



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
MESTRADO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE**

RAYANE SERRA ROSAS

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA COMUNIDADE DE
ZOOPLÂNCTON E DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NAS
ÁGUAS ESTUARINAS DO RIO ANIL, SÃO LUÍS – MA**

**São Luís – MA
2024**

RAYANE SERRA ROSAS

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA COMUNIDADE DE ZOOPLÂNCTON
E DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NAS ÁGUAS ESTUARINAS DO RIO ANIL,
SÃO LUÍS – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Linha de Pesquisa: Ecologia e Conservação da Biodiversidade de Ambientes Aquáticos

Orientadora: Profa. Dra. Andrea Christina Gomes de Azevedo Cutrim

São Luís – MA
2024

Rosas, Rayane Serra

Variação espaço-temporal da comunidade de zooplâncton e das variáveis ambientais nas águas estuarinas do rio anil, São Luís – MA / Rayane Serra Rosas. – São Luis, MA, 2024.

64 f

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade) – Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Profa. Dra. Andrea Christina Gomes de Azevedo Cutrim

1.Copépodes. 2.Diversidade ecológica. 3.Estuário. 4.Eutrofização. 5.Impactos antrópicos. I.Título.

CDU: 574.5(812.1)

RAYANE SERRA ROSAS

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA COMUNIDADE DE ZOOPLÂNCTON
E DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NAS ÁGUAS ESTUARINAS DO RIO ANIL,
SÃO LUÍS – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Aprovado em: 13 / 03 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANDREA CHRISTINA GOMES DE AZEVEDO CUTRI**
Data: 17/03/2024 21:10:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Andrea Christina Gomes de Azevedo Cutrim
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **MARCO VALERIO JANSEN CUTRIM**
Data: 18/03/2024 09:46:02-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Marco Valério Jansen Cutrim
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental (UFMA)
1º Examinador

Documento assinado digitalmente
 **RAIMUNDA NONATA FORTES CARVALHO NETA**
Data: 19/03/2024 09:42:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Raimunda Nonata Fortes Carvalho Neta
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade (UEMA)
2ª Examinadora

*Aos meus pais, minha irmã, minha orientadora
e meus amigos por cada sorriso nas conquistas
e o incentivo em momentos difíceis.*

*“A vida me ensinou a nunca desistir
Nem ganhar, nem perder,
mas procurar evoluir...
Histórias, nossas histórias
Dias de luta, dias de glória”
(Charlie Brown Jr.)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus e a Virgem Santíssima por toda a força, saúde, determinação, além de estarem sempre me guiando e protegendo nesta jornada da vida. Aos meus pais Eliete Serra e Waldivino Sousa por todo o apoio, carinho, incentivo e educação durante todos esses anos da minha vida. À minha irmã Ranielle Yasmim por trazer alegria e leveza para a minha vida, me lembrando sempre que os melhores momentos estão nas coisas mais simples.

Agradeço a minha orientadora Andrea Azevedo Cutrim, por toda a parceria, apoio, oportunidade e confiança oferecidos durante esses 6 anos de convivência divididos entre graduação e mestrado, acredito que nossa união foi não somente na relação orientadora e orientanda, mas também para a vida. Amo você profa!

Sou grata também pelos amigos que a vida me deu, pelos os momentos juntos e palavras de apoio, em especial: Gabriel Felipe, Ingrid Caroline, Julia Isabelle, Jálisson Alves, Juliana de Meneses, Christyélen Campos, Danielle Stephane, Isabela Paiva, Itallo Cristian. E a todos que fizeram parte da minha vida pessoal e acadêmica durante esses 6 anos de UEMA.

Aos meus amigos da vida que a vida me deu, obrigada por serem sempre os melhores companheiros Marcos Vinícios dos Santos, Bibiana Gomes e Maisa Vieira.

Ao Laboratório de Biologia Vegetal e Marinha (LBVM/UEMA), em especial os integrantes desta grande família que participaram de forma direta e indireta da minha formação acadêmica, seja como voluntários ou eu sendo voluntária em seus projetos, ganhando sempre experiência e tendo cada vez mais certeza de quão ampla é a nossa profissão.

Agradeço também a minha dupla de pesquisa Ana Virgínia pela parceria nas coletas, troca de conhecimentos e momentos de desabafo durante esse tempo que trabalhamos juntas.

Ao seu Júnior que nos acompanhou durante as coletas embarcadas no estuário do rio Anil. Ao Laboratório de Ficologia da Universidade Federal do Maranhão (LabFic/UEMA) na pessoa do Prof. Dr. Marco Cutrim, Ana Karoline e Quedyane Cruz, por todo o auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, a Universidade Estadual do Maranhão pelo financiamento da pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade (PPGECB/UEMA) pela formação acadêmica concedida durante o mestrado.

RESUMO

A comunidade de zooplâncton cada vez mais vem sendo considerado um elemento chave para diagnosticar a saúde dos ecossistemas aquáticos, pois respondam rapidamente as alterações ambientais sendo refletida na composição e distribuição desses organismos. Com isso, o objetivo geral da pesquisa foi caracterizar a composição e a distribuição da comunidade de zooplâncton, relacionando às variáveis ambientais ao longo do Estuário do rio Anil, São Luís – MA. As amostras foram coletadas através do arrasto horizontal e superficial na água com o auxílio da rede de plâncton, malha de 120 μm , onde após esse processo foram acondicionadas em frascos plásticos devidamente etiquetados e fixadas em formol a 4% para análises qualitativa e quantitativa do material biológico em quatro campanhas (estiagem x chuvoso). A partir dos resultados, foi observado que a diversidade beta do zooplâncton e a heterogeneidade ambiental estão relacionados ao nível de degradação em um estuário de macromarés, além disso, o estado trófico associado a composição e distribuição da comunidade de zooplâncton junto as variáveis ambientais, determinaram a divisão em dois setores do estuário. A diversidade alfa apontou o segundo setor (SII), o mais impactado ao longo do estuário, com um declínio quando comparado ao primeiro setor (SI). Já a diversidade beta, por meio do cálculo da PERMDISP e dissimilaridade de Jaccard, evidenciaram uma heterogeneidade ambiental definida por diferenças sazonais significativas, cooperando para uma heterogeneidade biológica entre os períodos chuvoso e estiagem. A PERMANOVA apontou variações nos parâmetros ambientais como: salinidade, pH, SiO_3 e NO^- , apresentaram diferença significativa tanto sazonal quanto setorialmente ($p < 0,05$). A comunidade foi composta por 74 táxons, cujo 75,7% foi representado pelo grupo dos copépodes, principalmente pelas famílias Oithonidae e Paracalanidae com o maior número de espécies. Quanto ao IndVal, este determinou 15 táxons entre eles destacam-se os copépodes *Euterpina acutifrons*, *Clytemnestra scutellata*, *Debilus swelli* e *Notodiaptomus* sp. sendo nove representantes do SI (60%) e seis o SII (40%). Portanto, através da pesquisa se pode determinar os filtros ambientais e as espécies indicadoras que compõem a dinâmica do estuário, assim como o estado trófico atual para o diagnóstico do ecossistema.

Palavras-chave: Copépodes. Diversidade ecológica. Estuário. Eutrofização. Impactos antrópicos.

ABSTRACT

The zooplankton community is increasingly being considered a key element for diagnosing the health of aquatic ecosystems, as they respond quickly to environmental changes, which are reflected in the composition and distribution of these organisms. Therefore, the general objective of the research was to characterize the composition and distribution of the zooplankton community, relating it to environmental variables along the Anil River Estuary, São Luís – MA. The samples were collected through horizontal and surface trawling in the water with the aid of a plankton net, 120 µm mesh, where after this process they were placed in properly labeled plastic bottles and fixed in 4% formaldehyde for qualitative and quantitative analysis of the material. biological in four campaigns (dry x rainy). From the results, it was observed that zooplankton beta diversity and environmental heterogeneity are related to the level of degradation in a macrotidal estuary, in addition, the trophic state associated with the composition and distribution of the zooplankton community along with environmental variables, determined the division into two sectors of the estuary. Alpha diversity pointed to the second sector (SII), the most impacted along the estuary, with a decline when compared to the first sector (SI). Beta diversity, through the calculation of PERMDISP and Jaccard dissimilarity, revealed an environmental heterogeneity defined by significant seasonal differences, contributing to biological heterogeneity between the rainy and dry periods. PERMANOVA showed variations in environmental parameters such as: salinity, pH, SiO₃ and NO⁻, showing significant differences both temporal and spatial ($p < 0.05$). The community was composed of 74 taxa, 75.7% of which were represented by the copepod group, mainly by the Oithonidae and Paracalanidae families with the largest number of species. As for IndVal, it determined 15 taxa, including the copepods *Euterpina acutifrons*, *Clytemnestra scutellata*, *Debilus swelli* and *Notodiaptomus* sp. nine representing the SI (60%) and six the SII (40%). Therefore, through research it is possible to determine the environmental filters and indicator species that make up the dynamics of the estuary, as well as the current trophic state for diagnosing the ecosystem.

Keywords: Copepods. Ecological diversity. Estuary. Eutrophication. Anthropogenic impacts.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO: Spatial heterogeneity of zooplankton community in an eutrophicated tropical estuary

Figure 1. Location of the study area with the six sampling points along the ARE.....	35
Figure 2. Historical average over the last 40 years (1981-2021) and of the monthly rainfall rates during the collection months (2022/2023) obtained from the official INMET website	36
Figure 3. Scatterplot pattern by sector (A) and boxplot of environmental heterogeneity by season (B).....	41
Figure 4. Map showing the TRIX results for each sector of the ARE between 2022 and 2023.	42
Figure 5. PCA results for environmental variables affecting the ARE between 2022 and 2023.	42
Figure 6. Percentage distribution of taxa by phylum identified in the ARE, São Luís, MA	43
Figure 7. Distribution of zooplankton density between seasonal periods (A) and between sectors (B) of the ARE.	44
Figure 8. Graph of taxa selected by the indicator value (IndVal) analysis for each sector.....	46
Figure 9. Beta diversity between sectors according to the ARE trophic state	46

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO: Spatial heterogeneity of zooplankton community in an eutrophicated tropical estuary

Table 1. Results of the permutational analysis of variance (PERMANOVA) of the environmental variables, considering seasonal periods (rainy and dry-temporal) and SI and SII (spatial) as factors	39
Table 2. Descriptive statistics of environmental variables and p values for special and seasonal analyses in the Anil River estuary (ARE)	40
Table 3. Ecological indices obtained from sectors during seasonal periods (rainy and dry) in the ARE, São Luís, MA	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Monitoramento em estuários no Nordeste.....	16
3.2 Impactos no ERA ao longo do tempo	17
3.4 Bioindicadores ambientais	19
REFERÊNCIAS.....	20
CAPÍTULO: Spatial heterogeneity of zooplankton community in an eutrophicated tropical estuary	32
APÊNDICES	60
A. Sinopse taxonômica dos táxons identificados durante todo o estudo no ERA, São Luís – MA.....	60
B. Fotomicrografia alguns organismos representantes do filo Arthropoda presentes em todos os períodos sazonais e pontos amostrais. A - Nauplio de Cirripedia; B - <i>Acartia tonsa</i> ; C - <i>Euterpina acutifrons</i> ; D - <i>Oithona nana</i> ; E - <i>Oithona ovalis</i> ; F - <i>Oithona similis</i>	61
C. TABELA DE OCORRÊNCIA DOS TÁXONS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes estuarinos são essenciais para a biodiversidade e produtividade aquática, visto que diversos organismos de interesse comercial utilizam deles como áreas de reprodução, desova e desenvolvimento, fato que o torna importante para o conhecimento e a preservação destes ecossistemas. Além disso, possuem considerável importância devido às características hidrodinâmicas dos estuários que retêm nutrientes, algas e outras plantas, tendo como resultado uma elevada produção primária, que é a principal fonte de alimento para os níveis tróficos mais elevados (Costa *et al.*, 2018).

Os estuários estão localizados próximo aos centros urbanos e o desenvolvimento industrial é um dos principais causadores do crescimento populacional desordenado nestas áreas, respondendo por uma majoritária parcela das recentes e preocupantes ameaças ambientais, em conjunto com as mudanças climáticas, a exploração exarcebada dos recursos naturais e a poluição (Paulo, 2010; De Campo; Branco, 2021).

No estuário do rio Anil (ERA) se concentra, atualmente, a maior área urbanizada relativa ao município de São Luís, possuindo cerca de 244.982 habitantes, além de ser a principal bacia hidrográfica, por estar localizado no centro da cidade, sendo muito utilizado pelo turismo e pesca local. Tal urbanização é resultante de um processo histórico de ocupação sem planejamento urbano e ambiental correto (Santos *et al.*, 2020; Machado *et al.*, 2022).

À vista disso, estão sendo gerados problemas ambientais nas áreas dos manguezais que circundam o estuário, pois, com a construção das palafitas dar-se o processo de desmatamento. A decisão para a ocupação destas áreas se deu pelo fato de facilitar a promoção dos corredores viários pela cidade, originando-se pelas áreas mais próximas destes locais (Coelho; Castro, 2018).

Logo, os problemas advindos da expansão em torno dos corpos hídricos vêm se agravando cada vez mais, através da descarga de esgoto doméstico, pela carga difusa, chorume e sedimentos dos loteamentos abertos. Os detritos antropogênicos que, em sua maioria, são lançados nos cursos d'água, como os estuários e sistemas aquáticos costeiros são, em geral, provenientes dos efluentes urbanos (Serejo *et al.*, 2020).

A qualidade da água é afetada por fontes naturais como os fatores climáticos, geomorfológicos e a cobertura vegetal, além de causas antrópicas, como uso do solo, práticas agrícolas, lançamento de efluentes domésticos e industriais que podem atingir

diretamente os ambientes estuarinos (Tyagi *et al.*, 2013). Desta forma, as águas necessitam de monitoramento e aplicação de indicadores, índices ou medidores para avaliar a saúde de um sistema (Lucas *et al.* 2010; Giri; Qiu, 2016).

Ecossistemas aquáticos, como o ERA, são importantes fontes de alimentação, reprodução e refúgio dos organismos, além de influenciar diretamente na economia por meio do pescado, turismo e recreação. Porém, por serem mais próximos dos meios urbanos, são os mais impactados pela interferência antrópica, necessitando de ações que possam sensibilizar para a conservação dessas áreas por meio do desenvolvimento de estudos da biota existente no ambiente (Zhang *et al.*, 2020; Marasinghe *et al.*, 2021).

Os estudos sobre diversidade de organismos podem ser conceituados como a variedade de espécies e suas abundâncias relativas (Bebone; Montag, 2021). De acordo com observação de Costa e Schmidt (2022), a diversidade possui padrões com relação a escala espacial, sendo eles: a diversidade *alfa*, que é o número dos organismos em uma localidade; a diversidade *beta*, que é a variação na composição dos organismos entre as comunidades de diferentes locais; e a diversidade *gama*, que é o número de organismos observados, em sua totalidade, em todos os habitats de uma região.

Dentre os organismos que compõem a biodiversidade aquática que vêm sofrendo com a intensa degradação de habitats, as assembleias de microorganismos planctônicos têm sido cada vez mais estudadas, devido à sua importância no fluxo de energia e na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas aquáticos (Yoneda, 1999; Júnior; Costa, 2019).

Os organismos planctônicos possuem diversas classificações, especialmente em relação ao seu habitat e tamanho. Quanto ao habitat eles podem ser classificados como dulcícolas (ou limnoplâncton), estuarinos e marinhos (ou haliplâncton); já quanto ao seu tamanho, podem ser denominados de picoplâncton (com células de tamanho inferior a 2 µm), nanoplâncton (com células de tamanho entre 2 e 20 µm) e microplâncton (com células de tamanho entre 20 e 200 µm) (Hasle; Sournia, 1978; Pereira; Soares-Gomes, 2009).

O zooplâncton é formado por um grupo de organismos heterotróficos que habitam a coluna d'água e desempenham um papel fundamental nas teias tróficas dos ecossistemas aquáticos. Embora eles estejam em suspensão nas correntes oceânicas, os organismos zooplanctônicos são capazes de nadar, no entanto por serem microscópicos acabam sendo transportados de acordo com a força e direção das águas (Johnson; Allen, 2012; Jensen *et al.*, 2013).

Como consumidores primários são uma importante fonte de alimento para muitos invertebrados e vertebrados de dimensões superiores (Reid; Williamson, 2010), responsáveis pela transferência de energia para os níveis superiores das teias tróficas. A sua alimentação é pouco diversificada, visto que a maioria são filtradores alimentando-se do seston que ocorre na coluna de água, nomeadamente fitoplâncton, bactérias e detritos (Moss, 2010).

A comunidade de zooplâncton é considerada um elemento-chave para o entendimento das alterações sucedidas nos ecossistemas aquáticos, pois são organismos que apresentam um curto ciclo de vida, além de serem sensíveis ao processo de eutrofização. Sua distribuição e estrutura podem ser determinadas tanto pelo ambiente quanto os processos físicos e químicos da água, visto que a disponibilidade de alimento é um dos principais fatores que designam a dinâmica do zooplâncton (Castello; Krug, 2017; De-Carli *et al.*, 2018).

Com isso, o zooplâncton apresenta características de grande interesse no quadro da investigação e monitoramento ambiental, por serem considerados excelentes indicadores biológicos, sensíveis às mudanças ambientais e pressões antropogênicas ao longo dos estudos já realizados, apontando respostas rápidas às alterações, tanto em sua composição quanto em distribuição (Serranito *et al.*, 2016).

O conhecimento acerca do zooplâncton, bem como das variáveis físico-químicas da água, é de fundamental importância para estudos de monitoramento ambiental, pois estes organismos respondem rapidamente às modificações ambientais, sendo excelentes indicadores de poluição, sazonalidade, desequilíbrio tróficos, entre outros (Nandy; Mandal, 2020).

Por esse motivo, vem sendo realizadas diversas pesquisas acerca da composição e distribuição da comunidade de zooplâncton nos estuários tropicais e subtropicais pelo mundo, como por exemplo, de Anderson e Harvey (2019), Al-Yamani *et al.* (2019), Sahu e Das (2021), Elangovan e Gauns (2021), Rajkumar *et al.* (2022), Yong *et al.* (2022).

Do mesmo modo, pesquisadores desenvolvem pesquisas nos estuários brasileiros sobre a dinâmica do zooplâncton a fim de monitorar a qualidade hídrica e verificar quais fatores são limitantes para estes organismos, destacando os estudos de Guenther *et al.* (2019), Garcia *et al.* (2020), Campelo *et al.* (2021), Augusto (2022) e Brito-Lolaia (2022). Assim, esses estudos visam salientar diferenças na dinâmica da comunidade, quando comparada aos períodos sazonais distintos (estiagem x chuvoso).

Com isso, as perguntas questionadoras da pesquisa são: Quais variações ambientais influenciam na composição faunística? E o quanto elas podem influenciar? Quais organismos conseguem adentrar ou permanecer dos pontos costeiros até os pontos limnéticos? E destacando as seguintes hipóteses: **H1** – O aumento da eutrofização afeta a abundância da comunidade de zooplâncton; **H2** – Os grupos taxonômicos de zooplâncton podem exibir diferentes respostas aos níveis de eutrofização do ambiente estuarino.

Em vista disso, devido ao estuário do rio Anil (ERA) está localizado no centro urbano da ilha de São Luís e ser muito utilizado para pesca e turismo, é necessária a realização de pesquisas no local, a fim de sensibilizar a sociedade acerca da sua importância ecológica e econômica para que possam ser realizadas políticas públicas para revitalização do referido estuário.

Além disso, a pesquisa apresenta um caráter de importância nacional e internacional, pois engloba os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e as metas da Agenda 2030, como os ODS 3 – Saúde e Bem-estar (meta: 3.9); ODS 6 – Água potável e saneamento (metas: 6.3, 6.6, 6.a e 6.b); ODS 14 – Vida na água (metas: 14.1, 14.2, 14.3, 14.5).

Para a apresentação e normatização do documento final da dissertação de mestrado, o Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade permite o formato do artigo científico já produzido pela pesquisa (Capítulo XII, Seção I, Art. 60º).

O artigo avalia a heterogeneidade ambiental no estuário do rio Anil com relação as variáveis hidrológicas e a comunidade zooplânctônica, além de apontar as espécies indicadoras de cada setor do estuário. Esse artigo foi submetido ao periódico Hydrobiologia, Qualis Capes A2 (2017-2020), área de avaliação Biodiversidade. O artigo submetido está formatado segundo normas de submissão do periódico escolhido (https://link.springer.com/journal/10750/submissionguidelines#Instructions%20for%20Authors_Manuscript%20Submission).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- ❖ Caracterizar a composição e a distribuição da comunidade de zooplâncton, relacionando às variáveis ambientais ao longo do Estuário do rio Anil, São Luís – MA.

2.2 Específicos

- ❖ Determinar o estado trófico da água através do índice trófico multimétrico para a saúde da biota existente no estuário do rio Anil;
- ❖ Analisar qualitativamente e a densidade da comunidade de zooplâncton;
- ❖ Apontar as diversidades α e β a fim de caracterizar a comunidade de zooplâncton presente no estuário do rio Anil;
- ❖ Selecionar as espécies indicadoras da comunidade de zooplâncton no estuário do rio Anil em cada setor trófico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Monitoramento em estuários no Nordeste

Os ecossistemas estuarinos são ambientes de transição entre as águas marinhas e continentais, por serem ambientes que possuem um alto dinamismo nutricional, são considerados importantes berçários naturais para a maioria dos organismos aquáticos e algumas aves, pois, oferecem abrigo e alimentação em épocas de reprodução e fase inicial de suas vidas (Serpe *et al.*, 2010; Santana; Costa; Abessa, 2015; Vendel *et al.*, 2022).

Contudo, por serem ambientes localizados próximo aos centros urbanos são muito explorados e impactados por meio da extração de seus recursos, despejo incorreto de lixo e dejetos em suas águas, pela falta de educação ambiental visando sensibilizar sobre a sua importância ecológica e econômica para a sociedade (Dos Santos Valota; Da Costa; De Souza, 2022).

Devido a isso, pesquisadores vêm trabalhando, ao longo dos anos, no monitoramento desses ecossistemas que são fundamentais para a manutenção da vida no planeta, tendo como medidores as variáveis ambientais e os indicadores biológicos para que se possa realizar um diagnóstico da saúde do ambiente, apontar quais parâmetros estão afetando e o que se pode fazer para revitalizá-los, a fim de formular estratégias para a gestão e conservação da biodiversidade, além do equilíbrio ecológico desses *habitats* (Dantas; De Almeida; De Souza Nogueira, 2023).

Na costa do nordeste brasileiro, tem sido realizadas pesquisas com os organismos planctônicos em vários estuários nordestinos como: estuário do rio Sergipe – PE (Araujo *et al.*, 2008), estuário rio Mossoró – RN (Serpe *et al.*, 2010), estuário do rio Paciência – MA (Cavalcanti *et al.*, 2020), estuário do rio Itapecuru – MA (Sá *et al.*, 2022), estuário do rio Preguiças – MA (Da Cruz *et al.*, 2023). Todos estes trabalhos utilizaram os organismos do plâncton como ferramenta para avaliar a qualidade de água por serem indicadores biológicos junto as análises das variáveis ambientais das áreas estudadas.

Os estudos de Marchese *et al.* (2020) e Arias *et al.* (2021) afirmam a importância a comunidade de zooplâncton como indicadores biológicos, por apresentarem um curto ciclo de vida e alta sensibilidade, apresentando respostas rápidas às mudanças ambientais, que alteram tanto sua composição como a densidade do grupo, pois, variáveis como: salinidade, disponibilidade de nutrientes e sazonalidade,

influenciam a dinâmica populacional da comunidade e apontam quais fatores podem limitar ou não a subsistência e manutenção destes organismos.

3.2 Impactos no ERA ao longo do tempo

O estuário do rio Anil é uma parte majoritária da principal bacia hidrográfica da ilha de São Luís, Maranhão, sendo responsável por adentrar diversos bairros servindo como fonte para banhos, lavagens e lazer por muito tempo. Contudo, o desenvolvimento das cidades de forma desordenada acabou limitando seu espaço e causando prejuízos constantes como a poluição de suas águas (Ferreira *et al.*, 2016; Coelho; De Castro, 2018).

Dentre tantas, uma das principais causas da degradação do ERA, se dá pela construção de casas em suas margens, sem saneamento básico nem coleta seletiva, resultando em despejo constante de efluentes domésticos e industriais em suas águas. Além do desmatamento das árvores de manguezal, realizado para a construção das residências e como resposta termina causando o assoreamento do rio (Medeiros, 2005; Martins; Lopes, 2009; Carvalho *et al.*, 2020).

Além de ser cercado por construções de pontes e rodovias a fim de facilitar a mobilidade urbana que interligam os bairros da cidade, essas modificações acabam por restringir o espaço que já estava ocupado pelas águas do estuário, podendo também ocasionar modificações na composição físico-química tanto do solo como no corpo hídrico (Pereira; Alcântara, 2017; Da Cruz; De Queiroz Ribeiro; Pereira, 2020).

A matriz de impacto ambiental e os mapas de uso e a ocupação das APP's mostram que a bacia do rio Anil está impactada por um alto adensamento populacional, causando a perda da biodiversidade, risco a saúde pública e a degradação da beleza cênica da paisagem (Ribeiro; Cruz; Dos Santos, 2020).

Portanto, todos esses impactos sofridos pelo ERA, ao longo do tempo, resultam em perda da biodiversidade, pois, alguns organismos não toleram sobreviver em um ambiente tão degradado, assim como o processo de eutrofização causado pelo alto aporte nutricional advindo dos efluentes despejados no rio, tendo como consequência, uma oxigenação das águas quase inexistente, prejudicial para os organismos aeróbicos que compõem este ecossistema (Alcântara, 2004; Silva *et al.*, 2014).

3.3 Importância da comunidade de zooplâncton

O zooplâncton é um grupo muito diversificado de organismos heterotróficos, que desempenham papel fundamental nos ecossistemas marinhos, consumindo fitoplâncton e servindo como alimento para larvas de peixe e peixes pelágicos adultos, transferindo a energia dos produtores primários a níveis tróficos superiores (Severiano *et al.*, 2021). A sua diversidade biológica desempenha um papel importante nas funções dos ecossistemas e nos serviços que fornecem à sociedade (Vitousek *et al.*, 1997; Loreau *et al.*, 2001).

Os organismos planctônicos, por seu tamanho e modo de vida, não conseguem se contrapor à força das águas, portanto são transportados passivamente, porém, é preciso reconhecer que sua capacidade de movimentação é uma questão de escala espacial. Por exemplo, animais planctônicos como copépodes, chaetognatos e hidromedusas têm capacidade de movimentação ativa, podendo realizar migrações verticais de centenas de metros por dia, geralmente à procura de alimento nas camadas mais superficiais do oceano (Gemaque *et al.*, 2020).

O grupo do zooplâncton apresenta características de grande interesse no quadro da investigação e monitoramento ambiental, por serem considerados excelentes indicadores biológicos, sensíveis às mudanças ambientais e pressões antropogênicas (Serranito *et al.*, 2016). Além disso, o zooplâncton ocupa uma posição estratégica na teia trófica aquática, atuando na reciclagem de nutrientes e na regulação das populações fitoplanctônicas, por meio do aumento da taxa de consumo sobre esses organismos (Dos Santos Corsini; Do Nascimento, 2020; Castello *et al.*, 2017).

Dentre esses organismos, os copépodes constituem elos importantes nas cadeias alimentares dos ecossistemas aquáticos. Além de conectora da energia nos níveis tróficos, a comunidade de zooplâncton é um bioindicador da qualidade da água no sistema. Como está ligada à comunidade de fitoplâncton, qualquer alteração na produção primária afeta diretamente a quantidade e a composição do zooplâncton (Eskinazi-Sant'anna *et al.*, 2007).

O uso do zooplâncton possibilita a detecção da existência de um problema ou característica interferindo na dinâmica da comunidade. Contudo, identificar que interferência é essa não constitui tarefa fácil, pois o zooplâncton apresenta íntima ligação com as mais diversas características ou impactos de um ecossistema. Por esta razão não convém abandonar definitivamente os métodos tradicionais de análise por medição de variáveis, sendo que a melhor escolha é uma aliança entre os métodos (Souza, 2019).

Desta forma, o estudo da comunidade de zooplâncton pode ajudar no monitoramento dos efeitos poluidores de despejos domésticos e industriais, pois esses organismos possuem grande sensibilidade ambiental e respondem a diversas categorias de impactos, tanto pela alteração na sua quantidade como na composição e diversidade da comunidade (Manickavasagam *et al.*, 2019). Eles apresentam espécies bioindicadores, fornecendo dados relevantes sobre processos que interagem no meio, influenciados pelas condições abióticas e bióticas (Li; Zheng; Liu, 2010).

3.4 Bioindicadores ambientais

Os organismos considerados bioindicadores são aqueles que avaliam a qualidade de um determinado ambiente, um dos índices mais utilizados para mensurar a qualidade da água de um local é o índice de diversidade da comunidade de zooplâncton, pois, ele avalia a presença e ausência de cada espécie assim como a sua abundância relativa (Ferreira; Olivati, 2014; Fernandes; De Sousa, 2018).

As condições ambientais influenciam de forma efetiva na dinâmica populacional deste grupo. Alterações nas variáveis como salinidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes e predação podem indicar problemas ambientais e resultar na ausência de alguns desses organismos (Prestes; Vincenci, 2019).

A poluição é um importante fator que potencializa ou limita determinados organismos, pois, a comunidade pode ser composta por indivíduos que conseguem tolerar as consequências advindas da degradação de seu *habitat*, portanto a presença dessas espécies pode indicar a presença de poluentes na água, assim como os que são mais vulneráveis, respondendo com a sua ausência no ambiente (Souza; Morassuti, 2018; Braz; Longo, 2019).

Do mesmo modo, a eutrofização afeta diretamente a comunidade zooplânctônica por obter uma alta produtividade nutricional causando baixa oxigenação das águas e dificultar a sobrevivência nestes locais. Além disso podem desencadear a formação de *blooms* de alguns representantes do fitoplâncton não palatáveis, fazendo com que migrem para outros locais em busca de alimento e de condições favoráveis (Goulart; Callisto, 2003; Otsuka *et al.*, 2014).

Outro fator considerável para a bioindicação da comunidade zooplânctônica é a densidade, quantidade de organismos por volume de água filtrada pela rede de plâncton. Quando a densidade diminui, pode designar problemas ambientais para o ecossistema como o despejo incorreto de dejetos e lixo na água, resultando em produção exacerbada

de nutrientes no corpo hídrico (De Farias *et al.*, 2019; Dos Santos Corsini; Do Nascimento, 2020).

Diante do exposto, por serem excelentes bioindicadores, a comunidade de zooplâncton tem se tornado um elemento chave para o estudo da qualidade da água dos ambientes estuarinos, por apresentar uma íntima relação com as variáveis ambientais, ocasiona respostas rápidas as alterações climáticas e pressões antrópicas (Zhao *et al.*, 2022; Bezerra; Figueiredo; Kozlowsky-Suzuki, 2023). Além de ser um elo importante para teia trófica aquática por realizar a transferência energética entre os níveis tróficos e representar a fase inicial da vida de organismos de alto interesse comercial como crustáceos, peixes e moluscos (Chouvelon *et al.*, 2019; Basuri *et al.*, 2023).

REFERÊNCIAS

Alcântara, E.H. de. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do Rio Anil. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 12, p. 158-173, 2004.

Alcântara, EH de. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do Rio Anil. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 12, p. 158-173, 2004.

Alencar, V. E. S. A. *et al.* Análise de parâmetros de qualidade da água em decorrência de efeitos da precipitação na baía de Guajará – Belém– PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 12, n. 02. P. 661-680, 2019.

Al-Yamani, Faiza; Madhusoodhanan, R.; Skryabin, V.; Al-Said, T. The response of microzooplankton (tintinnid) community to salinity related environmental changes in a hypersaline marine system in the northwestern Arabian Gulf. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 166, p. 151-170, 2019.

Anderson, Sean R.; Harvey, Elizabeth L. Variabilidade sazonal e determinantes do pastoreio de microzooplâncton e crescimento do fitoplâncton em um estuário subtropical. **Fronteiras em Ciências Marinhas**, v. 6, p. 174, 2019.

Araujo, H. M. P., Nascimento-Vieira, D. A., Neumann-Leitão, S., Schwamborn, R., Lucas, A. P. O., Alves, J. P. H. Zooplankton community dynamics in relation to the seasonal cycle and nutrient inputs in an urban tropical estuary in Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, p. 751-762, 2008.

Araujo, M.; Noriega, C.; Hounsou-Gbo, G.A; Veleza, D.; Araújo, J.; Bruto, L.; Neumann-Leitão, S. A Synoptic Assessment of the Amazon River-Ocean Continuum during Boreal Autumn: From Physics to Plankton Communities and Carbon Flux. **Frontiers in microbiology**, v. 8, p. 1358, 2017.

Augusto, Camille Nogueira. Biomassa e densidade do zooplâncton no Parque Estadual Marinho da Pedra da Risca do Meio (Ceará, Brasil). 2022.

- Basuri, C. K.; Garlapati, D.; Chandrasekaran, M.; Karri, R.; Ramanamurthy, M. V. Influence of environmental heterogeneity on the distribution of micro-zooplankton community along the tropical coastal waters. **Marine Pollution Bulletin**, v. 195, p. 115546, 2023.
- Benone, Naraiana Loureiro; Montag, Luciano Fogaça de Assis. Métodos quantitativos para diversidade taxonômica. **Oecologia Australis**. 25(2):398–414, 2021
- Berralho, A.; Abdelouahab, H.; Baibai, T.; Charib, S.; Larissi, J.; Agouzouk, A.; Makaoui, A. Variação de curto prazo da comunidade zooplanctônica na Baía de Cintra (noroeste da África). **Oceanologia**, v. 61, n. 3, pág. 368-383, 2019.
- Bezerra, Wellen Cristina Alves; Figueiredo, Gisela Mandali; Kozlowsky-Suzuki, Betina. Can we meaningfully estimate the impacts of climate on zooplankton biodiversity? A review on uses and limitations of marine time series. **Marine Pollution Bulletin**, v. 195, p. 115515, 2023.
- Björnberg, T.S.K. Copepoda. In: Boltovskoy, D. (ed.). **Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino**. Publ. Esp. INIDEP, Mar del Plata, Argentina, 1981. pp. 587-680.
- Boltovskoy, D. South Atlantic Zooplankton. 1^{ed}. Leinden. **The Netherlands: Backhuys Publishers**, v.1/2, p.1706. 1999.
- Bonecker, S. L. C. **Atlas de zooplâncton da região central da Zona Econômica Exclusiva Brasileira**. Rio de Janeiro: Museu nacional, 234 p. 2006.
- Bouvy, M; Pagano, M.; Troussellier, M. Effects of a cyanobacterial bloom (*Cylindros raciborskii*) on bacteria and zooplankton communities in Ingazeira reservoir (northeast Brazil). *Aquatic Microbial Ecology*, 25: 215-227, 2001.
<http://dx.doi.org/10.3354/ame025215>.
- Bradford, J. M.; Markhaseva, E. L.; Rocha, C. E. F.; Abiahy, B. Copepoda. In: Boltovskoy, D. 1999. **South Atlantic Zooplankton**. 860-1098p. 1999
- Braz, Sofia Negri; Longo, Regina Márcia. Bioindicadores de Poluição ambiental: um estudo bibliométrico. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 12, n. 27, p. 42-53, 2019.
- Brito, S.L.; Maia-Barbosa, P.M., Pinto-Coelho, R.M. Zooplankton as an indicator of trophic conditions in two large reservoirs in Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 16: 253 264,2011. <http://dx.doi.org/10.1111/j.14401770.2011.00484>.
- Brito-Lolaia, M., De Figueiredo, G.G.A.A., Neumann-Leitão, S., Yogui, G.T., Schwambom, R. Can the stable isotope variability in a zooplankton time series be explained by its key species?. **Marine Environmental Research**, v. 181, p. 105737, 2022.
- Campelo, Renata Polyana De Santana; De Lima, C. D. M.; De Santana, C.S.; Da Silva, A.J.; Neumann-Leitão, S.; Ferreira, B. P.; De Castro Melo, P. A. M. Oil spills: the invisible impact on the base of tropical marine food webs. **Marine Pollution Bulletin**, v. 167, p. 112281, 2021.

Carvalho, M. M. F., de Santana, C. G., dos Santos Lisboa, D. C., Rocha, L. N., Rangel, A. N., Muller, R. M. L. Avaliação de conformidade ambiental do efluente de estação de tratamento de esgoto nos corpos hídricos: Estudo de caso da ETE-Vinhais sobre o rio Anil, São Luís–MA. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797)**, v. 8, n. 1, p. 309-334, 2020.

Castello, jorge pablo; krug, luiz Carlos. **Introdução às Ciências do Mar**. Pelotas: Ed. Textos, 2017. 602 p. ISBN: 978-85-68539-00-2

Cavalcanti, L. F., Cutrim, M. V., Lourenço, C. B., Sá, A. K. D., Oliveira, A. L., & de Azevedo-Cutrim, A. C. Patterns of phytoplankton structure in response to environmental gradients in a macrotidal estuary of the Equatorial Margin (Atlantic coast, Brazil). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 245, p. 106969, 2020.

Cavalcanti, Lisana F.; Cutrim, M.V.J.; Maciel, C.C.S.; Dos Santos Sá, Ana Karoline Duarte; Azevedo-Cutrim, A.C.G. de; Pimentel, T.S.; Da Cruz, Q.S. Application of multiple indices to assess trophic and ecological status in a tropical macrotidal estuary (Equatorial Margin, Brazil). **Chemistry and Ecology**, v. 38, n. 2, pág. 122-144, 2022.

Cavalcanti-Lima, L.F., Cutrim, M.V., Feitosa, F.A.D.N., Flores-Montes, M.D.J., Dias, F.J., Sá, A.K.D.S., Lourenço, C.B. Effects of climate, spatial and hydrological processes on shaping phytoplankton community structure and β -diversity in an estuary-ocean continuum (Amazon continental shelf, Brazil). **Journal of Sea Research**, v. 102384, 2023.

CETESB - **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. 2021.
<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>, março.

Cetesb. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **L.5.304: Zooplâncton de água doce: métodos qualitativo e quantitativo**, p. 13. 2012.

Chouvelon, T.; Strady, E.; Harmelin-Vivien, M.; Radakovitch, O.; Brach-Papa, C.; Crochet, S.; Chiffolleau, J. F. Patterns of trace metal bioaccumulation and trophic transfer in a phytoplankton-zooplankton-small pelagic fish marine food web. **Marine Pollution Bulletin**, v. 146, p. 1013-1030, 2019.

Cideira-Neto, Ivo Raposo Gonçalves et al. Qualidade da Água no Estuário do Rio Goiana, Nordeste do Brasil: Subsídios para a Conservação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 05, p. 2340-2353, 2022.

Coelho, Keyton Kylon Fonseca; De Castro, Antônio Carlos Leal. Mudanças socioeconômicas e ambientais da população ribeirinha na bacia hidrográfica do Rio Anil, São Luís – MA. **Revista de Políticas Públicas**, v. 22, n. 2, p. 1091-1120, 2018.

Costa, Marília Maria Silva Da; Schmidt, Fernando Augusto. Diversidade gama, alfa e beta de assembleias de formigas em resposta a um gradiente de cobertura florestal em paisagem modificada pelo homem na Amazônia brasileira. **Biotropica**, v. 54, n. 2, pág. 515-524, 2022.

Cruz, Walefe Lopes da; Ribeiro, Deolony de Queiroz; Pereira, Ediléa Dutra. Conflitos de uso e ocupação em áreas de preservação permanente na bacia do rio Anil – São Luís, MA. **Revista Geonorte**. v.11, n.37, p.229-247, 2020.

Cutrim, Marco Valério Jansen; Ferreira, Francinara Santos; Dos Santos, Ana Karoline Duarte; Cavalcanti, Lisana Furtado; Araújo; Bethânia de Oliveira. Trophic state of an urban coastal lagoon (northern Brazil), seasonal variation of the phytoplankton community and environmental variables. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 216, p. 98-109, 2019.

Da Costa, K.G., De Azevedo, S.S., Pereira, L.C., Da Costa, R.M. Variabilidade Temporal do Zooplâncton no Sistema Estuarino do Rio Paracauari (Ilha do Marajó, Pará). **Tropical Oceanography**, Recife, v. 46, n. 1, p. 53-69, 2018.

Da Cruz, Q. S., Cutrim, M. V. J., Santos, T. P., dos Santos Sá, A. K. D., & Cavalcanti-Lima, L. F. Environmental heterogeneity of a tropical river-to-sea continuum and its relationship with structure and phytoplankton dynamics–Lençóis Maranhenses National Park. **Marine Environmental Research**, v. 187, p. 105950, 2023.

Da Cruz, Walefe Lopes; De Queiroz Ribeiro, Delony; Pereira, Ediléa Dutra. conflitos de uso e ocupação em áreas de preservação permanente na bacia do rio Anil-São Luís, MA: Conflicts of use and occupation in permanent preservation areas in the Anil river basin-São Luís, MA. **REVISTA GEONORTE**, v. 11, n. 37, p. 229-247, 2020.

Dantas, J.L., De Almeida, T., De Souza Nogueira, E. M. Uso do zooplâncton como ferramenta para estudo da qualidade de água em ecossistemas do semiárido do nordeste brasileiro:uma revisão bibliométrica. **Revista Ouricuri**, v. 13, n. 2, p. 03-22, 2023.

De Campos, Rodrigo José; Branco, Priscila. Ocupação desordenada dos espaços urbanos e suas consequências socioambientais. **Revista Thêma et Scientia**, v. 11, n. 2E, p. 216-227, 2021.

De Farias, C. L. C., Eichler, P. P. B., Vital, H., Gomes, M. P. Influência de Variações Ambientais e da Dinâmica Sedimentar na Distribuição de Foraminíferos no Estuário do Rio Potengi (RN, Brasil). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3, p. 112-128, 2019.

De Oliveira, C. S. P., da Silva Fonseca, A., Díaz, C. A.; dos Santos, W. P. Reflexões sobre o desafio ambiental: níveis de eutrofização e floração de cianobactérias na Bacia Apodi-Mossoró. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 5, p. 519-530, 2020.

De-Carli, Bruno; Albuquerque, Felícia; Moschini-Carlos, Viviane; Pompêo, Marcelo. Comunidade zooplancônica e sua relação com a qualidade da água em reservatórios do Estado de São Paulo. **Iheringia Série Zoologia**. v. 108, p. 11, 2018.

DHN – Diretoria de Hidrodinâmica e Navegação. Tábua das marés. São Luís (Estado do Maranhão). In: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>.

Dos Santos Corsini, Fábio; Do Nascimento, Ariane Flávia. Introdução ao uso de zooplâncton como bioindicador. **Ciências Ambientais: Recursos Hídricos**, p. 184, 2020.

Dos Santos Sá, A.K.; Cutrim, M.V.J.; Feitosa, F.A. do N.; Flores-Montes, M. de J.; Cavalcanti, L.F.; Costa, D. dos S.; Da Cruz, Q.S. Multiple stressors influencing the general eutrophication status of transitional waters of the Brazilian tropical coast: An approach utilizing the pressure, state, and response (PSR) framework. **Journal of Sea Research**. v.89, p. 102282, 2022.

Dos Santos Valota, E.C., Da Costa, S.M.F., De Souza, A.A.M. O processo de ocupação em ambientes de várzea urbana de uma pequena cidade do estuário amazônico: Ponta de Pedras – PA. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 26, p. e24-e24, 2022.

Elangovan, S. Sai; Gauns, Mangesh U. A comparative study on microzooplankton communities in two tropical monsoonal estuaries. **Journal of Sea Research**, v. 171, p. 102034, 2021.

Eskinazi-Sant'anna, E. M.; Menezes, R.; Costa, I. S.; Panosso, R. F.; Araújo, M. F.; Attayde, J. L. Composição da Comunidade Zooplânctônica em Reservatórios Eutróficos do Semi-árido do Rio Grande do Norte. **O ecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 03, p. 410–421, 2007.

Farshad, Hashemzadeh; Venkataramana, G. V. Impact of physico-chemical parameters of water on zooplankton diversity in Nanjangud industrial area, India. **Inter. Res. Journal of Environ. Sci**, v. 1, p. 37-42, 2012.

Fernandes, Ubirajara Lima; De Sousa, Geyse Freitas. Introduzindo conceitos sobre bioindicadores aquáticos em práticas de educação ambiental. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 1, p. 336-348, 2018.

Ferreira, C. F. C., Campos, G. A., da Silva Castro, J., Silva, M. H. L., de Lima Cardoso, R., de Oliveira Mota, T. D. S., Neta, R. N. F. C. Percepção ambiental sobre usos dos recursos aquáticos e sua relação com os resíduos sólidos no Rio Anil: estudo de caso para subsidiar ações educativas em São Luís-MA. **Pesquisa em Foco**, v. 21, n. 2, 2016.

Ferreira, Rafael Lopes; Olivati, Fabrício Narcísio. Autilização de bioindicadores como instrumento de bioindicadores como instrumento de perícia ambiental. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 5, n. 3, 2014.

Frankovich, Thomas A.; Gaiser, E.E.; Zieman, J.C.; Wachnicka, A.H. Spatial and temporal distributions of epiphytic diatoms growing on *Thalassia testudinum* Banks ex König: relationships to water quality. **Hydrobiologia**, v. 569, p. 259-271, 2006.

Garcia, Tatiane M.; Matthews-Cascon, H.; Schettini, C. A.; Matsumura-Tundisi, J. G.; Neumann-Leitão, S. Mesozooplankton community of a dammed estuary in Brazilian semi-arid region. **Cah. Biol. Mar**, v. 61, p. 149-158, 2020.

Gemaque, Tainára Cunha; Moraes, C. C.; De Araújo, P. G.; Da Silva, S. R.; De Oliveira, G. R.; Da Costa, D. P. Caracterização do Zooplâncton no baixo rio Amazonas região da orla da cidade de Macapá, AP, Brasil. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2676-2680, 2020.

Ghidini, A.R.; Serafim-Júnior, M.; Perbiche-Neves, G.; Brito, L. Distribution of planktonic Cladocerans (Crustacea: Branchiopoda) of a shallow eutrophic reservoir (Paraná State, Brazil). **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 4: 294-305, 2009.

Giri, S.; Qiu, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 41-48, 2016.

Goulart, M. D.; Callisto, Marcos. Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental. **Revista da FAPAM**, v. 2, n. 1, p. 156-164, 2003.

Grasshoff; K.; Mehrhardt, M.; Kremling, K. Methods of seawater analysis, **Verlag Chemie**, Weinheim. 1983. 419 pp.

Guenther, Mariana; Costa, A. E.; Pessoa-Fidelis, V. T.; Neumann-Leitão, S. Seasonal variations in plankton trophic structure under highly eutrophic conditions. **Marine and Freshwater Research**, v. 71, n. 6, p. 641-652, 2019.

Hasle, G.; Sournia, A. Phytoplankton Manual, Monographs on Oceanographic Methodology. **Phytoplankton Manual, Monographs on Oceanographic Methodology**, v. 6, p. 337, 1978.

Hedayati, A., Pouladi, M., Vazirizadeh, A., Qadermarzi, A., Mehdipour, N. Seasonal variations in abundance and diversity of copepods in Mond River estuary, Bushehr, Persian Gulf. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 18, n. 2, p. 447–452, 2017. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180201v>

Ibrahim, Adriana Nabil Abdel Fattah; Castilho-Noll, Maria Stela Maioli; Valenti, Wagner Cotroni. Dinâmica da comunidade zooplancônica em resposta ao estado trófico da água na aquicultura multitrófica integrada. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 49, 2023.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Normas climatológicas (1981-2023). São Luís, Maranhão. Acesso em 23 de maio de 2023, em <https://portal.inmet.gov.br/>

Jensen, T. C., I. Dimante-Deimantovica, A. K. Schartau, B. Walseng. Cladocerans respond to differences in trophic state in deeper nutrient poor lakes from Southern Norway. **Hydrobiologia**, n. 715, p.101–112, 2013.

Ji, B.; Yang, K.; Zhu,L.; Jiang,Y.; Wang,H.; Zhou,J.; Zhang, H., 2015. Aerobic Denitrification: A Review of Important Advances of the Last 30 Years. **Biotechnology and Bioprocess Engineering** 20: 643-651. DOI 10.1007/s12257-015-0009-0.

Johnson, William S.; Allen, Dennis M. Zooplankton of the Atlantic and Gulf coasts: a guide to their identification and ecology. **JHU Press**, 2012.

Júnior, Miodeli Nogueira; Costa, Micheli Duarte de Paula. Zooplâncton da Baía da Babitonga e plataforma continental adjacente: diagnóstico e revisão bibliográfica. **Revista CEPSUL-Biodiversidade e Conservação Marinha**, v. 8, p. eb2019001-eb2019001, 2019.

Koroleff, F. Determination of phosphorus. **Methods of seawater analysis**, p. 125-133, 1983.

Kozak, E.R.; Franco-Gordo, C.; Godínez-Domínguez, E.; Suárez-Morales, E.; Ambriz-Arreola, I. Variabilidade sazonal de valores de isótopos estáveis e tamanho de nicho em copépodes calanóides tropicais e frações de tamanho de zooplâncton. **Biologia Marinha**, v. 167, p. 1-13, 2020.

Lee, P.W.; Hsiao, S.H.; Chou, C.; Tseng, L.C.; Hwang, J.S. Flutuações do zooplâncton nas águas superficiais do estuário de um grande rio urbano subtropical. **Fronteiras em Ecologia e Evolução**, v. 9, p. 598274, 2021.

Li, L., Zheng, B., Liu, L. Biomonitoring and bioindicators used for river ecosystems: definitions, approaches and trends. **Procedia Environmental Sciences**, v. 2, p. 1510-1524, 2010.

Linnaeus, C. von. Tomus I. Systems naturae per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis. **Editio decima, reformata. Holmiae. (Laurentii Salvii)**, v. 1, p. 1-824, 1758.

Litchman, E.; Ohman, M. D.; Kiørboe, T. Trait-based approaches to zooplankton communities. **Journal of Plankton Research**, v. 35, n. 3, p. 473-484, 2013.

Liu, Wen-Cheng; Liu, Hong-Ming; Huang, Wei-Che. Flood–Ebb and Discharge Variations in Observed Salinity and Suspended Sediment in a Mesotidal Estuary. **Standards**, v. 2, n. 2, p. 209-225, 2022.

Lopes, Rubens Mendes; Dias, June Ferraz; Gaeta, A. S. Ambiente pelágico. Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos. Salvador: **EDUFBA**, p. 123-155, 2009.

Loreau M., Naeem S., Inchausti P., Bengtsson J., Grime Jp., Hector A., Hooper Du., Huston Ma., Raffaelli D., Schmid B., Tilman D., Wardle da. 2001. Biodiversity and 16 ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. **Science**, 294: pp. 804- 808.

Lucas, Ariovaldo; Folegatti, Marcos; Duarte, Sérgio. Qualidade da água em uma microbacia hidrográfica do Rio Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 937–943, 2010.

Machado, Adilson Matheus Borges; Eschrique, Samara Aranha; Lima, Leonardo Gonçalves de; Parise, Claudia Klose; Soares, Leonardo Silva; Azevedo, James Werllen Jesus Azevedo; Silva, Marcelo Henrique Lopes; Castro, Antonio Carlos Leal de. Distribution of physical and chemical variables in the water column and characterization of the bottom sediment in a macrotidal estuary on the Amazon coast of the state of Maranhão, Brazil. **Revista Ambiente & Água**. v.17, n.1, e2798, Taubaté - SP, 2022.

Manickavasagam, S., Sudhan, C., Bharathi, S., Aanad, S. Bioindicators in aquatic environment and their significance. **Journal of Aquaculture In The Tropics**, v. 34, n. 1, p. 73-79, 2019.

Maranhão, Estado do. **Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico:**

Atlas do Maranhão. São Luís: UEMA/GEPLAN, 2002.

Marasinghe, S., Perera, P., Simpson, G. D., Newsome, D. Nature-based tourism development in coastal wetlands of Sri Lanka: An Importance–Performance analysis at Maduganga Mangrove Estuary. **Journal of Outdoor Recreation and Tourism**, v. 33, p. 100345, 2021.

Margalef, D.R. Information theory in ecology. **Gen. Syst.** 1958. n. 3. p. 36–71.

Martins, A. L. P.; Lopes, M. J. S.; Melo, O. T. de. Zooplâncton como bioindicador da qualidade ambiental no Estuário do Rio Anil, São Luís, Maranhão. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**. n. 19, pgs. 51-60, 2006.

Martins, Ana Luiza Privado; Lopes, Maria José Saraiva. Caracterização da população ribeirinha do estuário do Rio Anil (São Luís-MA), com base em aspectos sociais, econômicos e ambientais. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 22, n. 9, p. 9-16, 2009.

Martins, Ana Luiza Privado; Lopes, Maria José Saraiva; De Melo, Odilon Teixeira. Zooplâncton como bioindicador de qualidade ambiental no estuário do rio Anil, São Luís, Maranhão. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, 19:51-60. 2006.

Medeiros, Thereza Christina Costa. A degradação do manguezal do Iguarapé do Jacarati, no estuário do Rio Anil, São Luiz-MA: um estudo de caso. **Revista Interface (Porto Nacional)**, n. 02, 2005.

Meng, Fanhua; Li, Zhenxiang; Li, Lei; Feng, Lu; LIU, Yan; LU, Xinxin; FAN, Yawen. Phytoplankton alpha diversity indices response the trophic state variation in hydrologically connected aquatic habitats in the Harbin Section of the Songhua River. **Relatórios Científicos** , v. 10, n. 1, pág. 1-13, 2020.

Morais, J. V. de M. .; Pinheiro, S. C. C. .; Ahndrew, L. M. S.; Sousa, E. B. de; Paes, E. T. . Zooplankton composition and density in the Tucuruí hydroelectric plant reservoir (Pará, Brazil). **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 12, p.e9991210766, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.10766.

Moss, B. Ecology of freshwaters: a view for the twenty-first century. **Atlantic. Blackwell Publishing Ltd.** 2010.

Mourão, Francianne Vieira; De Sousa, A.C.S.R.; Da Luz Mendes, R.M.; Castro, K.M.; Da Silva, A.C., El-Robrini, M.; Santos, M.D.L.S. Qualidade da água e eutrofização no estuário do Curuçá no norte do Brasil. **Estudos Regionais em Ciências Marinhas**, v. 39, p. 101450, 2020.

Nandy, Tanmoy, Mandal, Sumit. Desvendando a variação espaço-temporal da comunidade zooplancônica do rio Malta no sistema estuarino de Sundarbans, Índia. **Oceanologia**, v. 62, n. 3, p. 326-346, 2020.

Ogamba, E. N., Charles, E. E.; Izah, S. C. Application of diversity indices in the study zooplankton community of Taylor Creek in the Niger Delta, Nigeria. **Sumerianz Journal of Biotechnology**, v. 2, n. 6, p. 35-41, 2019.

- Otsuka, A. Y., Feitosa, F. D. N., Flores Montes, M. D. J., Honorato da Silva, M., Travassos, R. K. Condições ambientais do estuário do rio Botafogo (Itamaracá-Pernambuco-Brasil): clorofila a e algumas variáveis ambientais. **Tropical Oceanography**, v. 42, n. 3, p. 111-127, 2014.
- Paulo, Rodolfo Fares. O desenvolvimento industrial e o crescimento populacional como fatores geradores do impacto ambiental. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 13/14, 2010.
- Pereira, Marcio Rodrigo Da Silva; Alcântara, José O. A mobilidade e a expansão territorial na cidade de São Luís, MA: um novo paradigma social na ocupação do espaço urbano. **Cadernos Metrópole**, v. 19, p. 977-998, 2017.
- Pereira, Renato Crespo; Soares-Gomes, Abílio. Biologia marinha. **Interciência**, v. 2, p. 608, Rio de Janeiro, 2009.
- Pielou, E. C. Mathematical Ecology. **Wiley**. New York, 1977.
- Pinheiro, R.H.D.S., Santana, R.L.S., Monks, S., Santos, J.N.D.; Giese, E.G. Cucullanus marajoara n. sp.(Nematoda: Cucullanidae), parasita de Colomesus psittacus (Osteichthyes: Tetraodontiformes) no Marajó, Brasil. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária** , v. 521-530, 2018.
- Pinto, Filipe; Antunes, Sara C. Biomanipulação para o controlo da eutrofização. **Revista de Ciência Elementar**, v. 8, n. 1, 2020.
- Pinto, T.K., Austen, M.C., Warwick, R.M., Somerfield, P.J., Esteves, A.M., Castro, F.J.; Santos, P.J. Diversidade de nematóides em diferentes microhabitats em região de manguezal. **Ecologia Marinha** , v. 34, n. 3, pág. 257-268, 2013.
- Pinto-Coelho, R. M. Métodos de coleta, preservação, contagem e determinação de biomassa em zooplâncton de água epicontinentais. In: C. E. Bicudo, & D. d. Bicudo, **Amostragem em Limnologia** (2 ed., p. 371). São Carlos: RiMa, 2007.
- Prestes, Rosi Maria; Vincenci, Kelin Luiza. Bioindicators as environmental impact assessment. **Brailian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 2, n. 4, p. 1473-1493, 2019.
- Quinelato, Raquel Viana et al. Determinação da qualidade da água superficial e sua compatibilidade com os múltiplos usos: estudo de caso do estuário do rio Caraíva. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 1, p. 037-057, 2021.
- Rajkumar, M.; Prabu, V. A.; Rahman, M. M.; Jenkinson, I. R. Community structure of microzooplankton in a tropical estuary (Uppanar) and a mangrove (Pichavaram) from the south-east coast of India. **Journal of the Marine Biological Association of India**, v. 64, n. 2, p. 14, 2022.
- Rego, A. H. G.; Rangel-Junior, A.; Costa, I. A. S. Phytoplankton scenario and microcystin in water during extreme drought in semiarid tropical water supplies, Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology** 80(1):1-11, 2019.

- Reid, J. W.; C. E. Williamson. Copepoda Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. **Imprensa Acadêmica**. p. 829–899. 2010.
- Ribeiro, Delony de Queiroz; Cruz, Walefe Lopes; dos Santos, Gabriel Irvine Ferreira Alves. Delimitação e diagnóstico ambiental das áreas de preservação permanente na hidrográfica bacia do rio Anil, São Luís–MA. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente** , v. 1, não. 1 pág. 69-69, 2020.
- Rodrigues, R. de A. R. *et al.* Nitrogen Dynamics in Tropical Agricultural and Forest Systems and their Impact on Climate Change. **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 9, n. 5, p.1868-1886, 2017.
- Sá, A. K. D. S., Feitosa, F. A. N., Cutrim, M. V. J., Flores-Montes, M. J., dos S. Costa, D., Cavalcanti, L. F. Phytoplankton community dynamics in response to seawater intrusion in a tropical macrotidal river-estuary continuum. **Hidrobiologia** , pág. 1-33, 2022.
- Sahu, Biraja Kumar; Das, Sourav. Microzooplâncton em estuários, manguezais e lagoas da costa leste da Índia. **Dinâmica Biogeoquímica Estuarina da Costa Leste da Índia** , p. 183-209, 2021. See More.
- Santana, L.M.B.M., Costa, L.V., Abessa, D.M.S. A contaminação antrópica e seus efeitos em três estuários do litoral do Ceará, nordeste do Brasil-revisão. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 48, n. 2, p. 93-115, 2015.
- Santos, T. T. L.; Serejo, J. H. F.; Lima, H. P.; Eschrique, S. A. Dissolved Nutrient Fluxes in Macrotidal Estuary in the Amazonian Region, Brazil. **Tropical Oceanography**, v. 48, n. 1, p. 1–19, 2020.
- Seitzinger, S.P.; Harrison, J.A.; Bohlke, J.K.; Bouwman, A.F.; Lowrance, R.; Peterson, B.; Tobias, C.; Van Drecht, G. Denitrification across landscapes and waterscapes: a synthesis. **Ecol Appl** 16: 2064–2090. 2006.
- Serejo, J.H.; Santos, T.T.L.; Lima, H.P.; Azevedo, I.H.; Dos Santos, V.H.; Eschrique, S.A. Fortnightly variability of total suspended solids and bottom sediments in a macrotidal estuarine complex on the Brazilian northern coast. **Journal of Sedimentary Environments**. p.101-115, 2020.
- Serpe, F. R., Adloff, C. T., Crispim, M. C., Rocha, R. M. Comunidade zooplânctônica em um estuário hipersalino no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 5, n. 3, p. 51-73, 2010.
- Serranito, Bruno *et al.* Proposição de indicadores de pressão antrópica na Baía de Toulon (Mar Mediterrâneo) com base em séries temporais do zooplâncton. **Continental Shelf Research**, v. 121, p. 3-12 de 2016.
- Severiano, Juliana dos Santos, Amaral, C.B., Diniz, A.S., Moura, A.D.N. Resposta espécie-específica do fitoplâncton ao pastejo do zooplâncton em reservatórios eutróficos tropicais. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v. 33, 2021.
- Shannon C.E., Wiener W. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press. **Urbana. Illinois**, 1963. 125 pp.

Silva, C. O., R Junior, A., Perbiche-Neves, G., Pinheiro, A. P.; Lacerda, S. R. Baixa riqueza zooplanctônica indicando condições adversas de seca e eutrofização em um reservatório no Nordeste do Brasil. **Iheringia**. Série Zoologia, v. 110, 2020.

Silva, G. S. D., Santos, E. A. D., Corrêa, L. B., Marques, A. L. B., Marques, E. P., Sousa, E. R. D., & Silva, G. S. D. Avaliação integrada da qualidade de águas superficiais: grau de trofia e proteção da vida aquática nos rios Anil e Bacanga, São Luís (MA). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, p. 245-250, 2014.

Simpson, E. H. Measurement of diversity. **Nature**. p. 163-168, 1949.

Siqueira, G. W. *et al.* Distribuição de carbono, nitrogênio, fósforo e outros parâmetros geoquímicos na Plataforma Continental do Amazonas, Norte do Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 37, n. 1-2, p. 119-130, 2017.

Souza, Ana Kely Rufino; Morassuti, Claudio Yamamoto. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

Souza, C. A. D., Machado, K. B., Nabout, J. C., Muniz, D. H. D. F., Oliveira-Filho, E. C., Kraus, C. N., Vieira, L. C. G. Simplificação do monitoramento ambiental de comunidades planctônicas utilizando diferentes abordagens ecológicas. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v. 31, 2019.

Souza, C. B. G., Campos, A. S., de Sousa, F. B. B., dos Santos, A. M. A., De Carvalho, G. P. O uso de indicadores ambientais na avaliação de unidades de conservação: o caso do Parque Estadual do Utinga em Belém/PA (PEUT). **Nature and Conservation**, v. 13, n. 1, p. 86-94, 2020.

Strickland, J.D.H.; Parsons, T.R. A practical handbook of sea water analysis. **Bull. Fish. Res. Bd Can.** n. 167, v. 1, p. 311, 1972

Tenenbaum, Denise Rivera; Gomes, E. A. T. **Dinoflagelados e tintinídeos da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira: guia de identificação**. Rio de Janeiro: Museu Nacional, 2006.

Tyagi, S.; Sharma, B.; Singh, P.; Dobhal, R. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. **American Journal of Water Resources**, v. 1, n. 3, p.34-38, 2013.

Valentin, J. L. **Ecologia Numérica**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 117 p.

Valentin, J.L.; Macêdo-Saidah, F.E.; Tenenbaum, D. R.; Seiva, N. L. A. Diversidade específica para análise das sucessões fitoplanctônicas, Aplicações ao ecossistema de ressurgência de Cabo Frio (RJ). **Nerítica**. Ponta do Sul, v. 6, n. ½, p.7-26, 1991.

Vendel, A.L., Macêdo, A.K.S., Silva, J.R.P.D., Santos, J.D.A., Alves, V.E.D.N., Rosa, R.D.S. Espécies de peixes do estuário do rio Paraíba, nordeste do Brasil. **Biota Neotropica**, v. 22, 2022.

Vitousek, P.M., Lubchenco J., Mooney Ha., Melillo J. 1997. Human domination of

Earth's ecosystems. **Science**, 277: pp. 494-499.

Vollenweider, R. A.; Giovanardi, F.; Montanari, G.; Rinaldi, A. Caracterização das condições tróficas das águas marinhas costeiras com especial referência ao NW do mar Adriático: proposta de escala trófica, turbidez e índice generalizado de qualidade da água. **Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society**. 9(3):329-357, 1998. Doi: 10.1002/(sici)1099-095x(199805/06)9:3329::aid-env308 > 3.0.co;2-9.

Yoneda, N. T. Área Temática: Plâncton. **Centro de Estudos do Mar Curitiba: Centro de Estudos do Mar**, Universidade Federal do Paraná, 1999.

Yong, Yu Lin; Lee, C. W.; Bong, C.W.; Chew, L.L.; Chong, V. C. The role of microzooplankton grazing in the microbial food web of a tropical mangrove estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 275, p. 107969, 2022.

Yuan, D.; Chen, L.; Luan, L.; Wang, Q.; Yang, Y. Efeito da salinidade na comunidade zooplânctônica no estuário do Rio das Pérolas. **Journal of Ocean University of China**, v. 19, p. 1389-1398, 2020.

Zhang, X., Ning, X., He, X., Sun, X., Yu, X., Cheng, Y., ... & Wu, Y. . Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River Estuary, China. **PLoS One**, v. 15, n. 1, p. e0228276, 2020.

Zhao, W.; Dai, L.; Chen, X.; Wu, Y.; Sun, Y.; Zhu, L. Characteristics of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in the South Yellow Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 176, p. 113471, 2022.

CAPÍTULO: Spatial heterogeneity of zooplankton community in an eutrophicated tropical estuary

HETEROGENEIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA COMUNIDADE DE ZOOPLANKTON EM UM ESTUÁRIO TROPICAL EUTROFIZADO

^aRosas, Rayane Serra; ^{a*}Azevedo-Cutrim, Andrea Christina Gomes

^a*Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade (PPGECB), Departamento de Biologia, Laboratório de Biologia Vegetal e Marinha, Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, São Luís, Brasil;*

Corresponding author: andrea.azevedo.uema@gmail.com

ORCIDs

Rayane Serra Rosas - <https://orcid.org/0000-0003-3744-5647>

Andrea Christina Gomes de Azevedo–Cutrim - <https://orcid.org/0000-0002-3097-1364>

ABSTRACT

The beta diversity and environmental heterogeneity of zooplankton reflect the level of degradation in a macrotidal estuary on the Brazilian equatorial margin. Using the multimetric index (TRIX), we assessed the trophic state and its association with zooplankton composition, distribution, and environmental variables in a tropical estuary. The results showed that significant seasonal and sectoral environmental differences contributed to biological heterogeneity, with the second sector (SII) exhibiting the greatest impact, leading to decreased alpha diversity compared to that of the first sector (SI). Salinity, pH, SiO_2^3 , and NO_2^- exhibited significant seasonal and sectoral variations ($p < 0.05$). The community comprised 74 taxa, with copepods (75.7%), mainly from the families Oithonidae and Paracalanidae, dominating in terms of species number. Overall, the community exhibited medium diversity, low richness, and heterogeneity. In turn, the beta diversity, determined by calculating PERMADISP and Jaccard dissimilarity, revealed environmental heterogeneity reflected by significant seasonal differences combined with biological heterogeneity between the rainy and dry periods. Indicator species analysis identified 15 taxa, including copepods such as *Euterpina acutifrons* and *Clytemnestra scutellata*, with nine representing SI (60%) and

six representing SII (40%). This study underscores the importance of identifying environmental filters and indicator species to understand estuarine dynamics and diagnose ecosystem trophic states.

Keywords: Copepods; ecological diversity; estuary; eutrophication; anthropogenic impacts.

INTRODUCTION

Studies on community ecology have emphasized that local processes influence the composition and abundance of species (Neumann-Leitão et al., 2019). Furthermore, the effects of these regional processes on local dynamics have been demonstrated by several researchers (Ricklefs and Schluter, 1993; Hubbell, 1997; Forbes and Chase, 2002), including the processes that link communities. Physicochemical processes can play important roles in determining the connectivity between habitats and influencing community attributes at different size scales (Ricklefs, 1987; Cowen et al., 2006). For example, in macrotidal estuaries, dispersal by currents in marine areas links coastal communities to limnetic communities and vice versa, thus forming patches of species throughout interconnected environments (metacommunities) (Watson et al., 2011; Niebuhr et al., 2015).

Estuaries with urban areas on their banks receive a substantial input of water-quality altering substances (Morley et al., 2012). As a result, the contribution of nutrients increases, especially in unsanitized areas, leading to eutrophication of the entire estuary (Nixon, 1995; Glibert, 2017; Cloern et al., 2020). Urban development and land use can increase nutrient loads, leading to eutrophication and adverse impacts on water quality (Chen and Lu, 2014; Xia et al., 2016), with consequences for the zooplankton community (Zervoudaki et al., 2009).

The Anil River estuary (ARE), located in one of the largest urban areas in northeastern Brazil, is subject to high degree of pollution from domestic and industrial sewage (Martins et al., 2021), with visible environmental degradation. Environmental changes are reflected in the dynamics of biological organisms, including zooplankton communities.

The zooplankton community is considered a key element for understanding the changes that occur in aquatic ecosystems because these organisms are responsible for the flow of energy between basal producers and other trophic levels and have a shortlife cycle, in addition to being sensitive to eutrophication. The distribution and structure

of the zooplankton community can be determined both by the environment and by the physical and chemical processes of water since the availability of food is one of the main factors that determines zooplankton dynamics (Munõz-Colmenares et al., 2021).

Zooplankton diversity and abundance are indicators of water quality and trophic conditions in cold, temperate, and tropical waters (Jeppesen et al., 2000; Kuczyńska-Kippen and Joniak, 2016; Hui et al., 2021). Thus, understanding how zooplankton community composition varies spatially and temporally (i.e., according to beta diversity) has become a central topic in lake and estuary ecology and management (Liu et al., 2020; Loewen et al., 2019; Lopes et al., 2017).

The use of zooplankton as a bioindicator has already been implemented in degraded estuaries (Modéran et al. 2010; Albaina et al. 2009; Rose et al. 2019) and has been shown to be an efficient method for evaluating the environmental quality of these locations. These organisms can respond in different ways to environmental changes. Sometimes, they undergo changes that range from cellular changes resulting from mutations to changes at the community level, altering the composition, diversity, and density of species (Uriarte and Villate, 2005). Changes in zooplankton communities have been used as important indicators for assessing the effects of urbanization and pollution on aquatic environments (Costa et al. 2016).

In this study, our objective was to evaluate the alpha and beta diversity of zooplanktonic communities in a macrotidal estuary. We examined the relative importance of local abiotic factors (e.g., water quality; eutrophication levels; factors such as N and P; chlorophyll-a; pH; water temperature; suspended solids; and Secchi depth) in determining medium-term trends in the spatial heterogeneity of zooplankton communities.

Furthermore, the research is of national and international importance, as it covers the Sustainable Development Goals and the goals of the 2030 Agenda, such as SDG 3 – Health and Well-being (target: 3.9); SDG 6 – Drinking water and sanitation (goals: 6.3, 6.6, 6.a and 6.b); SDG 14 – Life in water (goals: 14.1, 14.2, 14.3, 14.5). Therefore, to carry out this scientific research on estuarine biodiversity.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Anil River Basin, located northwest of São Luís Island, Northeast Brazil, has an area of approximately 40.77 km², with the Anil River as its main tributary and an extension of 13,8 kilometres. Its source is located in the neighbourhood of Aurora,

descending approximately 9.5 km in a straight line to sea level, with the directional axis oriented from southeast to northwest from the source. Its channel exhibits a meandering profile, cutting the northeastern portion of the urban centre of the city of São Luís on the route towards the mouth of the São Marcos Estuarine Complex.

The mangrove vegetation borders the bed of the estuary, where it receives constant influence from the macrotides coming from the São Marcos Estuarine Complex for most of its route. Among the mangrove species are *Rhizophora mangle* Leechman (red mangrove), *Avicennia germinans* L. Stearn (black mangrove), and *Laguncularia racemosa* Gaertm (white mangrove) (Rego et al., 2023).

Sample design

The four sampling campaigns were carried out during low spring tides, in the years 2022/2023, with two occurring during the rainy period (April/2022 and February/2023) and two occurring during the dry period (September/2022 and November/2022), at six sampling points.

The division of the estuary by sector was based on the result obtained by the multimetric index (TRIX), which consists of a trophic index that quantifies the eutrophication of the environment. The points located at the mouth of the estuary (P1, P2, and P3) were classified as eutrophic and were considered sector I (SI), whereas the points upstream of the estuary (P4, P5, and P6) were classified as hypereutrophic and were considered sector II (SII) (Fig. 1).

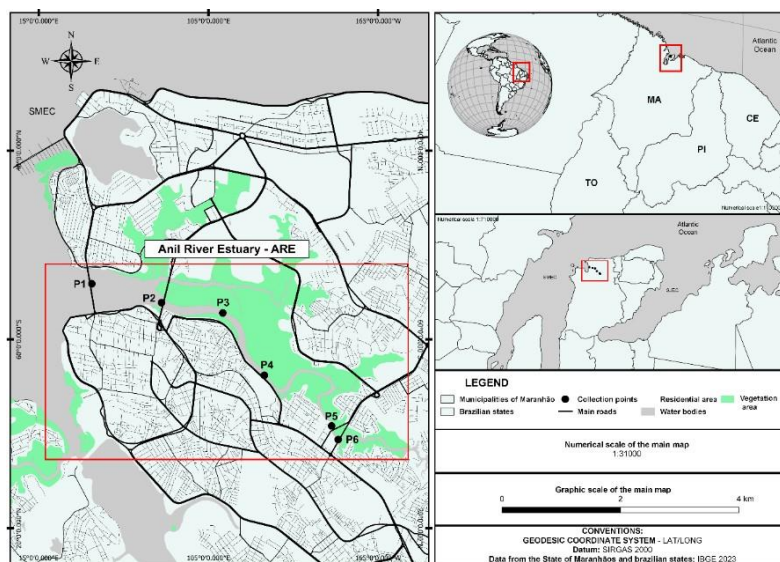


Figure 1. Location of the study area with the six sampling points along the ARE.

The ARE climate is characterized as humid tropical with two well-defined periods throughout the year: the rainy period, between the months of January and June, and the dry period, between July and December (Fig. 2). The temperatures are high, with average variations between 23 °C and 30 °C. The daily thermal amplitude is low due to factors such as low latitude and proximity to the ocean, with no marked variation between day and night (Coelho et al., 2017).

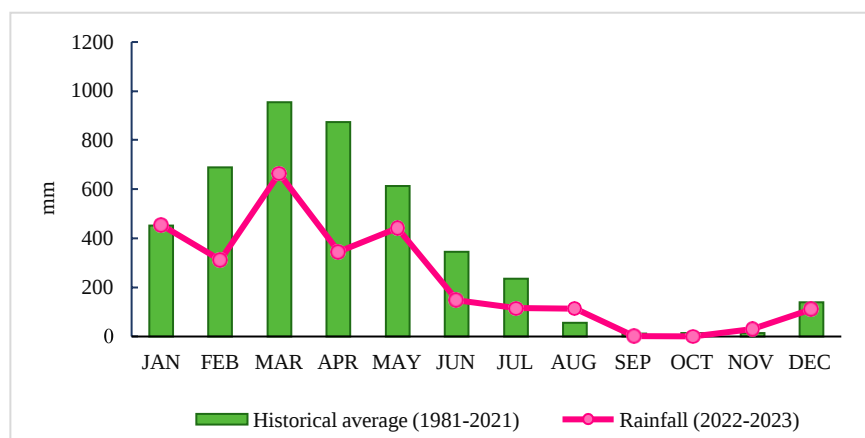


Figure 2. Historical average over the last 40 years (1981-2021) and of the monthly rainfall rates during the collection months (2022/2023) obtained from the official INMET website.

To measure the environmental variables of the water, the samples were collected in triplicate using the HANNA® multiparametric probe (model HI – 98194) to verify the water temperature, salinity, hydrogen potential (pH), dissolved oxygen saturation (%), dissolved oxygen (mg L^{-1}) and total dissolved solids (TDS). In addition, a Secchi disk was used to measure water transparency (cm). Surface water samples (50 cm deep) were obtained using a van Dorn bottle (5 L) to determine the total nutrients (nitrogen (TN) and phosphorus (TP)), dissolved ammonium ions (NH_3), nitrite (NO_2^-), nitrate (NO_3^-), silicate (SiO_2^{3-}), orthophosphate (PO_4^{3-}) and chlorophyll-a (Chl-a). To determine nutrients in mg L^{-1} , the following methodologies were used: phosphate (PO_4^{3-}), total phosphorus (PT), total nitrogen (NT) and silicate (SiO_2^{3-}) as described by Grasshoff et al. (1983); ammonium ion (NH_3^+) as described by Koroleff (1976); and nitrate (NO_3^-) and nitrite (NO_2^-) as described by Strickland and Parsons (1972).

Phytoplankton biomass (Chl-a concentration) was determined by the spectrophotometric method (UNESCO, 1966) according to the specifications of Strickland and Parsons (1972). For determination of Chl-a, water samples (100–250 ml) were filtered through Whatman GF/C glass fibre filters (0.48 μm porosity and 47 mm diameter). Pigment extraction was carried out with 90% acetone for 24 hours at -18 °C

in the dark.

The TRIx was determined according to Vollenweider et al. (1998). (Eq. 1)

$$\text{TRIX} = \frac{\log_{10} [\text{Chl } a \times \text{aD\%O} \times \text{TN} \times \text{TP}] - 1.5}{1.2} \quad (1)$$

This index includes chemical and biological parameters and includes four variables that are directly expressed: primary productivity, measured as the concentration of chlorophyll *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$); dissolved oxygen saturation, measured as the absolute deviation [$\text{abs } |\text{abs}| 100 - \text{\%O}| = \text{aD\% O}$]; and nutritional elements, measured as the concentrations of total phosphorus (TP) (mg m^{-3}) and total nitrogen (TN) (mg m^{-3}).

Based on the TRIx results, water quality and trophic conditions are classified into five categories: ultraoligotrophic: TRIx <2 (excellent); oligotrophic: $2 \leq \text{TRIX} < 4$ (high); mesotrophic: $4 \leq \text{TRIX} < 5$ (good); mesotrophic to eutrophic: $5 \leq \text{TRIX} < 6$ (moderate); and eutrophic: $6 \leq \text{TRIX} < 8$ (poor) (Caruso et al., 2010).

Composition and density of the zooplankton community

Sampling was carried out at spring tide and at ebb using a conical-cylindrical zooplankton trawl net (1.20 m long, 60 cm long and 120 μm mesh) via horizontal and subsurface trawling in the water column for 10 minutes to obtain the samples. A flowmeter was used to check the level of filtered water. Immediately afterwards, the samples were placed in wide-mouth polyethylene containers with a capacity of 300 mL, duly labelled and fixed with 4% formaldehyde solution.

In the laboratory, the samples were homogenized, and 1 mL aliquots were removed with a graduated pipette, totalling 10 mL per sample. The individuals were counted in the Sedwick Rafter chamber to screen for organisms using a Zeiss® microscope at 100x magnification, a method adapted from Da Silva et al. (2020).

The taxonomic framework of copepods was based on the works of Björnberg (1981), Boltovskoy (1999) and Bradford-Grieve et al. (1999). The classification of adult copepods and copepodites was carried out with the help of the World Register of Marine Species (WORMS).

The density estimate (org.m^{-3}) was obtained from the number of individuals present per sample (estimated from the subsamples analysed) divided by the volume of water filtered by the network (m^3), according to Doubek et al. (2018).

α and β diversity

From the data analysis, we calculated the ecological diversity (Shannon–Winner, 1963), richness (proposed by Margalef (1958)), equitability (proposed by Pielou (1977)), and dominance (Simpson, 1949) indices using Paleontological Software Statistics (PAST) version 4.12.

β diversity was calculated using the PERMDISP function (Anderson and McArdle, 2006), which made it possible to test the variability (dispersion) of species in different sectors of the ecosystem through the average distance of each observational unit to its group centroid based on Jaccard dissimilarity. To partition beta diversity (nesting and rotation), the beta.pair function from the Betapart package (Baselga and Orme, 2012) was applied using the Jaccard dissimilarity index via the R Studio version 4.2.1 program.

Statistical analysis

For statistical analysis of the obtained data, the Shapiro–Wilk normality test and Levene homogeneity test were applied to determine the parametric and nonparametric variables, respectively. For parametric variables, analysis of variance (ANOVA) was performed, and for nonparametric variables, the Kruskal–Wallis H test was applied to determine the degree of significance ($p < 0.05$) of the variables in the study area.

Principal component analysis (PCA) was performed using Pearson's linear moment-product correlation. To compare the differences between the eight collection points and between the two seasonal periods (rain x dry), bifactor analysis of variance (two-way ANOVA) was used.

Multivariate permutation analysis (PERMANOVA) revealed significant differences ($p < 0.05$) in environmental variables, spatial distributions (between SI and SII), and temporal characteristics (rainy period and drought). The objective was to permute the distance matrix, generating values of the sectoral variables at random or determining that there is in fact an association between the sectors (factors/classes) and the distance matrix visualized through nMDS/ACP/Cluster.

To assess the existence of environmental heterogeneity between sectors (SI and SII) and between seasonal periods (rainy and dry), a permutation test of the multivariate homogeneity of dispersion of groups (PERMDISP) was carried out using the Euclidean distance for environmental data (Anderson, 2005). In addition, the Euclidean distance

was calculated using physical and chemical data (Anderson, 2005) through the *betadisper* function in the *vegan* package (Oksanen et al., 2015). Subsequently, a principal coordinate analysis (PCoA) was performed to identify the graphical pattern of the spatial distribution of environmental heterogeneity. Statistical differences ($p < 0.05$) in environmental heterogeneity between the sectors were detected using one-way ANOVA with 999 permutations.

The significance of the indicator value (IndVal) was then tested through random permutation. It varies from 0 (no indicator value) to 1 (perfect indication), with higher values for stronger indicator species when considering the specificity (A) and fidelity (B) components. Taxa with an IndVal >0.4 and a p value <0.05 were considered reliable indicators (Frankovich et al., 2006). To investigate the ecological preferences of the species, functional traits were assigned to the indicator taxa of each sector. All the analyses were performed using R software (version 4.1.2), PAST 4.12 and PRIMER 06.

RESULTS

Environmental heterogeneity

The PERMANOVA results revealed significant differences in environmental variables between seasonal periods ($p=0.0284$) and between sectors ($p=0.0202$). The temporal and sectoral interactions were not significant ($p>0.05$), as shown in Table 1.

Table 1. Results of the permutational analysis of variance (PERMANOVA) of the environmental variables, considering seasonal periods (rainy and dry-temporal) and SI and SII (spatial) as factors.

	df	SS	MS	F	P	Perm (N)
Temporal	1	66249.8	66250	3.798	0.028	9999
Spatial	1	76516.3	76516	4.387	0.020	9999
Spatial vs temporal	1	26379.1	26379	1.512	0.211	9999
Residual	20	348834	17442			
Total	23	51798.0				

The variables responsible for the environmental heterogeneity of the ARE were salinity, pH, SiO_2^{3-} and NO^- , which exhibited significant seasonal and sectoral

differences ($p < 0.05$). TDS and NT exhibited significant differences only in terms of seasonal variation ($p < 0.05$). NH_3 and PT were significantly different between the sectors ($p < 0.01$), as shown in Table 2.

The SI presented results with higher averages during the rainy season, such as transparency (40.0 ± 12.6 cm), salinity (32.0 ± 1.3), OD (4.0 ± 2.8 mg L⁻¹), pH (8.0 ± 0.1). However, nutrients dissolved in water, such as, NH_3 (165.0 ± 91.1 mg m⁻³) NO_2^- (4.5 ± 0.9 mg m⁻³) NO_3^- (14.0 ± 2.6 mg m⁻³) PO_4^{3-} (3.0 ± 2.6 mg m⁻³) NT (153.3 ± 59.1 mg m⁻³) PT (6.0 ± 2.7 mg m⁻³) expressed higher SII means throughout the estimation period. (Tab. 2).

Table 2. Descriptive statistics of environmental variables and p values for special and temporal analyses in the Anil River estuary (ARE).

	RAINY		DRY		Spatial value p	Temporal value p
	S1	S2	S1	S2		
Salinity	25.16 ± 6.49	15.16 ± 7.13	31.83 ± 1.32	24.16 ± 4.75	0.004^b	0.012^b
Secchi (cm)	36.00 ± 5.21	28.83 ± 15.09	40.33 ± 12.58	33.50 ± 8.36	0.213 ^b	0.772 ^b
Temperature (°C)	29.90 ± 0.19	29.84 ± 0.51	29.78 ± 0.29	29.68 ± 1.10	0.340 ^b	0.930 ^b
pH	7.44 ± 0.24	7.15 ± 0.15	7.82 ± 0.03	7.38 ± 0.22	0.002^b	0.004^b
DO Saturation (%)	53.83 ± 24.87	43.06 ± 16.70	71.34 ± 46.14	52.86 ± 28.23	0.524 ^b	0.643 ^b
DO (mg L ⁻¹)	3.41 ± 1.87	2.88 ± 1.27	3.61 ± 2.81	3.00 ± 1.52	0.795 ^b	0.953 ^b
TDS (mg L ⁻¹)	31.65 ± 17.52	20.56 ± 14.40	45.22 ± 4.42	41.76 ± 13.06	0.269 ^a	0.004^a
Chlorophyll <i>a</i> (µg L ⁻¹)	15.63 ± 8.67	19.71 ± 13.00	34.44 ± 25.47	109 ± 42.67	0.073 ^b	0.003^b
Fosphate (mg m ⁻³)	0.06 ± 0.02	0.18 ± 0.13	0.05 ± 0.02	0.28 ± 0.25	0.001^b	0.839 ^b
Silicate (mg m ⁻³)	9.00 ± 1.36	15.05 ± 5.54	5.75 ± 2.96	7.94 ± 3.86	0.038^a	0.007^a
Nitrate (mg m ⁻³)	0.69 ± 0.40	0.52 ± 0.22	0.69 ± 0.19	0.87 ± 0.16	0.967 ^a	0.129 ^a
Nitrite (mg m ⁻³)	0.06 ± 0.06	0.15 ± 0.07	0.04 ± 0.03	0.21 ± 0.04	0.001^b	0.583 ^b
Ammonium ion (mg m ⁻³)	2.13 ± 2.49	2.67 ± 1.89	0.20 ± 0.15	2.81 ± 1.55	0.001^b	0.133 ^b
TN (mg m ⁻³)	0.96 ± 0.42	1.37 ± 1.08	1.73 ± 0.70	2.15 ± 0.83	0.246 ^a	0.025^a
TP (mg m ⁻³)	0.05 ± 0.01	0.09 ± 0.06	0.07 ± 0.02	0.18 ± 0.08	0.006^b	0.026^b

PERMDISP showed that, in the ARE, there was environmental heterogeneity between seasonal periods ($p = 0.012$), which was marked by differences in the dispersion of environmental data between the rainy and dry periods (Fig. 3A and B). Spatially, the dispersion of the data was homogeneous ($p = 0.864$), with no environmental heterogeneity between sectors.

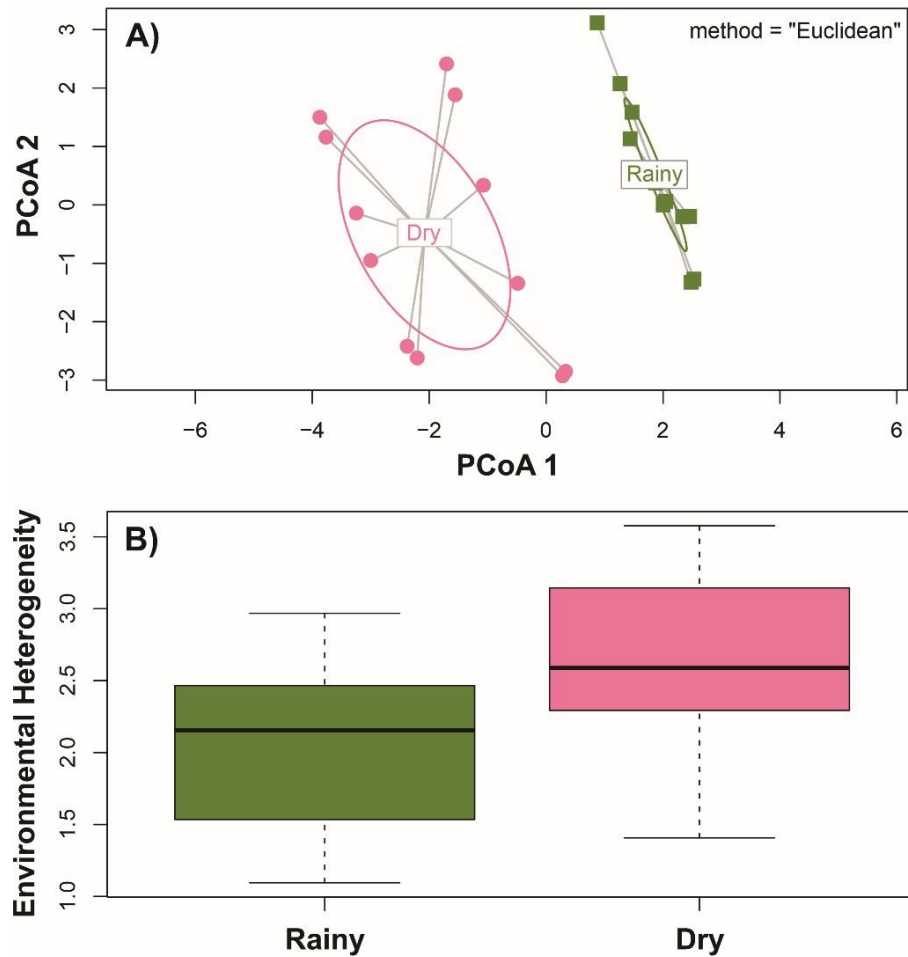


Figure 3. Scatterplot pattern by sector (A) and boxplot of environmental heterogeneity by season (B).

The TRIX results ranged from 7.4 to 9.2. Thus, the study area was framed as a eutrophic environment (SI) at the points located downstream of the ARE where the CESM had the most influence. The points upstream of the estuary were classified as hypereutrophic environments (SII), as shown in Figure 4.

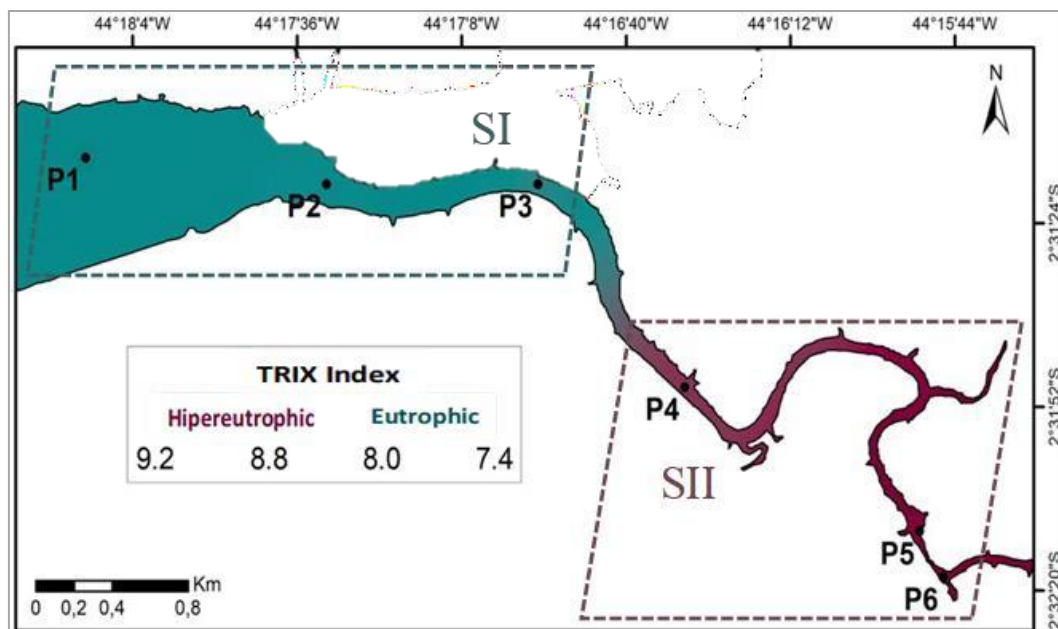


Figure 4. Map showing the TRIX results for each sector of the ARE between 2022 and 2023.

Principal Component Analysis (PCA) revealed the physicochemical interactions of the environmental variables that determine the water quality of the Anil River Estuary, as shown in Fig 5. The first two components explain 60% of the total variance in the data. This variation follows the seasonal pattern highlighted mainly in PC1 (32%), where the environmental variations of the rainy season, such as the increase in nutrient concentration (DIP=0.86, nitrite=0.95, ammonium ion=0.90, TP=0.74) were directly associated with increased trophic status (TRIX=0.76). On the other hand, these trophic conditions decrease during drought, presenting an indirect relationship with salinity (-0.75) and pH (-0.85). In PC2 (28%), this same pattern was recorded among nitrogen compounds (NT=0.83 and nitrate=0.69) and water transparency (0.72). During this period, the increase in trophic conditions is related to the decrease in dissolved oxygen concentrations in the water (DO=-0.79), which can lead to hypoxia (Fig.5).

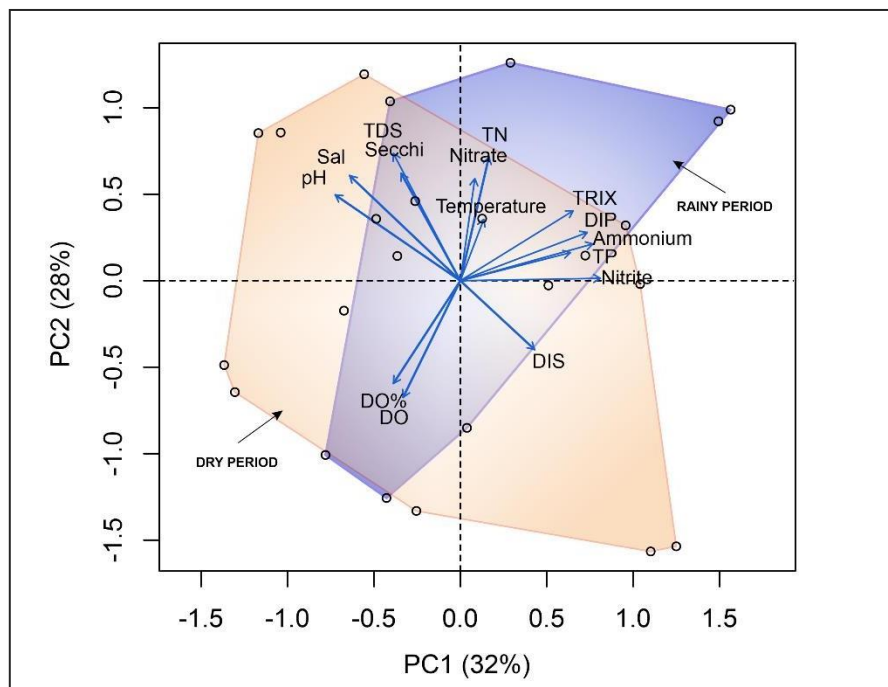


Figure 5. PCA results for environmental variables affecting the ARE between 2022 and 2023.

Zooplankton community composition

The analyses revealed a community composed of 74 taxa divided into ten phyla,

nine classes, ten orders, and nineteen families. The families Paracalanidae (*Paracalanus crassirostris*, *Paracalanus nanus*, *Paracalanus indicus*, and *Paracalanus aculeatus*) and Oithonidae (*Oithona ovalis*, *Oithona nana*, *Oithona similis* and *Oithona simplex*) belong to the subphylum Crustacea and accounted for the largest number of individuals.

The percentage contribution of each phylum to the analysed community can be observed according to the distribution of the phyla. The subphylum Crustacea, represented by copepods, dominated the microzooplankton, accounting for 75%. The others accounted for 7% (Nematoda), 3% (Ciliophora, Cnidaria, Mollusca, and Chordata), and 1% (Foraminifera, Echinodermata, and Annelida), as shown in Figure 6.

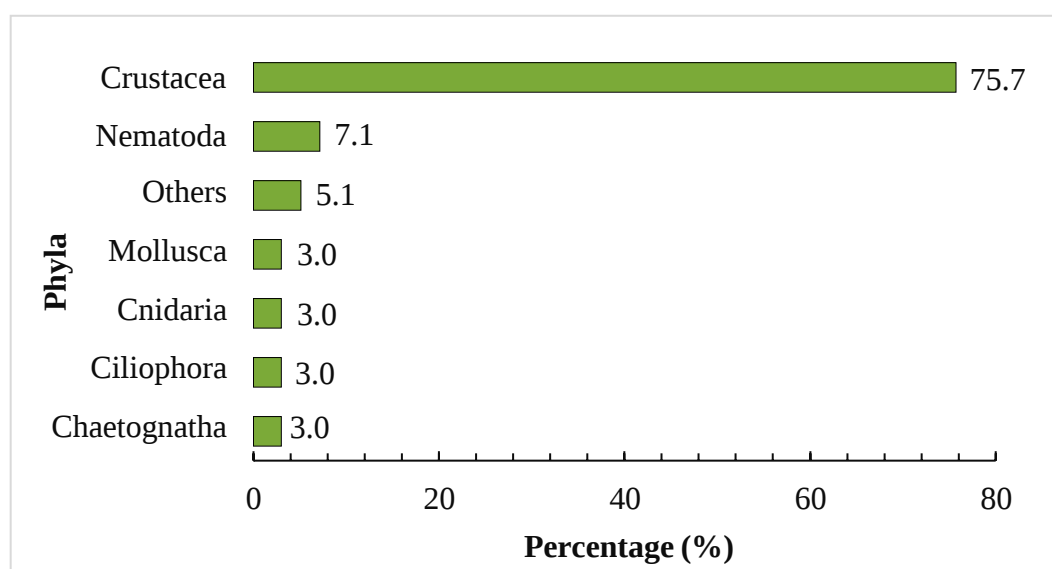


Figure 6. Percentage distribution of taxa by phylum identified in the ARE, São Luís, MA.

Analysis of the density of organisms between seasonal periods revealed that the highest expression occurred in the dry season because the organisms that make up the community are highly sensitive to environmental changes and can respond quickly to the most diverse types of impacts (Fig. 7A).

Regarding the sectors (Fig. 7B), the zooplankton community exhibited greater density in SII in the dry season, and the number of organisms was influenced by the points further upstream of the river. The most representative species of this sector was *Notodiaptomus* sp., which is typical of freshwater environments, with densities varying between 6.26 org m⁻³ and 79.63 org m⁻³.

Some organisms at different developmental stages exhibited high densities during the analyses, including *Cirripecta nauplius* (2.14 org m⁻³ – 102.17 org m⁻³), Bivalvia (veliger) (52.84 org m⁻³ – 3.70 org m⁻³) and Copepodito I (35.94 org m⁻³ – 87.17 org m⁻³). Thus, even with all the present impacts, the ARE still persists and manages to

provide conditions for the biota to develop in this ecosystem.

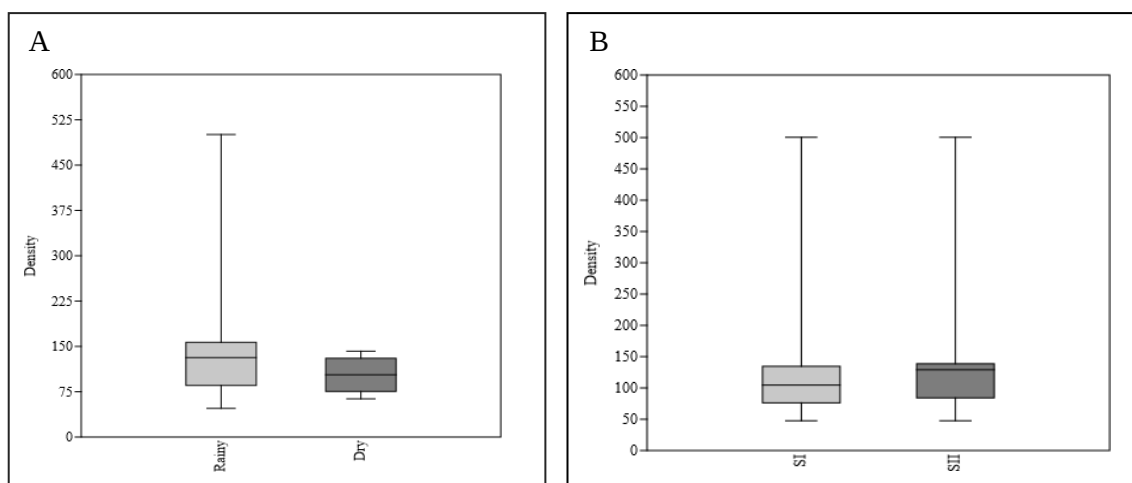


Figure 7. Distribution of zooplankton density between seasonal periods (A) and between sectors (B) of the ARE.

Ecological indices of the zooplankton community

The diversity data ranged from an average of 2.04 bits ind⁻¹ to 2.41 bits ind⁻¹, indicating average diversity. The community richness throughout the study was less than 5.0, indicating low richness. The equitability revealed a heterogeneous community among the sectors. Finally, dominance ranged from 0.78 to 0.86, indicating similar values between sectors and seasonal periods (Table 3).

From the sectoral point of view, richness presented the highest averages in SI in both seasonal periods. Diversity exhibited greater averages during the rainy season in both sectors. Regarding equitability and dominance, the means showed little variation both between the seasonal periods and between the sectors.

Table 3. Ecological indices obtained from sectors during seasonal periods (rainy and dry) in the ARE, São Luís, MA.

Seasonal	Rainy		Dry	
Sectors	SI	SII	SI	SII
Diversity (bits ind ⁻¹)	2.41±0.29	2.39±0.29	2.19±0.31	2.04±0.48
Dominance	0.84±0.08	0.86±0.06	0.80±0.06	0.78±0.17
Richness	4.65±0.21	3.84±0.92	4.46±0.61	2.76±0.87
Equitability	0.70±0.011	0.72±0.09	0.62±0.08	0.65±0.16

Estuary indicator species

The indicator value analysis revealed 15 taxa as sector indicators, nine (60%) of which were representative of SI and six (40%) of SII. In SI, the copepods *Euterpina acutifrons* (IndVal>0.80; $p=0.001$) and *Clytemnestra scutellata* (IndVal>0.80; $p=0.001$) exhibited specificity values of 0.84 and 0.87, respectively, and fidelity values of 1.00 and 0.91, respectively. These organisms are representative of the order Haparticoidea and exhibit herbivorous or detritivorous diets, which are typical of coastal and estuarine environments.

In the same sector, other organisms in certain growth stages were also indicated, such as Bivalvia (veliger) (specificity: 0.76 and fidelity: 0.91), Ostracoda (specificity: 0.84 and fidelity: 0.91), Copepodito I (specificity: 0.80 fidelity: 0.91) and Brachyura Protozoa (specificity: 0.93 and fidelity: 0.83) (IndVal>0.70; $p>0.001$), which are the first filter feeders and representatives of the phylum Mollusca, and the others have an omnivorous diet and representatives of the phylum Arthropoda. (Fig. 8).

In SII, the copepod *Debilus swelli* (IndVal>0.90; $p=0.0001$) stood out, with a specificity of 0.89 and fidelity of 0.91; this species belongs to the order Calanoida and has herbivorous or omnivorous feeding habits typical of an estuarine environment. Other organisms, such as *Notodiaptomus* sp1 and *Notodiaptomus* sp2 (IndVal>0.60; $p=0.03$), which are representatives of the order Calanoida, exhibit an omnivorous diet and are typical of environments that have a greater influence on river waters, both with a specificity of 0.91 and fidelity of 0.75, were also detected. In addition, the naupliar phase (I) of the order Haparticoidea (IndVal>0.91; $p=0.0001$) had a specificity of 0.90 and fidelity of 1.00 (Fig. 8).

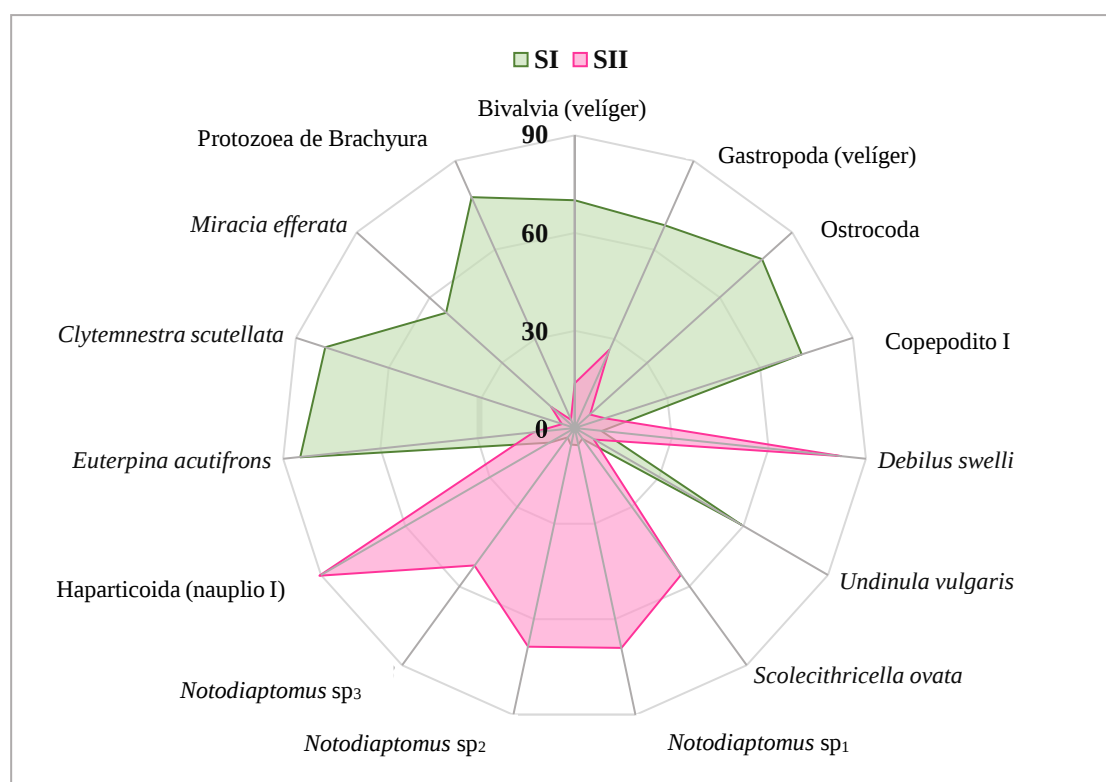


Figure 8. Graph of taxa selected by the indicator value (IndVal) analysis for each sector.

Beta diversity

The total beta diversity of the Anil River Estuary was high (0.84). Regarding sectors, SI (eutrophic) had lower beta diversity ($\beta = 0.40$) than did SII (0.55) and was hypereutrophic (Fig. 9). The partitioning of β diversity revealed that turnover was the largest component (0.84), while nesting did not significantly contribute.

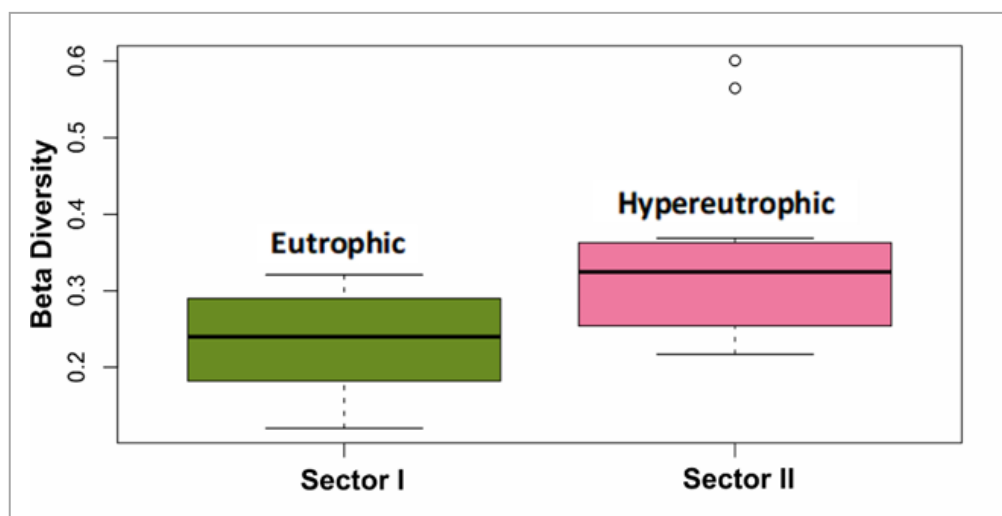


Figure 9. Beta diversity between sectors according to the ARE trophic state.

DISCUSSION

Environmental variables of the ARE

Variations in rainfall and the movement generated by waves and tides affect the dynamics of coastal zones, reducing water transparency during months with higher rainfall since the low transparency values presented in the ARE are associated with the rainy season. This fact is closely related to the resuspension of muddy sediment in this estuary, which resulted in an increase in TDS, as there was no increase in water volume that could cause greater dilution and dispersion of these solids in the water column

(Dias et al., 2016; Duarte-dos-Santos et al., 2017; Hedayati et al., 2017; Liu et al., 2022).

The marked fluvial influence and increase in rainfall in the Brazilian equatorial margin tend to favour the recording of low salinity values due to the increase in freshwater in the water column, causing spatial and seasonal differences in the estuaries of the Amazon coast. This situation has been observed not only in the ARE but also in other estuarine systems (De Melo et al., 2023; Cavalcanti-Lima et al., 2023).

The main anthropogenic sources are the dumping of domestic and industrial sewage with or without primary treatment, the leaching of nitrogen fertilizers and surface runoff, as they are responsible for the entry of nitrogen compounds (mainly ammonia) and phosphate into water bodies (Bi and Gasperi, 2015; Cloern, 2019; Yu et al., 2019; Yang et al., 2021; Cideira-Neto et al., 2022); this finding explains the fact that the means were greater in the SII because these are the sampling points at which housing nuclei without sanitation (stilts) on its banks and the marked presence of garbage were present. Furthermore, in the ERA we recorded pollution mainly composed of Nitrate according to the PCA, consequences of the excessive dumping of domestic and industrial effluents into the estuary waters over these years, resulting in the eutrophication scenario presented by TRIx (Domangue and Mortazavi, 2018; Wadnerkar et al., 2019).

Excess ammonium ion can cause serious damage to the ecosystem in question, with fish mortality directly affecting the economy and ecology since the exaggerated absorption of this substance causes respiratory failure in organisms (Xia et al., 2021). In addition to causing problems such as water acidification, hypoxia, or anoxia; loss of biodiversity; fertilization; and consequent eutrophication of continental waters, estuaries, and coastal marine habitats reduces dissolved oxygen concentrations and affects water quality (Salmond and Wing, 2022).

Eutrophication and zooplanktonic community

The TRIx results were used to classify the ARE as a eutrophic environment in both sectors; however, SII exhibited higher values and was classified as hypereutrophic. The consequence of this is the excess nutrients caused by the dumping of effluents and garbage into water bodies, causing the disordered growth of phytoplankton, periphyton

and macrophytes, which can harm the fauna with the excess oxygen released by the aquatic flora from photosynthesis (Cutrim et al., 2019; Dos Santos Sá et al., 2022).

The zooplankton community is indirectly affected by eutrophication because it is not subject to nutrient accumulation or changes in water bodies resulting from this process; therefore, the availability of the food above that is supported by the ecosystem, in addition to contributing to the bloom of cyanobacteria, is affected by eutrophication in the environment, which are unpalatable organisms that are hardly nutritious to zooplankton. This phenomenon results in malnutrition with a decline in reproduction and, consequently, in population growth, and these conditions directly affect the ecological indices of the community (Chaparro-Herrera et al., 2021; Dos Santos Sá et al., 2022; Salazar-Sánchez et al., 2023).

The zooplankton in the ARE were composed mostly of copepods, which belong to the subphylum Crustacea and are composed mainly of cyclopoid and calanoid representatives in the estuarine community. These same organisms were predominant in the studies by Pinheiro et al. (2013) and Palma et al. (2013) in an estuarine system on the north coast of Brazil and in estuaries in northeastern Brazil in studies by Marcário et al. (2021), Andrade et al. (2022) and Cruz et al. (2023).

Cyclopoids are predominantly found in eutrophic environments (Parra et al., 2009), and calanoids, whose feeding habits involve filtration, are generally found in oligotrophic environments. However, some species of calanoids of the genus *Notodiaptomus* are frequently observed in eutrophic environments (Rietzler et al., 2002; Vignatti et al., 2018). Panosso et al. (2003) stated that species of this genus may feed on small colonies and filaments of cyanobacteria, thus enabling their survival in a eutrophic environment.

Regarding the biological indicators, the haparticoid copepods *Euterpina acutifrons* and *Clytemnestra scutellata* and the naupliar stages of the group were strong indicators of SI. These species are considered tolerant, despite eutrophic conditions, and are adaptable to wide variations in salinity and environmental temperature (Abou et al., 2014; Annabi-Trabelsi et al., 2022). *E. acutifrons* has been identified as an opportunistic and strategist species due to its herbivorous status, especially in impacted environments (Pereira et al., 2005; Chew; Chong, 2016).

Calanoids are considered typical of oligotrophic environments by some authors (Teixeira et al., 2017; Fantón et al., 2020). In contrast, in the ARE, species of the genus *Notodiaptomus* were classified as bioindicators of hypereutrophic IBS. Bouvy et al. (2001) and Ger et al. (2016) reported that these organisms have the ability to break cyanobacterial filaments into small particles for food and survive on a diet restricted to cyanobacteria of the genus *Microcystis*, which are usually found in eutrophic environments.

Ostracods were present in SII only in the rainy season, but in SI, they occurred in both seasonal periods because they inhabit fresh to hypersaline aquatic environments. They may be among the most promising groups in marine areas because they are vulnerable to environmental changes and are therefore used as tools for environmental research in estuaries (Ruiz et al., 2005; Martínez et al., 2013).

The phylum Nematoda was the second most abundant group of the analysed community (7.1%). This phylum is composed of planktonic nematodes, which are mesozooplankton that are free-living and can develop in different aquatic environments. In addition, these nematodes are harmful to both fish and humans, resulting in joint damage (in terms of ecology, economy, and public health) since, when consuming parasitized fish, humans become the definitive host of the nematodes (Pinto et al., 2013; Ptatscheck and Traunspurger, 2020). They can develop in places without basic sanitation or garbage collection, and effluents are dumped directly into ARE waters (Farshad; Venkataramana, 2012; Ogamba; Charles; Izah, 2019).

The ecological indices of the ARE revealed medium alpha diversity, low richness, and a heterogeneous community, characteristics typical of the coastal zone because they experience several stressors, such as tidal dynamics and variations in environmental parameters throughout the year, resulting in ecosystem instability and organisms that are tolerant to these adversities (Pearman et al., 2018; Gong et al., 2020; Barroeta et al., 2022).

The ARE showed a significant difference between the seasonal periods in terms of both environmental heterogeneity and beta diversity, directly reflecting the biological composition of the sectors. Environmental heterogeneity and beta diversity are related because β diversity arises from the responses of organisms to environmental variations in the ecosystem during different seasonal periods. It should be noted that

beta diversity is considered the degree of habitat specialization of taxa (Johnson et al., 2011; Rakhesh et al., 2013; Gadelha et al., 2023).

Studies of zooplankton distributions and diversity patterns associated with environmental heterogeneity are important for understanding the basic structure and function of coastal ecosystems. Based on this assumption, the determinants of environmental filters (salinity, pH, silicate, nitrite, TDS, TN, ammonium ion, and TP) affecting the distribution of the zooplanktonic community in the ARE were identified in this study. In addition, the complex ecological relationships of the indicator organisms and the variation in taxonomic diversity were evaluated as a function of environmental heterogeneity in a tropical eutrophic macrotidal system.

FINAL CONSIDERATIONS

The composition, richness, and diversity of taxa at the upstream sites of the estuary differed from those observed downstream. Thus, these results reaffirm that the salinity, pH, and discharge structure of zooplankton assemblages indicate that large tidal-dominated estuarine systems with short residence times, such as the ARE, have spatial factors (human development and urbanization) that may have major effects on zooplankton within the tidal range at points further downstream.

The classification of the trophic state of the ecosystem was a key element for grouping the sampling points into sectors, in addition to influencing the distribution of the community in the estuary since eutrophication indirectly affects zooplankton population growth; consequently, this classification indicated medium diversity, low richness and a heterogeneous community.

Copepods (Crustacea: Copepoda) were the most representative organisms in the community because they are the most common group of zooplankton and are the most tolerant to environmental variations throughout the estuary.

The community density varied between the seasons because organisms such as tintinids, chaetognathians and appendicularia tended to be more common during the dry season, a period in which there was less influence from rainfall and consequently higher salinity values and more favourable conditions for these organisms.

Environmental heterogeneity indicated that salinity, salinity, pH, silicate, nitrite, TDS, TN, ammonium ion and TP)are environmental filters that were

significantly different both seasonally and by sector ($p < 0.05$); this heterogeneity is highly important in the selection of indicator taxa, in which the organisms of the order Haparticoidea that inhabit eutrophicated environments stood out. The calanoids of the genus *Notodiaptomus* sp. stood out in SII both in density and as an indicator of this sector.

Author contributions

Conceptualization: [Rayane Serra Rosas, Andrea Christina Gomes de Azevedo-Cutrim and Marco Valério Jansen Cutrim]; Methodology: [Rayane Serra Rosas, Andrea Christina Gomes de Azevedo-Cutrim and Marco Valério Jansen Cutrim]; Formal analysis and investigation: [Rayane Serra Rosas, Danielle Stephane Campos Souza, Ana Virginia Gomes de Oliveira, Quedyane Silva da Cruz and Ana Karoline Duarte dos Santos Sá]; Writing - original draft preparation: [Rayane Serra Rosas, Andrea Christina Gomes de Azevedo-Cutrim, Marco Valério Jansen Cutrim and Quedyane Silva da Cruz]; Writing - review and editing: [Marco Valério Jansen Cutrim]; Funding acquisition: [Universidade Estadual do Maranhão -UEMA].

Declarations

Conflict of interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

Ethical approval. Not applicable.

Consent to participate. Not applicable.

References

- Albaina, A, Villate, F & Uriarte, I, 2009. Zooplankton communities in two contrasting Basque estuaries (1999–2001): reporting changes associated with ecosystem health. *Journal of Plankton Research*, 31:739–752. DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp025>
- Baselga, A & Orme, CDL, 2012. betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 3:808–812. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00224.x>
- Bi, EG, Monette, F & Gasperi, J, 2015. Analysis of the influence of rainfall variables on urban effluents concentrations and fluxes in wet weather. *Journal of Hydrology*, 523:320–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.017>

Björnberg, TSK. Copepoda. In: Boltovskoy, D (ed.), 1981. Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. Publicación especial del INIDEP, Mar del Plata, Argentina. 587-680.

Boltovskoy, D, 1999. South Atlantic Zooplankton. 1°ed. Leinden. The Netherlands: Backhuys Publishers, ½:1706.

Bradford-Grieve, JM, Markhaseva, EL, Rocha, CEF, Abiahy, B, 1999. Copepoda. South Atlantic Zooplankton. 2:869-1705

Brito, SL, Maia-Barbosa, PM & Pinto-Coelho, RM, 2011. Zooplankton as an indicator of trophic conditions in two large reservoirs in Brazil. Lakes. Reservoirs: Research and Management, 16:253-264. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.14401770.2011.00484>

Cardoso, MML, Sousa, W, Brasil, J, Costa, MRA, Becker, V, Attayde, JL & Menezes, RF, 2022. Prolonged drought increases environmental heterogeneity and plankton dissimilarity between and within two semiarid shallow lakes over time. Hydrobiologia, 849:3995-4014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04882-0>

Caruso, G, Leonardi, M, Monticelli, LS, Decembrini, F, Azzaro, F, Crisafi & E, Vizzini, S, 2010. Assessment of the ecological status of transitional waters in Sicily (Italy): First characterization and classification according to a multiparametric approach. Marine Pollution Bulletin, 60:1682-1690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.047>

Cavalcanti-Lima, LF, Cutrim, MV, Feitosa, FADN, Flores-Montes, MDJ, Dias, FJ, Sá, AKDS, Lourenço, CB, 2023. Effects of climate, spatial and hydrological processes on shaping phytoplankton community structure and β -diversity in an estuary-ocean continuum (Amazon continental shelf, Brazil). Journal of Sea Research, 193:102384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102384>

Chaparro-Herrera, D, Fuentes-García, R, Hernández-Quiroz, M, Valiente-Riveros, E, Hjort-Colunga, E & Ponce de Leon-Hill, C, 2021. Comprehensive health evaluation of an urban wetland using quality indices and decision trees. Environmental Monitoring and Assessment, 193:183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08939-w>

Cloern, JE, 2019. Patterns, pace, and processes of water-quality variability in along-studied estuary. Limnology and Oceanography, 64:S192-S208. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.10958>

Cloern, JE, Schraga, TS, Nejad, E & Martin, C, 2020. Nutrient Status of San Francisco Bay and Its Management Implications. Estuaries and Coasts, 43:1299-1317. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00737-w>

Costa, BNS, Pinheiro, SCC, Amado, LL & de Oliveira Lima, M, 2016. Microzooplankton as a bioindicator of environmental degradation in the Amazon. Ecological Indicators, 61:526–545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.005>

Cowen, RK, Paris, CB & Srinivasan, A, 2006. Scaling of connectivity in marine populations. Science, 311:522–527. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1122039>

- Cutrim, MVJ, Ferreira, FS, dos Santos, AKD, Cavalcanti, LF & Araújo, BO, 2019. Trophic state of an urban coastal lagoon (northern Brazil), seasonal variation of the phytoplankton community and environmental variables. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 216:98-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.013>
- da Silva Dias, FJ, Castro, BM, Lacerda, LD, Miranda, LB & Marins, RV, 2016. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 180:258-274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.006>
- da Silva, AJ, de Castro Melo, PAM, Neumann-Leitão, S & de Melo Júnior, M, 2020. Non-predatory mortality of planktonic copepods in a reef area influenced by estuarine plume. *Marine Environmental Research*, 159:105024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105024>
- de Melo Albuquerque, KF, Silva, MHL, de Jesus Azevedo, JW, Soares, LS, Bandeira, AM, Soares, LA & de Castro, ACL, 2023. Assessment of water quality and concentration of heavy metals in fishes in the estuary of the Perizes River, Gulf of Maranhão, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 186:114420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114420>
- Domangue, RJ & Mortazavi, B. 2018. Nitrate reduction pathways in the presence of excess nitrogen in a shallow eutrophic estuary. *Environmental Pollution*, 238:599-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.033>
- dos Santos Sá, AK, Cutrim, MVJ, Feitosa, FAN, Flores-Montes, MJ, Cavalcanti, LF, Costa, DS, Da Cruz, QS, 2022. Multiple stressors influencing the general eutrophication status of transitional waters of the Brazilian tropical coast: An approach utilizing the pressure, state, and response (PSR) framework. *Journal of Sea Research*, 89:102282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102282>
- Doubek, JP, Campbell, KL, Doubek, KM, Hamre, KD, Lofton, ME, McClure, RP & Carey, CC, 2018. The effects of hypolimnetic anoxia on the diel vertical migration of freshwater crustacean zooplankton. *Ecosphere*, 9:e02332. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.2332>
- Dufrêne, M & Legendre, P, 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67:345-366. DOI: <https://doi.org/10.1890/0012-9615>
- Farshad, H & Venkataramana, GV, 2012. Impact of physico-chemical parameters of water on zooplankton diversity in Nanjangud industrial area, India. *International Research Journal of Environment Sciences*, 1:37-42.
- Forbes, AE & Chase, JM, 2002. The role of habitat connectivity and landscape geometry in experimental zooplankton metacommunities. *Oikos*, 96:433-440. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.960305>.

Frankovich, TA, Gaiser, EE, Zieman, JC & Wachnicka, AH, 2006. Spatial and temporal distributions of epiphytic diatoms growing on *Thalassia testudinum* Banks ex König: relationships to water quality. *Hydrobiologia*, 569:259-271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0136-x>

Gianuca, AT, Declerck, SAJ, Lemmens, P & de Meester, L, 2017. Effects of dispersal and environmental heterogeneity on the replacement and nestedness components of β -diversity. *Ecology*. 98:525–533. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.1666>

Giri, S & Qiu, Z, 2016. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review. *Journal of Environmental Management*, 173:41-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.029>

Glibert, PM, 2017. Eutrophication, harmful algae and biodiversity: challenging paradigms in a world of complex nutrient changes. *Marine Pollution Bulletin*, 2:591-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.027>

Grasshoff, K, Ehrhardt, M & Kremling, K, 1983. *Methods of Seawater Analysis*, Verlag Chemie, New York, 16:581–614.

Hedayati, A, Pouladi, M, Vazirizadeh, A, Qadermarzi, A & Mehdipour, N, 2017. Seasonal variations in abundance and diversity of copepods in Mond River estuary, Bushehr, Persian Gulf. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18:447–452. DOI: <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180201v>

Heino, J, Melo, AS & Bini, LM, 2015. Reconceptualising the beta diversity-environmental heterogeneity relationship in running water systems. *Freshwater Biology*. 60:223–235. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.12502>

Hubbell, SP, 1997. A unified neutral theory of biogeography and relative species abundance and its application to tropical rain forests and coral reefs. *Coral Reefs*, 16:S9–S21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003380050237>

Koroleff, F, 1976. Determination of phosphorus. In K. Grasshoff, [Ed.] *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, Weinheim, 117–25.

Lima, MS, Schneck, F, Haig They, N, Oliveira Crossetti, L, Bohnenberger, JE, McMahon, KD & da Motta Marques, D, 2020. Turnover is replaced by nestedness with increasing geographical distance in bacterial communities of coastal shallow lakes. *Marine and Freshwater Research*, 71:1086–1098. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF19110>

Liu, P, Xu, S, Lin, J, Li, H, Lin, Q & Han, BP, 2020. Urbanization increases biotic homogenization of zooplankton communities in tropical reservoirs. *Ecological Indicators*, 110:105899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105899>

Liu, WC, Liu, HM & Huang, WC, 2022. Flood–Ebb and Discharge Variations in Observed Salinity and Suspended Sediment in a Mesotidal Estuary. *Standards*, 2:209-225. DOI: <https://doi.org/10.3390/standards2020016>

- Loewen, CJ, Strecker, AL, Larson, GL, Vogel, A, Fischer, JM & Vinebrooke, RD, 2019. Macroecological drivers of zooplankton communities across the mountains of western North America. *Ecography*, 42:791-803. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.03817>
- Lopes, PM, Bini, LM, Declerck, SAJ, Farjalla, VF & Bozelli, RL, 2014. Correlates of zooplankton beta diversity in tropical lake systems. *PLoS One*, 9:e109581. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109581>
- Margalef, DR, 1958. Information theory in ecology. *Generation System*, 3:36–71.
- Martins, FL, Giordano, F, Barrella, W, 2021. Socio-environmental vulnerability of water in the estuary of the metropolitan region of Santos (Brazil). *Quaestiones Geographicae*, 40:113-125. DOI: <https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0040>
- Modéran, J, Bouvais, P, David, V, Noc, SL, Bouhet, BS, Niquil, N, Miramand, P & Fichet, D, 2010. Zooplankton community structure in a highly turbid environment (Charente estuary, France): spatio-temporal patterns and environmental control. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 88:219–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.04.002>
- Montes-Pérez, JJ, Moreno-Ostos, E, Marañón, E, Blanco, JM, Rodríguez, J, 2020. Intermediate-size cell dominance in the phytoplankton community of an eutrophic, estuarine ecosystem (Guadalupe River, Southern Spain). *Hydrobiologia*, 847:2241-2254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04251-9>
- Morley, SA, Toft, JD & Hanson, KM, 2012. Ecological Effects of Shoreline Armoring on Intertidal Habitats of a Puget Sound Urban Estuary. *Estuaries and Coasts* 35:774-784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-012-9481-3>
- Muñoz-Colmenares, ME, Soria, JM & Vicente, E, 2021. Can zooplankton species be used as indicators of trophic status and ecological potential of reservoirs?. *Aquatic Ecology*, 55:1143-1156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10452-021-09897-8>
- Neumann-Leitão, S, Melo-Junior, MD, Porto-Neto, FDF, Silva, AP, Diaz, XFG, Silva, TDAE, Schwamborn, R, 2019. Connectivity between coastal and oceanic zooplankton from Rio Grande do Norte in the Tropical Western Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 6:287. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00287>
- Niebuhr, BB, Wosniack, ME, Santos, MC, Raposo, EP, Viswanathan, GM, Da Luz, MG & Pie, MR, 2015. Survival in patchy landscapes: the interplay between dispersal, habitat loss and fragmentation. *Scientific reports*, 5:11898. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep11898>
- Nixon, SW, 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*. 41:199-21. DOI: <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.1042204>

Ogamba, EN, Charles, EE, Izah, SC, 2019. Application of diversity indices in the study zooplankton community of Taylor Creek in the Niger Delta, Nigeria. *Sumerianz Journal of Biotechnology*, 2:35-41.

Palma, MB, Costa, KG da, Magalhães, A, Flores Montes, J, Pereira, LCC & Costa, RM da. 2013. Zooplankton spatial and temporal distribution in an equatorial estuary (Amazon littoral, Brazil). *Journal of Coastal Research*, 65 (10065), 1182-1187. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI65-200.1>

Panosso, R, Carlsson, PER, Kozlowsky-Suzuki, B, Azevedo, SM, Granéli, E, 2003. Effect of grazing by a neotropical copepod, *Notodiaptomus*, on a natural cyanobacterial assemblage and on toxic and non-toxic cyanobacterial strains. *Journal of Plankton Research*, 25:1169-1175. DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/25.9.1169>

Parra, G, Matias, NG, Guerrero Ruiz, FJ, Boa Vida, MJ, 2009. Short term fluctuations of zooplankton abundance during autumn circulation in two reservoirs with contrasting trophic state. *Limnetica*, 28:175-184.

Pelage, L, Gonzalez, JG, Le Loc'h, F, Ferreira, V, Munaron, JM, Lucena-Fredou, F & Fredou, T, 2021. Importance of estuary morphology for ecological connectivity with their adjacent coast: A case study in Brazilian tropical estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 251:107184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107184>

Pielou, EC, 1977. *Mathematical Ecology*. Wiley. New York.

Pinel-Alloul, B & Ghadouani, A, 2007. Spatial heterogeneity of planktonic microorganisms in aquatic systems. The spatial distribution of microbes in the environment, 203-310. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6216-2_8

Pinheiro, SCP, Magalhães, A, da Costa, VB, Pereira, LCC & da Costa, RM. 2013. Temporal variation of zooplankton on a tropical Amazonian beach. *Journal of Coastal Research*, 65 (10065), 1838-1843. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI65-311.1>

Pinto, TK, Austen, MC, Warwick, RM, Somerfield, PJ, Esteves, AM, Castro, FJ & Santos, PJ, 2013. Nematode diversity in different microhabitats in a mangrove region. *Marine Ecology*, 34(3), 257-268. DOI: <https://doi.org/10.1111/maec.12011>

Ptatscheck, C & Traunspurger, W, 2020. The ability to get everywhere: dispersal modes of free-living, aquatic nematodes. *Hydrobiologia*, 847:3519-3547. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04373-0>

Rahman, SA & Yaakub, SM, 2020. Socio-economic valuation of seagrass meadows in the Pulai River Estuary, Peninsular Malaysia, through a wellbeing lens. *Marine and Freshwater Research*, 71:877-891. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF19208>

Rego, AHG, Rangel-Junior, A, Costa, IAS, 2019. Phytoplankton scenario and microcystin in water during extreme drought in semiarid tropical water supplies, Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 80:1-11. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.182599>

Rego, J, de Amarante Júnior, OP & Dias, JR, 2023. Use, Land Occupation and Environmental Impacts on São Marcos Beach, São Luísma, Brazil. *International Journal of Research in Humanities and Social Studies*. 10:52-61. ISSN 2394- 6296. DOI: <https://doi.org/10.22259/2394-6296.1003004>

Reyes-Velarde, PM, Alonso-Rodríguez, R, Domínguez-Jiménez, VP & Calvario-Martínez, OMAR, 2023. The spatial distribution and seasonal variation of the trophic state TRIX of a coastal lagoon system in the Gulf of California. *Journal of Sea Research*, 193:102385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102385>

Ricklefs, RE & Schluter, D, 1993. Species diversity: regional and historical influences. In: *Species diversity in ecological communities: Historical and Geographical Perspectives* (eds R. E. Ricklefs and D. Schluter), 1:350-363.

Ricklefs, RE, 1987. Community diversity: relative roles of local and regional processes. *Science*, 235:167-171. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.235.4785.167>

Rose, TH, Tweedley, JR, Warwick, RM & Potter, IC, 2019. Zooplankton dynamics in a highly eutrophic microtidal estuary. *Marine Pollution Bulletin* 142:433-451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.047>

Salazar-Sánchez, M. del R, Arias-Hoyos, A, Rodríguez-Alegría, DC & Morales-Velazco, S, 2023. Microorganisms Bioindicators of Water Quality. In *Microbial Biodiversity, Biotechnology and Ecosystem Sustainability*, 247-269. Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4336-2_12

Salmond, NH & Wing, SR, 2022. Sub-lethal and lethal effects of chronic ammonia exposure and hypoxia on a New Zealand bivalve. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 5491:51696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151696>

Serranito, B, Aubert, A, Stemmann, L, Rossi, N & Jamet, JL, 2016. Proposition of indicators of anthropogenic pressure in the Bay of Toulon (Mediterranean Sea) based on zooplankton time-series. *Continental Shelf Research*, 121:3-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.016>

Shannon, CE & Wiener, W, 1963. *The mathematical theory of Communication* University. Urbana: Illinois Press, 125.

Simpson, EH, 1949. Measurement of diversity. *Nature*, 163:688.

Soininen, J, Kokocinski, M, Estlander, S, Kotanen, J & Heino, J, 2007. Neutrality, niches, and determinants of plankton metacommunity structure across boreal wetland ponds. *Écoscience*, 14:146-154. DOI: [10.2980/1195-6860\(2007\)14\[146:NNADOP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2980/1195-6860(2007)14[146:NNADOP]2.0.CO;2)

Strickland, JDH & Parsons, TR, 1972. *A practical handbook of sea water analysis*. Bulletin Fisheries Research Board of Canada, 1:310. DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791>

Tyagi, S, Sharma, B, Singh, P & Dobhal, R, 2013. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1:34-38. DOI: <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>

UNESCO, 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater – Report of SCOR-UNESCO Working group 17 (Paris): Monographs in Oceanographic Methodology, 1:69.

Uriarte, I & Villate, F, 2005. Differences in the abundance and distribution of copepods in two estuaries of the Basque coast (Bay of Biscay) in relation to pollution. *Journal of Plankton Research*, 27:863-874. DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbi059>

Vignatti, AM, Echaniz, SA, Cabrera, GC, Mancini, M, & Salinas, V, 2018. Dinámica estacional del zooplancton y su relación con los factores ambientales en el lago urbano Dacar (Córdoba, Argentina). *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 20:297-309. DOI: <https://doi.org/10.22179/revmacn.20.594>

Vollenweider, R. A, Giovanardi, F, Montanari, G & Rinaldi, A, 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*, 9:329-357. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-095x\(199805/06\)9:3%3c329::aid-env308%3e3.0.co;2-9](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-095x(199805/06)9:3%3c329::aid-env308%3e3.0.co;2-9)

Wadnerkar, PD, Santos, IR, Looman, A, Sanders, CJ, White, S, Tucker, JP & Holloway, C. 2019. Significant nitrate attenuation in a mangrove-fringed estuary during a flood-chase experiment. *Environmental Pollution*, 253:1000-1008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.060>

Walsh, JP, 1988. Selectivity and selective perception: An investigation of manager's belief structures and information processing. *Academy of Management journal*, 31:873-896. DOI: <https://doi.org/10.5465/256343>

Wang, Y, Hu, J, Pan, H, Li, S & Failler, P, 2016. An integrated model for marine fishery management in the Pearl River Estuary: Linking socio-economic systems and ecosystems. *Marine Policy*, 64:135-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.11.014>

Watson, JR, Siegel, DA, Kendall, BE, Mitarai, S, Rassweiler, A & Gaines, SD, 2011. Identifying critical regions in small-world marine metapopulations. *PNAS*. 108:907–913. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111461108>

Wu, J, Mao, R, Li, M, Xia, J, Song, J, Cheng, D & Sun, H, 2020. Assessment of aquatic ecological health based on determination of biological community variability of fish and macroinvertebrates in the Weihe River Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 267:110651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110651>

Xia, F, Jiang, QY, Zhu, T, Zou, B, Liu, H & Quan, ZX, 2021. Ammonium promoting methane oxidation by stimulating the Type Ia methane-oxidizing bacteria in tidal flat

- sediments of the Yangtze River estuary. *Science of The Total Environment*, 793:148470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148470>
- Yang, B, Lin, H, Bartlett, SL, Houghton, EM, Robertson, DM & Guo, L, 2021. Partitioning and transformation of organic and inorganic phosphorus among dissolved, colloidal and particulate phases in a hypereutrophic freshwater estuary. *Water Research*, 196:117025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117025>
- Yu, D, Chen, N, Krom, MD, Lin, J, Cheng, P, Yu, F & Gao, X, 2019. Understanding how estuarine hydrology controls ammonium and other inorganic nitrogen concentrations and fluxes through the subtropical Jiulong River Estuary, SE China under baseflow and flood-affected conditions. *Biogeochemistry*, 142:443-466. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00546-9>
- Yuan, D, Chen, L, Luan, L, Wang, Q & Yang, Y, 2020. Effect of salinity on the zooplankton community in the Pearl River estuary. *Journal of Ocean University of China*, 19:1389-1398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11802-020-4449-6>
- Zervoudaki, S, Nielsen, TG, & Carstensen, J, 2009. Seasonal succession and composition of the zooplankton community along an eutrophication and salinity gradient exemplified by Danish waters. *Journal of plankton research*, 31:1475- 1492.

APÊNDICES

A. Sinopse taxonômica dos táxons identificados durante todo o estudo no ERA, São Luís – MA.

FILO CILIOPHORA

Classe Ciliata

Subclasse Spirotricha

Ordem Tintinnida

Família Epiplocyclididae

Epiplocyclus undella Jörgensen, 1927

Família Codonellidae

Tintinnopsis rotundata Kofoed e Campbell, 1929

FILO CNIDARIA

Subfilo Medusozoa

Classe Hidrozoa (Gonotecas)

Subclasse Hydroidolina

Ordem Leptothecatae

Família Campanulariidae

Obelia sp.

(medusa e pólipos)

FILO EQUINODERMATA (Larvas)

FILO NEMATODA

Nematoide 1

Nematoide 2

Nematoide 3

Nematoide 4

Nematoide 5

FILO MOLLUSCA

Classe Bivalvia (Veliger)

Classe Gastropoda (Veliger)

FILO ANNELIDA

Classe Polychaeta (Larvas)

FILO ARTHROPODA

Subfilo Crustacea

Classe Maxillopoda

Subclasse Thecostraca

Infraclasse Cirripedia

(nauplios I, II, III e IV)

Classe Copepoda

Ordem Calanoida

(copepoditos I, II, III, IV e V)

Família Calanidae

Undinula vulgaris Dana, 1849

Família Eucalanidae

Subeucalanus pileatus Giesbrecht, 1888

Família Nullosetigeridae

Phyllopus helgae Farran, 1908

Família Paracalanidae

Paracalanus crassirostris Dahl f., 1894

Paracalanus nanus Sahr GO, 1925

Paracalanus indicus Wolfenden, 1905

Paracalanus aculeatus Giesbrecht, 1888

Família Pseudocalanidae

Ctenocalanus vanus Giesbrecht, 1888

Pseudocalanus acutus Giesbrecht, 1881

Família Diaptomidae

Notodiaptomus sp₁

Notodiaptomus sp₂

Notodiaptomus sp₃

Família Scolecithricidae

Scolecithricella ovata Farran, 1905

Família Temoridae

Temora turbinata Dana, 1849

Família Centropagidae

Centropages bradyi Wheeler, 1900

Centropages brachiatus Dana, 1849

Família Phyllopodidae

Phyllopus helgae Farran, 190

Família Acartidae

Acartia liljeborgi Giesbrecht, 1889

Acartia tonsa Dana, 1849

Ordem Cyclopoida

Família Oithonidae

Oithona ovalis Baird, 1843

Oithona nana Giesbrecht, 1893

Oithona similis Claus, 1866

Oithona simplex Farran, 1913

Família Oncaeidae

Oncae media Giesbrecht, 1891

Ordem Harpacticoida

(nauplios I e II)

Família Miraciinae

Miracia efferata Dana, 1849

Família Euterpinidae

Euterpina acutifrons Dana, 1847

Família Clytemnestrinae

Clytemnestra scutellata Dana, 1847

Classe Malacostraca

Ordem Decapoda

Infraordem Brachyura

(zoeas e megalopodas)

Infraordem Caridea (Zoeas)

Família Luciferidae

Belzebub faxoni Borradaile, 1915

Classe Ostracoda (nauplios)

FILO CHAETOGNATHA

Classe Sagittodea

Ordem Aphragmophora

Família Sagittidae

Parasagitta friderici Ritter-Záhony, 1911

Sagitta sp. Quoy e Gaimard, 1827

FILO CHORDATA

Subfilo Tunicata

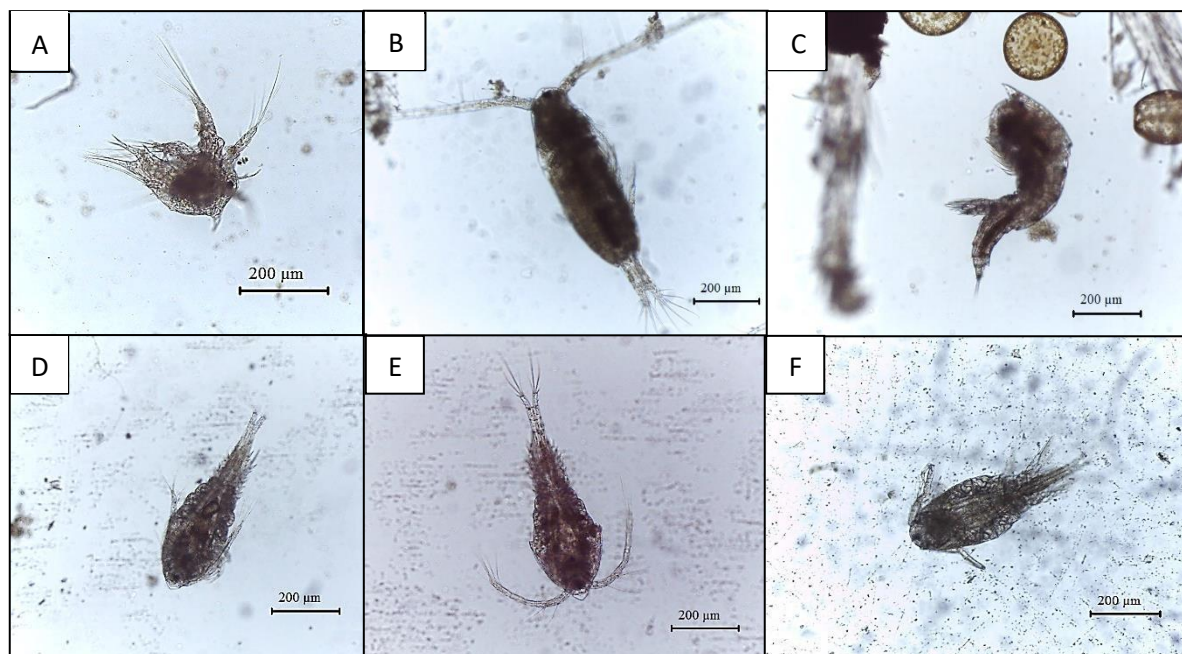
Classe Appendicularia

Ordem Copelata

Família Oikopleuridae

Oikopleura dioica Fol, 1872

B. Fotomicrografia alguns organismos representantes do filo Arthropoda presentes em todos os períodos sazonais e pontos amostrais. **A** - Nauplio de Cirripedia; **B** - *Acartia tonsa*; **C** - *Euterpina acutifrons*; **D** - *Oithona nana*; **E** - *Oithona ovalis*; **F** - *Oithona similis*.



Fonte: Autoria própria (2023)

