AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE SEDIMENTOS DE ÁREAS ESTUARINAS E DE MANGUEZAL DO RIO PARAÍBA DO SUL (RJ) COM *Nitokra* sp.

Ana Luiza Gonçalves Sepulcro[1], Échily Sartori[2], Nathalia da Rocha Alves[1], Ingrid Ferreira dos Santos[1], Jéssica Dutra Ferreira[1], Carlos Eduardo de Rezende[2], Cristiane dos Santos Vergilio[1]

[1]Universidade Federal do Espírito Santo/ CCENS, Alto Universitário, S/N - Guararema, Alegre - ES, 29500-000, Brasil, ana.l.sepulcro@edu.ufes.br, nathaliarocha173@gmail.com, ingrid.f.santos@edu.ufes.br, jessicadutra017@gmail.com, cristiane.vergilio@ufes.br.
[2]Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, echilysartori1@gmail.com, crezende@uenf.br.

Resumo
O estudo avaliou a qualidade dos sedimentos do estuário e manguezal do Rio Paraíba do Sul (RPS) por meio de análises granulométricas, químicas e ecotoxicológicas. Foram identificados elementos-traço como As, Cr, Cu, Pb e Zn, com concentrações acima do TEL (nível liminar para indução de efeitos tóxicos para biota) em diferentes pontos de coleta, principalmente no manguezal. Os sedimentos desse ambiente apresentaram predominância de frações finas, favorecendo a retenção de contaminantes. Nos ensaios com *Nitokra sp*, as amostras de ambos os ambientes (estuário e manguezal) reduziram significativamente a produção de descendentes em relação ao controle, sendo observado um decréscimo mais acentuado no manguezal ($p < 0,0001$). Os efeitos foram mais acentuados nos sedimentos de manguezal, estão possivelmente relacionados às suas características granulométricas e geoquímicas. Os resultados destacam a importância dos ensaios ecotoxicológicos na identificação de efeitos subletais e na avaliação integrada da qualidade dos sedimentos.

Palavras-chave: Mangue; Estuário; *Nitokra sp.*; Sedimento.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas – Ecologia.

Introdução

A zona de transição entre as águas continentais e marinhas origina os estuários, ecossistemas costeiros caracterizados por gradientes de salinidade, temperatura e nutrientes (McLusky; Elliott, 2002; Knoppers et al., 2009). Esses ambientes são importantes áreas de alimentação, reprodução e abrigo, funcionando como berçários naturais para diversas espécies. Além disso, a estrutura do manguezal contribui para a regulação estuarina ao reduzir o fluxo das águas e favorecer a retenção de nutrientes e matéria orgânica (Kathiresan; Bingham, 2001). Entretanto, esses ambientes sofrem pressões antrópicas, como desmatamento, lançamento de efluentes e esgoto sem tratamento, expansão urbana, descarte de resíduos e assoreamento, comprometendo sua qualidade ambiental. Nesse contexto, os sedimentos atuam na retenção e no transporte de poluentes, especialmente metais tóxicos e compostos orgânicos persistentes, que podem associar-se à matéria orgânica nos manguezais (Souza et al., 2012; Da Silva et al., 2014).

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul possui caráter interestadual, abrangendo porções territoriais de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, sendo o eixo central para a segurança hídrica e a integração socioeconômica do Sudeste. O Rio Paraíba do Sul (RPS) destaca-se pela urbanização e industrialização, sujeita ao aporte de contaminantes por atividades urbanas, industriais e agropecuárias, além de alterações no uso do solo e no regime hidrológico (ANA, 2011).

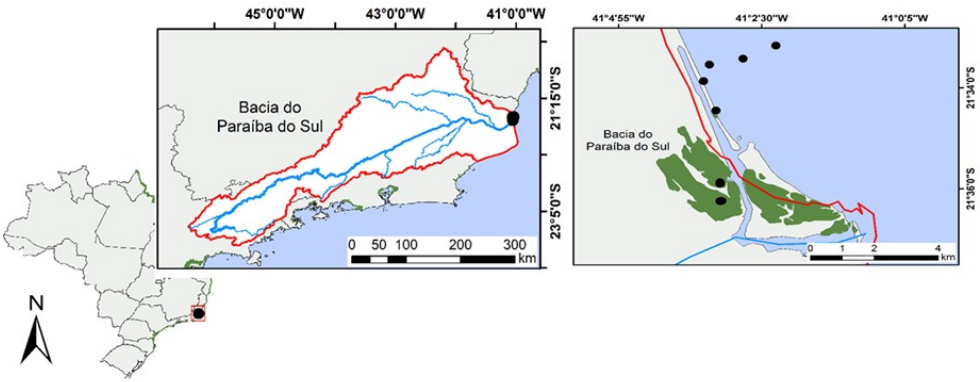
Nesse sentido, os ensaios ecotoxicológicos são ferramentas importantes para avaliar a qualidade ambiental e os efeitos de contaminantes nos sedimentos. O copépode bentônico *Nitokra* sp. destaca-se como organismo-teste por sua sensibilidade às alterações na qualidade da água e do sedimento (Lotufo; Abessa, 2002). Nesse sentido, o presente estudo visa comparar a toxicidade crônica de sedimentos do estuário e manguezal do RPS (RJ), por meio de análises biogeoquímicas e ensaios ecotoxicológicos com *Nitokra* sp.

Metodologia

Coleta das amostras ambientais

As amostras de sedimento foram coletadas no baixo curso do rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro, abrangendo os ambientes de estuário e manguezal (Figura 1). As coletas ocorreram em duas campanhas, nos períodos seco (C1, outubro de 2022) e chuvoso (C2, março de 2023), abrangendo 24 pontos, sendo 12 no estuário e 12 no manguezal. Em cada ponto, foram determinados in situ parâmetros físico-químicos. Os sedimentos foram coletados com draga, acondicionados em sacos plásticos e congelados a −20 °C. Após o descongelamento, foram destinados às análises granulométricas e aos ensaios ecotoxicológicos, enquanto a porção restante foi liofilizada, peneirada (< 2,0 mm) e homogeneizada para determinação de metais.

Figura 1. Mapa da bacia do Rio Paraíba do Sul e dos pontos de coleta das áreas estuarinas e de manguezal do Rio Paraíba do Sul – RJ.



Fonte: Elaborado por Échily Sartori.

Análise granulométricas do sedimento

Uma porção de sedimento foi fracionado (<2 mm) por peneiramento, em seguida foi colocado sob agitação em um banho de ultrassom por 10 min, seguido da determinação da distribuição do tamanho de partícula por difração a laser (Shimadzu modelo SALD-3101) em areia, silte e frações de argila.

Ensaios ecotoxicológicos do sedimento com *Nitokra sp.*

Os ensaios ecotoxicológicos seguiram a metodologia proposta por Lotufo e Abessa (2002), com adaptações no número de réplicas e organismos. Foram utilizados tubos de 25 mL contendo 2 g de sedimento úmido e 15 mL de água do mar reconstituída (salinidade 35). Para cada amostra, foram realizadas 10 réplicas com cinco fêmeas ovadas de *Nitokra* sp., totalizando 50 organismos. No início do ensaio, os organismos receberam 0,1 mL alimento algáceo. Os ensaios foram conduzidos a 25 ± 2 °C, com fotoperíodo de 14h luz/10h escuro e sem aeração por um período de 10 dias. Os parâmetros físico-químicos foram medidos no início e final do experimento. Após o tempo de exposição, os organismos foram fixados em formaldeído 10% com rosa de bengala por 48 h. Os frascos experimentais foram peneirados em malha de 0,045 mm para triagem de diferentes fases de vida de *Nitokra sp*. fêmeas ovadas, adultos e juvenis (náuplios e copepoditos).

Análise dos dados

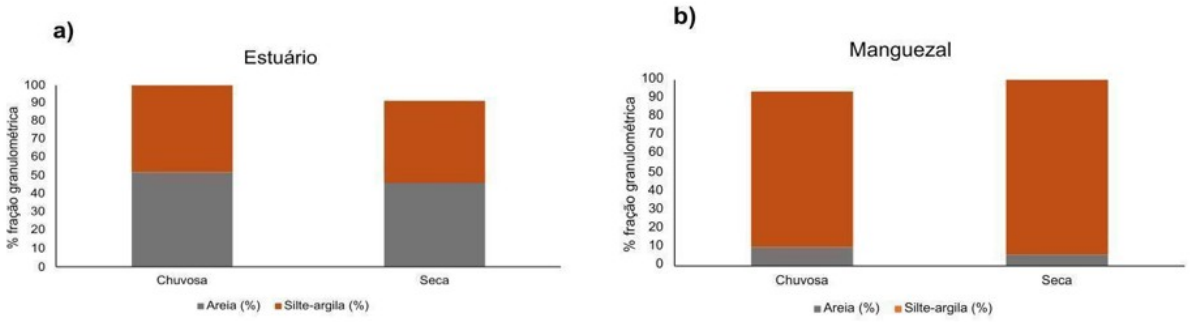
Para os dados quantitativos, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), seguida pelo teste post-hoc de Turkey, considerando um nível de significância de 5% ($p<0,05$). As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram conduzidas no software GraphPad Prism, versão 8.4.2.

Resultados

Caracterização granulométrica do sedimento

A distribuição granulométrica diferiu entre o estuário e o manguezal (Figura 2). Nos pontos estuarinos, areia e silte-argila apresentaram proporções semelhantes nas estações chuvosa (52,0% e 48,0%) e seca (46,1% e 45,3%), enquanto no manguezal foi observada a predominância de silte-argila em ambas as estações (83,6% e 93,8%), com baixa proporção de areia (10,0% e 6,2%).

Figura 2. Distribuição percentual das frações granulométricas nos sedimentos das estações chuvosa (2023) e seca (2022) do estuário (a) e do manguezal (b) do Rio Paraíba do Sul.



Fonte: Autoria do próprio autor.

Concentração de metais no sedimento

Em relação aos níveis dos elementos traço, nenhum elemento ultrapassou o nível de PEL (Probable Effect Level), porém As, Cr, Cu, Pb e Zn excederam o TEL (Threshold Effect Level) em diferentes ambientes e períodos, com maiores concentrações e frequência de violações no manguezal (Tabela 2). Nesse ambiente, Cr apresentou violações em 83,3% e 100% das amostras, e Cu em 66,7% e 100%, nos períodos chuvoso e seco, respectivamente, enquanto Zn excedeu o TEL em 50% das amostras no período chuvoso. No estuário, as violações foram menos frequentes e envolveram os elementos As, Cr, Cu, Pb e Zn (Tabela 2).

Tabela 1. Concentrações totais de elementos-traço (mg kg^{-1}) nos sedimentos do estuário e manguezal do Rio Paraíba do Sul, nas estações chuvosa e seca, e frequência de amostras acima dos valores de referência TEL (Threshold Effect Level) e PEL (Probable Effect Level), conforme Buchman (2008).

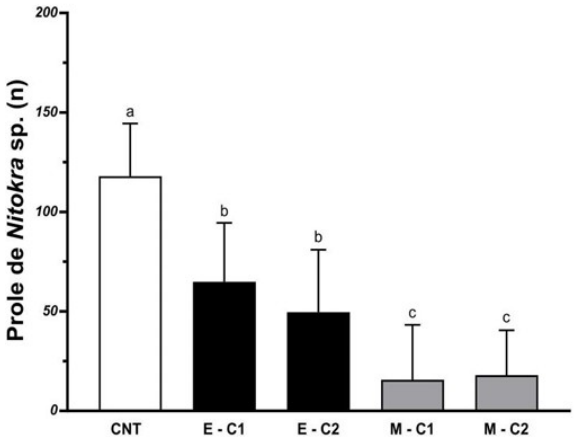
Elementos (mg/kg)		ESTUÁRIO		MANGUEZAL		TEL / PEL - NOOA	
		Chuvosa n=7	Seca n=5	Chuvosa n=6	Seca n=6	TEL	PEL
As	Média ± DP	11,7 ± 15,9	7,7 ± 11,2	5,8 ± 2,7	6,1 ± 2,2	7,2	42
	Violação TEL	2/7 (28,6%)	2/5 (40%)	2/6 (33,3%)	2/6 (33,3%)		
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
Cd	Média ± DP	0,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,7	4,2

	Violação TEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
	Média ± DP	44,8 ± 36,3	52,8 ± 43,7	63,9 ± 30,4	80,8 ± 3,7		
Cr	Violação TEL	3/7 (42,9%)	2/5 (40%)	5/6 (83,3%)	6/6 (100%)	52	160
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
	Média ± DP	11,7 ± 10,9	6,7 ± 11,6	24,2 ± 12,3	27,7 ± 3,9		
Cu	Violação TEL	2/7 (28,6%)	1/5 (20%)	5/6 (83,3%)	6/6 (100%)	19	108
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
	Média ± DP	18,1 ± 11,9	23,2 ± 12,5	24,8 ± 11,3	29,8 ± 3,2		
Pb	Violação TEL	2/7 (28,6%)	3/5 (60%)	3/6 (50%)	2/6 (33,3%)	30	112
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		
	Média ± DP	64,7 ± 40,9	39,2 ± 59,3	127,5 ± 85,6	91,0 ± 10,8		
Zn	Violação TEL	0/7 (0%)	1/5 (20%)	3/6 (50%)	0/6 (0%)	124	271
	Violação PEL	0/7 (0%)	0/5 (0%)	0/6 (0%)	0/6 (0%)		

Avaliação do potencial tóxico do sedimento através de ensaios ecotoxicológicos com *Nitokra sp.*

Os ensaios ecotoxicológicos crônicos com *Nitokra* sp. indicaram os efeitos da exposição ao sedimento na reprodução os organismos. A produção de prole foi o parâmetro mais sensível (Figura 3), com redução significativa em todos os tratamentos ambientais em relação ao controle ($p < 0,0001$), evidenciando comprometimento reprodutivo. A exposição ao sedimento de ambos os ambientes induziu redução da prole dos organismos expostos, sendo esse efeito mais pronunciado nas amostras do manguezal (Figura 3).

Figura 3. Número absoluto da prole de *Nitokra sp*. após a exposição crônica aos sedimentos de estuário (E) e manguezal (M) do Rio Paraíba do Sul (RPS). CNT= Controle; E - C1= Estuário - Campanha 1; E - C2= Estuário - Campanha 2; M - C1= Manguezal - Campanha 1; M - C2= Manguezal - Campanha C2.



Fonte: Autoria do próprio autor.

Discussão

As menores produções de descendentes, associadas à maior incidência de violações do TEL, foram registradas nos sedimentos de manguezal, indicando maior comprometimento da reprodução nesse ambiente. Essa resposta pode estar relacionada às características sedimentológicas do manguezal, que apresentou predominância de frações finas, especialmente silte e argila. Sendo assim, está predominância pode estar associada à menor energia hidrodinâmica devido a presença da estrutura de raízes, assim como do regime periódico de maré, que favorecem a deposição e retenção de sedimentos (Kathiresan; Bingham, 2001).

Essa maior sensibilidade pode estar associada às características granulométricas e geoquímicas do manguezal, marcado pela predominância de silte e argila, que favorece o acúmulo de partículas finas e matéria orgânica e influencia a distribuição de contaminantes (Almeida; Souza, 2008; Figueiredo et al., 2011). Tais, fatores que favorecem a retenção e podem aumentar a biodisponibilidade desses contaminantes para os organismos bentônicos, contribuindo para os efeitos ecotoxicológicos observados. Os ensaios ecotoxicológicos demonstraram a importância da utilização de *Nitokra sp*. como organismo-teste na avaliação da qualidade de sedimentos, permitindo identificar efeitos subletais que não seriam evidenciados apenas pelas análises químicas.

No presente estudo, essa condição é particularmente relevante porque o manguezal apresentou maior frequência de concentrações de Cr, Cu e Zn acima do TEL, concomitantemente às menores respostas reprodutivas de *Nitokra* sp. Embora essa associação não permita estabelecer, isoladamente, uma relação causal entre os metais e os efeitos observados, ela sugere que as características do sedimento podem contribuir para a maior exposição dos organismos bentônicos aos contaminantes. Os resultados obtidos neste estudo reforçam que a concentração total de metais nos sedimentos, isoladamente, não é suficiente para explicar os efeitos ecotoxicológicos observados.

Segundo Rainbow (2007), a toxicidade dos metais está diretamente relacionada à sua disponibilidade para os organismos, sendo influenciada por processos de adsorção e partição entre as diferentes fases do sedimento. Assim, concentrações totais semelhantes podem resultar em diferentes respostas biológicas dependendo das características físicas e químicas da matriz sedimentar. Nesse sentido, a ausência de concentrações superiores ao PEL não implica necessariamente ausência de efeitos biológicos, sobretudo quando são observadas concentrações acima do TEL associadas a respostas subletais em organismos expostos cronicamente.

Nesse contexto, as maiores concentrações de metais e a predominância de sedimentos finos no manguezal constituem fatores relevantes para compreender os efeitos observados neste estudo. Todavia, os ensaios com *Nitokra* sp. constituem uma ferramenta complementar às análises químicas, permitindo avaliar não apenas a presença de contaminantes, mas também seus possíveis efeitos sobre processos biológicos fundamentais, como a reprodução. A integração desses diferentes indicadores fornece, portanto, uma avaliação mais abrangente da qualidade dos sedimentos e do potencial de comprometimento ecológico nos diferentes compartimentos do Rio Paraíba do Sul.

Conclusão

Os resultados demonstraram diferenças entre os sedimentos do estuário e do manguezal do Rio Paraíba do Sul, com predominância de frações finas e maiores concentrações de alguns metais no manguezal. Embora nenhum elemento tenha ultrapassado os valores de PEL, foram observadas violações do TEL para As, Cr, Cu, Pb e Zn, com maior frequência nesse ambiente, o que deperta um alerta para potenciais efeitos na biota local.

Os ensaios crônicos com *Nitokra* sp. evidenciaram comprometimento reprodutivo, sendo a produção de prole o parâmetro mais sensível, com redução significativa em todos os tratamentos em relação ao controle e efeitos mais pronunciados no manguezal. Esses achados reforçam a importância da integração entre características sedimentares, análises químicas e respostas ecotoxicológicas na avaliação da qualidade dos sedimentos. Nesse contexto, *Nitokra* sp. mostrou-se um organismo-teste sensível para a identificação de efeitos subletais, especialmente sobre a reprodução.

Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão da qualidade ambiental do estuário e do manguezal do Rio Paraíba do Sul, ambientes de elevada importância ecológica inseridos em uma bacia de grande relevância ambiental e socioeconômica. Os resultados fornecem subsídios para futuras pesquisas e para ações de monitoramento e conservação desses importantes ambientes costeiros.

Referências

ALMEIDA, M. G.; SOUZA, C. M. M. Distribuição espacial de mercúrio total e elementar e suas interações com carbono orgânico, área superficial e distribuição granulométrica em sedimentos superficiais da bacia inferior do Rio Paraíba do Sul, RJ, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 22, n. 3, 2008.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estudos auxiliares para a gestão do risco de inundações: Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Brasília: ANA, 2011.

ARAUJO, Beatriz Ferreira et al. Distribuição e fracionamento do hg em sedimentos do rio Paraíba do Sul–RJ, Brasil. **Química Nova**, v. 38, n. 1, p. 30-36, 2015. DOI: https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140268.

BUCHMAN, Michael F. **Screening Quick Reference Tables (SQuiRTs)**. Seattle: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Response and Restoration, 2008. (NOAA OR&R Report 08-1). Disponível em: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9327 . Acesso em: 12 jun. 2026.

KATHIRESAN, Kandasamy; BINGHAM, Brian L. Biology of mangroves and mangrove ecosystems. 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)40003-4.

KNOPPERS, B. A. et al. A interface terra-mar do Brasil. **Biologia marinha. Interciência, Rio de Janeiro**, p. 529-553, 2009.

LOTUFO, G. R.; ABESSA, D. M. S. Testes de toxicidade com sedimento total e água intersticial estuarinos utilizando copépodes bentônicos. In: NASCIMENTO, I. A.; SOUSA, E. C. P. M.; NIPPER, M. G. (org.). **Métodos em ecotoxicologia marinha: aplicações no Brasil.** São Paulo: Artes Gráficas e Indústria Ltda., 2002. p. 151–162.

MCLUSKY, Donald S.; ELLIOTT, Michael. **The estuarine ecosystem: ecology, threats and management.** OUP Oxford, 2004.

MIGUENS, Flávio Costa et al. Structural and elemental analysis of bottom sediments from the Paraíba do Sul River (SE, Brazil) by analytical microscopy. **Journal of South American Earth Sciences**, v. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.12.009.

RAINBOW, Philip S. Trace metal bioaccumulation: models, metabolic availability and toxicity. **Environment international**, v. 33, n. 4, p. 576-582, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.007.

DA SILVA, Caroline Cavalcanti et al. Long-term variation of Ecotoxicological quality of sediment in an estuarine system with industrial and port activities. **Marine Pollution Bulletin**, v. 215, p. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117854. 117854, 2025. DOI:

SOUZA, Paulo Sérgio et al. Concentrações de Metais Traço em Sedimentos de Manguezais da Baía de Sepetiba (Rio de Janeiro, Brasil): Digestão Assistida por Micro-ondas com Ácido Nítrico e Água Régia. **Revista Virtual de Quimica**, v. 4, n. 4, p. 464-473, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20120035.