

Análise Integrada de Indicadores de Risco Ecológico em um Ecossistema Lagunar Urbano

Priscila Maria de Oliveira Muniz Cunha¹; Julia Araújo Alves²; Adriana Pereira Oliveira de Araújo¹; Enrico Mendes Saggioro²; André Luís de Sá Salomão¹

✉ pricunhabio@gmail.com

1. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Maracanã, Rio de Janeiro – Brasil

2. Instituto Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), Manguinhos, Rio de Janeiro – Brasil

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: Outubro de 2025

Aceito em: Novembro de 2025

Publicado em: Dezembro de 2025

Resumo: As lagoas costeiras são de fundamental importância, considerando sua rica biodiversidade e fauna associada, alta produtividade aquática e relevância econômica, social e turística. A Lagoa de Piratininga (LP) sofre com o assoreamento e a ocupação de suas margens devido ao processo de urbanização iniciado há mais de 20 anos. O objetivo deste estudo foi realizar uma Avaliação de Risco Ecológico (ARE) para a LP a partir de quatro linhas de evidência (LoE): Qualidade da Água, Química, Ecotoxicológica e Ecológica. Amostras de águas superficiais foram coletadas em cinco pontos de amostragem da lagoa e em uma área referência, em agosto de 2022. Os resultados da LoE de Qualidade da Água indicaram elevadas concentrações de coliformes termotolerantes (3.410.000 NMP/100 mL) e DBO (308,3 mg L⁻¹), classificando o risco como muito alto (0,80–0,89). Na LoE Química, foram detectados quatro hormônios, com destaque para o EI (392,5 ng·L⁻¹), resultando em risco químico muito alto (0,99). A LoE Ecotoxicológica revelou atividade estrogênica entre 38,2 e 65,4 ng EQ-E2 L⁻¹, com risco variando de baixo a moderado (0,74–0,85). Na LoE Ecológica, houve predomínio de Cyanobacteria e risco alto (0,59–0,67). O Índice de Risco Ecológico Integrado foi muito alto (0,99) em todos os pontos, indicando significativo comprometimento ambiental. Os resultados refletem intensa pressão antrópica, baixa renovação hídrica e avançado processo de eutrofização. Assim, a LP apresenta risco ecológico muito alto, reforçando a necessidade de medidas urgentes de gestão ambiental e saneamento para mitigação dos impactos observados.

Palavras-chave: Lagoa costeira, Qualidade da água, Ambiente aquático, Ensaios ecotoxicológicos, Fitoplâncton.

Integrated Analysis of Ecological Risk Indicators in an Urban Lagoon Ecosystem

Abstract: Coastal lagoons are of fundamental importance due to their rich biodiversity, associated fauna, high aquatic productivity, and economic, social, and touristic relevance. The Piratininga Lagoon (PL) suffers from siltation and shoreline occupation resulting from an urbanization process that began more than 20 years ago. The aim of this study was to conduct an Ecological Risk Assessment (ERA) for PL based on four Lines of Evidence (LoE): Water Quality, Chemical, Ecotoxicological, and Ecological. Surface water samples were collected at five sampling points within the lagoon and at one reference site in August 2022. Results from the Water Quality LoE indicated high concentrations of thermotolerant coliforms (3,410,000 MPN/100 mL) and BOD (308.3 mg·L⁻¹), classifying the risk as very high (0.80–0.89). In the Chemical LoE, four hormones were detected, with the natural hormone EI (392.5 ng·L⁻¹) showing the highest mean concentration, resulting in a very high chemical risk (0.99). The Ecotoxicological LoE revealed estrogenic activity ranging from 38.2 to 65.4 ng EQ-E2·L⁻¹, with risk levels varying from low to moderate (0.74–0.85). In the Ecological LoE, Cyanobacteria dominated the phytoplankton community, and the risk was classified as high (0.59–0.67). The Integrated Ecological Risk Index was very high (0.99) at all sampling points, indicating significant environmental impairment. The results reflect strong anthropogenic pressure, low water renewal, and an advanced eutrophication process. Therefore, PL presents a very high ecological risk, emphasizing the urgent need for environmental management and sanitation measures to mitigate the observed impacts.

Keywords: Coastal Lagoon, Water quality, Aquatic environment, Ecotoxicological assays, Phytoplankton.

Análisis Integrado de Indicadores de Riesgo Ecológico en un Ecosistema Lagunar Urbano

Resumen: Las lagunas costeras son de fundamental importancia debido a su rica biodiversidad, fauna asociada, alta productividad acuática y relevancia económica, social y turística. La Laguna de Piratininga (LP) sufre procesos de sedimentación y ocupación de sus márgenes como resultado de la urbanización iniciada hace más de 20 años. El objetivo de este estudio fue realizar una Evaluación de Riesgo Ecológico (ERE) para la LP a partir de cuatro Líneas de Evidencia (LoE): Calidad del Agua, Química, Ecotoxicológica y Ecológica. Se recolectaron muestras de agua superficial en cinco puntos de muestreo de la laguna y en un área de referencia en agosto de 2022. Los resultados de la LoE de Calidad del Agua indicaron altas concentraciones de coliformes termotolerantes ($3.410.000 \text{ NMP}/100 \text{ mL}^{-1}$) y DBO ($308,3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), clasificando el riesgo como muy alto (0,80–0,89). En la LoE Química se detectaron cuatro hormonas, destacando la natural E1 ($392,5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), con riesgo químico muy alto (0,99). La LoE Ecotoxicológica reveló actividad estrogénica entre 38,2 y $65,4 \text{ ng EQ-E2}\cdot\text{L}^{-1}$, con riesgo de bajo a moderado (0,74–0,85). En la LoE Ecológica se observó predominio de Cyanobacteria y riesgo alto (0,59–0,67). El Índice de Riesgo Ecológico Integrado fue muy alto (0,99) en todos los puntos, indicando un significativo deterioro ambiental. Los resultados reflejan una intensa presión antrópica, baja renovación hídrica y un avanzado proceso de eutrofización. Así, la LP presenta un riesgo ecológico muy alto, lo que refuerza la necesidad urgente de medidas de gestión ambiental y saneamiento para mitigar los impactos observados.

Palabras clave: Laguna costera, Calidad del agua, Ambiente acuático, Ensayos ecotoxicológicos, Fitoplancton.

INTRODUÇÃO

As lagoas costeiras urbanas são ambientes aquáticos fundamentais para manutenção da biodiversidade de espécies da fauna e flora, contribuindo com a saúde pública e a preservação de ecossistemas de grande importância ecológica, cultural e econômica para as cidades (Sousa *et al.*, 2013). No entanto, as ações humanas vêm contribuindo para o agravamento do processo de degradação contínuo desses ambientes, ameaçando sua biodiversidade (Pagliarini, *et al.*, 2019).

A Lagoa de Piratininga é um exemplo de lagoa costeira urbanizada que sofre há mais de 20 anos os impactos causados pela urbanização não planejada e sem uma infraestrutura compatível com seu desenvolvimento. Um dos impactos de grande importância é a redução da profundidade da lagoa em função do assoreamento causado pelo desmatamento e pela ocupação de suas margens (Niterói, 2021). Somado a isso, a falta de infraestrutura de saneamento adequada resulta em lançamentos constantes de esgoto doméstico sem tratamento ou tratamento inadequado no corpo hídrico.

Os impactos em cursos hídricos podem ser mensurados por diversos métodos quantitativos e qualitativos, com o uso de diferentes parâmetros para caracterizar os efeitos adversos causados nos meios biótico e abiótico (Pagliarini, *et al.*, 2019). Entretanto, na maioria dos trabalhos, a avaliação ambiental é comumente apresentada de maneira isolada, para cada parâmetro analisado, sendo escassos os métodos que integram cada análise e que contribuem

para uma melhor compreensão dos respectivos efeitos ao ecossistema (Ann Hauser & Parente, 2018).

Nesse contexto, a Avaliação de Risco Ecológico (ARE) é uma ferramenta importante para a gestão de ecossistemas contaminados, uma vez que é possível identificar efeitos adversos de contaminantes no ambiente em decorrência da exposição a estressores de origem antrópica (USEPA, 1992). Além disso, a ARE possibilita melhor gerenciamento de áreas contaminadas, pois inclui uma visão mais global dos riscos com a identificação dos efeitos adversos dos contaminantes no ambiente, a partir de análises químicas, físico-químicas, ecotoxicológicas e ecológicas (USEPA, 1992).

O objetivo desse estudo foi realizar uma Avaliação de Risco Ecológico (ARE) preliminar para a Lagoa de Piratininga, Niterói- RJ, a partir de uma visão mais global dos riscos, utilizando quatro linhas de evidência (LoE): Qualidade da Água, Química, Ecotoxicológica e Ecológica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Lagoa de Piratininga (LP) possui superfície de 4,17 km² e profundidade entre 0,4 e 1,2 m (NEPHU, 2022). Localizada na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, no município de Niterói, altamente influenciada pelos processos de urbanização, com elevada especulação imobiliária e ausência de infraestrutura de saneamento adequada (Scheidegger, 2022).

As amostras de água superficial da lagoa foram coletadas em cinco pontos (P1-P5) em uma campanha de amostragem realizada em agosto de 2022. A área de referência (P0) foi o Açude do Camorim, no Parque Estadual da Pedra Branca (RJ).

Avaliação de Risco Ecológico (ARE)

Baseada na integração dos riscos estimados das quatro LoE (Qualidade da Água, Química, Ecotoxicológica e Ecológica) para estimativa do Risco Ambiental da lagoa (Jensen & Mesman, 2006; Sabino *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2025). Um peso específico foi atribuído para cada LoE: Qualidade da Água = 1,0; Química = 1,0; Ecotoxicológica = 1,5; Ecológica = 2,0. As LoEs de Qualidade da Água e Química receberam peso 1,0 pois outros compostos ou parâmetros, que não os selecionados neste estudo, podem estar influenciando o risco; a LoE ecotoxicológica apresenta uma resposta dos organismos testados à presença dos compostos presentes na amostras; enquanto a LoE ecológica recebeu o maior peso por corresponder aos organismos que estão presentes e passaram seu ciclo de vida na lagoa estudada. Os riscos estimados foram traduzidos

em escalas de 0 a 1, onde: 0-0,25 correspondeu ao baixo risco; 0,25-0,50 ao risco moderado; 0,50-0,75 ao alto risco; e 0,75-1,0 ao risco muito alto.

LoE de Qualidade da Água (LoE_{QA}): foram analisados os parâmetros temperatura, pH, OD (Oxigênio Dissolvido), condutividade, salinidade, turbidez, DQO (Demanda Química de Oxigênio), fósforo, nitrogênio e sólidos totais dissolvidos, todos associados a contaminação por esgotos. As análises seguiram a metodologia da *American Public Health Association* (APHA, 2012) (DQO, nitrogênio e fósforo) e as demais com o auxílio da sonda multiparâmetro de campo Hanna, modelo HI9829. As análises microbiológicas utilizaram o kit Collilert (Marca Ideux). Posteriormente foi realizado o cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA) (APHA, 2012; ANA, 2015), e o índice de risco de qualidade de água (IRQA), este foi calculado a partir de regressão linear, com base nos valores de IQA.

LoE Química (LoE_{Quim}): foram analisados a presença dos seguintes compostos na água superficial da lagoa: hormônios sintéticos – 17 α etinilestradiol – EE2 (CAS 57-63-6), Levonorgestrel- LEVO (CAS 17489-40-6); Hormônios naturais – 17- β estradiol- E2 (CAS 50-28-2) e Estrona- E1 (CAS 53-16-7).

As amostras de água (1 L) foram filtradas em membranas de fibra de vidro (0,7 μ m, 4,5 mm; Millipore, Merck) e posteriormente em membrana de PTFE (0,2 μ m, 4,5 mm; Merck) no mesmo dia da coleta. O filtrado foi submetido à extração em fase sólida (SPE) utilizando cartuchos Oasis HLB (6CC, 500 mg). Os cartuchos foram condicionados com 10 mL de metanol e 10 mL de água ultrapura, seguidos da percolação de 250 mL das amostras ajustadas para pH 3 a um fluxo de 3 mL $\cdot$ min⁻¹. Após lavagem com 5 mL de água ultrapura e secagem a vácuo (20 min), os analitos foram eluídos com 8 mL de MeOH:DCM (70:30), evaporados sob nitrogênio e reconstituídos com 1,25 mL de MeOH:H₂O (1:1).

A identificação e quantificação das substâncias químicas de interesse (SQI) foram realizadas por cromatografia líquida de ultra eficiência acoplada à espectrometria de massas em tandem (UPLC-MS/MS, Waters ACQUITY® Xevo TQD®) no LABIFI/UERJ. Utilizou-se coluna BEH C18 (1,7 μ m, 2,1 $\times$ 50 mm) a 50°C, com fluxo de 0,4 mL $\cdot$ min⁻¹, fases móveis A (água) e B (metanol), ambas com 0,01% de hidróxido de amônio. O sistema operou em modo gradiente (90-1% A, 8 min), injeção de 5 μ L e ionização por electrospray (ESI $\pm$) em modo MRM, com voltagem capilar de $\pm$ 3,2 kV.

Os parâmetros de validação seguiram as diretrizes do ICH (2022), incluindo linearidade, limites de detecção (LD) e quantificação (LQ), exatidão, precisão e efeito de matriz. As curvas de calibração foram obtidas por regressão linear entre as razões de área dos analitos e dos padrões

deuterados (BPA-d₁₆ e DZP-d₅) em concentrações de 0,1 a 250 µg·L⁻¹. O LD foi definido pela relação sinal/ruído de 3:1, e o LQ pelo menor ponto da curva analítica. A recuperação (REC%) e o efeito de matriz (EM%) foram avaliados conforme Matuszewski *et al.* (2003).

O risco químico foi estimado conforme Jensen e Mesman (2006) e Sabino *et al.* (2021), a partir do cálculo da pressão tóxica individual das substâncias, correção pela área de referência e integração dos riscos sob efeito aditivo. Os valores de PNEC (Concentração Prevista Sem Efeito) adotados foram obtidos de normas internacionais e literatura científica, priorizando dados de ensaios crônicos.

LoE Ecotoxicológica (LoE_{Ecotox}): foram utilizadas as amostras da água superficial da lagoa sem diluição (100%), em ensaios crônicos com a microalga fotossintética *Skeletonema costatum* (ABNT, 2021a) e ensaios agudos com o microcrustáceo *Artemia sp.* (ABNT, 2021b). A atividade estrogênica foi monitorada por meio do ensaio *Yeast Estrogen Screen* (YES), que utiliza cepas recombinantes de *Saccharomyces cerevisiae* para avaliar a atividade estrogênica da amostra (Routledge & Sumpter, 1996). Ensaios de toxicidade crônica com *S. costatum* foram avaliados comparando as amostras coletadas com o controle, usando o *GraphPad Prism 5* (v. 5.02 para Windows, San Diego, EUA) com análise de variância de uma via seguida por Múltipla de *Dunnett* Teste de comparação ($p < 0,05$). Para os ensaios com *Artemia sp.* foi utilizado *Trimmed Spearman-Kärber* e o programa *GraphPad Prism* versão 5 (v. 5.02 para Windows, San Diego, EUA). Já os dados do ensaio YES foram analisados no software *Origin®* 8.0, resultando em gráficos com as curvas dose-resposta em escala logarítmica e auxiliando no ajuste sigmoidal para a curva padrão do controle positivo por regressão linear.

LoE Ecológica (LoE_{Eco}): foi avaliada por meio de biomonitoramento *in situ*, com foco nos efeitos da poluição sobre as comunidades fitoplanctônicas da Lagoa de Piratininga. Foram analisadas variáveis de estrutura e função ecológica, como riqueza, abundância, diversidade e densidade de espécies. As amostras de água (200 mL) foram coletadas em frascos âmbar e fixadas em solução de lugol (Lund *et al.*, 1958). A identificação e contagem dos organismos foram realizadas em microscópio invertido (Utermöhl, 1958), utilizando campos aleatórios (Uherlinger, 1964) até atingir ao menos 100 indivíduos da espécie dominante. A densidade celular foi convertida em biomassa segundo Hillebrand *et al.* (1999) e Montagnes *et al.* (1994). A diversidade foi estimada pelo índice de Shannon (1948), permitindo avaliar a qualidade ambiental e a uniformidade da distribuição das espécies. A riqueza de táxons e a abundância relativa por classes taxonômicas foram utilizadas como descritores ecológicos. As análises estatísticas foram conduzidas no software PAST v2.16 (Hammer *et al.*, 2001).

O índice de risco ecológico foi obtido por meio da fórmula BKK *Triad* (Jensen e Mesman, 2006), que integra os parâmetros ecológicos em um único valor representativo do risco ambiental.

Índice de Risco Ecológico Integrado (REI): foi realizada uma integração a partir dos fatores de ponderação para cada LoE (Jensen & Mesman, 2006). Sendo, EnvRI a média aritmética ponderada dos índices risco de cada LoE.



Figura 1. Niterói – RJ nas proximidades da Lagoa de Piratininga. Pontos de coleta de água superficial representados pelos círculos em amarelo.

Fonte: adaptado de Google Earth.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

LoE de Qualidade da Água (LoEQa)

A partir das análises dos parâmetros selecionados de cada LoE, foi possível obter uma avaliação de risco ecológico ampla e ao mesmo tempo detalhada da Lagoa de Piratininga. A concentração de coliformes termotolerantes (3.410.000 NMP/ 100 mL no P1) e de DBO (308,3 mg.L⁻¹ no P3), na campanha de amostragem realizada em agosto de 2022, foi elevada. O IQA da lagoa foi classificado como muito alto em todos os 5 pontos amostrados, com risco variando de 0,80 (P4) a 0,89 (P1). Assim, o índice de Risco de Qualidade da Água demonstra que a água superficial da lagoa de Piratininga apresentou condições desfavoráveis tanto para biota como

para a população do entorno, visto os riscos muito altos em todos os 5 pontos amostrados (Figura 2).

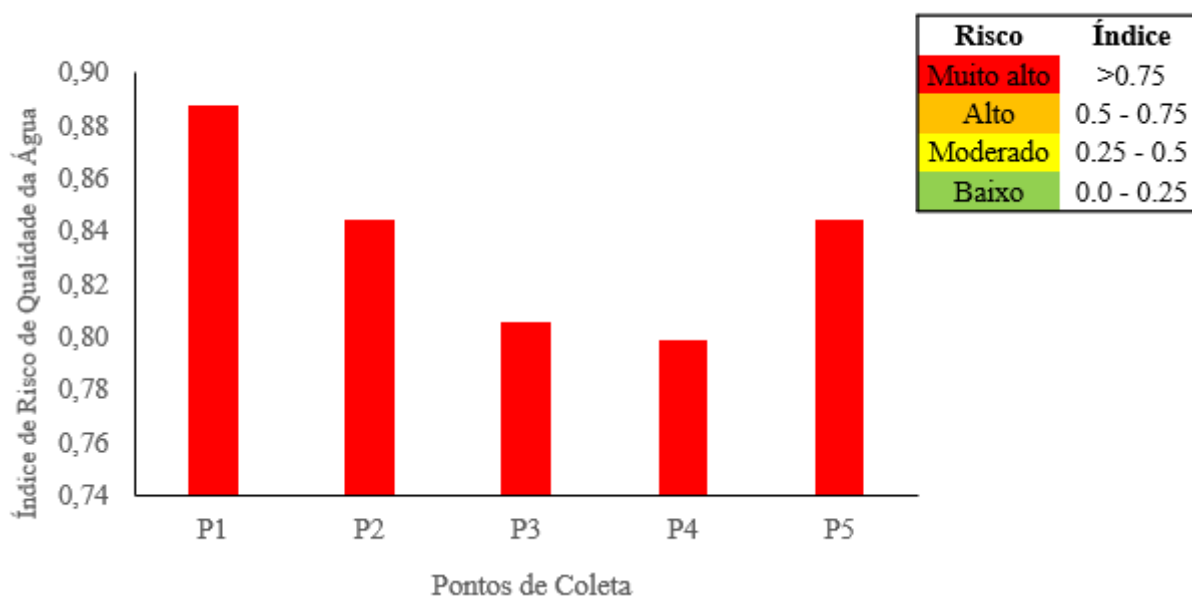


Figura 2. Índice de Risco de Qualidade da água dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

LoE Química (LoE_{Quim})

Na LoE química, foi observada a presença dos quatro hormônios investigados (Figura 3). A maior média observada entre os pontos foi do hormônio natural EI (392,5 ng L⁻¹), seguida do hormônio sintético LEVO (182,3 ng L⁻¹). O Risco Químico foi classificado como muito alto para todos os pontos, com risco de 0,99 (Figura 4).

Os contaminantes de preocupação emergente, como os hormônios, têm sido cada vez mais detectados em ambientes aquáticos, levantando preocupações quanto aos seus efeitos adversos sobre a biota, podendo interferir em processos fisiológicos de organismos aquáticos (Grzegorzek *et al.*, 2024; Unnikrishan *et al.*, 2024). Além disso, evidências sugerem que a exposição crônica a esses poluentes pode comprometer a integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos, destacando a necessidade de monitoramento e desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigação e remoção desses contaminantes (Biswas *et al.*, 2024).

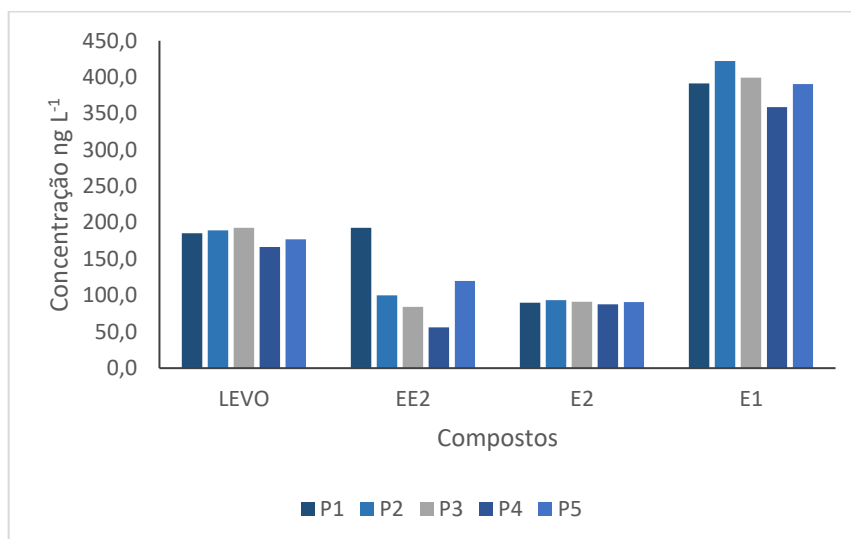


Figura 3. Concentração (ng L⁻¹) dos hormônios (LEVO: Levonorgestrel; EE2: 17 α etinilestradiol; E2: 17- β estradiol; E1: Estrona) dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

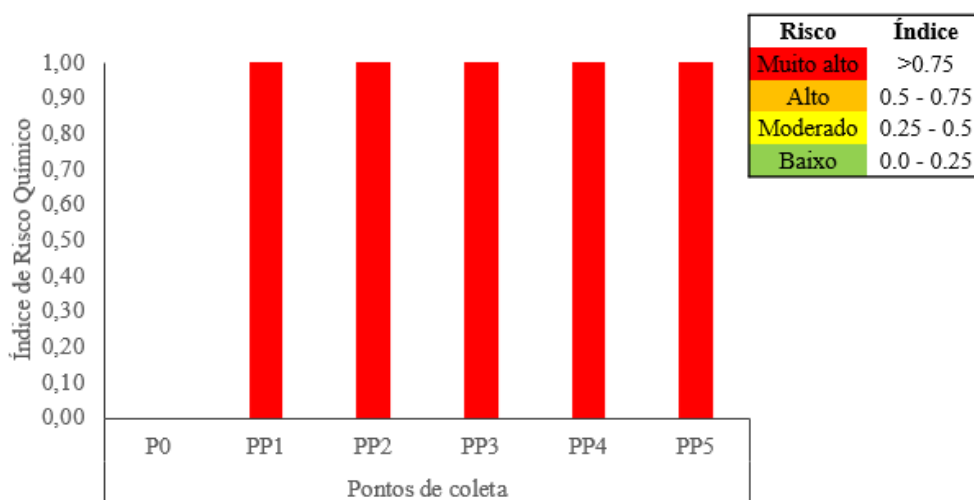


Figura 4. Índice de Risco Químico dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

LoE Ecotoxicológica (LoE_{Ecotox})

As amostras de água superficial da lagoa não causaram mortalidade para a *Artemia sp.*, pois não houve diferença estatística significativa do controle para todos os pontos amostrados. Quanto aos ensaios com a microalga *S. costatum* foi observado que a amostra do ponto P1 causou um estímulo ao crescimento das microalgas (aumento no número de indivíduos mL⁻¹), o que pode estar associado a presença de matéria orgânica. No entanto, para os pontos P2, P4 e P5 foram observados efeitos tóxicos de inibição de crescimento.

Quanto às análises do YES, foi observada atividade estrogênica em todos os pontos da Lagoa de Piratininga, com concentração de equivalente de estradiol (EQ-E2 ng L⁻¹) que variou entre 38,2 (P3) e 65,4 ng L⁻¹ (P2). Dessa maneira, foi observado o menor índice de risco ecotoxicológico no ponto P4 (0,74) e o maior índice de risco no ponto P1 (0,85), classificados como alto e muito alto, respectivamente (Figura 5). Assim, o índice de risco ecotoxicológico variou de 0,74 (P4) a 0,85 (P1) (Figura 5).

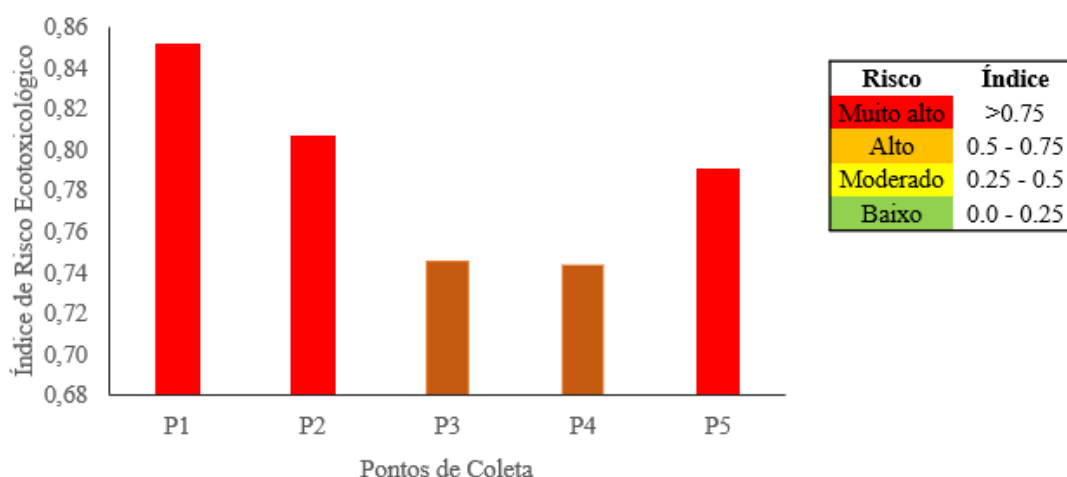


Figura 5. Índice de Risco Ecotoxicológico, a partir da análise da água superficial em ensaios com a microalga *S. costatum* e o microcrustáceo *Artemia sp.*, dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

Um estudo realizado na Baía de Guanabara, detectou uma concentração máxima de EQ-E2 de 3,2 ng L⁻¹ (Nascimento, *et al.*, 2019), já outro estudo em Darwin Harbour, um estuário na Austrália, detectou valores que variaram entre 1,29 a 5,66 ng L⁻¹ (French *et al.*, 2015). Neste estudo foram encontrados valores de EQ-E2 superiores, isto se deve principalmente ao fato de os pontos amostrais deste trabalho se localizarem em algumas áreas onde é grande a influência dos corpos hídricos afluentes (rios Pavuna, Pavuninha, Passarinho, Caçambé e Marinho), alguns destes com elevada carga de efluente sanitário.

Um estudo realizado também na Lagoa de Piratininga detectou concentrações de EQ-E2 de 68,55 ng L⁻¹ para o mês de agosto, sendo este um período de seca. Tais valores de atividade estrogênica são típicos de corpos hídricos que recebem elevado aporte de esgotos, uma vez que tais efluentes possuem altas concentrações de compostos estrogênicos (Andersen *et al.*, 1999). Tais valores são preocupantes, visto que uma classificação preliminar de risco para peixes em

ambientes ribeirinhos australianos, que recebem águas residuais tratadas (Kumar *et al.*, 2012), propõe que os valores de EQ-E2 na faixa de 1-10 ng L⁻¹ representam um risco moderado.

LoE Ecológica (LoE_{Eco})

As análises do fitoplâncton da lagoa permitiram observar a abundância de classes taxonômicas, com maiores valores para os grupos *Cyanobacteria*, *Bacyllariphyceae* e *Chlorophyceae* (Gráfico 1). O P0 apresentou uma comunidade fitoplanctônica mais bem distribuída e equilibrada entre as espécies presentes, assim como, não foi verificada a presença de organismos do grupo *Cyanobacteria*. A ausência deste grupo está associada a ambientes ecologicamente mais estáveis e menos impactados (Reynolds *et al.*, 2006). Já os pontos da lagoa apresentaram uma grande abundância de organismos do grupo *Cyanobacteria*, em relação aos outros grupos. Isto ocorreu, principalmente nos pontos P3 e P5, indicando pouca estabilidade ecológica na comunidade de fitoplâncton local (Pielou, 1966). As florações de cianobactérias em corpos hídricos são frequentes. No entanto, após o término da floração pode ocorrer um esgotamento significativo do teor de oxigênio da água e consequentemente, pode levar à mortandade de peixes de uma lagoa (Moustaka-Gouni *et al.*, 2017).

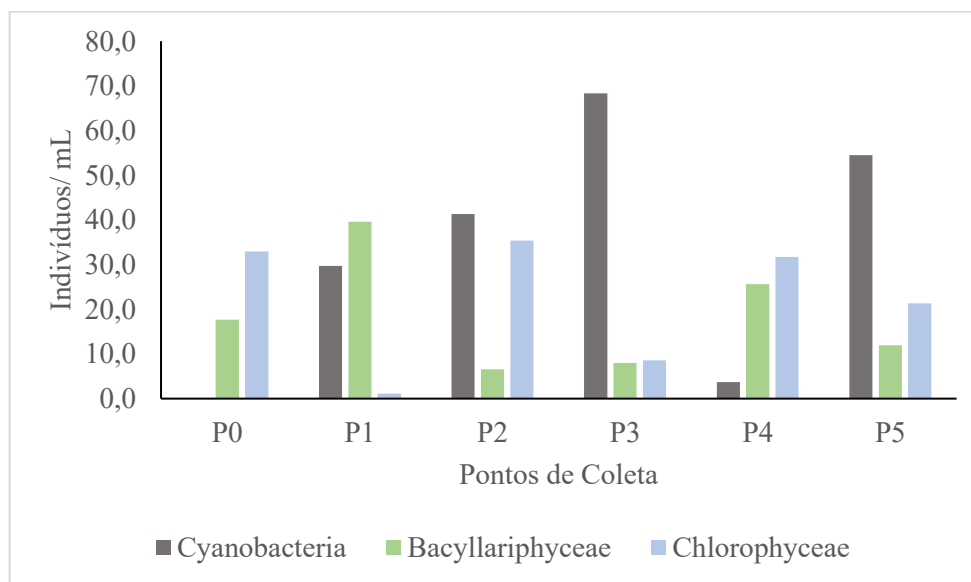


Gráfico 1. Densidade relativa das classes taxonômicas do fitoplâncton dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

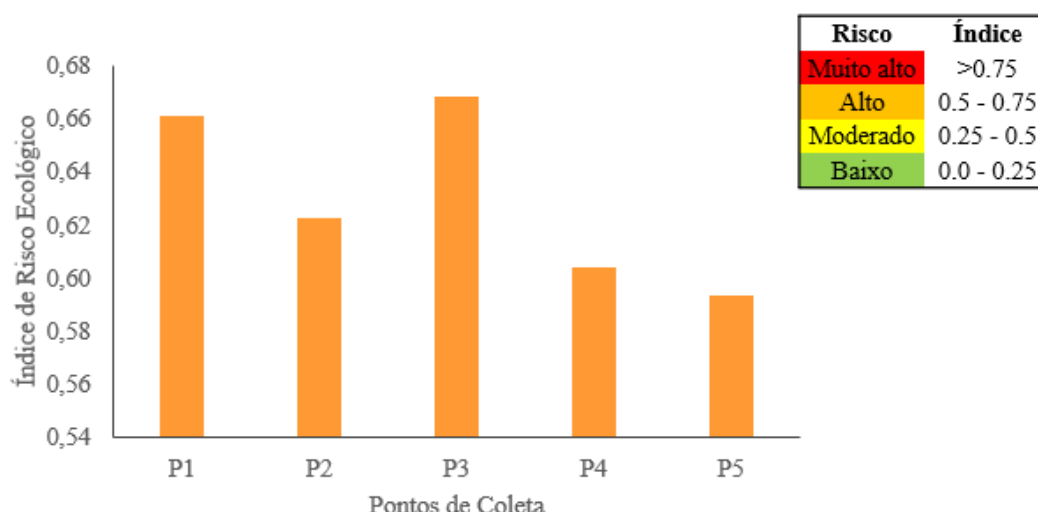


Figura 6. Índice de Risco Ecológico, a partir da análise da riqueza e abundância das espécies de fitoplâncton da água superficial, dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

Assim, os índices de risco ecológico foram classificados como alto (entre 0,59 e 0,67) para todos os pontos, não sendo observado diferença significativa entre eles (Figura 6).

Índice de risco ecológico integrado (REI)

O índice de risco ecológico integrado foi estimado a partir dos resultados dos índices de risco específicos das quatro linhas de evidência (LoE) da qualidade de água, química, ecotoxicológica e ecológica. Pesos diferentes para cada risco de cada linha de evidência (média ponderada) foram aplicados conforme descrito na metodologia. A Lagoa de Piratininga apresentou risco ecológico integrado da água muito alto (0,99) na coleta de agosto de 2022, em todos os pontos (Gráfico 2). A coleta foi realizada no inverno (período seco), em maré baixa e nesse período foi observado baixo índice pluviométrico, o que dificultou a renovação de água na lagoa.

Avaliação Integrada da Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Guandu: Parâmetros Físico-Químicos, Ecotoxicológicos e Índice de Qualidade da Água

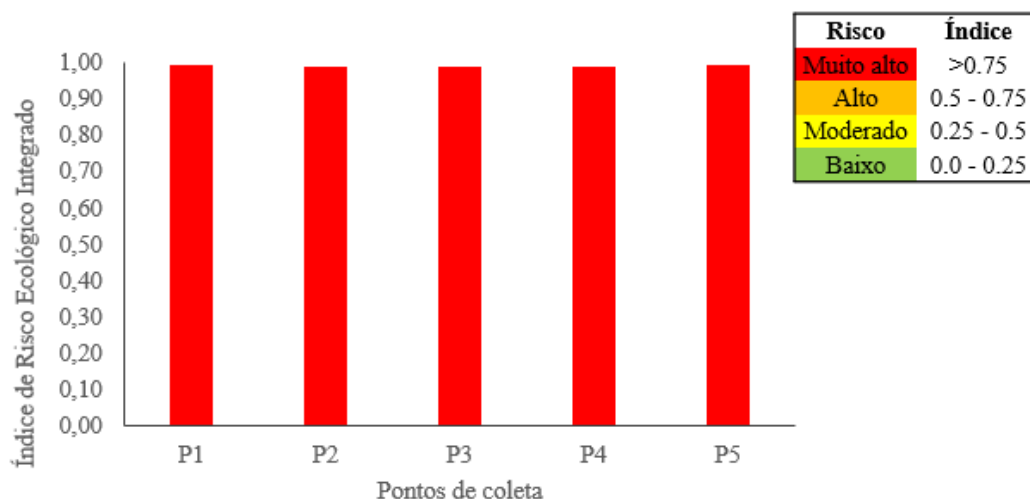


Figura 7. Índice de Risco Ecológico Integrado, dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

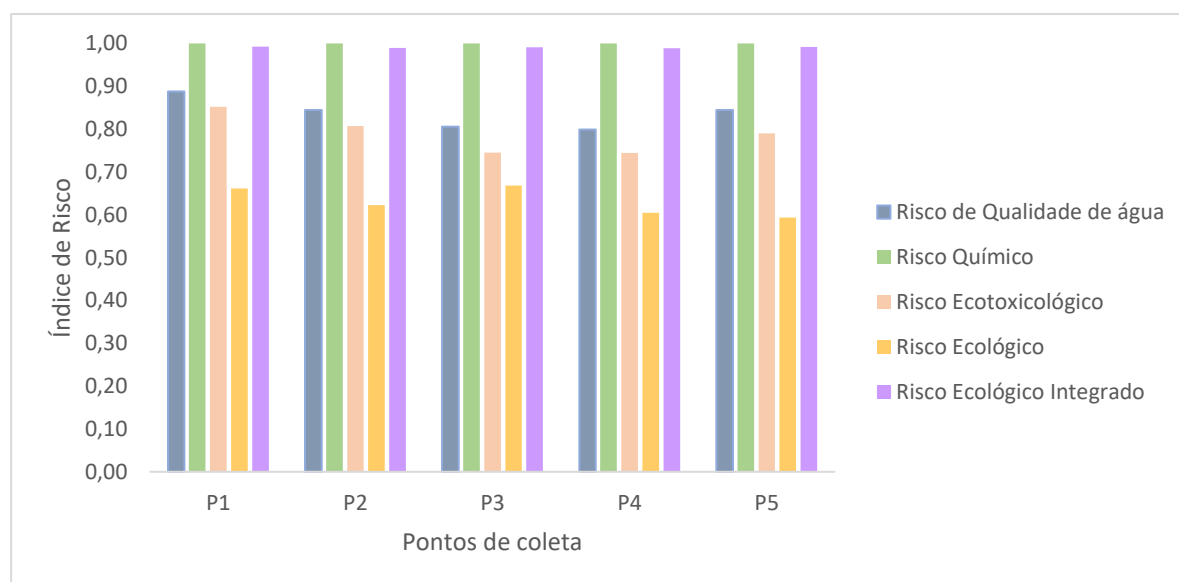


Gráfico 2. Resumo dos Índices de Riscos (Qualidade da Água, Químico, Ecotoxicológico, Ecológico e Ecológico Integrado) dos cinco pontos de água superficial amostrados na Lagoa de Piratininga, Niterói (RJ).

Fonte: Elaboração própria.

Esse padrão de índice de risco muito alto reflete a intensa pressão antrópica que incide sobre esse sistema lagunar, caracterizado por alta densidade urbana, ocupação desordenada do solo, lançamento recorrente de efluentes domésticos não tratados, lançamento de águas pluviais contaminadas, além de intervenções antrópicas nas margens e no regime hidrológico (Cunha *et al.*, 2025). Entre as LoEs analisadas, a LoE química foi a principal responsável pelos

valores mais elevados de risco integrado neste período analisado (inverno). Os maiores valores de risco foram registrados para os pontos: P1>P2>P5>P3>P4.

Uma ARE realizada na Lagoa de Jacarepaguá (RJ) (Cunha *et al.*, 2025), município vizinho a Niterói, observou características semelhantes ao corpo hídrico analisado no presente trabalho, tais resultados representam uma grande probabilidade de verificação de uma lagoa com um avançado processo de eutrofização e contaminação. Neste estudo da Lagoa de Jacarepaguá, os índices de Risco Ecológico Integrado apresentaram 60% dos resultados das análises dos pontos como risco muito alto e 40% como alto. O maior risco estava localizado em uma área próxima à condomínios residenciais e no período de inverno, de menor intensidade de chuvas.

Em um outro estudo, Sabino *et al* (2021) verificou que o índice de Risco Ecológico Integrado do rio João Mendes, contribuinte da lagoa de Itaipu (Niterói-RJ), lagoa vizinha a de Piratininga, foi considerado muito alto (acima de 0,75), para todos os pontos amostrais, durante todas as coletas. Tanto os resultados esperados para a lagoa de Piratininga, quanto os resultados da lagoa de Jacarepaguá e do rio João Mendes demonstram alto grau de impacto e contaminação. Mesmo que estas áreas sejam consideradas com um alto grau de urbanização, tais áreas naturais ainda abrigam muitas espécies da fauna e da flora e de acordo com Jensen & Mesman (2006), o índice de risco esperado para essas áreas deveria ser na faixa de 0,00–0,25 (baixo risco).

CONCLUSÃO

A abordagem metodológica empregada neste estudo para a Avaliação de Risco Ecológico (ARE) mostrou-se eficaz na análise integrada da Lagoa de Piratininga. A combinação das análises de qualidade da água, química, ecotoxicológica e ecológica evidenciou que o sistema apresenta um índice de risco ecológico integrado muito alto em todos os pontos amostrados (> 0,75). Os resultados demonstram o grau de impacto ao qual o ecossistema está submetido, refletindo as condições ambientais e de qualidade da água, aspecto particularmente relevante diante do uso da lagoa para atividades de subsistência, como a pesca artesanal.

Os dados obtidos a partir da aplicação da metodologia de ARE contribuem para o aprimoramento de ferramentas e modelos de avaliação e monitoramento ambiental, subsidiando a formulação de estratégias de gestão e mitigação dos riscos ecológicos atuais e futuros. Espera-se que estes resultados sirvam de base para o fortalecimento das ações de recuperação da qualidade da água atualmente em curso, bem como para o aprimoramento da

fiscalização ambiental, especialmente no controle da descarga de efluentes domésticos nos corpos hídricos afluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos laboratórios LABIFI e LES do DESMA/UERJ; LabAlgas do IBRAG/UERJ e Labetox S.A. Fiocruz envolvidos neste estudo pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados. Também expressamos nossa gratidão às agências de fomento FAPERJ e CAPES pelo financiamento, bolsas e verbas de custeio que possibilitaram a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16181: Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – Método de ensaio com microalga marinha*. Rio de Janeiro, 2021a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16530: Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda – Método de ensaio com *Artemia* sp. (Crustacea, Brachiopoda)*. Rio de Janeiro, 2021b.
- AL-KALADI, A.; MOSLEH, Y. Y. I.; AFIFI, M. Biomarcadores bioquímicos e histológicos da poluição por Zn em Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Arco. Sci.*, v. 66, p. 295-311, 2013.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil*. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2005.
- ANDERSEN, H. R. *et al.* Comparison of short-term estrogenicity tests for identification of hormone-disrupting chemicals. *Environmental Health Perspectives*, v. 107, Supl. 1, p. 89-108, 1999.
- APHA – EATON, A. D. *et al.* *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22. ed. Washington: American Public Health Association, 1360 p., 2012.
- BISWAS, P.; VELLANKI, B. P.; RAVICHANDRAN, M. K.; KAZMI, A. A.; PHILIP, L. Vigilância generalizada de contaminantes emergentes na bacia do rio Yamuna: avaliação de águas superficiais, sedimentos, águas subterrâneas e plantas aquáticas. *ACS ES&T Water*, v. 4, n. 5, p. 2044-2056, 2024.
- CUNHA, P. M. O. M., DE SOUSA, J. S. D., DA CRUZ, M. C. S., COUTINHO, R., DOMINGOS, P., KREPSKY, N., ... & DE SÁ SALOMÃO, A. L. Environmental risk assessment methodology for urban tropical lagoons based on feasible lines of evidence under limited resources conditions: Jacarepaguá Lagoon/Brazil. *Ecotoxicology*, 34(4), 539-553. 2025
- FRENCH, V. A. *et al.* Characterisation of microcontaminants in Darwin Harbour, a tropical estuary of northern Australia undergoing rapid development. *Science of the Total Environment*, v. 536, p. 639-647, 2015.
- GRZEGORZEK, M.; WARTALSKA, K.; KOWALIK, R. Ocorrência e fontes de hormônios em recursos hídricos – Impacto ambiental e na saúde. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, n. 26, p. 37907-37922, 2024.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp. Harper, D.A.T. (ed.). 1999. Numerical Palaeobiology. John Wiley e Sons. 2001.
- HAUSER, A. R.; PARENTE, T. E. *Ecotoxicology: Perspectives on Key Issues*. 1. ed. CRC Press, 290 p., 2018.
- HILLEBRAND, H.; DURSELEN, C.D.; KIRSCHTEL, D.; POLLINGHER, U. & ZOHARY, T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35: 403-424. 1999.

ICH- International Conference on Harmonization (ICH). International council for harmonisation of technical requirements for pharmaceuticals for human use. Validation of analytical procedures Q2 (R2). 2022.

JENSEN, J.; MESMAN, M. *Ecological Risk Assessment of Contaminated Land*. Biltoven: RIVM, 2006.

KUMAR, A. *et al.* Treated effluent in the aquatic environment: impact assessment of endocrine disrupting chemicals. *Report to the National Water Commission EPI2292*. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Campbell ACT, Australia, 2012.

LUND, J. W. G. *et al.* The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimation by counting. *Hydrobiologia*, v. 11, p. 143-170, 1958.

MATOS, P. *et al.* Biochemical and histological hepatic changes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to carbaryl. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 89, n. 1, p. 73-80, 2007.

MATUSZEWSKI, B.K., CONSTANZER, M.L., CHAVEZ-ENG, C.M. Strategies for the assessment of matrix effect in quantitative bioanalytical methods based on HPLC-MS/MS. *Analytical chemistry*, 75(13), 3019-3030. 2003.

MONTAGNES, D. J. S.; BERGES, J. A.; HARRISON, P. J.; TAYLOR, F. J. R. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 39:1044-60. 1994.

MOUSTAKA-GOUNI, M. *et al.* First report of *Aphanizomenon favaloroi* occurrence in Europe associated with saxitoxins and a massive fish kill in Lake Vistonis, Greece. *Marine and Freshwater Research*, v. 68, p. 793-800, 2017.

NASCIMENTO, M. T. L. *et al.* Determination of water quality, toxicity and estrogenic activity in a nearshore marine environment in Rio de Janeiro, Southeastern Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 149, p. 197-202, 2017.

NITERÓI. *Plano de monitoramento do sistema lagunar Piratininga-Itaipu*. Niterói: Prefeitura Municipal de Niterói; Hydrosience Consultoria Ambiental, Contrato Sexec nº 07/2018, 2021.

NÚCLEO DE ESTUDOS E PROJETOS HABITACIONAIS E URBANOS – NEPHU. *Comunidades de Niterói – Beira da Lagoa de Piratininga*. Disponível em: <http://nephu.sites.uff.br/programa/mapeando-conflitos/mapeando-comunidades/comunidades-de-niteroi/beira-da-lagoa-de-piratininga/>. Acesso em: 2022.

PAGLIARINI, E. C. *et al.* Aplicação da Análise de Risco Ecológico para Avaliação de Impactos em Ecossistemas Aquáticos Naturais. *Ambiente & Sociedade*, v. 22, 2019.

PIELOU, E. C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, v. 13, p. 131-144, 1966.

PUGAJEVA, I., RUSKO, J., PERKONS, I., LUNDANES, E., & BARTKEVICS, V. Determination of pharmaceutical residues in wastewater using high performance liquid chromatography coupled to quadrupole-Orbitrap mass spectrometry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 133, 64-74. 2017.

REYNOLDS, C. S. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

ROUTLEDGE, E. J.; SUMPTER, J. P. Estrogenic activity of surfactants and some of their degradation products assessed using a recombinant yeast screen. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 15, p. 241-248, 1996.

SABINO, J. A. *et al.* Occurrence of organic micropollutants in an urbanized sub-basin and ecological risk assessment. *Ecotoxicology*, v. 30, n. 1, p. 130-141. DOI: 10.1007/s10646-020-02304-2. 2021.

SCHEIDEGGER, S. *Bacia da Lagoa de Piratininga na Região Oceânica: estudo de valorização ambiental da paisagem*. Évora: Universidade de Évora, 61 p., 2022.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423. 1948.

SOUSA, L. P. *et al.* Incorporation of local knowledge in the identification of Ria de Aveiro Lagoon ecosystem services (Portugal). *Journal of Coastal Research*, v. 65, p. 1051-1056, 2013.

Avaliação Integrada da Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Guandu: Parâmetros Físico-Químicos, Ecotoxicológicos e Índice de Qualidade da Água

UHERLINGER, V. Étude statistique des méthodes de dénombrement planctonique. Arch. Sci., 17 (2): 121-123. 1964.

UNNIKRISHAN, A.; KHALID, N. K.; RAYAROTH, M. P. *et al.* Ocorrência e distribuição de hormônios esteroides (estrogênio) e outros contaminantes de crescente preocupação em um corpo d'água no sul da Índia. Chemosphere, v. 351, 141124, 2024.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Framework for Ecological Risk Assessment. Washington, DC: EPA, (EPA/630/R-92/001), 1992.

UTERMÖHL, H. Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Mitt. int. Verein. theor. angew. Limnol.9, p. 38. 1958.