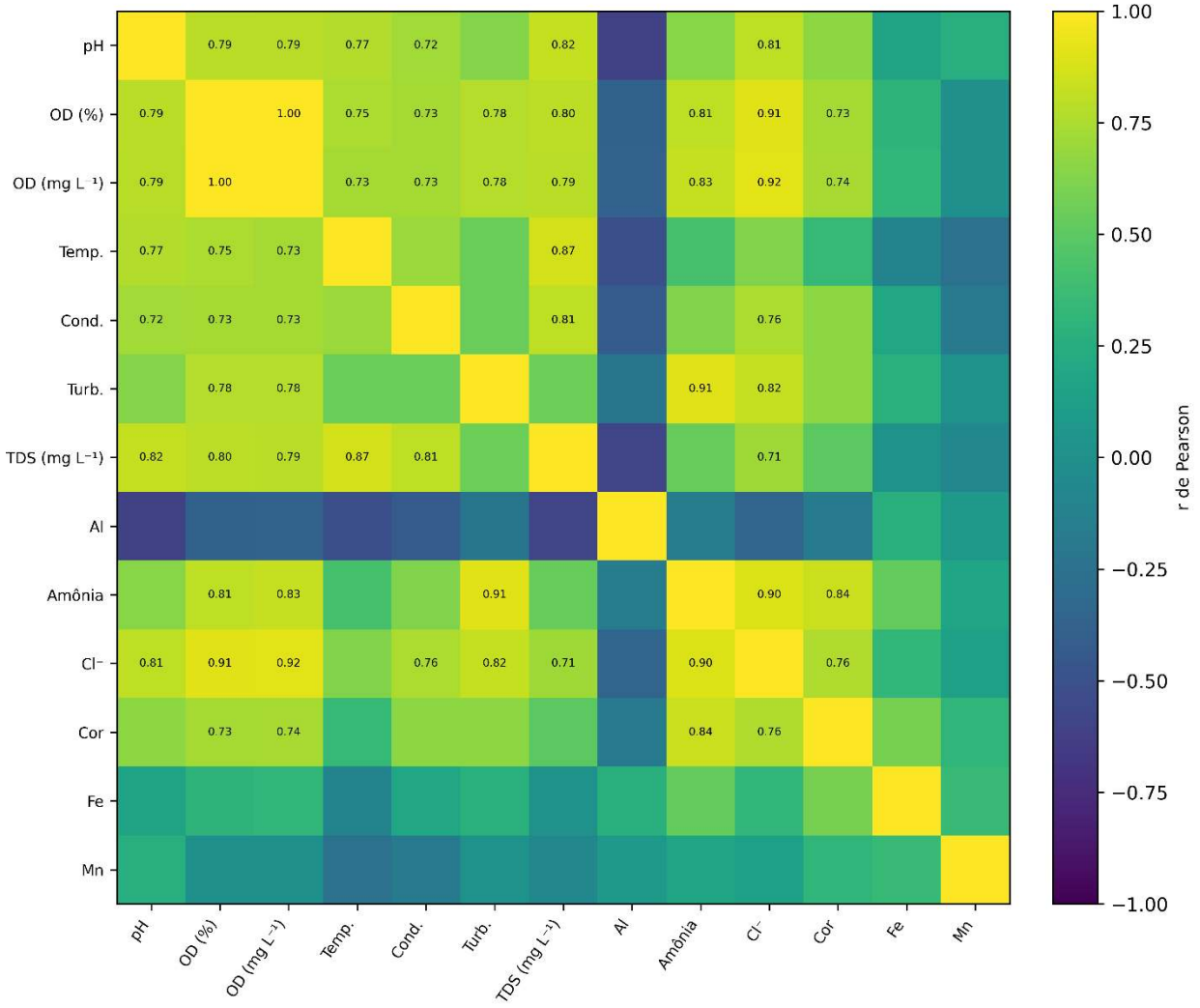
Entre os elementos metálicos, Fe, Mn e Al apresentaram elevada variabilidade entre os pontos, porém não exibiram padrão longitudinal tão consistente quanto as variáveis anteriormente descritas. O ferro variou entre 0,03 e 1,03 mg L^{-1}, com média de 0,50 ± 0,32 mg L^{-1}. O manganês total apresentou concentrações entre 0,057 e 0,368 mg L^{-1}, com média de 0,106 ± 0,071 mg L^{-1}, enquanto o alumínio variou entre 0,003 e 0,129 mg L^{-1}, com média de 0,037 ± 0,028 mg L^{-1}. Considerando os valores de referência apresentados na Tabela 2, 11 pontos (61,1%) apresentaram Fe acima de 0,30 mg L^{-1}, sete (38,9%) apresentaram Mn acima de 0,10 mg L^{-1} e apenas P5 apresentou Al superior a 0,10 mg L^{-1}. Para Fe e Al, entretanto, a interpretação normativa deve considerar que a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece limites para as formas dissolvidas. A ausência de padrão espacial uniforme sugere que esses elementos estão sujeitos a controles distintos daqueles responsáveis pelo principal gradiente longitudinal da bacia. Estudos realizados na Amazônia Oriental demonstram que sua distribuição pode refletir simultaneamente litologia, intemperismo, condições redox, exposição do solo, escoamento superficial e interação água–sedimento (Salomão *et al.*, 2023; Salomão *et al.*, 2025). No estado do Amapá, Viana *et al.* (2021) demonstraram relações entre uso e cobertura da terra, concentração de metais e efeitos ecotoxicológicos na bacia do rio Araguari, enquanto Costa *et al.* (2022) observaram

associações entre composição da paisagem e contaminantes inorgânicos na água e em peixes do mesmo sistema. Em conjunto, os resultados demonstram marcada heterogeneidade físico-química entre os pontos amostrais da bacia do rio Macacoari. Os setores superiores concentram águas comparativamente mais ácidas, menos mineralizadas e com menor oxigenação, enquanto a porção inferior apresenta aumento de pH, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade, amônia, cloreto e cor verdadeira. Em contraste, Fe, Mn e Al apresentam maior variabilidade local e não acompanham uniformemente esse gradiente. A convergência entre esses padrões fornece a base para as análises de correlação e multivariadas utilizadas para discriminar os principais componentes associados à heterogeneidade ambiental da bacia.

3.2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

A matriz de correlação de Pearson evidenciou forte covariação entre diferentes parâmetros físico-químicos da água ao longo da bacia do rio Macacoari (Figura 2). Considerando $|r| \geq 0,70$, foram identificadas 30 correlações fortes, todas estatisticamente significativas após correção de Benjamini–Hochberg para comparações múltiplas. A associação mais elevada ocorreu entre o oxigênio dissolvido expresso em mg L^{-1} e a porcentagem de saturação de oxigênio ($r = 0,999$; $p < 0,001$), resultado esperado por se tratarem de medidas diretamente relacionadas da disponibilidade de oxigênio na água. Em razão dessa elevada redundância, apenas o oxigênio dissolvido em mg L^{-1} foi mantido nas análises multivariadas subsequentes, evitando a ponderação duplicada do mesmo componente hidroquímico na PCA e na HCA. Entre as demais associações, destacaram-se oxigênio dissolvido e cloreto ($r = 0,918$), turbidez e amônia ($r = 0,912$), amônia e cloreto ($r = 0,898$), temperatura e TDS ($r = 0,868$), amônia e cor verdadeira ($r = 0,841$), oxigênio dissolvido e amônia ($r = 0,827$), pH e TDS ($r = 0,825$), turbidez e cloreto ($r = 0,825$) e condutividade elétrica e TDS ($r = 0,807$). Também foram observadas correlações fortes entre pH e cloreto ($r = 0,808$), pH e oxigênio dissolvido ($r = 0,788$), oxigênio dissolvido e turbidez ($r = 0,780$), pH e temperatura ($r = 0,767$), cloreto e cor verdadeira ($r = 0,763$), condutividade e cloreto ($r = 0,757$), temperatura e oxigênio dissolvido ($r = 0,734$) e pH e condutividade ($r = 0,722$). A temperatura apresentou correlações fortes com TDS ($r = 0,868$), pH ($r = 0,767$) e oxigênio dissolvido ($r = 0,734$), integrando o conjunto de variáveis associado ao principal gradiente espacial da bacia.

Figura 2. Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físico-químicos da água da bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.



Os valores apresentados nas células correspondem às correlações fortes (|r|≥0,70). A escala cromática varia de roxo/azul escuro, indicando correlações negativas, passando por tonalidades verdes, representando associações fracas ou próximas de zero, até amarelo, indicando correlações positivas fortes. A intensidade da cor é proporcional à magnitude do coeficiente de correlação.
Fonte: Elaborada pelos autores

O padrão de correlações demonstra que variáveis associadas à oxigenação, mineralização, material particulado, matéria orgânica e dinâmica de nutrientes variaram conjuntamente ao longo do gradiente longitudinal do rio Macacoari. A associação de cloreto com oxigênio dissolvido, amônia, turbidez, cor verdadeira e condutividade, juntamente com as relações entre TDS, pH, temperatura e condutividade, é consistente com mudanças simultâneas na composição da água entre os setores da bacia. Esse comportamento é particularmente evidente na porção inferior, onde foram observados maiores valores de vários desses parâmetros. Em sistemas amazônicos, a composição físico-química das águas pode responder à mistura de massas de água, transporte de sedimentos e solutos, matéria orgânica dissolvida, características geológicas e conectividade entre tributários e grandes canais

fluviais (Drake *et al.*, 2021; Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Salomão *et al.*, 2025). As associações observadas, entretanto, não permitem atribuir uma origem comum ou estabelecer relações causais entre os parâmetros. A covariação entre turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira, por exemplo, pode resultar da atuação simultânea de transporte de material particulado, mineralização da matéria orgânica, escoamento superficial, mistura de águas e modificações no uso da terra. Assim, o conjunto das correlações reforça a existência de um gradiente hidroquímico espacial integrado, e não a resposta isolada de uma única variável. Esse padrão fornece suporte para a aplicação da Análise de Componentes Principais e da Análise de Agrupamento Hierárquico, utilizadas a seguir para identificar os principais eixos de variação e a organização espacial dos pontos amostrais.

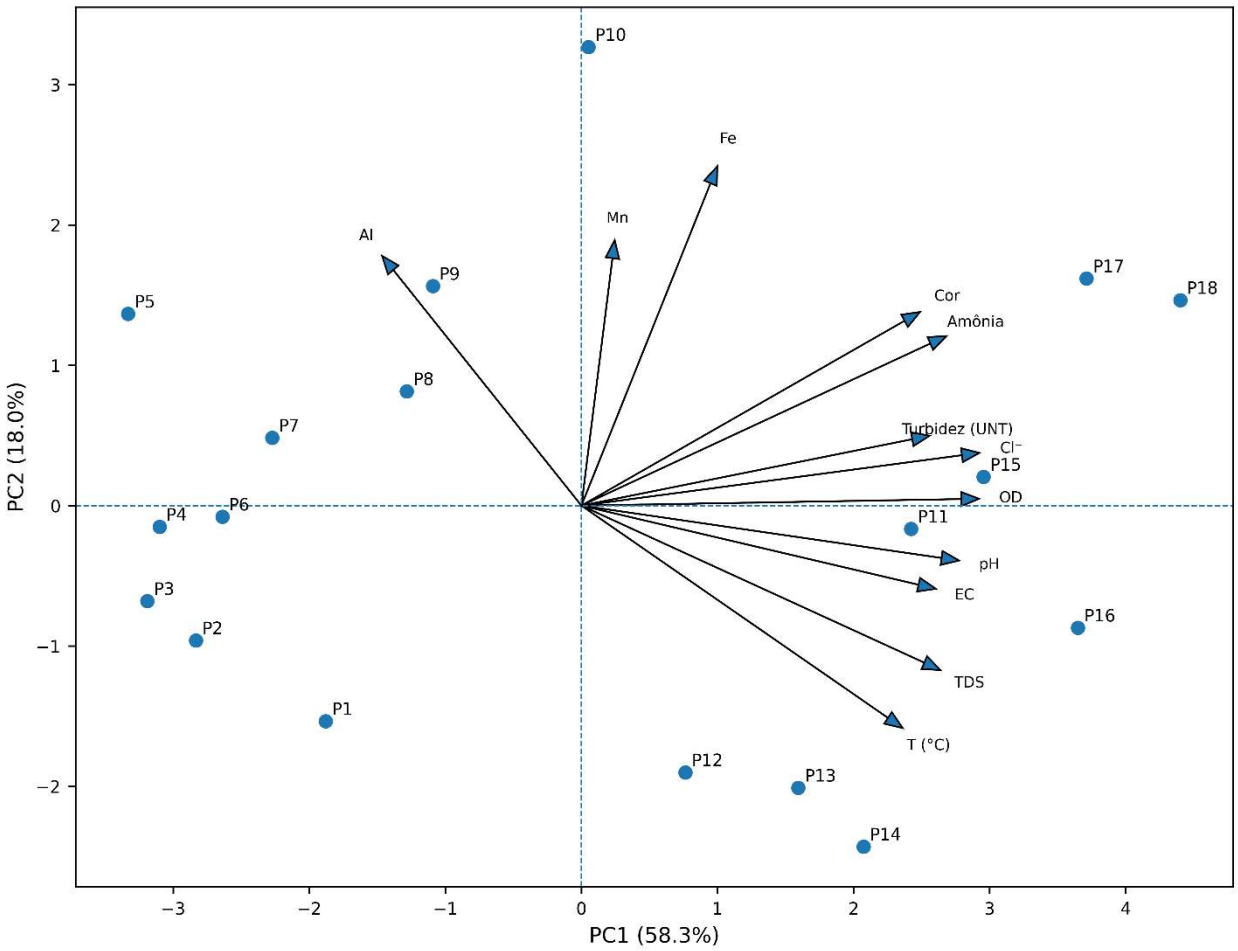
3.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Análise de Componentes Principais foi realizada com os dados padronizados, mantendo-se o oxigênio dissolvido em mg L^{-1} e excluindo-se a porcentagem de saturação de oxigênio devido à elevada redundância entre essas duas variáveis. Os três primeiros componentes apresentaram autovalores superiores a 1 e explicaram conjuntamente 84,8% da variância total, sendo 58,3% atribuídos ao PC1, 18,0% ao PC2 e 8,6% ao PC3. Os dois primeiros componentes concentraram, portanto, 76,3% da variabilidade dos dados, permitindo representar adequadamente a principal estrutura hidroquímica da bacia no plano bidimensional do biplot (Tabela 3; Figura 3). O PC1 representou o principal gradiente hidroquímico espacial da bacia e apresentou cargas positivas elevadas para cloreto (0,971), oxigênio dissolvido (0,970), pH (0,921), amônia (0,890), TDS (0,876), condutividade elétrica (0,864), turbidez (0,849), cor verdadeira (0,826) e temperatura (0,783). A contribuição simultânea dessas variáveis demonstra que a maior parcela da variabilidade entre os pontos está associada a mudanças coordenadas na mineralização, oxigenação, material particulado, nutrientes e características ópticas da água. Os maiores scores positivos no PC1 concentraram-se nos setores inferiores da bacia, enquanto os pontos dos setores superiores se distribuíram predominantemente no sentido oposto, evidenciando uma organização longitudinal do sistema. Esse eixo deve ser interpretado como um gradiente hidroquímico, e não diretamente como gradiente de degradação ambiental, uma vez que diferenças de turbidez, concentração iônica, matéria orgânica e oxigenação também podem decorrer de processos naturais de mistura de águas, transporte de sedimentos e conectividade hidrológica característicos dos sistemas amazônicos (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Jenkins *et al.*, 2025).

O PC2 explicou 18,0% da variância e apresentou maior associação positiva com ferro (0,802), manganês (0,628) e alumínio (0,591), além de contribuição positiva da cor verdadeira (0,458) e amônia

(0,401). Em sentido oposto, a temperatura apresentou carga de −0,526. Esse componente evidencia uma dimensão hidroquímica distinta do gradiente longitudinal predominante no PC1, relacionada principalmente à distribuição dos elementos metálicos. A maior contribuição de Fe, Mn e Al para esse eixo é coerente com a influência de processos de intemperismo, características pedogeoquímicas, condições redox e interações água–sedimento sobre a mobilidade desses elementos em ambientes amazônicos (Salomão *et al.*, 2025). O PC3 respondeu por 8,6% da variância e foi caracterizado principalmente pelo manganês, que apresentou carga positiva de 0,768, enquanto o alumínio apresentou contribuição negativa moderada (−0,461). Embora esse componente tenha autovalor superior a 1, sua contribuição foi substancialmente menor que a dos dois primeiros eixos. Assim, a interpretação ambiental concentrou-se principalmente no plano PC1–PC2, que reuniu mais de três quartos da variabilidade total e apresentou a separação espacial mais evidente entre os pontos amostrais.

Figura 3. Biplot da Análise de Componentes Principais dos parâmetros físico-químicos da água da bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.



As setas representam as cargas (loadings) das variáveis e os pontos representam os scores das amostras. Os componentes PC1 e PC2 explicaram 58,3% e 18,0% da variância, respectivamente, correspondendo conjuntamente a 76,3% da variabilidade total.
Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 3. Cargas das variáveis físico-químicas nos três primeiros componentes principais da água da bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil

Variável	PC1	PC2	PC3
pH	**0,92**	−0,13	0,36
Oxigênio dissolvido (mg L^{-1})	**0,97**	0,01	−0,11
Temperatura (°C)	**0,78**	−0,52	−0,06
Condutividade elétrica (µS cm^{-1})	**0,86**	−0,19	−0,14
Turbidez (UNT)	**0,84**	0,16	−0,24
TDS (mg L^{-1})	**0,87**	−0,38	0,09
Alumínio (mg L^{-1})	−0,48	0,59	−0,46
Amônia (mg L^{-1})	**0,89**	0,40	−0,18
Cloreto (mg L^{-1})	**0,97**	0,12	−0,03
Cor verdadeira (mg Pt L^{-1})	**0,82**	0,45	0,04
Ferro (mg L^{-1})	0,33	**0,80**	−0,11
Manganês (mg L^{-1})	0,08	**0,62**	**0,76**
Autovalor	**7,40**	**2,28**	**1,09**
Variância explicada (%)	**58,3**	**18**	**8,6**
Variância acumulada (%)	**58,3**	**76,3**	**84,8**

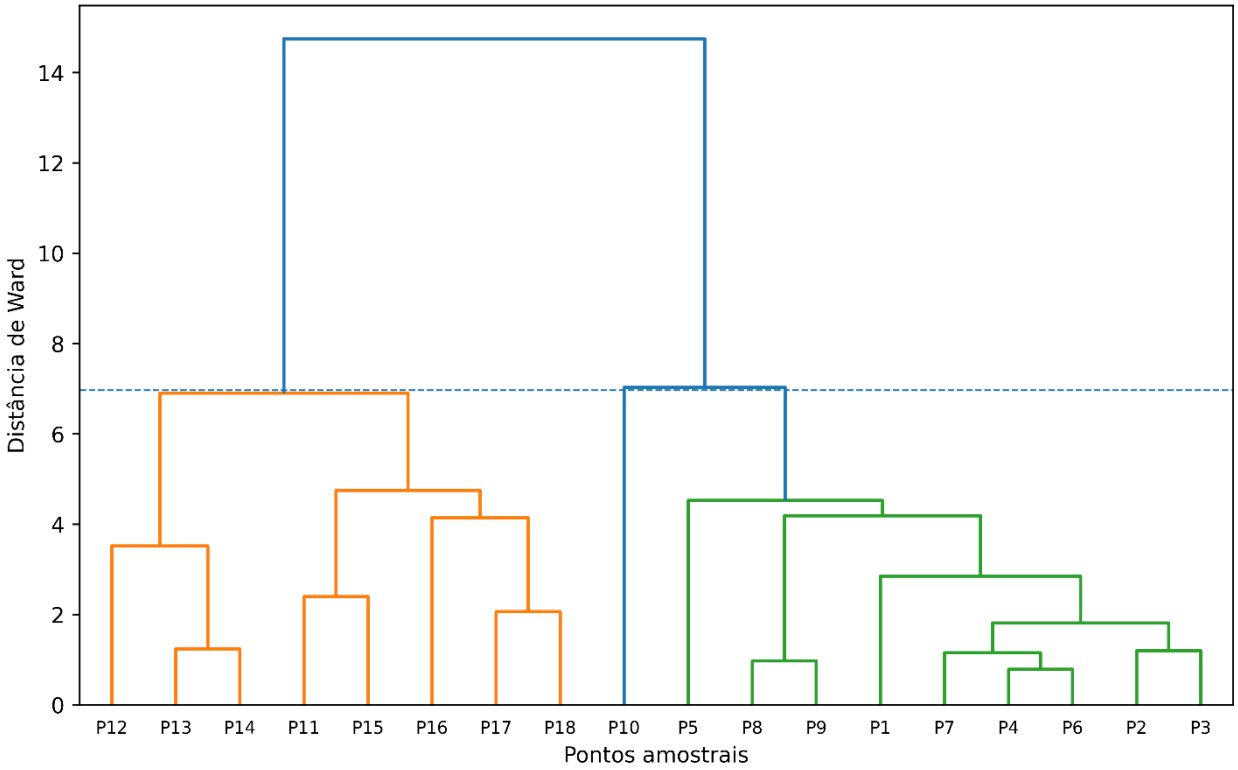
Valores em negrito indicam cargas com loading ≥0,60.
Fonte: Elaborada pelos autores

A distribuição dos scores no biplot confirma a estruturação espacial indicada pelas análises descritivas e de correlação. Variáveis como cloreto, oxigênio dissolvido, pH, amônia, TDS, condutividade, turbidez e cor verdadeira apresentaram vetores orientados predominantemente no mesmo sentido do PC1, demonstrando forte covariação e participação conjunta no principal gradiente da bacia. Em contraste, Fe, Mn e Al apresentaram maior projeção sobre o PC2, indicando comportamento parcialmente independente do conjunto de variáveis responsável pela diferenciação longitudinal. Essa separação reforça a existência de mais de um processo hidroquímico estruturando a qualidade da água do rio Macacoari, com um primeiro eixo relacionado à organização longitudinal da bacia e um segundo associado principalmente à dinâmica dos elementos metálicos. A aplicação de abordagens multivariadas tem demonstrado elevada utilidade para discriminar esses padrões em sistemas aquáticos amazônicos, nos quais múltiplos controles ambientais atuam simultaneamente sobre a composição da água (Costa *et al.*, 2020; Mesquita *et al.*, 2026).

3.4 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO

A Análise de Agrupamento Hierárquico, realizada com os dados padronizados, distância euclidiana e método Ward.D^2, identificou três grupos principais de pontos amostrais e apresentou estrutura espacial concordante com aquela observada na PCA (Figura 4). A configuração resultante separou P1–P9, P10 e P11–P18, evidenciando compartimentos com características físico-químicas distintas ao longo da bacia.

Figura 4. Dendrograma da Análise de Agrupamento Hierárquico dos pontos amostrais da bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil, obtido a partir dos parâmetros físico-químicos padronizados, utilizando distância euclidiana e método Ward.D². Foram identificados três agrupamentos principais: Grupo 1 (P11–P18), Grupo 2 (P1–P9) e Grupo 3 (P10).



Fonte: Elaborada pelos autores

O P10 foi separado dos demais pontos e constituiu um grupo isolado, demonstrando condição hidroquímica particular. Nesse ponto foram registrados pH de 6,68, oxigênio dissolvido de 4,1 mg L^{-1}, condutividade elétrica de 12,6 µS cm^{-1}, turbidez de 17,6 UNT, cor verdadeira de 201 mg Pt L^{-1}, Fe de 0,78 mg L^{-1} e Mn de 0,368 mg L^{-1}. A concentração de manganês correspondeu ao maior valor registrado entre os 18 pontos amostrais, enquanto Fe e cor verdadeira também apresentaram concentrações elevadas em relação a grande parte da bacia. Esse conjunto de características explica sua individualização na HCA e indica a influência de processos locais distintos daqueles que estruturaram os demais agrupamentos. Em ambientes amazônicos, a distribuição de Fe e Mn pode ser condicionada pelo intemperismo, pelas características pedogeoquímicas e por processos de mobilização e retenção associados às condições redox e à interação água–sedimento, podendo gerar elevada variabilidade espacial mesmo em pontos relativamente próximos (Salomão *et al.*, 2025). O terceiro compartimento reuniu P11–P18, abrangendo todos os cinco pontos previamente definidos como diretamente influenciados pelo rio Amazonas, P14–P18. Em comparação com P1–P9, esse grupo apresentou tendência a maiores valores de pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira. A inclusão de P11–P13 no mesmo agrupamento de P14–P18 indica, contudo, que a mudança hidroquímica observada no setor inferior não se restringe exclusivamente aos

pontos classificados a priori como diretamente influenciados pelo rio Amazonas. O padrão sugere o estabelecimento progressivo de condições físico-químicas semelhantes ainda antes do trecho de contato mais direto, possivelmente refletindo a transição longitudinal e o aumento da conectividade hidrológica na porção inferior da bacia.

A concordância entre HCA e PCA reforça essa interpretação. Enquanto o primeiro componente principal concentrou as maiores cargas de cloreto, oxigênio dissolvido, pH, amônia, TDS, condutividade, turbidez e cor verdadeira, o dendrograma separou os pontos justamente segundo a variação conjunta dessas características. Assim, a heterogeneidade espacial da água no rio Macacoari não resulta da resposta isolada de uma única variável, mas da organização conjunta de diferentes propriedades físico-químicas ao longo do sistema hidrográfico. Resultados semelhantes têm sido observados em estudos multivariados realizados em ambientes amazônicos, nos quais PCA e HCA permitem distinguir compartimentos hidroquímicos resultantes da interação entre geologia, características da paisagem, conectividade hidrológica e pressões antrópicas (Costa *et al.*, 2020; Salomão *et al.*, 2025; Mesquita *et al.*, 2026).

3.5 INFLUÊNCIA DO RIO AMAZONAS

A comparação entre os pontos sem influência direta do rio Amazonas (P1–P13) e aqueles localizados no setor definido a priori como diretamente influenciado pelo sistema amazônico (P14–P18) revelou diferenças físico-químicas consistentes entre as duas porções da bacia (Tabela 4). Considerando as comparações simultâneas e o controle da taxa de falsas descobertas pelo procedimento de Benjamini–Hochberg, nove parâmetros apresentaram diferenças significativas entre os setores: pH, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio, temperatura, condutividade elétrica, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira. Em conjunto, esses resultados evidenciam uma mudança na composição hidroquímica em direção à porção inferior da bacia.

Tabela 4. Comparação dos parâmetros físico-químicos da água entre pontos sem e com influência direta do rio Amazonas na bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.

Parâmetro	Sem influência (n = 13)	Com influência (n = 5)	Diferença (%)	p ajustado
pH	5,58 ± 0,92	6,74 ± 0,08	20,7	**0,0044**
OD (mg L^{-1})	3,94 ± 1,01	6,86 ± 1,15	74,2	**0,0069**
OD (% sat.)	51,84 ± 13,70	92,10 ± 15,18	77,7	**0,003**
Temperatura (°C)	29,75 ± 0,75	30,86 ± 0,29	3,7	**0,0333**
Condutividade (µS cm^{-1})	15,20 ± 14,87	40,22 ± 4,35	164,6	**0,0451**
Turbidez (UNT)	12,16 ± 6,34	43,26 ± 21,65	255,8	**0,0451**
TDS (mg L^{-1})	10,69 ± 9,90	23,00 ± 2,24	115,1	0,1093
Al (mg L^{-1})	0,041 ± 0,030	0,026 ± 0,019	−37,1	0,5083
Amônia (mg L^{-1})	0,098 ± 0,086	0,354 ± 0,160	262,4	**0,0368**
Cloreto (mg L^{-1})	3,92 ± 0,56	5,20 ± 0,56	32,5	0,0097
Cor verdadeira (mg Pt L^{-1})	86,46 ± 48,92	204,00 ± 53,54	135,9	**0,0104**
Fe (mg L^{-1})	0,468 ± 0,247	0,598 ± 0,497	27,9	0,6004
Mn (mg L^{-1})	0,115 ± 0,082	0,084 ± 0,019	−26,5	0,6004

Valores em negrito indicam diferença significativa ($p < 0,05$).
Fonte: Elaborada pelos autores

O pH aumentou de 5,58 ± 0,92 nos pontos sem influência direta para 6,74 ± 0,08 nos pontos sob influência do rio Amazonas, correspondendo a incremento de 20,7% (p ajustado = 0,0044). O elevado tamanho de efeito observado (Hedges g = 1,38) demonstra uma separação expressiva entre os dois setores. Esse comportamento indica redução da acidez em direção à porção inferior da bacia e acompanha o gradiente identificado pelas análises multivariadas. Em sistemas amazônicos, variações espaciais de pH podem resultar da interação entre características geológicas, matéria orgânica dissolvida, composição iônica e mistura entre massas de água hidroquimicamente distintas, especialmente em áreas submetidas à conectividade entre tributários e grandes canais fluviais (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Jenkins *et al.*, 2025). As diferenças no oxigênio dissolvido foram ainda mais pronunciadas. A concentração média aumentou de 3,94 ± 1,01 para 6,86 ± 1,15 mg L^{-1}, correspondendo a acréscimo de 74,2% (p ajustado = 0,0069), enquanto a saturação passou de 51,84 ± 13,70% para 92,10 ± 15,18% (p ajustado = 0,0030). Em ambas as comparações, o coeficiente rank-biserial foi igual a 1,0, indicando separação completa entre as distribuições dos dois grupos. Embora essas duas medidas expressem aspectos diretamente relacionados da disponibilidade de oxigênio na água, sua concordância reforça a existência de condições de oxigenação distintas entre os setores superior/intermediário e inferior da bacia.

A condutividade elétrica apresentou aumento de 15,20 ± 14,87 para 40,22 ± 4,35 µS cm^{-1}, equivalente a 164,6% (p ajustado = 0,0451). Esse incremento indica maior concentração relativa de espécies iônicas dissolvidas no setor inferior e é compatível com a mudança hidroquímica decorrente da mistura de águas com diferentes composições. A condutividade constitui uma variável particularmente sensível à mineralização e à composição iônica dos ambientes aquáticos amazônicos,

podendo responder tanto às características geológicas das bacias quanto à conectividade hidrológica e às alterações na paisagem (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025). A turbidez apresentou uma das maiores diferenças relativas entre os dois setores, aumentando de 12,16 ± 6,34 para 43,26 ± 21,65 UNT, correspondendo a incremento de 255,8% (p ajustado = 0,0451; Hedges g = 2,44). A magnitude do efeito evidencia uma diferença acentuada na quantidade de material responsável pela dispersão da luz na coluna d'água. Esse comportamento é particularmente relevante no setor conectado ao rio Amazonas, cuja elevada carga de sedimentos em suspensão constitui uma das características hidrogeoquímicas mais marcantes do sistema de águas brancas. A transferência de sedimentos entre o canal principal, tributários e ambientes hidrologicamente conectados pode modificar significativamente as propriedades ópticas e físico-químicas das águas adjacentes (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Jenkins *et al.*, 2025).

A amônia também apresentou forte diferenciação espacial, aumentando de 0,098 ± 0,086 para 0,354 ± 0,160 mg L^{-1}, equivalente a 262,4% (p ajustado = 0,0368; Hedges g = 2,23). Esse aumento ocorreu paralelamente à elevação da turbidez, cor verdadeira e condutividade, sugerindo que a porção inferior da bacia recebe águas com composição biogeoquímica distinta. Entretanto, a concentração de amônia pode responder simultaneamente à decomposição da matéria orgânica, à dinâmica de nutrientes, às condições de oxirredução e a fontes locais, não sendo possível atribuir sua variação exclusivamente à influência do rio Amazonas com base em uma única campanha amostral.

Já o cloreto aumentou de 3,92 ± 0,56 para 5,20 ± 0,56 mg L^{-1}, correspondendo a incremento de 32,5% (p ajustado = 0,0097; Hedges g = 2,17). Apesar das baixas concentrações absolutas, sua variação foi consistente entre os setores e acompanhou o aumento da condutividade elétrica. Por apresentar comportamento relativamente conservador em ambientes fluviais, o cloreto pode contribuir para a identificação de processos de mistura e diluição entre massas de água. No sistema amazônico, seus fluxos e concentrações variam entre sub-bacias e ao longo do ciclo hidrológico em resposta às fontes de solutos e às mudanças de descarga (Drake *et al.*, 2021).

A cor verdadeira apresentou aumento de 86,46 ± 48,92 para 204,00 ± 53,54 mg Pt L^{-1}, correspondendo a 135,9% (p ajustado = 0,0104; Hedges g = 2,23). Esse padrão indica alteração substancial na fração dissolvida responsável pelas propriedades ópticas da água no setor inferior. A cor verdadeira em ambientes amazônicos está associada principalmente à matéria orgânica dissolvida cromófora e às interações entre substâncias húmicas e elementos dissolvidos, podendo variar amplamente em função da origem das águas, da conectividade hidrológica e do transporte de matéria orgânica entre os diferentes compartimentos da paisagem (Jenkins *et al.*, 2025). Já os sólidos totais dissolvidos apresentaram média de 10,69 ± 9,90 mg L^{-1} nos pontos sem influência direta e 23,00 ±

2,24 mg L^{-1} no setor influenciado, representando aumento de 115,1%. Apesar dessa diferença relativa, o resultado não permaneceu significativo após a correção para comparações múltiplas (p ajustado = 0,1093). Da mesma forma, não foram observadas diferenças significativas para Al (p ajustado = 0,5083), Fe (p ajustado = 0,6004) e Mn (p ajustado = 0,6004). A ausência de um padrão semelhante ao observado para cloreto, condutividade, turbidez e amônia indica que esses elementos metálicos apresentam distribuição espacial mais dependente de controles locais, incluindo mineralogia, intemperismo, processos redox e interação água–sedimento. Esse comportamento tem sido descrito em bacias da Amazônia Oriental, nas quais Fe e Mn apresentam elevada variabilidade espacial relacionada à geologia, hidrologia e características da paisagem (Salomão *et al.*, 2025).

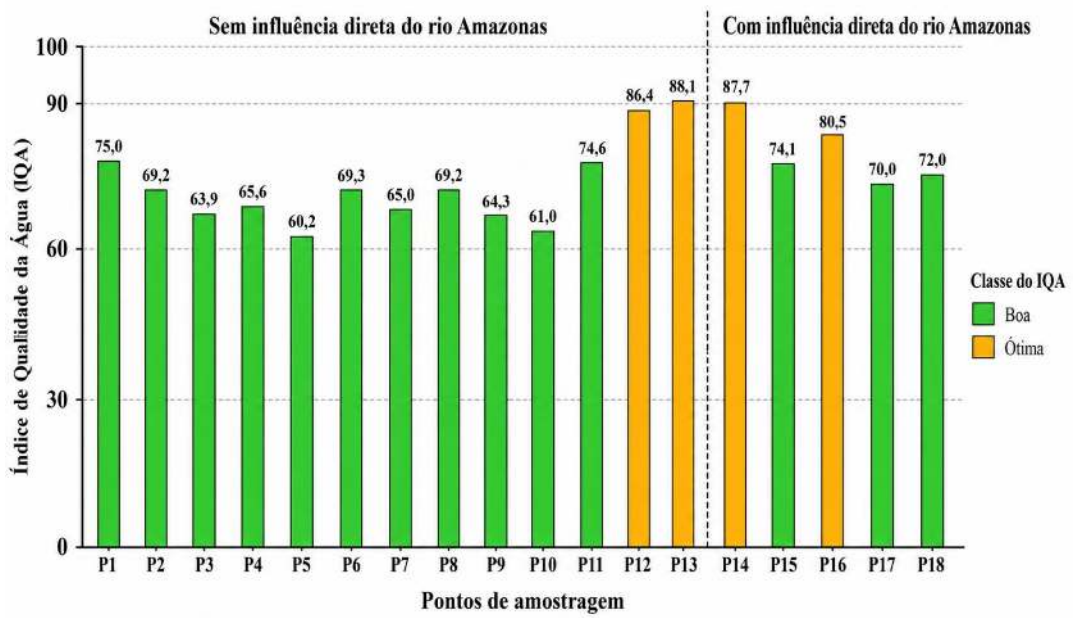
Em conjunto, a magnitude e a consistência das diferenças observadas para múltiplos parâmetros sustentam a existência de um gradiente hidroquímico associado à porção inferior da bacia do rio Macacoari. Os maiores valores de pH, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira nos pontos P14–P18 são compatíveis com maior conectividade hidrológica com o rio Amazonas e convergem com a estrutura espacial identificada pela PCA e pela HCA. Contudo, considerando que os dados foram obtidos em uma única campanha amostral, esses resultados devem ser interpretados como associações espaciais compatíveis com a influência do sistema amazônico, sem estabelecer relação causal definitiva. A intensidade dessa conectividade pode variar ao longo do pulso hidrológico, tornando necessária a realização de campanhas em diferentes períodos do ciclo sazonal para determinar sua persistência e magnitude.

3.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

O IQA adaptado variou de 60,2 a 88,1, com média geral de 72,0 ± 8,8 entre os 18 pontos amostrais (Figura 5). De acordo com as classes adotadas, 14 pontos (77,8%) foram enquadrados na categoria boa e quatro pontos (22,2%) na categoria ótima, não sendo registrados pontos classificados como razoáveis, ruins ou péssimos. O menor valor foi observado em P5 (60,2), enquanto os maiores ocorreram em P13 (88,1), P14 (87,7), P12 (86,4) e P16 (80,5). A distribuição dos valores demonstra que os melhores índices não se concentraram exclusivamente no setor definido como sob influência direta do rio Amazonas, uma vez que P12 e P13, pertencentes ao grupo P1–P13, também apresentaram classificação ótima. Nos pontos sem influência direta do rio Amazonas (P1–P13), o IQA apresentou média de 70,1 ± 8,8, enquanto nos pontos sob influência direta (P14–P18) a média foi de 76,9 ± 7,2. Embora o setor inferior tenha apresentado valor médio numericamente superior, a distribuição do IQA no grupo P1–P13 não atendeu plenamente ao pressuposto de normalidade. Dessa forma, a comparação entre os setores foi realizada pelo teste de Mann–Whitney, que não indicou diferença estatisticamente

significativa entre os grupos (U = 15,0; p = 0,0945). Assim, apesar do aumento médio observado em P14–P18, os resultados não sustentam uma diferença estatística do IQA entre os setores na campanha avaliada.

Figura 5. Índice de Qualidade da Água (IQA) nos 18 pontos amostrais da bacia do rio Macacoari, estado do Amapá, Brasil.



A linha vertical tracejada separa os pontos sem influência direta do rio Amazonas (P1–P13) daqueles considerados sob influência direta (P14–P18). As barras representam as classes de qualidade estabelecidas para o IQA adaptado.
Fonte: Elaborada pelos autores

A predominância das categorias boa e ótima indica que, sob a perspectiva integrada do IQA adaptado, a qualidade da água do rio Macacoari apresentou condição globalmente favorável durante o período amostrado. Entretanto, esse resultado deve ser interpretado em conjunto com os parâmetros físico-químicos individuais e com as análises multivariadas, uma vez que índices sintéticos podem atenuar respostas contrastantes entre variáveis ao integrá-las em um único valor ponderado. Costa *et al.* (2020), ao desenvolverem um sistema de indicadores de qualidade da água para a Amazônia brasileira, demonstraram que a capacidade discriminatória desses índices depende diretamente da seleção das variáveis e de sua adequação às características hidroquímicas regionais. Nesse sentido, a classificação predominantemente boa ou ótima observada no rio Macacoari não implica ausência de heterogeneidade ambiental, pois diferenças significativas entre os setores permaneceram evidentes para pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira. Esse contraste reforça a necessidade de interpretar índices de qualidade conjuntamente com a estrutura físico-química dos sistemas aquáticos, especialmente em ambientes amazônicos, onde geologia,

conectividade hidrológica, matéria orgânica, transporte de sedimentos e uso da terra podem produzir variações substanciais entre locais amostrais (Zanin *et al.*, 2024; Salomão *et al.*, 2025).

Embora os pontos P14–P18 tenham apresentado IQA médio numericamente superior ao observado em P1–P13, essa diferença não foi estatisticamente significativa (U = 15,0; p = 0,0945). Esse resultado indica que as alterações hidroquímicas associadas ao setor inferior não produziram uma mudança correspondente na classificação integrada da qualidade da água. A interpretação é coerente com a natureza multidimensional dos sistemas fluviais amazônicos, nos quais diferentes características físico-químicas podem responder simultaneamente, e em sentidos distintos, aos processos de mistura de águas, transporte de solutos e sedimentos e conectividade hidrológica (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021; Jenkins *et al.*, 2025). Assim, no rio Macacoari, o IQA sintetizou adequadamente a condição geral dos pontos, mas apresentou menor sensibilidade para discriminar o gradiente espacial identificado pela PCA, HCA e pelas comparações individuais entre os setores.

4 CONCLUSÕES

A bacia do rio Macacoari apresentou heterogeneidade espacial significativa na qualidade da água ao longo de seu gradiente longitudinal. Os pontos da porção inferior, especialmente aqueles definidos a priori como sob influência direta do rio Amazonas, apresentaram maiores valores de pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, amônia, cloreto e cor verdadeira, evidenciando organização hidroquímica distinta em relação aos setores superior e intermediário. A PCA e a HCA reforçaram essa diferenciação espacial, identificando um gradiente hidroquímico predominante e três compartimentos principais: P1–P9, P10 e P11–P18. O isolamento de P10 e o agrupamento de P11–P18 indicam que a transição hidroquímica da porção inferior se estabelece progressivamente ao longo da bacia. O IQA adaptado variou de 60,2 a 88,1, com 14 pontos classificados como de qualidade boa e quatro como ótima. Embora o setor sob influência direta do rio Amazonas tenha apresentado IQA médio superior, essa diferença não foi significativa (U = 15,0; p = 0,0945), indicando menor capacidade do índice integrado para discriminar o gradiente espacial identificado pelas análises físico-químicas e multivariadas. Assim, os resultados demonstram que a qualidade da água do rio Macacoari apresenta marcada estruturação espacial e que a maior conectividade hidrológica com o rio Amazonas está associada às características hidroquímicas da porção inferior. Como os dados correspondem a uma única campanha, recomenda-se ampliar o monitoramento para diferentes fases do ciclo hidrológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Amapá pelo suporte e apoio logístico, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amapá pelo apoio financeiro (Processo Nº 0036.1201.2160.0002/2024) e a primeira autora agradece a CAPES pela bolsa de estudo (Processo Nº. 88887.001054/2024-00).

REFERÊNCIAS

ALBERT, J. S.; CARNAVAL, A. C.; FLANTUA, S. G. A.; LOHMANN, L. G.; RIBAS, C. C.; RIFF, D.; CARRILLO, J. D.; FAN, Y.; FIGUEIREDO, J. J. P.; GUAYASAMIN, J. M.; HOORN, C.; MELO, G. H.; NASCIMENTO, N.; QUESADA, C. A.; ULLOA, C.; VAL, P.; ARIEIRA, J.; ENCALADA, A. C.; NOBRE, C. A. Human impacts outpace natural processes in the Amazon. Science, v. 379, n. 6630, eabo5003, 2023. DOI: 10.1126/science.abo5003.

ALMEIDA, M. S.; MONTAG, L. F. A.; ORTEGA, J. C. G.; JUEN, L.; MICHELAN, T. S.; SILVA, R. S.; SILVA, M. J.; MENDONÇA, M. B.; AMADOR, D. G.; PRUDENTE, B. S. Environmental predictors of fish assemblages in insular streams of the eastern Amazon. Aquatic Ecology, v. 60, art. 65, 2026. DOI: 10.1007/s10452-026-10308-z.

ANDERSON, E. P.; ENCALADA, A. C.; COUTO, T. B. A.; BEVERIDGE, C. F.; HERRERA-R, G. A.; HEILPERN, S. A.; ALMEIDA, R. M.; CAÑAS-ALVA, C.; CORREA, S. B.; DE SOUZA, L. S.; *et al.* A baseline for assessing the ecological integrity of Western Amazon rivers. Communications Earth & Environment, v. 6, art. 623, 2025. DOI: 10.1038/s43247-025-02530-8.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA; AWWA; WEF, 2017.

ATHAYDE, S.; UTSUNOMIYA, R.; VICTORIA-LACY, L.; BEVERIDGE, C.; JENKINS, C. N.; LAUFER, J.; HEILPERN, S.; OLIVAS, P.; ANDERSON, E. P. Interdependencies between Indigenous peoples, local communities, and freshwater systems in a changing Amazon. Conservation Biology, v. 39, n. 3, e70034, 2025. DOI: 10.1111/cobi.70034.

BEVERIDGE, C. F.; ESPINOZA, J.-C.; ATHAYDE, S.; CORREA, S. B.; COUTO, T. B. A.; HEILPERN, S. A.; JENKINS, C. N.; PILAND, N. C.; UTSUNOMIYA, R.; WONGCHUIG, S.; ANDERSON, E. P. The Andes–Amazon–Atlantic pathway: a foundational hydroclimate system for social–ecological system sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 121, n. 22, e2306229121, 2024. DOI: 10.1073/pnas.2306229121.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CABRERA, M.; CAPPARELLI, M. V.; ÑACATO-CH, C.; MOULATLET, G. M.; LÓPEZ-HERAS, I.; DÍAZ GONZÁLEZ, M.; ALVEAR-S, D.; RICO, A. Effects of intensive agriculture and urbanization on water quality and pesticide risks in freshwater ecosystems of the Ecuadorian Amazon. Chemosphere, v. 337, 139286, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139286.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2016. São Paulo: CETESB, 2017.

COSTA, H. C.; PEREIRA, S. F. P.; SANTOS, L. P.; OLIVEIRA, A. F. S.; SILVA, T. M. E.; SILVA, C. S. E.; ROCHA, R. M.; FREITAS, K. H. G.; SANTOS, D. C.; CRUZ, E. S. Chemometrics applied in the development of a water quality indicator system for the Brazilian Amazon. ACS Omega, v. 5, n. 51, p. 32899–32906, 2020. DOI: 10.1021/acsomega.0c03430.

COSTA, M. S.; VIANA, L. F.; CARDOSO, C. A. L.; ISACKSSON, E. D. G. S.; SILVA, J. C.; FLORENTINO, A. C. Landscape composition and inorganic contaminants in water and muscle tissue of Plagioscion squamosissimus in the Araguari River (Amazon, Brazil). Environmental Research, v. 208, 112691, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112691.

DRAKE, T. W.; HEMINGWAY, J. D.; KUREK, M. R.; PEUCKER-EHRENBRINK, B.; BROWN, K. A.; HOLMES, R. M.; *et al.* The pulse of the Amazon: fluxes of dissolved organic carbon, nutrients, and ions from the world's largest river. Global Biogeochemical Cycles, v. 35, e2020GB006895, 2021. DOI: 10.1029/2020GB006895.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; FLEISCHMANN, A. S.; PAPA, F.; PAIVA, R. C. D.; WONGCHUIG, S.; MELACK, J. M.; *et al.* Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. Reviews of Geophysics, v. 59, e2020RG000728, 2021. DOI: 10.1029/2020RG000728.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1981–2010. Brasília: INMET, 2020.

JENKINS, C. N.; ATHAYDE, S.; BEVERIDGE, C. F.; CORREA, S. B.; ESPINOZA, J.-C.; HEILPERN, S. A.; HERRERA-R, G. A.; VICTORIA-LACY, L.; OLIVAS, P.; OLIVEIRA, A.; PILAND, N. C.; UTSUNOMIYA, R.; ANDERSON, E. P. Global importance of Amazonian freshwaters. Frontiers in Ecology and the Environment, v. 23, e2868, 2025. DOI: 10.1002/fee.2868.

MESQUITA, K. F. C.; MACEDO, M. A. R.; LIMA, M. O.; AVIZ, M. D.; PEREIRA, J. A. R.; SANTOS, M. L. S. Avaliação integrada da qualidade da água por Análise de Componentes Principais e Índice de Poluição por Metais Pesados na Bacia do Murucutu, Belém (PA), Amazônia brasileira. Revista do Departamento de Geografia, v. 47, e242226, 2026. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2026.242226.

R Core Team (2025). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RIBAS, C. C.; SAWAKUCHI, A. O.; ALMEIDA, R. P.; PUPIM, F. N.; REGO, M. A.; BATISTA, R.; KNOWLES, L. L. The role of rivers in the origin and future of Amazonian biodiversity. Nature Reviews Biodiversity, v. 1, p. 14–31, 2025. DOI: 10.1038/s44358-024-00001-0.

SALOMÃO, G. N.; DALL'AGNOL, R.; ALMEIDA, G. S.; AMARANTE, R. T.; MELLO, G. M.; SILVA JÚNIOR, R. O.; GUIMARÃES, J. T. F.; SILVA, M. S.; FERREIRA, D. M.; PONTES, P. R. M.; SAHOO, P. K.; MARQUES, E. D.; SILVA FILHO, E. V. Effect of land use, geology, and seasonality on hydrogeochemical baseline variations in a watershed impacted by human activities in the eastern Amazon. Environmental Monitoring and Assessment, v. 197, n. 10, 1138, 2025. DOI: 10.1007/s10661-025-14565-7.

SALOMÃO, G. N.; DALL'AGNOL, R.; SAHOO, P. K.; ALMEIDA, G. S.; AMARANTE, R. T.; ZEFERINO, L. B.; LOPES, J. P. N.; SOUZA FILHO, P. W. M.; COSTA, N. Y. M.; GUIMARÃES, J. T. F.; *et al.* Changes in the surface water quality of a tropical watershed in the southeastern Amazon due to the environmental impacts of artisanal mining. Environmental Pollution, v. 329, 121595, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121595.

SOUZA, D. C. D.; VIANA, L. F.; KUMMROW, F.; CARDOSO, C. A. L.; LIMA, N. A.; LACERDA, I. A. R.; CRISPIM, B. A.; BARUFATTI, A.; DIAS, L. A. V.; FLORENTINO, A. C. Bioaccumulation of metals in fish collected from Macapá urban aquatic environments (Brazilian Amazon) and the risks to human health. Toxics, v. 13, n. 2, art. 67, 2025. DOI: 10.3390/toxics13020067.

THOMAZ, E. L.; NUNES, D. D.; WATANABE, M. Effects of tropical forest conversion on soil and aquatic systems in southwestern Brazilian Amazonia: a synthesis. Environmental Research, v. 183, 109220, 2020. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109220.

VAZ, J. M. Avaliação da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Macacoari, Amapá, Brasil. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2021.

VIANA, L. F.; KUMMROW, F.; CARDOSO, C. A. L.; LIMA, N. A.; SOLÓRZANO, J. C. J.; CRISPIM, B. A.; BARUFATTI, A.; FLORENTINO, A. C. High concentrations of metals in the waters from Araguari River lower section (Amazon biome): relationship with land use and cover, ecotoxicological effects and risks to aquatic biota. Chemosphere, v. 285, 131451, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131451.

ZANIN, P. R.; CAVALCANTE, R. B. L.; FLEISCHMANN, A. S.; PERES, C. A.; FERREIRA, D. M.; SERRÃO, E. A. O.; PONTES, P. R. M. Do protected areas enhance surface water quality across the Brazilian Amazon? Journal for Nature Conservation, v. 81, 126684, 2024. DOI: 10.1016/j.jnc.2024.126684.