



Produtividade primária e hidrologia de um sistema flúvio-estuarino amazônico da Ilha de Marajó - Pará (Amazonia Oriental)

Igor Charles Castor Alves¹, *Maamar El Robrini², Maria de Lourdes Souza Santos³

¹Doutor em Ciências, Universidade da Amazônia, Brasil. (igor.charles@unama.br)

²Doutor em Geologia Marinha, Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros, Faculdade de Oceanografia, Universidade Federal do Pará, Brasil. (*Autor correspondente: robrini@ufpa.br)

³Doutora em Oceanografia, Programa de Pós-Graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil. (mdelssantos@yahoo.com.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 05/08/2025 – Revisado em: 17/09/2025 – Aceito em: 20/10/2025

RESUMO

Este artigo analisa a produtividade primária e hidrologia do estuário superior do rio Arari (Ilha de Marajó). Foram avaliados os parâmetros físicos e químicos ($t^{\circ}\text{C}$, TDS, CE, transparência, maré, pH, nitrato, nitrito, N-amoniaco, fosfato, silicato). Coletas simultâneas de águas foram realizadas (chuvoso e seco de 2009 - sizígia), em 3 estações (1) foz do estuário do rio Arari, (2) Cachoeira do Arari e (3) Fazenda Murutucú. Os parâmetros foram analisados por métodos de estatística descritiva e multivariada, Análise de Componentes Principais (ACP) e Cluster. Observou-se diferenças entre os períodos, demonstrando influência da descarga fluvial, turbulência, precipitação e maré nas águas do estuário do rio Arari. Os valores de CE, máximo de $233 \mu\text{S.cm}^{-1}$ revelam que não há influência salina durante o ano. A transparência foi de 55 cm máximo/chuvoso) e 15 cm (seco), revelando a disponibilidade de luz como o principal fator limitante da produtividade primária. O nitrito e N-amoniaco predominam durante o chuvoso (mediana de $0,32 \mu\text{mol.L}^{-1}$ e $18,1 \mu\text{mol.L}^{-1}$). Durante o seco, a concentração de nitrato aumenta (mediana de $24,98 \mu\text{mol.L}^{-1}$). Concentrações elevadas de N-amoniaco em ambos os períodos, com máximo de $41,67 \mu\text{mol.L}^{-1}$, 12 vezes maior que o mínimo $3,33 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (seco). O fosfato foi $< 2 \mu\text{mol.L}^{-1}$ durante o ano, com mediana de $0,32 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (chuvoso) e $0,46 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (seco). O silicato teve valor maior no seco, com mediana de $33,7 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (chuvoso) e $75,88 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (seco). No chuvoso, a descarga de água do rio Arari promove a mistura das águas no rio.

Palavras-Chaves: Produtividade primária, ilha do Marajó, estuário do rio Arari, Amazônia.

Primary productivity and hydrology of an amazonian fluvial-estuarine system on marajó island - pará (eastern amazonia)

ABSTRACT

This article analyzes the primary productivity and hydrology of the upper estuary of the Arari River (Marajó Island). Physical and chemical parameters ($t^{\circ}\text{C}$, TDS, EC, transparency, tide, pH, nitrate, nitrite, ammoniacal N, phosphate, silicate) were evaluated. Simultaneous water samples were collected (rainy and dry seasons of 2009 - spring tide) at three stations: (1) mouth of the Arari River estuary, (2) Cachoeira do Arari, and (3) Murutucú Farm. The parameters were analyzed using descriptive and multivariate statistical methods, Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis. Differences were observed between the periods, demonstrating the influence of river discharge, turbulence, precipitation, and tides on the waters of the Arari River estuary. EC values, with a maximum of $233 \mu\text{S.cm}^{-1}$, reveal that there is no saline influence during the year. Transparency was 55 cm maximum/rainy) and 15 cm (dry), revealing light availability as the main limiting factor for primary productivity. Nitrite and ammoniacal N predominate during the rainy season (median of $0.32 \mu\text{mol.L}^{-1}$ and $18.1 \mu\text{mol.L}^{-1}$). During the dry season, the nitrate concentration increases (median of $24.98 \mu\text{mol.L}^{-1}$). High concentrations of ammoniacal N in both periods, with a maximum of $41.67 \mu\text{mol.L}^{-1}$, 12 times higher than the minimum $3.33 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (dry). Phosphate was $< 2 \mu\text{mol.L}^{-1}$ during the year, with a median of $0.32 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (rainy) and $0.46 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (dry). Silicate had a higher value in the dry season, with a median of $33.7 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (rainy) and $75.88 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (dry). In the rainy season, the discharge of water from the Arari River promotes the mixing of waters in the river.

Keywords: Primary productivity, Marajó Island, Arari River estuary, Amazon.

1. Introdução

Os cursos de água são essenciais para o fornecimento de serviços ecossistêmicos de abastecimento (água, pesca), reguladores (purificação da água, resiliência climática) e culturais (recreação e turismo), e estão enfrentando impactos (urbanização, agricultura e mudanças climáticas) (Reid *et al.*, 2019; Poikane *et al.*, 2021). Na interface entre os domínios continental e oceânico, os estuários são componentes essenciais do contínuo aquático terra-oceano, e desempenham um papel significativo nos ciclos biogeoquímicos, pois transformam e exportam grandes quantidades de carbono e nutrientes terrígenos dos rios para as águas marinhas (Laruelle *et al.*, 2024). Estes ecossistemas estão intimamente associados à dinâmica físico-química costeira, incluindo interações entre as variáveis biológicas, meteorológicas e oceanográficas (Bernardinho *et al.*, 2015). Entretanto a macromaré e o gradiente de salinidade regulam as variações da produção primária, devido ao aporte contínuo de nutrientes e intensificam a mistura das águas oriundas da drenagem continental e das águas oceânicas, aumentando a oxigenação (Bazin *et al.*, 2014).

Os ecossistemas estuarinos são considerados áreas onde ocorrem intensas transformações da matéria orgânica (MO), com liberação de nutrientes na sua forma inorgânica dissolvida. Os nutrientes inorgânicos dissolvidos são essenciais para o processo de produção primária nos estuários. De acordo com Santos *et al.* (2023), a distribuição espacial e temporal dos nutrientes é influenciada pelo regime sazonal e por oscilações de maré em um ambiente altamente dinâmico.

Nitrato, fosfato e sílica são nutrientes necessários para o crescimento das populações de fitoplâncton (Sabar *et al.*, 2024). O fitoplâncton, como produtor primário em ambientes aquáticos, desempenha função crucial, servindo como fonte vital de alimento para outros organismos marinhos (Rahmah *et al.*, 2022). A distribuição e a quantidade de fitoplâncton nas águas são influenciadas por fatores físicos, como temperatura da água, intensidade da luz, profundidade da água, nível de turbidez e disponibilidade de nutrientes (Nurmalitasari; Sudarsono, 2023). Altas concentrações de nitrato e fosfato nas águas costeiras levam ao aumento da abundância de fitoplâncton, e o silicato é necessário para a formação das paredes celulares das diatomáceas (Sabar *et al.*, 2024), que requerem ácido silícico para crescimento (Torres *et al.*, 2023).

A presença de fósforo nos ambientes aquáticos tem causado sérios danos à qualidade das águas e à biodiversidade (Zhang *et al.*, 2024). De acordo com os mesmos autores, a presença e o acúmulo de concentrações totais de fósforo em águas superficiais são o resultado de um efeito combinado de muitos fatores naturais e antropogênicos, e muitas vezes é difícil identificar intuitivamente a importância individual de cada fator em relação à poluição do ambiente aquático. As atividades urbanas contribuem por meio do lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais, enquanto o meio rural se destaca pela introdução de nutrientes como o fósforo e compostos nitrogenados nos corpos hídricos, decorrente de práticas agropecuárias, como o uso de fertilizantes na agricultura e das excreções provenientes da criação de animais, como a suinocultura, pecuária bovina, piscicultura, entre outras (Hansen; Feiden, 2025).

Os estuários, como continuação marinha entre a terra e o oceano, apresentam níveis elevados de nutrientes derivados principalmente da descarga fluvial, da atmosfera e também do oceano, o que regula a produção de fitoplâncton nos ecossistemas marinhos costeiros (Niu *et al.*, 2020). O aumento das cargas de nutrientes estimula a produtividade primária dos estuários (Woodland *et al.*, 2015).

A zona flúvio-estuarina estudada enquadra-se no estuário superior ou Zona do Rio (ZR), onde predomina a influência de águas fluviais e a maré dinâmica (salinidade é nula). Este artigo analisa a hidroquímica e a produtividade primária no sistema flúvio estuarino do rio Arari (Ilha de Marajó), no trecho (foz - Cachoeira do Arari), considerando as variações sazonais (chuvoso e seco) e espaciais dos parâmetros físicos, físico-químicos e biológico (clorofila *a*), que contempla os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS 6, 13, 14, 15, United Nations, 2025).

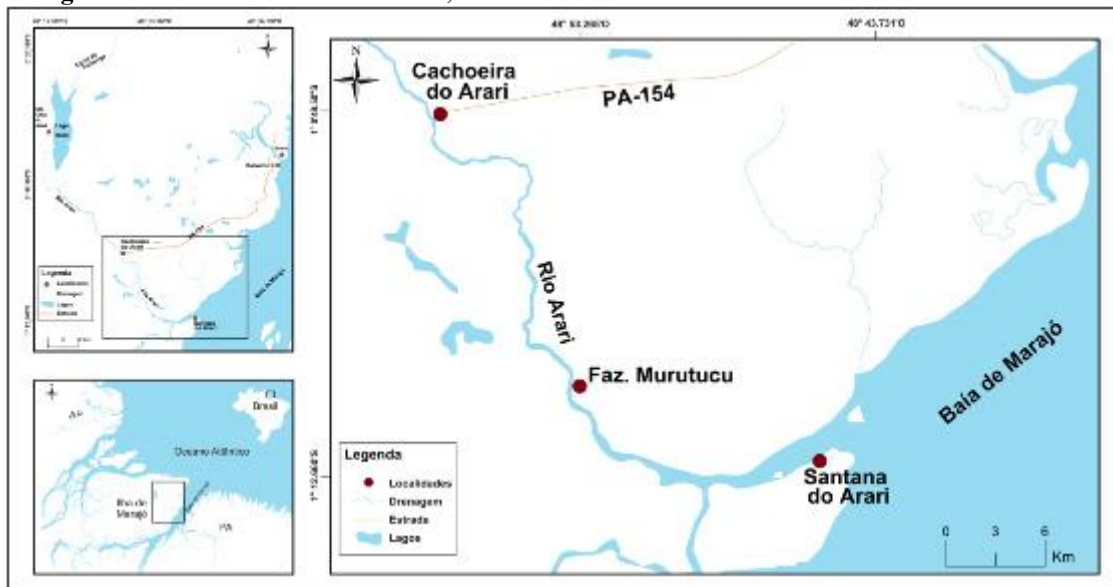
2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O rio Arari está localizado no Setor 2 – Marajó Oriental (SEMAS, 2020) (Figura 1), e distante de 70 km da capital Belém (Estado do Pará), a bacia hidrográfica do rio Arari posiciona-se na região de campos e totaliza 864 km², sendo caracterizada por inúmeros paleo canais, principalmente em sua parte noroeste, é o principal rio da região de campos da ilha de Marajó, percorre de forma meandrante cerca de 117 km desde sua nascente no lago Arari até sua foz no estuário do rio Pará (Baía de Marajó).

Figura 1 - Localização do rio Arari, com a sua fonte no Lago Arari e a sua foz no estuário do rio Pará.

Figure 1 - Location of the Arari River, with its source in Lake Arari and its mouth in the Pará River estuary.



Fonte: autores.
Sources: authors.

O município de Cachoeira do Arari é a única área urbana existente na região de investigação, ocupa uma superfície de 3.100,261 km² e sua população é de 24.064 habitantes, com densidade de 6,59 hab km² (IBGE, 2025). De acordo com o Governo do Pará (2021), os primeiros habitantes no local, foram os índios Aruans, iniciando a colonização com a penetração dos jesuítas, a partir de 1700. O nome Cachoeira originou-se do desnível do leito do rio Arari, que no verão, provoca uma precipitação de água em cachoeira, sendo uma denominação de origem tupi e significa “rio das araras”. A principal manifestação religiosa de Cachoeira do Arari é a festa de Nossa Senhora da Conceição, realizada e a dança de carimbó é a manifestação da cultura popular do município. Não há registros de indústrias na região, as principais atividades econômicas são a pecuária bovina e bubalina, extrativismo vegetal, a agricultura, como o arroz recém-introduzido e o turismo.

A ilha do Marajó apresenta topografia suave, com altitudes que não atingem 20 m, e em grande parte constitui uma extensa planície sujeita às inundações sazonais pelas chuvas e/ou cheias dos rios, os quais estão sob influência de maré. A região de estudo enquadra-se na Zona Climática Tórrida (muito quente), de domínio climático Equatorial úmido, litorâneo Amazônico (Eq'oam) (Novais; Machado, 2023). A temperatura média anual é de 27,3 °C e a precipitação é superior a 3.000 mm/ano (INMET, 2025). As chuvas são marcadas pelo movimento migratório latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), definido como o máximo na precipitação tropical ou como um cinturão tropical de nuvens convectivas, e sua posição varia sazonalmente de 9 °N a 2 °N no Oceano Atlântico Equatorial (Utida *et al.*, 2019). Existem dois períodos: chuvoso (dezembro

- maio) e seco (junho - novembro). Os ventos têm direção preferencial NE, com velocidade média de 7 m s^{-1} , e variação sazonal devido à migração do ZCIT. Em Cachoeira do Arari, a maré atinge amplitude máxima de 2.60 m e mínimo de 0.10 m (DHN, 2025).

2. Materiais e Metodologia

A metodologia foi baseada em coletas sistemáticas e periódicas, adotando as variações climáticas locais, para isso foram realizadas 4 (quatro) campanhas: 2 (duas) no período chuvoso (08/04/2009 e 24/05/2009) e 2 (duas) no seco (20/09/2009 e 02/11/2009). No trecho do rio Arari (43 km), compreendido entre a Vila de Santana do Arari e Cachoeira do Arari foram distribuídas 3 (três) estações de coleta, uma na Foz do rio Arari na Vila de Santana do Arari ($1^{\circ}12'3.16''\text{S}$ e $48^{\circ}45'47.32''\text{W}$), uma na Fazenda Murutucú ($1^{\circ}10'13.94''\text{S}$ e $48^{\circ}53'37.71''\text{W}$) e uma estação na cidade de Cachoeira do Arari ($1^{\circ}0'31.95''\text{S}$ e $48^{\circ}57'46.15''\text{W}$) (Figura 1). A amostragem de água foi realizada simultaneamente nas três estações de coleta de hora em hora durante 12 horas, fechando um pulso de maré a fim de observar as alterações provocadas pelas marés de enchente e de vazante, as amostras foram coletadas em águas de superfície e sempre em condições de maré de sizígia.

2.2 Amostragem de campo e procedimentos laboratoriais

Em campo foram determinados: temperatura (t °C), pH, condutividade elétrica (CE) e (TDS) com medidores multiparâmetros (HANNA HI9828). A concentração de oxigênio dissolvido (OD) é medida por meio de uma titulação iodométrica ou Método de Winkler (Strickland; Parsons, 1972).

Amostras de água foram coletadas diretamente na superfície com garrafa hidrológica do tipo Van Dorn, armazenadas em frascos de polietileno de 500 ml, refrigeradas e protegidas contra a luz, para posterior filtração. Posteriormente uma alíquota de 0,25L foi filtrada com filtros Whatman GF/F 0,45 mm e 47 mm para determinação da clorofila-*a*, seguindo Teixeira (1973). Outra alíquota de 100 mL foi filtrada em filtros pré-pesados para a determinação do material em suspensão. A determinação do material particulado em suspensão (MPS), sólidos totais (ST), sólidos totais orgânicos (ST orgânicos) e sólidos totais minerais (ST minerais) foram feitas segundo a metodologia da APHA (1995).

Para obtenção da concentração de nutrientes inorgânicos foi utilizado o método colorimétrico, usando um espectrofotômetro HACH-2500, para a determinação do fosfato, nitrito, nitrato e silicato foi empregada a metodologia de Grasshoff *et al.* (1983). O N-amoniacoal foi medido pelo método de Nessler, adaptado do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995).

2.3. Análise Estatística

Os dados obtidos foram analisados por métodos de estatística descritiva e multivariada, Análise de Componentes Principais (ACP) e Cluster. A transparência da água não foi inserida, por falta de dados na matriz de dados. Em determinados horários de coleta, não foi possível a detecção da profundidade do disco de Secchi. Os resultados dos meses de abril e maio são apresentados como “período chuvoso” e os resultados registrados nos meses setembro e novembro são chamados de “período seco”.

3. Resultados

3.1. Precipitação, ventos e marés

O ano de 2009 na Ilha de Marajó foi marcado por eventos extremos de chuva e seca durante o primeiro e segundo semestre, respectivamente. De acordo com Moraes *et al.* (2005) em Soure (Ilha de Marajó) a

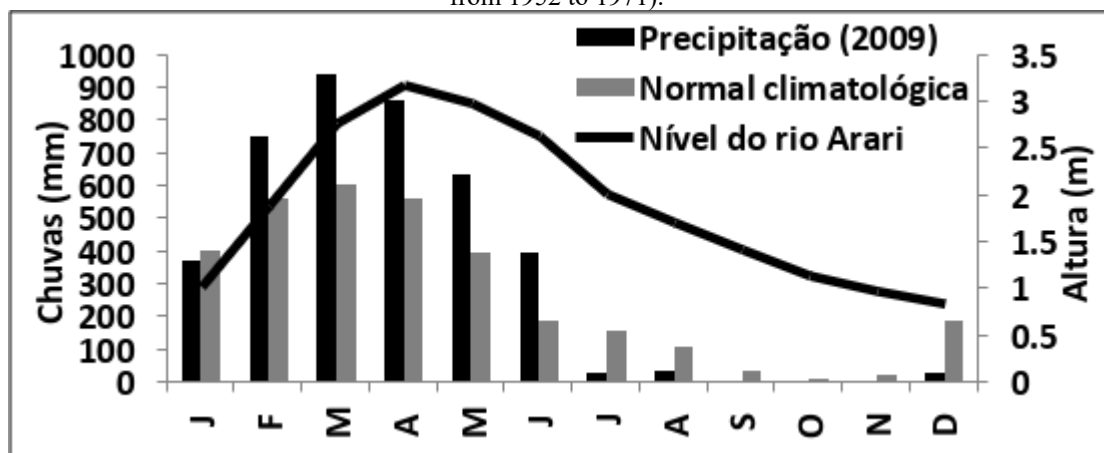
precipitação média anual é de 3.216 mm. De acordo com INMET (2025) para esta cidade no ano de 2009, foi registrado o valor de 4.058 mm, sendo 3.964 mm, ou seja 79,2% deste valor registrado no período de janeiro a junho e o restante apenas 94 mm, 20,8%, entre os meses de julho e dezembro (Figura 2).

Os resultados de velocidade do vento registrados na estação de Soure (Ilha de Marajó) revelam que no trimestre (SON) Setembro, Outubro, Novembro ocorreu à maior disponibilidade eólica ao longo do ano e as maiores velocidades com máximo de 7.0 m.s^{-1} em novembro, Já o trimestre com ventos mais fracos é o (MAM) Março, Abril, Maio, onde predominam ventos fracos tanto no interior da ilha quanto nas suas margens, mínimos de $1,31 \text{ m.s}^{-1}$ em maio e a média não passa dos 3 m.s^{-1} .

O regime hidrológico do rio Arari é definido pelos períodos de maior e menor precipitação, as cheias iniciam em dezembro ou janeiro e terminam em julho ou agosto, atingindo o máximo em abril ou maio e mínimo entre setembro e novembro, tal como os demais rios da ilha do Marajó, e do próprio rio Amazonas. Os resultados das medições das alturas hidrométricas no rio Arari, realizados por IDESP (1974), compreendem um período de 19 anos de observações diárias na estação Cachoeira do Arari (Figura 2).

Figura 2 - Variação da chuva acumulada mensal (2009) em Soure. Fonte: (INMET, 2025). Variação sazonal do nível da água no rio Arari (dados médios mensais obtidos no posto Cachoeira do Arari-período de 1952 - 1971).

Figure 2 - Variation in monthly accumulated rainfall (2009) in Soure. Source: (INMET, 2025). Seasonal variation in water level in the Arari River (monthly average data obtained at the Cachoeira do Arari station - period from 1952 to 1971).



Fonte: IDESP (1974).
Sources: IDESP (1974).

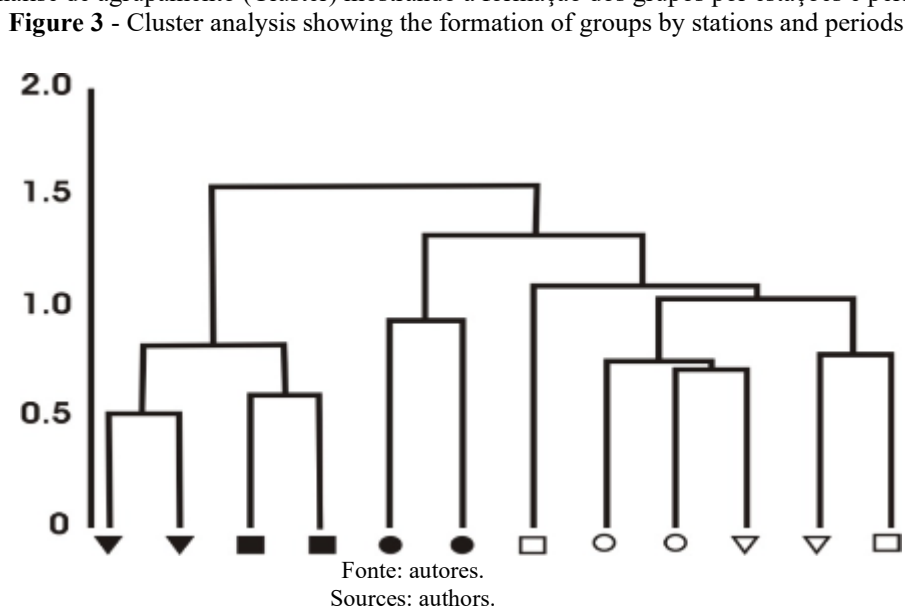
Em Cachoeira do Arari nos meses de abril e maio não foi observada a influência da maré, a amplitude de maré foi de apenas 0,05 m e 0,09 m, respectivamente, contudo não é observado o fluxo e refluxo da maré, o rio Arari apresenta um fluxo unidirecional em direção a sua foz, ou seja, a maré dinâmica não atinge este ponto do rio Arari. Por outro lado, nos meses de setembro e novembro a amplitude foi de 1,08 m e 1,22 m, respectivamente. A oscilação da maré no rio Arari teve um comportamento assimétrico, com predomínio da maré vazante, em Cachoeira do Arari a enchente dura em média 04 h 00 min e a vazante 08 h 00 min.

Na estação Murutucú a amplitude média de maré foi de 2,78 m no período chuvoso e de 3,01 m no seco, a enchente tem duração de 04 h 15 min e a vazante 07 h 45 min e na estação Santana a amplitude ficou entre 3,11 m (chuvoso) e 3,45 m (seco), com duração de 04 h 45 min para enchente e 07 h 15 min para vazante. O nível da água aumenta bruscamente no começo da enchente e sobe em torno de 1 m em apenas 20 min., em seguida o movimento de subida se torna mais suave e continua crescendo lentamente durante 2 ou 3 horas até a preamar.

3.2 análise de Agrupamento

A análise de agrupamento foi feita com os resultados médios obtidos em cada estação de coleta nas quatro campanhas. Dois grandes grupos formaram-se, o primeiro com os dados das estações de Cachoeira e Murutucú (período seco), e o segundo que engloba todos os resultados do chuvoso nas estações Cachoeira, Murutucú e Santana, mais os resultados do período seco da estação Santana (Figura 3).

Figura 3 - Análise de agrupamento (Cluster) mostrando a formação dos grupos por estações e períodos.



Os grupos formados salientam a variação sazonal existente nas águas do rio Arari, no período seco os dados da estação Cachoeira (setembro e novembro) ficaram agrupados o que demonstra a semelhança entre os resultados obtidos, este mesmo comportamento foi observado para as estações Murutucú e Santana. Por outro lado, no período chuvoso não foi observado esse mesmo padrão de comportamento entre as estações, os grupos formados foram entre estações diferentes.

3.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

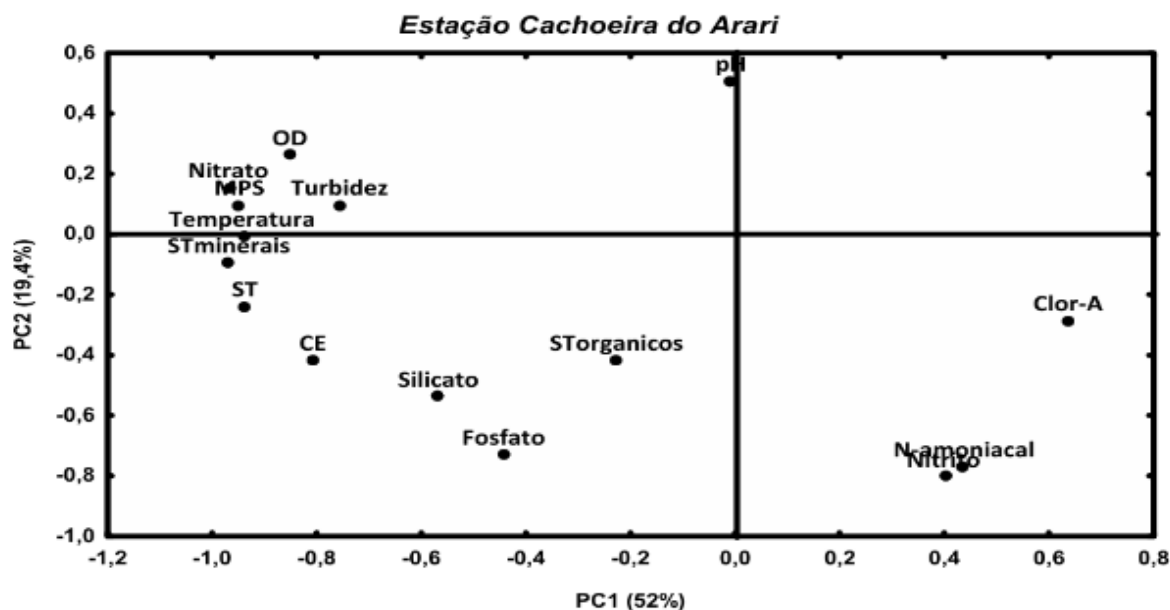
a) Estação Cachoeira do Arari

A análise de componentes principais com todos os parâmetros nos diferentes períodos de coleta na estação Cachoeira, mostra que as duas primeiras componentes (PC1 e PC2) juntas descrevem cerca de 72% da variância original. A PC1 explicou 52% da variância total e pode ser interpretada como um contraste entre, de um lado, nitrato (0,40), N-amoniaco (0,44) e clorofila *a* (0,64) e, de outro lado, *t* °C (-0,94), OD (-0,85), CE (-0,81), MPS (-0,95), turbidez (-0,75), ST (-0,94), STMineral (-0,97), nitrato (-0,87), fosfato (-0,44) e silicato (-0,57).

A relação direta entre a CE, MPS, turbidez, ST e STMineral destaca a forte ligação existente entre esses parâmetros. Além disso, a diminuição da CE pode ser relacionada com a diminuição dos íons de nitrato, fosfato e silicato (Figura 4).

Figura 4 - Componentes (PC1 e PC2) da Estação Cachoeira do Arari.

Figure 4 - Components (PC1 and PC2) of the Cachoeira do Arari Station.



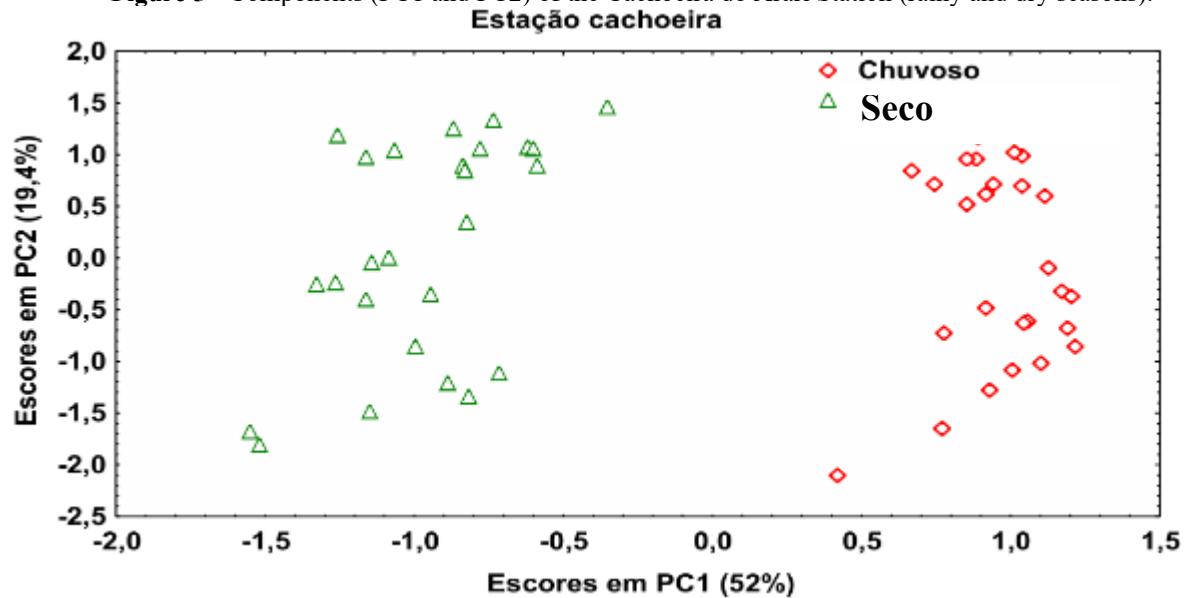
Fonte: autores.
Sources: authors.

Ao longo da PC1 a temperatura e o OD apresentaram uma relação inversa com o nitrito, N-amoniacal e clorofila-*a* o que indica a utilização do OD no processo de nitrificação. A clorofila-*a* foi favorecida de acordo com a elevação da $t^{\circ}\text{C}$, ou seja, aumentou quando a temperatura estava em seu máximo valor.

O pH e ST Orgânicos não apresentaram uma forte influência na primeira componente, mas destacaram-se na segunda (PC2), que explicou 19,4% da variância total, estes dois parâmetros variaram inversamente isso indica que o processo de remineralização da MO exerce alguma influência sobre o pH das águas do rio Arari. A correlação positiva entre o nitrito e amônia e inversa com o nitrato e OD ressalta o processo de nitrificação ocorrente no ciclo do nitrogênio.

De acordo com os escores para os dados durante os dois períodos sazonais em PC1 e PC2, estratificados de acordo com a sazonalidade da região, a separação total das amostras hidrológicas nos dois períodos, com o chuvoso deslocado na PC1 para a extremidade positiva e o seco deslocado para a extremidade negativa, indica a influência da sazonalidade na distribuição dos parâmetros abióticos e bióticos na estação Cachoeira (Figura 5).

Figura 5 - Componentes (PC1 e PC2) da Estação Cachoeira do Arari (períodos chuvoso e seco).
Figure 5 - Components (PC1 and PC2) of the Cachoeira do Arari Station (rainy and dry seasons).

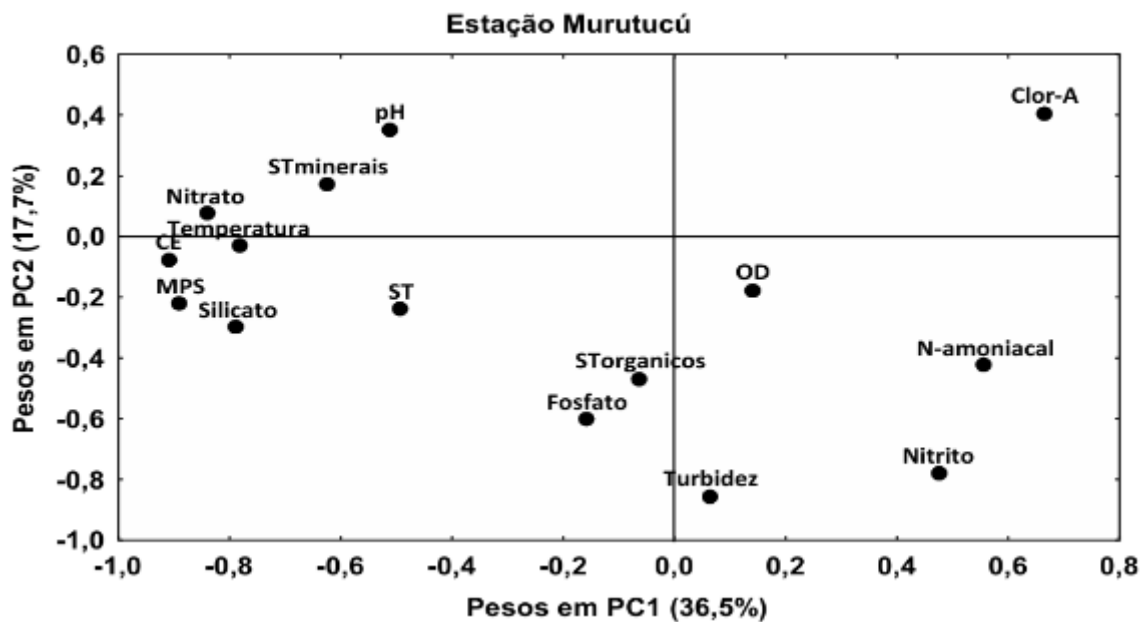


No período chuvoso os parâmetros que são favorecidos são clorofila-*a*, nitrito e N-amoniacal, enquanto que no seco foram favorecidos o OD, nitrato, MPS, turbidez, sólidos inorgânicos, ST, CE, silicato, fosfato, sólidos orgânicos.

b) Estação Murutucú

Na estação Murutucú, as duas primeiras componentes (PC1 e PC2) explicaram 54,2% da variância original. Na primeira componente, que explica cerca de 36,5% da variância total, foi observado um contraste entre o nitrito (0,48), o N-amoniacal (0,56) e a clorofila-*a* (0,67), com o pH (-0,51), a *t* °C (-0,78), a CE (-0,91), o MPS (-,89), os ST (-0,49), STMinerais (-0,62), o nitrato (-0,84) e o silicato (-0,79) (Figura 6).

Figura 6 - Componentes (PC1 e PC2) na Estação Murutucú.
Figure 6 - Components (PC1 and PC2) at Murutucú Station.



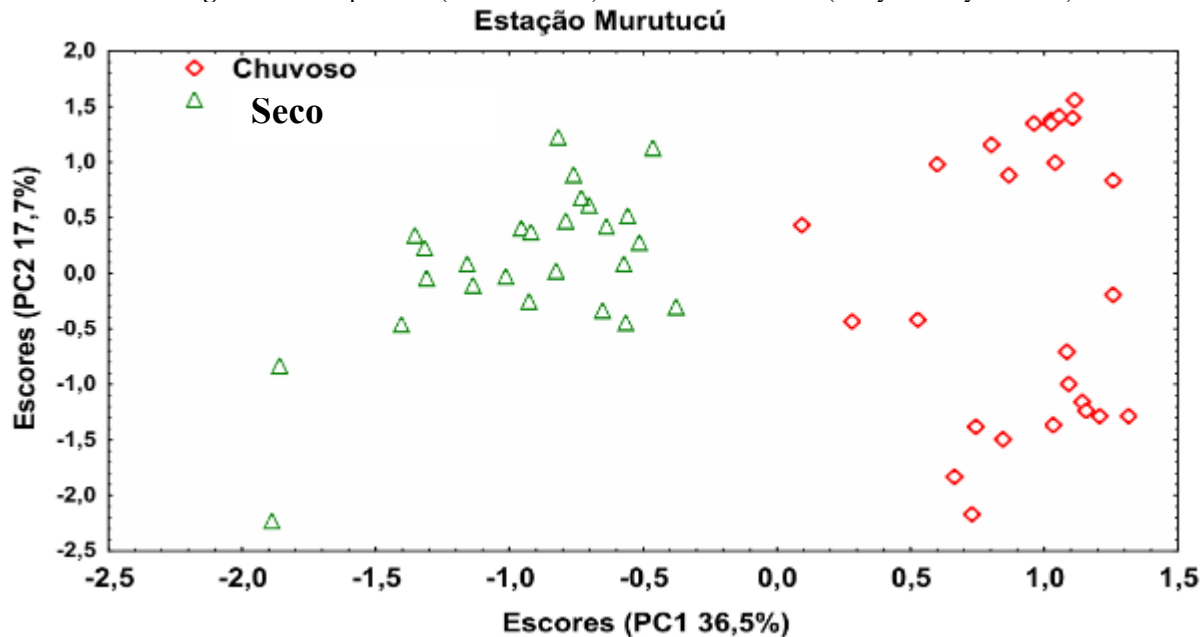
Fonte: autores.
 Sources: authors.

A correlação positiva entre o nitrito, o N-amoniacal e a clorofila-*a* também foi observada na estação Cachoeira, o que mostra ser o N-amoniacal o nutriente que favorece a produtividade primária em ambas as estações.

A segunda componente explica cerca de 17,7% da variância total e apresenta como principais elementos a clorofila-*a* (0,41), em contraste com a turbidez (-0,85), STorgânicos (-0,47), o nitrito (-0,78), o N-amoniacal (-0,43), e o fosfato (-0,60) a relação inversa da clorofila-*a* com turbidez, N-amoniacal e fosfato revela que a diminuição da turbidez favorece o desenvolvimento da biomassa fito planctônica, que utiliza esses nutrientes no processo fotossintético, o MPS não teve influência nessa segunda componente.

Os escores para os dados durante os dois períodos sazonais em PC1 e PC2, estratificados de acordo com a sazonalidade da região, revelam uma nítida separação sazonal, com os escores do período chuvoso na extremidade positiva e do seco na extremidade negativa da PC1 (Figura 7).

Figura 7 - Componentes (PC1 e PC2) na Estação Murutucú (períodos chuvoso e seco).
Figure 7 - Components (PC1 and PC2) at Murutucú Station (rainy and dry seasons).



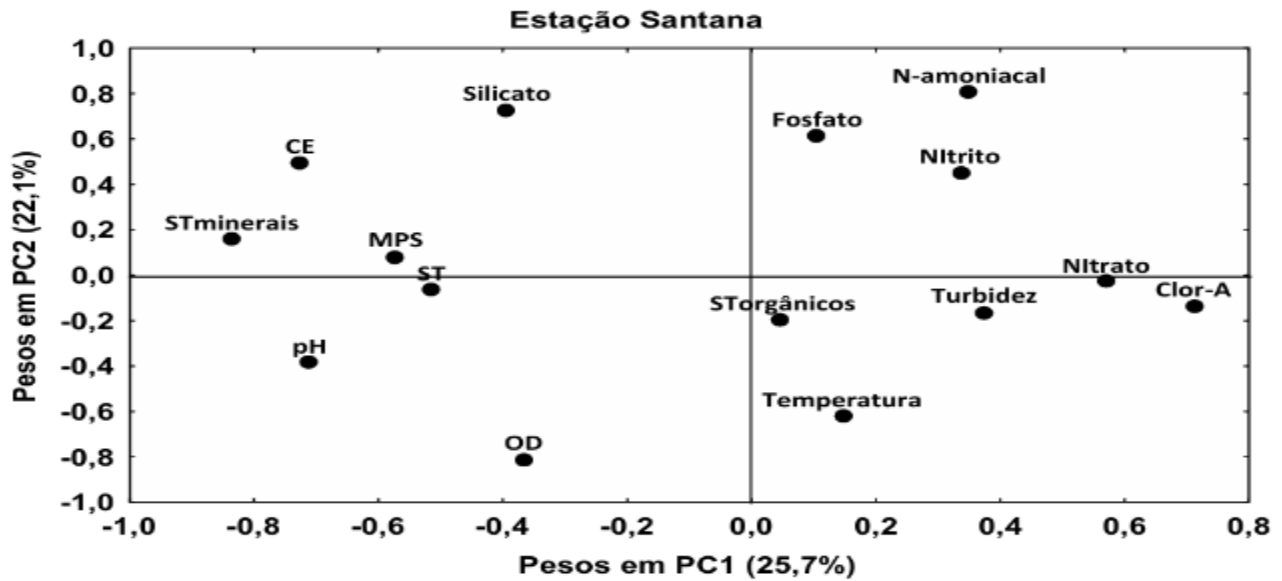
Fonte: autores.
 Sources: authors.

A distribuição na PC2 indica uma separação das amostras de abril e maio, revelando que existem diferenças significativas entre estes meses na estação Murutucú. Por outro lado, no período seco, observa-se um agrupamento das amostras dos meses de setembro e novembro, ou seja, as amostras representativas do seco apresentam características bastante semelhantes.

c) Estação Santana do Arari

Na estação Santana, as duas primeiras componentes (PC1 e PC2), explicam 47,8% da variância original. A primeira componente explicou 25,7% da variância total, é formada em seu lado negativo pelo pH (-0,71), CE (-0,73), MPS (-0,57), ST (-0,52) e STminerais (-0,84) e na extremidade positiva por nitrato (0,57) e clorofila-*a* (0,71) (Figura 8).

Figura 8 - Componentes (PC1 e PC2) na Estação Santana do Arari.
Figure 8 - Components (PC1 and PC2) at Santana do Arari Station.

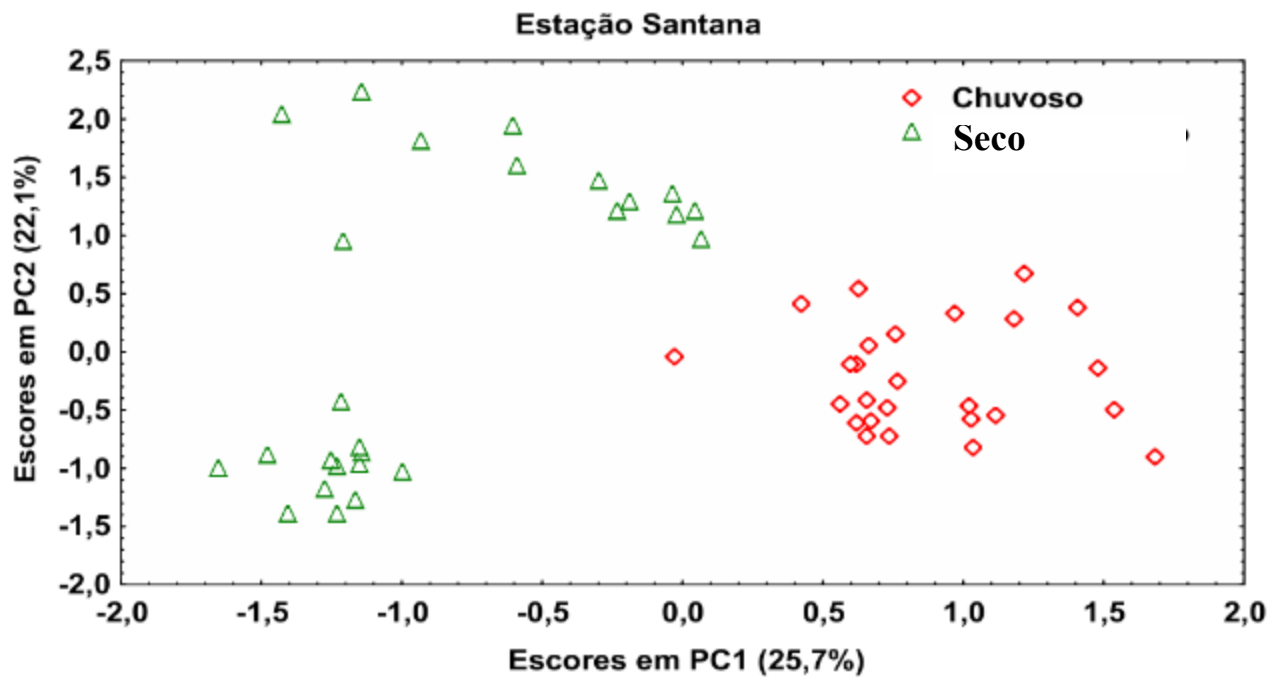


Fonte: autores.
 Sources: authors.

A correlação positiva entre a CE e os STminerais mostra a relação direta existente entre estes parâmetro nas águas do rio Arari, para o nitrato e a clorofila-*a* essa relação direta sugere que este nutriente favorece a produtividade primária, os valores máximos de OD nesta estação, podem estar influenciando a concentração de nitrato, por nitrificação e esta oxigenação é influenciada principalmente pela atmosfera, visto que, a clorofila-*a* e OD apresentam correlação inversa. A segunda componente explicou cerca de 22,1% e foi formada pela CE (0,50), nitrito (0,45), N-amoniacal (0,81), fosfato (0,61) e silicato (0,73), a relação direta entre esses parâmetros reforça a influência dos nutrientes no aumento da CE. A extremidade negativa foi formada por t °C (-0,62), e OD (-0,81).

Os escores, para os dados da estação Santana, durante os dois períodos sazonais em PC1 e PC2, estratificados de acordo com a sazonalidade da região, mostram que as amostras do chuvoso estão agrupadas na extremidade positiva da PC1 e as amostras do seco estão agrupadas na extremidade negativa, o que indica a influência da sazonalidade na distribuição dos parâmetros abióticos e bióticos (Figura 9).

Figura 9 - as componentes (PC1 e PC2) da Estação Santana do Arari (períodos chuvoso e seco).
Figure 9 - Components (PC1 and PC2) of the Santana do Arari Station (rainy and dry seasons).



Fonte: autores.
 Sources: authors.

No período chuvoso os parâmetros favorecidos são clorofila-*a*, nitrito e N-amoniacal, nitrato e fosfato e no seco foram favorecidos o OD, silicato, MPS, ST minerais, ST e CE, em relação a PC2 as amostras dos meses de abril e maio (chuvoso) tem pequena variação, ou seja, durante este período as águas apresentam características bastante homogêneas, enquanto que para o seco ocorre uma clara separação entre os dados obtidos nos meses de setembro e novembro, ou seja, as águas do rio Arari mudam suas características conforme a intensificação do período de estiagem.

A ACP indicou que as duas principais formas assimiladas no processo fotossintético são o N-amoniacal seguido do nitrato, esse comportamento pode ser observado ao longo do rio Arari, pois enquanto ocorre a diminuição de nitrato e N-amoniacal há aumento na concentração de nitrito.

3.4 Concentrações dos parâmetros hidroquímicos, nutrientes e Clorofila-*a* ao longo do rio Arari

As tabelas 1 e 2 mostram a estatística descritiva do período chuvoso e do seco obtidos no rio Arari (ilha de Marajó).

Tabela 1 - Número de valores (N), valores de medianas, mínimo, máximo, quartil inferior, quartil superior e desvio padrão (Desv Pad) dos parâmetros pH, t °C, OD, transparência, CE, MPS, ST, STorgânicos, STminerais, nitrato, nitrito, N-amoniacal, fosfato, silicato e clorofila *a*, obtidos no estuário do rio Arari durante o período chuvoso.

Table 1 - Number of values (N), median values, minimum, maximum, lower quartile, upper quartile, and standard deviation (SD) of the parameters pH, t °C, DO, transparency, EC, MPS, ST, STOrganic, STmineral, nitrate, nitrite, ammoniacal N, phosphate, silicate, and chlorophyll *a* obtained in the Arari River estuary during the rainy season.

Variáveis	N	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil superior	Desv Pad
pH	78	5,2	3,3	6,2	4,8	5,5	0,6

T°C	78	28,59	27	30,6	28	29,2	0,85
OD (ml.L ⁻¹)	78	3,64	2,98	5,29	3,4	4,24	0,52
Transparência (cm)	47	28	12	55	17	50	15,1
CE (mS.cm ⁻¹)	78	101,3	60,2	165	87,4	117	19,9
MPS (mg.L ⁻¹)	78	24,5	9	75	17	37	14,9
ST (mg.L ⁻¹)	78	101,5	33	567	73	133	100,4
STminerais (mg.L ⁻¹)	78	41	5	443	27	56	57,1
STorgânicos (mg.L ⁻¹)	78	57	11	472	39	81	75,8
Nitrato (mM.L ⁻¹)	78	6,72	0,1	21,4	3,5	10,37	4,54
Nitrito (mM.L ⁻¹)	78	0,32	0,07	1,04	0,15	0,61	0,28
N-amoniaco (mM.L ⁻¹)	78	18,1	4,4	41,7	11,7	27,8	9,0
Fosfato (mM.L ⁻¹)	78	0,32	0,03	0,92	0,22	0,6	0,24
Silicato (mM.L ⁻¹)	78	33,7	5,7	125,1	15,9	52	27,7
Clorofila-a (mg.m ⁻³)	78	17,4	4,2	38,3	12,8	23,8	7,8
NID:PID	78	85,3	9,1	1305,9	50,6	124,9	170,8

Tabela 2 - Número de valores (N), valores de medianas, mínimo, máximo, quartil inferior, quartil superior e desvio padrão (Desv Pad) dos parâmetros pH, t °C, OD, transparência, CE, MPS, ST, STorgânicos, STminerais, nitrato, nitrito, N-amoniaco, fosfato, silicato e clorofila *a*, obtidos no estuário do rio Arari durante o período seco.

Table 2 - Number of values (N), median values, minimum, maximum, lower quartile, upper quartile, and standard deviation (SD) of the parameters pH, t °C, DO, transparency, EC, MPS, ST, STorganic, STmineral, nitrate, nitrite, ammoniacal N, phosphate, silicate, and chlorophyll *a* obtained in the Arari River estuary during the dry season.

Variáveis	N	Mediana	Mínimo	Máximo	Quartil inferior	Quartil superior	Desv Pad
pH	78	5,60	4,40	7,88	5,20	6,85	1,05
T°C	78	29,88	28,00	31,10	29,10	30,20	0,70
OD (ml.L ⁻¹)	78	4,25	2,58	5,88	3,49	4,76	0,76
Transparência (cm)	49	15,0	8,0	45,5	10,5	28,0	11,3
CE (S.cm)	78	153,4	103,6	233,0	151,1	177,4	24,5
MPS (mg. L ⁻¹)	78	108,5	15,0	343,0	50,0	217,0	98,1
ST (mg. L ⁻¹)	78	221,0	99,0	635,0	165,0	407,0	157,3
STminerais (mg. L ⁻¹)	78	163,0	58,0	540,0	118,0	276,0	128,5
STorgânicos (mg.L ⁻¹)	78	53,5	15,0	501,0	32,0	84,0	73,6
Nitrato (mM.L ⁻¹)	78	24,98	2,73	71,53	7,90	67,23	27,11
Nitrito (mM.L ⁻¹)	78	0,173	0,055	0,727	0,109	0,300	0,125
N-amoniaco (mM.L ⁻¹)	78	12,22	3,33	30,00	7,22	17,22	6,83
Fosfato (mM.L ⁻¹)	78	0,46	0,13	1,30	0,35	0,70	0,26
Silicato (mM.L ⁻¹)	78	75,88	6,80	170,75	54,75	126,70	47,18
Clorofila-a (mg.m ⁻³)	78	8,91	3,94	25,81	7,22	12,25	3,90
NID:PID	78	68,3	16,6	630,6	31,4	175,8	127,8

Os parâmetros bióticos e abióticos variaram sazonalmente no rio Arari, durante o período chuvoso apresentaram valores maiores a Clorofila-*a*, nitrito, N-amoniaco e STorgânicos por outro lado durante o seco apresentaram os maiores valores a t °C da água, pH, OD, CE, MPS, ST, STminerais, nitrato, fosfato e silicato.

O valor mínimo de amplitude diária da temperatura foi de 0,6 °C em novembro (estação Santana) e máximo de 3,6 °C também em Santana em maio, a amplitude máxima de variação sazonal foi de 3,2 °C. Os valores de pH no rio Arari foram ácidos nos dois períodos, no seco ocorreu um gradiente crescente ao longo do rio (5,36; 6,28; 6,85) nas estações Cachoeira (CS), Murutucú (MS) e Santana (SS), respectivamente e indica que o pH é influenciado por águas ácidas provenientes do rio Arari e águas menos ácidas provenientes da Baía de Marajó, que durante o período seco sofre influência das águas do Oceano Atlântico, o valor intermediário na estação Murutucú (MS) indica uma mistura das águas nesse trecho do rio.

O menor valor de OD (2,59 mL.L⁻¹) foi registrado na estação Santana em novembro, para esta mesma amostra foi observado o menor valor de pH 3,33, o que pode indicar o consumo de OD pelo processo de remineralização da MO. Por outro lado, o maior valor de OD 5,88 mL.L⁻¹ foi registrado na estação Santana em novembro e está associado a um valor de pH de 7,80, o que por sua vez pode ser uma indicação da atividade fotossintética que contribui para o aumento de OD e eleva os valores de pH.

Os valores de CE foram característicos de água doce durante todas as campanhas, a distribuição espacial da CE sugere algum processo de mistura das águas, provavelmente influenciado por correntes de maré que são mais intensas neste período, com predomínio da influência de águas fluviais.

O MPS e ST apresentaram um padrão de variação semelhante à CE, isso pode indicar que ocorre uma compartimentação das águas do rio Arari, de acordo com as diferentes estações. Em relação às ST orgânicas e minerais, a fração orgânica foi predominante durante o período chuvoso, sendo 61% dos ST representado pela fração orgânica e 39% pela fração mineral. Por outro lado, no seco o comportamento foi inverso, pois a fração mineral foi predominante, sendo 77% dos ST representado pela fração mineral e 23% pela fração orgânica.

Em relação à variação sazonal das formas nitrogenadas, isto pode estar relacionado ao processo de nitrificação, visto que, o valor de mediana nas duas formas mais reduzidas, N-amoniacal e nitrito, são deslocadas no sentido oposto ao nitrato, forma mais oxidada.

Na estação cachoeira foram registradas as maiores concentrações de nitrato e N-amoniacal e as menores em Santana, o que indica que a fonte destes nutrientes está localizada a montante do rio Arari e que ao longo do seu percurso esses nutrientes podem estar sendo assimilados por organismos fitoplanctônicos, ou passando por processos de desnitrificação no ciclo do nitrogênio.

Em relação à variação espacial do PID os maiores valores de mediana foram detectados em Santana 0,60 mM.L⁻¹, foz do rio Arari, intermediários em Murutucú 0,45 mM.L⁻¹ e os menores em Cachoeira do Arari 0,38 mM.L⁻¹ (Figura 7). Esse gradiente foi observado nos dois períodos estudados e mostra uma correlação inversa com o MPS e ST, ou seja, as estações de amostragem que apresentaram concentrações baixas de MPS são as que apresentam as maiores concentrações de PID, essa relação pode ocorrer em virtude da capacidade das argilas, presentes no MPS, em adsorver o PID, retirando da coluna d'água por processos de sedimentação. O aumento pode ser ainda indicativo de processos de resuspensão ocorrentes ao longo do rio Arari, causados por turbulência e que liberam fósforo para a coluna d'água.

O comportamento sazonal do silicato foi semelhante ao do fósforo, ST e sólidos suspensos, o que demonstra a relação existente entre estes parâmetros em função de sua natureza terrígena, e indica que os processos de resuspensão favorecem o aporte deste nutriente ao longo do rio Arari. As maiores concentrações foram registradas no período seco. A clorofila-*a* apresentou os valores mínimo e máximo de 4,22 mg.m⁻³ e 38,31 mg.m⁻³ durante o período chuvoso e de 3,9 mg.m⁻³ e 25,81 mg.m⁻³ no seco. A relação NID:PID registrou maior mediana no chuvoso 85,3 enquanto no seco foi de 68,3. Essa diferença sazonal pode ser desconsiderada, visto que esse valor maior no período chuvoso se deu em função de alguns poucos valores baixos de fósforo em torno de 0,025 mM.L⁻¹, durante o chuvoso os valores de NID:PID variaram entre 9,1 e 1.305,9 enquanto no seco variou de 16,6 a 630,6 não sendo notado um padrão de variação com a maré, esta distribuição sem um padrão definido sugere que as concentrações de NID e PID variaram em função de processos de resuspensão que momentaneamente elevavam as concentrações de nutrientes. Os valores mais elevados da relação NID:PID foram registrados na estação Cachoeira em ambos os períodos, enquanto os menores valores da relação NID:PID foram registrados na estação Santana durante o seco.

4. Discussão

Através das análises estatísticas, foram observadas diferenças significativas entre os períodos estudados, o que demonstra uma grande influência dos diversos fatores ambientais como descarga fluvial, turbulência, precipitação e maré na dinâmica dos processos que ocorrem no rio Arari. Em regiões tropicais, esses fatores são os principais controladores da dinâmica de nutrientes e produtividade primária (Rocha, 2021).

Os eventos extremos de chuvas e seca no ano de 2009 na ilha de Marajó ocorreram em função de fenômenos climáticos de escala global, no primeiro semestre foi a La Niña e no segundo semestre o El Niño (evento moderado) (Lopes *et al.*, 2021). Na ilha de Marajó, o grande volume de chuvas (período chuvoso) que cai na região de campos, provoca a interligação das redes de drenagem, tornando a ilha um imenso campo alagado “*wetland*”, o que leva ao aumento na descarga fluvial do rio Arari neste período e faz com que a maré dinâmica não chegue até Cachoeira do Arari, o rio segue um fluxo unidirecional em direção a sua foz. São redes complexas de paleocanais alongados, sinuosos a meandros com até 2,6 km de largura (Rossetti *et al.*, 2012; Mantelli *et al.*, 2009). De acordo com Gomes *et al.* (2024), a ilha do Marajó apresenta uma densidade fluvial elevada com os maiores valores ($18,9 \text{ km/km}^2$ – $28,4 \text{ km/km}^2$). As águas do rio Arari somam-se com as águas que descem dos campos e inicia-se então o que as comunidades ribeirinhas chamam de “*inchaço do Arari*”. As águas dos campos, ricas em MO, são a principal fonte de nutrientes para o rio Arari durante este período. Durante o período seco, a partir de julho e agosto, a diminuição das chuvas e do nível das águas do rio permite o avanço da maré dinâmica, então ocorre uma modificação na hidrodinâmica do rio Arari e os movimentos de fluxo e refluxo da maré são observados novamente.

Em geral, esse pulso de inundação na bacia hidrográfica do rio Arari provoca alterações na dinâmica dos parâmetros físicos, físico-químicos e biológicos que quando comparados a outros ambientes da região amazônica (Monteiro; El Robrini, 2016) mostram padrões diferentes de distribuição sazonal, ou seja, o comportamento hidro químico no rio Arari é distinto das demais bacias hidrográficas da região amazônica em função de sua hidrologia. Esta singularidade já foi observada em estudos anteriores por Salati *et al.* (1973), que demonstraram que as perdas de águas superficiais por evaporação são desprezíveis e Reis *et al.* (1977) que mostraram que a evaporação das águas superficiais é relevante no balanço de águas na bacia. Perturbações hidrodinâmicas frequentes e presença de sedimentos em suspensão resultam na redução da claridade da água (Zhang *et al.*, 2024), entretanto, em áreas com baixo regime hidrodinâmico, os sedimentos são depositados e a transparência da água, aumenta.

A maré no rio Arari, é controlada pela sazonalidade, durante o período chuvoso o regime hidrodinâmico é baixo, por outro lado, durante o seco o rio Arari apresenta alto regime hidrodinâmico, em função da maré, que se propaga ao longo do rio. A maré é do tipo semi diurna, com diferentes amplitudes ao longo do rio, as regiões da foz do rio Arari, vila de Santana e da sede da Fazenda Murutucu são dominadas por mesomaré ($2 < 4 \text{ m}$), enquanto em Cachoeira do Arari ocorre a micromaré. No rio Arari, a maré é assimétrica e dominada pela vazante, para as estações de Santana e Murutucú, no início da enchente o nível da água aumenta bruscamente e logo em seguida se torna mais suave, a suavização ocorre em função do alagamento das margens do rio, áreas de várzea, que durante o período chuvoso já se encontram alagadas, os níveis de maré baixa são mais elevados, o que favorece uma menor amplitude de maré. Enquanto no seco, durante as enchentes, o alagamento da várzea também causa o efeito de suavização na amplitude da maré, contudo o nível da maré baixa do rio é menor e isso favorece o aumento na amplitude.

Para a estação Cachoeira, a maré é assimétrica, contudo, o padrão de suavização na enchente não foi observado, provavelmente em função da ocorrência de micromaré, isso significa que a pequena amplitude não permite que a área de várzea seja alagada. Os valores médios de propagação da onda de maré enchente corroboram com o comportamento sazonal do regime hidrodinâmico no rio Arari.

A temperatura das águas do rio Arari é característica de um ambiente tropical, onde a amplitude da variação diária é mais significativa que a variação sazonal. As menores temperaturas ocorrem no período chuvoso em função da grande quantidade de nuvens que recobrem a ilha de Marajó, durante praticamente todos os dias neste período, estas nuvens inibem a incidência dos raios solares o que resulta em temperaturas

mais baixas, por outro lado no seco estas nuvens se tornam mais esparsas e as águas do rio Arari ficam expostas a mais horas de insolação que permitem a elevação da temperatura da água.

Os valores de CE das águas do rio Arari revelam que este rio não recebe influência salina, ou seja, é um ambiente tipicamente de águas doces durante o ano inteiro. O maior valor de CE registrado no período seco ($233,0 \text{ mS.cm}^{-1}$) é apenas 4 vezes maior que o mínimo registrado no período chuvoso $60,20 \text{ mS.cm}^{-1}$, o que caracteriza o rio Arari como um sistema predominantemente de água doce durante ambos os períodos. No rio Paracauari (Ilha de Marajó), Monteiro; El Robrini (2016) detectaram valores de CE de $11.002 \text{ mS.cm}^{-1}$ no período seco para uma salinidade de 6,18. Entretanto, Vital (1989) registrou valores menores que os encontrados no presente artigo, o mesmo padrão sazonal foi observado por essa autora, com máximo de 100 mS.cm^{-1} (seco) e 80 mS.cm^{-1} (chuvoso) no lago Arari. Ferreira *et al.* (2022), mediram valores de $86,64 \text{ mS.cm}^{-1}$ e $123,61 \text{ mS.cm}^{-1}$ no Estuário do rio Pará (trecho superior), respectivamente no chuvoso e seco.

De acordo com a subdivisão do estuário proposta por Miranda *et al.* (2017), os valores de salinidade menores que 1, assim como a baixa CE detectada revelam que a foz do rio Arari está situada na Zona de rio do estuário principal, o rio Pará ou Baía de Marajó, ou seja, esta região recebe influência somente da maré dinâmica. Assim, o rio Arari, pode ser classificado como um sistema flúvio-estuarino, com predomínio de características fluviais, apesar da influência da maré dinâmica, que na estiagem penetra dezenas de quilômetros rio adentro. A análise de componentes principais mostrou que a CE tem forte correlação com ST, MPS, ST inorgânicos e íons dissolvidos, principalmente fosfato e silicato. No rio Arari a variação espacial da CE é controlada principalmente pelos processos de resuspensão e sedimentação, enquanto a variação sazonal deste parâmetro é controlada pela precipitação.

A intensificação dos processos de resuspensão favoreceu o aumento da turbidez, as águas do rio Arari possuem elevada concentração de MPS durante o ano todo, o que atribui uma coloração amarelada e aspecto barrento as mesmas, cursos d'água (rios, lagos, estuários) com essas características são muito frequentes na bacia amazônica e são regionalmente conhecidas de acordo Silva *et al.* (2013) como águas brancas. De acordo com Huynh *et al.* (2024), a matéria particulada em suspensão (MPS) é caracterizada por sua composição biomineral, como compostos orgânicos, carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio orgânico particulado (POP) e inorgânicos. Entretanto, partículas orgânicas como algas bentônicas e biodepósitos também são presentes, durante o período chuvoso. O rio Arari recebe contribuições de material alóctone, principalmente na forma orgânica, resultante da decomposição da vegetação das áreas alagadas, essa distribuição foi confirmada pelos valores de ST orgânicos que representaram 61% dos ST, os outros 39% representam a fração mineral. Contudo, a subida do nível das águas e o baixo regime dinâmico favorecem os processos de sedimentação do MPS e dos ST além de contribuir para a diluição dos mesmos e aumentar a transparência da água. No Estuário do rio Pará (foz), Costa *et al.* (2025) mediram valores de $25,9 \text{ mL.L}^{-1}$ e $30,4 \text{ mL.L}^{-1}$, respectivamente no seco e chuvoso.

Por outro lado, no período seco o balanço hídrico é negativo, ou seja, a evaporação é maior que a precipitação, isto faz com que a dinâmica do rio aumente, com a diminuição do nível da água e do aporte fluvial, a maré dinâmica tem comportamento assimétrico e avança em direção a nascente do rio Arari e este apresenta fluxo bidirecional, característico dos movimentos de enchente e vazante da maré. No rio Arari foi observado um comportamento assimétrico, com intervalos de tempo entre enchente e vazante iguais a 5,0 e 7,0 horas, respectivamente. As correntes de maré também podem ser eficazes no movimento dos sedimentos, através de assimetria da maré e/ou em áreas de maior energia de onda ou energia de correntes, para as zonas de baixa energia através de decantação nos momentos de correntes lentas.

A principal fonte de MPS e ST no período seco é de origem autóctone, ocorrendo predominância da fração mineral, neste caso 77% dos ST é representado pela fração mineral, o restante 23% é referente à fração orgânica. O regime de alta dinâmica e o fluxo turbulento favorecem os processos de resuspensão, e reduz o processo de sedimentação, logo a transparência da água também diminui.

A quantidade do MPS é largamente determinada por forças atmosféricas, que causam um influxo de materiais terrígenos das áreas adjacentes e resuspendem os sedimentos de fundo. Estes efeitos são ampliados em casos de ambientes rasos ($<2 \text{ m}$ de profundidade no rio Arari), durante a maré baixa (Huynh *et al.*, 2024).

Vital (1989) observou no lago Arari a presença de uma camada muito densa de argila floculada, que permanece praticamente imóvel no fundo, porém a mesma pode ser facilmente remobilizada devido à agitação das águas pelos ventos, quando a profundidade do lago se reduz a menos da metade do período de cheia.

A velocidade do vento medido na estação Soure (ilha de Marajó) (INMET, 2025), indica um aumento na intensidade do vento durante o período seco, o que corrobora com os registros de velocidade de vento no estudo de El Robrini *et al.* (2024) que revela a ocorrência das maiores intensidades de ventos na ilha de Marajó durante o período seco. Essa ação do vento pode influenciar diretamente nos parâmetros hidroquímicos do rio Arari, como por exemplo, o OD e o MPS. De acordo com Meng *et al.* (2024), a resuspensão ocorre devido aos efeitos combinados de ventos induzindo ondas e correntes, e a agitação por correntes de maré, além disso, a velocidade do vento apresentou uma forte correlação ($r = 0,98$) com as concentrações de MPS. Outra característica importante da influência da variabilidade meteorológica é destacada por Bordin *et al.* (2023), segundo estes autores, o vento tem papel importante na distribuição do OD.

Em geral, as principais fontes de oxigênio são a reaeração atmosférica e a fotossíntese, enquanto a depleção está associada à oxidação bioquímica da MO carbonácea, nitrogenada e processos de respiração (OMS, 2009). Isso leva a crer que nos ecossistemas aquáticos amazônicos a fonte de oxigênio a partir da atmosfera é considerada muito importante.

No rio Arari a dinâmica do OD é controlada por diversos fatores, produtividade primária, remineralização da MO, utilização no processo de nitrificação, ação do vento e da maré. Os menores valores de OD registrados no período chuvoso podem estar associados ao processo de degradação da MO, que durante este período apresenta maior concentração, os valores de pH mais ácidos durante este período reforçam esta hipótese, pois um dos resultados da atividade de decomposição da MO é a diminuição do pH. A ACP revela que durante o seco ocorre uma forte correlação de OD com MPS, essa relação sugere que a principal fonte de OD para as águas do rio Arari é a atmosfera, visto que os maiores valores de turbidez são em função dos processos de mistura principalmente do vento e das correntes de maré, e contribuem para inibição do processo fotossintético.

A oxigenação do rio Arari também está associada aos processos de nitrificação, onde as formas mais reduzidas de nitrogênio (nitrito e amônio) predominam durante o período chuvoso, por outro lado, quando as concentrações de OD aumentam no seco o nitrato, forma mais oxidada, é favorecida em detrimento das formas reduzidas. Nesse sentido houve um incremento na concentração do nitrato no período seco, com o valor mínimo de aproximadamente 27 vezes maior em relação ao chuvoso. O processo de nitrificação foi favorecido pelo acréscimo de OD durante este período.

A concentração de nitrato ao longo do rio diminui, no sentido Cachoeira-Foz, e pode ser um indicativo da assimilação desta forma nitrogenada pelo processo fotossintético, confirmando o resultado da PCA que mostra uma correlação entre nitrato, amônio e clorofila-*a*. O nitrito foi a forma nitrogenada que apresentou as menores concentrações, inferiores a $2\mu\text{M.L}^{-1}$ e de maneira geral acompanhou a distribuição do amônio.

O contraste entre OD com N-amoniacal, durante o período chuvoso, ocorreu em todas as estações de coleta e pode ser indicativo que a degradação da MO ocorre ao longo de todo o rio Arari. No processo de decomposição da MO, íons dissolvidos são liberados na sua forma inorgânica, por exemplo, o N-amoniacal. Reddy *et al.* (2020) afirmam que a difusão e fluxo de amônio da camada anaeróbia do sedimento para a coluna de água, é o processo que mais contribui com uma parcela importante de amônio para a camada aeróbia da coluna de água.

Os resultados obtidos no rio Arari indicam que o N-amoniacal é a principal forma assimilada no processo fotossintético, seguida do nitrato. Concentrações elevadas de N-amoniacal no rio Arari ocorreram em ambos os períodos, com o máximo $41,67\mu\text{M.L}^{-1}$ 12 vezes maior que o mínimo $3,33\mu\text{M.L}^{-1}$ registrado no seco, sendo as maiores concentrações durante o chuvoso relacionados principalmente à liberação deste nutriente a partir do processo de degradação da MO, ou seja, a fonte foi a partir do processo de *Amonificação*. Os resultados de ST Orgânicos corroboram com isso, pois no período chuvoso estes corresponderam a 61% do total de ST, o que indica a presença significativa de MO nas águas do rio Arari.

São poucos os trabalhos de hidroquímica na região, entretanto, os valores de N-amoniacal encontrados

no rio Arari são muito altos quando comparados com estudos realizados em áreas estuarinas amazônicas. Monteiro; El Robrini (2016) no estuário do rio Paracauari (Ilha de Marajó) registraram valores máximos de $0,55 \mu\text{M.L}^{-1}$ e $0,77 \mu\text{M.L}^{-1}$ nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. Santos *et al.* (2008) na Plataforma Continental do Amazonas encontraram o valor de mediana de $0,38 \mu\text{M.L}^{-1}$ de NH_4^+ , Santos *et al.* (2008) registraram os valores máximos de N-amoniaco de $0,91$ e $0,26 \mu\text{M.L}^{-1}$ em áreas costeiras e oceânicas respectivamente. Eschrique *et al.* (2006) observaram valores mínimo de $0,12$ e máximo de $0,80 \mu\text{M.L}^{-1}$ de NH_4^+ estudou na área adjacente à costa do Pará e. Por outro lado, Cohen (1998) observou nas águas do furo do chato (Bragança-PA) o valor de $14,0 \mu\text{M.L}^{-1}$ de NH_4^+ durante o período chuvoso.

No período seco, os valores de N-amoniaco no rio Arari permaneceram altos e podem ser o resultado de resuspensão de lama fluida por correntes de maré, que lançam águas intersticiais dos poros, reforçada em nutrientes, diretamente para a coluna de água. De acordo com Braga *et al.* (2023), os sedimentos podem ter participação diferenciada na regulação das concentrações de nutrientes na coluna d'água, ao longo do sistema, o fluxo de nutrientes a partir dos sedimentos apresentou uma forte sazonalidade, sendo maior na estação seca, o NH_4^+ foi a principal forma de nitrogênio liberado compreendendo 70-100% do fluxo de DIN.

Baumgarten *et al.* (2005) registraram valores de amônio entre $1,9$ - $29,7 \mu\text{M.L}^{-1}$ e observaram que a coluna sedimentar na enseada rasa e não contaminada (Lagoa dos Patos), foi a principal fonte de nutrientes para a coluna d'água, via processos de advecção e difusão molecular a partir da água intersticial.

Concentrações altas de N-amoniaco associadas à contaminação por despejos de efluentes domésticos e industriais são acompanhadas por altas concentrações de fosfato, que pode ser proveniente de fertilizantes e detergentes, Wen *et al.* (2008) encontraram no estuário do rio Danshuei (Taiwan) valores de N-amoniaco entre 10 - $1000 \mu\text{M.L}^{-1}$, 55 vezes maiores que os valores encontrados neste artigo, e estes associados a valores de fosfato entre $0,1$ - $35 \mu\text{M.L}^{-1}$, 76 vezes superiores a mediana encontrada neste artigo.

Os valores de fosfato neste artigo foram inferiores a $2 \mu\text{M.L}^{-1}$, Eschrique *et al.* (2006) estudaram a distribuição dos nutrientes na coluna d'água da área adjacente à costa do Pará e registraram valores de fosfato de $0,43 \mu\text{M.L}^{-1}$ na camada eufótica e de $2,20 \mu\text{M.L}^{-1}$ na camada afótica, e atribuiu o aumento devido à liberação desse nutriente através da degradação da MO. Monteiro; El Robrini (2016) registraram no rio Paracauari (ilha de Marajó) valores médios para o fosfato de $0,89 \mu\text{M/L}^{-1}$ no período chuvoso e $0,26 \mu\text{M/L}^{-1}$ no seco, sendo que não foram observadas diferenças significativas entre superfície e fundo, estes autores atribuíram os maiores valores de fosfato no chuvoso a contribuição do particulado proveniente do escoamento fluvial e do manguezal adjacente.

Durante o ano, ao longo do rio Arari foi observado um gradiente positivo da estação Cachoeira para Santana, esse padrão de distribuição se mostrou inverso ao MPS, o que indica que o fosfato pode estar sendo retirado da coluna d'água através do processo de adsorção por argilas, pois sua disponibilidade aumenta de acordo com a diminuição do MPS. Este processo pode ser favorecido pelo pH levemente ácido das águas do rio Arari, essa relação com pH fica mais nítida durante o período seco, quando se observa os valores ácidos de pH na estação Cachoeira e valores alcalinos na estação Santana relacionados diretamente com as menores e maiores concentrações de fosfato, respectivamente.

Santos *et al.* (2008) estudaram a distribuição do fosfato na coluna d'água da foz do rio Amazonas no período de diminuição da descarga (agosto, 2001) e observaram na camada eufótica o valor máximo de $0,77 \mu\text{M/L}$ e na camada afótica $0,89 \mu\text{M/L}$. Estes autores concluíram que o pH alcalino em todas as amostras influenciou muito pouco os processos de adsorção e dessorção do fósforo na coluna de água. Em relação à variação sazonal, o fosfato mostrou um discreto aumento na concentração durante o período seco, o que pode estar associado a um efeito combinado do menor consumo deste elemento no processo fotossintético, visto que os valores de clorofila-*a* foram menores, com a liberação deste elemento a partir da camada de sedimentos.

O silicato apresentou comportamento sazonal e espacial semelhante ao do fosfato. Em diversos trabalhos os valores de silicato sofrem aumento durante o período chuvoso, pois são associados ao aumento no aporte de sedimentos (Monteiro; El Robrini, 2016). Contudo, neste artigo os valores de silicato foram maiores no período seco, onde ocorrem os maiores valores de MPS e mostram forte correlação com os sólidos totais e MPS, o que revela a natureza terrígena deste elemento, para DeMaster; Pope (1996) dada à

complexidade e o tamanho da bacia hidrográfica da Amazônia, mudanças temporais e espaciais nas concentrações de nutrientes nos rios não são inesperadas.

Neste artigo, os valores obtidos são entre 2 e 4 vezes maiores em relação aos resultados de Monteiro; El Robrini (2016) que registraram no rio Paracauari (Ilha de Marajó) o valor máximo de $81,35 \mu\text{mol.L}^{-1}$ durante o período chuvoso e de $42,65 \mu\text{mol.L}^{-1}$ no seco. Santos *et al.* (2008) detectaram valores entre $14,48 \mu\text{mol L}^{-1}$ e $108,59 \mu\text{mol L}^{-1}$ na foz do rio Amazonas, com os maiores valores mais próximos a foz e diminuição em direção ao oceano Atlântico. Eschrique *et al.* (2006) registraram na foz do estuário do rio Pará valores de silicato entre $0,42 \mu\text{M.L}^{-1}$ e $31,77 \mu\text{M.L}^{-1}$, com altas concentrações próximas da costa associada ao aporte fluvial. Santos *et al.* (2008) verificaram valores de silicato entre $1,07$ e $31,77 \mu\text{M}$ para a Plataforma Continental do Pará e consideraram que a contribuição fluvial é a principal responsável pela manutenção de sílica nas águas superficiais desta plataforma continental. Ao longo do rio Arari os valores de silicato aumentam gradualmente em direção a foz do rio, o que indica que a fonte deste elemento ocorre ao longo de todo o rio, e provavelmente é de origem autóctone, sendo disponibilizado a partir de processos de resuspensão.

As concentrações dos nutrientes nitrogenados e fosfatados foram altas durante o ano todo, apesar da variação sazonal o que favoreceu a atividade de organismos do fitoplâncton, como pode ser observado por meio dos valores de clorofila-*a*. Contudo, as condições mais favoráveis para atividade fotossintética ocorreram no período chuvoso, quando foi registrada a maior transparência da água, por outro lado durante o seco a transparência da água diminui consideravelmente e apesar do incremento nas concentrações de nutrientes a clorofila-*a* diminui, isso revela que a disponibilidade de luz é o principal fator limitante da produtividade primária no rio Arari.

Santos *et al.* (2008) encontraram alta concentração de clorofila-*a* na foz do rio Amazonas, com valores de até $9,8 \text{ mg.m}^{-3}$ (média de $1,6 \text{ mg.m}^{-3}$) e de acordo com esses dados caracterizaram a zona costeira como um ambiente eutrófico. Noriega *et al.* (2009) registraram no estuário de Barras de Jangadas (Nordeste-Brasil) valores médios de clorofila *a* entre $20,85$ e $34,04 \text{ mg.m}^{-3}$ e caracteriza este ambiente como eutrófico. Neste artigo, os valores de clorofila-*a* estiveram entre $3,9 \text{ mg.m}^{-3}$ e $38,31 \text{ mg.m}^{-3}$, o que pode caracterizar o rio Arari como um ambiente eutrófico.

De acordo com a ACP, a clorofila *a* apresenta correlação principalmente com as formas nitrogenadas dos nutrientes, o que pode indicar o fósforo como provável fator limitante. Os valores da relação NID:PID corroboram com essa observação, pois, apesar de valores mínimos iguais a 9,1 e 16,6, inferiores ou iguais a relação de Redfield (N:P), os valores de mediana estiveram sempre acima de 68,3, o que mostra o PID como fator limitante. Valores altos da relação N:P foram registrados por Noriega *et al.* (2009) no estuário de barra de jangadas (Nordeste-Brasil), os valores variaram de 1,56 a 824,64, com média de 35,28 na estação chuvosa. Na foz do rio Amazonas, Santos *et al.* (2008) registraram valores entre 11,56 e 16,3, nas camadas eufótica e afótica, respectivamente. Os dados de Monteiro; El Robrini (2016) no rio Paracauari (ilha de Marajó) revelam valores da relação NID:PID de 7,93 no período chuvoso e 9,23 no seco, o que indica a limitação por nitrogênio.

Os valores de nutrientes fosfatados e nitrogenados encontrados neste artigo estudo sugerem que o rio Arari é um ambiente eutrófico e aparentemente ainda livre de pressões antrópicas. Os processos ocorrentes no ciclo do nitrogênio como nitrificação, desnitrificação e amonificação, aumentam ou diminuem a intensidade sazonalmente. A oxigenação do rio Arari acompanha o aumento da hidrodinâmica, que ocorre no período seco, esta demonstra ser favorecida pelos ventos e apresenta fraca correlação com a clorofila *a*, ou seja, a atmosfera é a principal fonte de oxigênio para as águas do rio Arari. Esta oxigenação favorece diretamente o processo de nitrificação.

Os valores de nutrientes fosfatados e nitrogenados encontrados neste artigo sugerem que o rio Arari é um ambiente eutrófico e aparentemente ainda livre de pressões antrópicas. Os processos ocorrentes no ciclo do nitrogênio como nitrificação, desnitrificação e amonificação, aumentam ou diminuem a intensidade sazonalmente. A oxigenação do rio Arari acompanha o aumento da hidrodinâmica, que ocorre no período seco, esta demonstra ser favorecida pelos ventos e apresenta fraca correlação com a clorofila *a*, ou seja, a atmosfera é a principal fonte de oxigênio para as águas do rio Arari. Esta oxigenação favorece diretamente o processo de nitrificação.

5. Conclusão

O rio Arari é um ambiente altamente dinâmico, drena a região de campos da ilha de Marajó, que sazonalmente é alagada e apresenta-se como um imenso “*wetland*”, sua foz está localizada na parte superior do estuário do rio Pará (Baía de Marajó), onde os valores de salinidade correspondem à Zona de Rio, indicando uma forte influência da descarga continental, que mesmo no período seco não permite o avanço de águas salobras provenientes do Oceano Atlântico. A maré é do tipo semidiurna, com ocorrência de maré dinâmica e ausência de maré salina, o regime é de mesomaré e dominado pela maré enchente nas estações Santana e Murutucú e micromaré na estação Cachoeira do Arari. Os valores dos parâmetros físicos e físico-químicos são característicos de um rio de águas brancas.

No período chuvoso, para a maioria dos parâmetros estudados, a grande descarga de água do rio Arari promove a mistura das águas ao longo do rio, dessa maneira é pouco intensa a diferença entre as águas, por exemplo, da foz (estação Santana) com Cachoeira do Arari. Por outro lado, durante o período seco ocorre uma divisão do rio de acordo com as três estações estudadas, as águas apresentam características distintas, com valores característicos para cada região do rio, além de padrões de distribuição espacial, com gradientes crescentes ou decrescentes de acordo com o parâmetro em questão. Para este último caso, a ACP revela que a influência da maré determina essa diferenciação nas águas ao longo do rio, o que pode ser em função das diferentes amplitudes de maré observadas. Com a diminuição do nível da água o rio Arari se torna bastante raso, durante este período a ação dos ventos é mais intensa, assim como a maré, essa ação conjunta favorece os processos de resuspensão, e oxigenação das águas, ou seja, a distribuição dos parâmetros ao longo do rio Arari é controlada sazonalmente por diferentes forças: físicas e meteorológicas.

O fosfato e o silicato revelaram as suas fontes terrígenas, com maiores valores associados à liberação por meio de processos de resuspensão. O aumento nas concentrações de nutrientes está associado à diminuição da transparência da água e dos valores de clorofila *a*, revelando que o principal fator limitante da produtividade primária no rio Arari é a disponibilidade de luz. Contudo a relação NID:PID mostra que o fósforo também pode ser fator limitante para a produtividade primária.

5. Agradecimentos

6. Referências

APHA - American Public Health Association (1995). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: Library of Congress. 21st Ed.

Baumgarten, M. G. Z. ; Niencheski, L. F. H.; & Martins, B. A. D. (2005). Saco do Justino (RS-Brasil): amônio e fosfato na coluna d'água e na água intersticial de uma enseada não contaminada. **Atlântica**, FURG, 27 (2), 113-129. <https://doi.org/10.5088/atlantica.v27i2.2181>.

Bazin, P.; Jouenne, F.; Friedl, T.; Deton-Cabanillas, A. F.; Le Roy, B.; Véron, B. (2014). Phytoplankton diversity and community composition along the estuarine gradient of a temperate macrotidal ecosystem: combined morphological and molecular approaches. **PLoS ONE**, 4, 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094110>.

Bernardino, A. F.; Barros, F.; Perez, L. F.; Netto, S. A.; Colling, L. A.; Pagliosa P. R.; Lana, P. C.; Maia, R. C.; Christofolletti, R. A.; Filho, J. S. R.; Costa, T. M. (2015). **Monitoramento de Ecossistemas Bentônicos Estuarinos**. In: Turra, A.; & Denadai, M. R. (Org.). Protocolos para o monitoramento de habitats bentônicos costeiros – Rede de Monitoramento de Habitat Bentônicos Costeiros - ReBentos. Instituto Oceanográfico,

Universidade de São Paulo, 134-154, 2015.

Bordin, L. H.; Machado, E Da C.; Mendes, C. R. B.; Fernandes, E. H. L.; Camargo, M. G.; Kerr, R.; Schettini, C. A. (2023). Daily variability of pelagic metabolism in a subtropical lagoonal estuary, **Journal of Marine Systems**, 240, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103861>.

Braga, E. S.; Lucena, L. M.; Almeida, A. J. M.; Pires, M. L. T.; Nascimento, J. E. F. Do; Sutti, B. O.; Berbel, G. B. B.; Chiozzini, V. G. (2023). O ambiente estuarino e a variação de Ph: limites naturais e observação experimental do efeito da acidificação sobre a biodisponibilidade de fósforo. **Quím. Nova**, 46 (6), 591-607. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230054>

Cohen, M. C. L. (1998). **Nutrientes e outros fatores relacionados à produção primária nas águas do manguezal de Bragança-PA**. 105f. Dissertação de Mestrado, geologia, Programa de Pós Graduação em Geoquímica & Geologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Costa, M.; Monteiro, S.; Rollnic, M. (2025). Contribuição Hidrossedimentar do Rio Pará para a Zona Costeira Amazônica. **Caderno De Geografia**, 35 (81), 407-430. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2025v35n81p407>

Demaster, D. J.; Pope, R. H. (1996). Nutrient dynamics in Amazon shelf waters: results from AMASSEDs. **Continental Shelf Research**, 16 (3), 263-289.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. (2025). **Amplitudes de maré**. Disponível em www.dhn.mar.mil.br. Acesso em 12/03/2025.

El Robrini, M; Silva, P. V. M.; Guereiro, J. S.; Ranieri, L. A. (2024). Seasonal and macrotidal influence on the morphodynamics of estuarine beaches (Marajó island - Eastern amazon - Brazil). **Quaternary and Environmental Geosciences**, 15, 34-48. <https://doi.org/10.5380/qeg.v15i0.94228>.

Eschrique, S. A.; Santos, M. L. S.; Saraiva, A. L. L.; Delfino, I. B.; Botelho, V.F. (2006). Estudo dos nutrientes no ambiente pelágico adjacente à costa do estado do Pará. **Arquivos de Ciências do Mar**, 39, 120-130.

Ferreira, D. P. M.; Carneiro, B. S.; Marques, L. C. A.; EL - Robrini, M. (2022). Qualidade das águas estuarinas do Rio Pará na Zona Portuária de Vila do Conde (município de Barcarena/Pará). *Geografia*, Rio Claro-SP, 47 (1), 1-27. ISSN: 1983-8700.

Governo do Estado do Pará (2021). **Estatística Municipal Cachoeira do Arari**. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará (FAPESPA) CDD: 23 ed. 318.1. 50p.

Grasshoff, K.; Ehrhardt, M.; Kremling, K. (1983). **Methods of seawater analysis**. 2. ed. Florida: Verlage Chemie, 632 p. Disponível em: ISBN-10 3527295895. Consulta em 12 Jan. 2023.

Gomes, D. J. C.; Beltrão, N. L. S.; Dias, Y. A. S.; Maia, E. T. (2024). Eventos de inundação em anos extremos de dipolo do Atlântico e La Niña no Arquipélago do Marajó. **Revista Brasileira de Climatologia**, 35, 380-400. ISSN 2237-8642379.

Hansen, J. P. M.; Feiden, A. (2025). A Dinâmica do aporte de fósforo na qualidade dos recursos hídricos superficiais. **ARACÊ**, 7(7), 36576-36592. <https://doi.org/10.56238/arev7n7-081>.

Huynh, T. T.; Kim, J.; Lee, S. D.; Fettweis, M.; Bi, Q.; Kim, S.; Lee, S.; Choi, Y. Y.; Nguyen, H. S.; Bui, T.

V.; Lee, B. J. (2024). Spatiotemporal Dynamics of Suspended Particulate Matter in Water Environments: A Review. **Water**, 16, 1-20. <https://doi.org/10.3390/w16243613>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2025. **Estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2009**, segundo os municípios. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2009. Acesso em 15 de março de 2025.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (2025). **Consulta Dados da Estação Automática: SOURE (PA)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 01/03/2025.

IDESP. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará. 1974. **Estudo integrados da Ilha de Marajó**. Belém. 333p.

Laruelle, G. G.; Rosentreter, J. A.; Regnier, P. (2025). Extrapolation-Based Regionalized Re-evaluation of the Global Estuarine Surface Area. **Estuaries and Coasts**, 48 (34), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12237-024-01463-3>.

Lopes, A. B.; Vieira, M. R. S.; Lima Filho, A. A. De L. F.; Silvestrim, E. G.; Silvestrim, F. G. (2021). Anomalias na precipitação de quatro municípios do Amazonas, Brasil. **Research, Society and Development**, 10 (14), 1-9. <https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21766>.

Mantelli, L. R.; Rossetti, D. F.; Albuquerque, P. C. G.; Valeriano, M. M. (2009). Applying SRTM digital elevation model to unravel Quaternary drainage in forested areas of Northeastern Amazonia. **Computers and Geosciences**, 35, 2331-2337.

Meng, L.; Tu, J.; Wu, X.; Lou, S.; Cheng, J.; Chalov, S.; Han, X.; Fan, D. (2024). Wave, flow, and suspended sediment dynamics under strong winds on a tidal beach. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 303, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108799>.

Miranda, L. B. De; Pinheiro, A. F.; Kjerfve, B.; Mendes de, C. F. B. (2017). **Fundamentals of estuarine physical oceanography**, 480p. ISBN: 9789811030406.

Monteiro, S. M.; El Robrini, M. (2016). Salinity variation in the macrotidal mixing zone: the Paracauari River estuary, Marajó Island (Northern Brazil). In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D. M.; McCarroll, R. J. (eds.), Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia). **Journal of Coastal Research**, 75 (Special Issue), 93-97. ISSN 0749-0208.

Moraes, B. C.; Costa, J. M. N.; Costa, A. C. L.; Costa, M. H. (2005). Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, 35(2), 207-214.

Niu, L.; Luo, X.; Cai, H.; Zhang, T.; Yang, Q. (2020). Implications of Nutrient Enrichment and Related Environmental Impacts in the Pearl River Estuary, China: Characterizing the Seasonal Influence of Riverine Input. **Water**, 12(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/w12113245>.

Noriega, C. E.; Muniz, K.; Flores-Montes, M. J.; Macêdo, S. J.; Araujo, M.; Feitosa, F. A.; Lacerda, S. R. (2009). Hydrobiological time series in a tropical estuary (Brazil). **Revista de Biología Marina y Oceanografía**, 44(1): 93-108.

Novais, G. T.; Machado, L. A. (2023). Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. **Revista Brasileira De Climatologia**, 32(19), 1–39. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16163>

- Nurmalitasari, M.; Sudarsono, S. (2023). Keanekaragaman Plankton Dan Tingkat Produktivitas Primer Antara Dua Musim Di Perairan Kabupaten Bantul. Kingdom. **The Journal of Biological Studies**, 9(1), 16–34. <https://doi.org/10.21831/kingdom.v9i1.18156>.
- Poikane, S.; Várbiro, G.; Kelly, M. G.; Birke, S.; Phillips, G. (2021). Estimating river nutrient concentrations consistent with good ecological condition: More stringent nutrient thresholds needed. **Ecological Indicators**, 121, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107017>.
- Rahmah, N.; Zulfikar, A.; Apriadi, T. (2022). Kelimpahan fitoplankton dan kaitannya dengan beberapa parameter lingkungan perairan di estuari Sei Carang Kota Tanjungpinang. **Journal Marine Research**, 11(2), 189–200. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i2.32945>.
- Reddy, K. R.; Delaune, R. D.; Inglett, P. W. (2020). **Biogeochemistry of wetlands**. CRC Press, 2. Edition, CRC Press. 732 p. ISBN 9781498764551.
- Reid, A. J.; Carlson, A. K.; Creed, I. F.; Eliason, E. J.; Gell, P. A.; Johnson, P. T.; Kidd, K. A.; MacCormack, T. J.; Olden, J. D.; Ormerod, S. J.; Smol, J. P. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. **Biol. Rev.**, 94 (3), 849–873.
- Reis, C. M.; Tancredi, A. C. F. N. S.; Matsui, E.; Salati, E. (1977). Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de O-18 e D. **Acta Amazonica**, 7, 209-222.
- Rocha, F. N. da S. (2021). Influência da dinâmica de nutrientes para a eutrofização em corpos hídricos. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, 2(2), 91. <https://doi.org/10.51189/rema/1660>.
- Rossetti, D. F.; Bertani, T. C.; Zani, H.; Cremon, E. H.; E. H. Hayakawa, E. H. (2012). Late Quaternary sedimentary dynamics in Western Amazonia: Implications for the origin of open vegetation/forest contrasts. **Geomorphology**, 177-178 (1), 177-178, 74-92. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.015>.
- Sabar, M.; Samman, A.; Abubakar, S.; Sunarti, S. Rina, R.; Bahtiar, B. (2024). Nitrate, Phosphate, Silica and Phytoplankton Abundance in the Coastal Waters of Maitara Island, North Maluku. **Omni-Akuatika** 20(2):71- 85. SSN: 1858-3873.
- Salati, E.; Matsui, E.; Cervellini, A.; & Friedman, I. (1973). **Hidrologia isotopica da Amazônia (concentração de O-18 e D em águas fluviais)**. Relatório CENA 9. Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CNEN-USP.
- Santos, R. M.; Sousa, P. H. C.; Varela, A. W. P.; Pamplona, F. C.; Santos, M. De L. S. (2023). Variação espaçotemporal de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila a em um estuário amazônico tropical no norte do Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.** 28, 1-14. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200408>.
- Santos, M. L.; Muniz, K.; Barros-Neto, B.; Araujo, M. (2008). Nutrient and phytoplankton biomass in the Amazon River shelf waters. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 80 (4), 703-717. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652008000400011>.
- SEMAS. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Lei nº 9.064, de 25 de maio de 2020** DOE nº 34234, de 27/05/2020 Institui a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC/PA). Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/6556.pdf>. Acesso em 30 de junho de 2023.

Silva, M. do S. R. da; Miranda, S. A. F.; Domingos, R. N.; Silva, Rodrigues, S. L. R Da; Santana, G. P. (2013). Classification of Amazonian Rivers: A Strategy for the Preservation of these Resources. **HOLOS Environment**, 13 (2), 163. ISSN:1519-8634.

Strickland, J. D. H.; Parsons, T. R. (1972). A practical handbook of sea water analysis. **Bulletim Fisheries research board of Canada** 167 1-311. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/39262/1/Strickland-Parsons_1972.pdf, Acesso em: 22 out. 2020.

Teixeira, C. (1973). Introdução aos métodos para medir a produção primária do fitoplâncton marinho. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, 22, 59-92. <https://doi.org/10.1590/S0373-55241973000100004>.

Torres, R.; Sherrell, R.; Reid, B.; Pizarro, G.; Frangópulos, M.; Alarcón, A.; Márquez, M.; Díaz-Rosas, F.; Menschel, E.; González, H. E.; Moreno-Meynard, P.; Montero, P.; Pacheco, H.; Pinto-Torres, M.; Alarcón, C.; Ibañez, R.; Hawkings, J. (2023). Iron and silicic acid addition effects on early spring macronutrient drawdown and biogenic silica production of Patagonia estuarine waters. **Progress in Oceanography**, 214, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.102982>.

United Nations. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://www.un.org/en>. Acesso em: 12 set. 2025

Utida, G.; Cruz, F. W.; Etourneau, J.; Bouloubassi, J.; Schefuß, E.; Vuille, M.; Novello, V. F.; Prado, L. F.; Sifeddine, A.; Klein, V.; Zular, A.; Viana, J. C. C.; & Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports.**, 9 (1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.

Vital, H. (1989). Estudo do Geossistema do Lago Arari, Ilha de Marajo-PA. **Revista Brasileira de Geociencias**, 19 (4), 514-515.

Wen, L. S.; Jiann, K. T.; & Liu, K. K. (2008). Seasonal variation and flux of dissolved nutrients in the Danshuei Estuary, Taiwan: a hypoxic subtropical mountain river. **Estuar. Coast. Shelf Sci.**, 78 694-704. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.02.011>.

Woodland, R.J.; Thomson, J.R.; Mac Nally, R.; Reich, P.; Evrard, V.; Wary, F. Y.; Jeffrey P. Walker, J. W.; Cook, P. L.M. (2015). Nitrogen loads explain primary productivity in estuaries at the ecosystem scale. **Limnol. Oceanogr.** 60, 1751-1762. <https://doi.org/10.1002/lno.10136>.

Zhang, N.; Li, H.; Xu, F.; Thompson, C. L. E; Townend, I. H.; He, Q. (2024). Drag acting on suspended sediment increased by microbial colonization. **Nature Geoscience**, 18, 396-401. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01679-3>.