

Análise da qualidade da água de riachos e do rio Parnaíba em Florianópolis: fatores abióticos, risco ecológico e implicações para a gestão ambiental

Rogério Nora Lima

Professor Doutor - Biólogo, UFPI/CAFS, Brasil
noralima@gmail.com

Ana Flavia de Sousa Lacerda

Bióloga
analacerda@ufpi.edu.br

Ricardo Araujo Lima

Engenheiro agrônomo
ricardo.sec21@gmail.com

Análise da qualidade da água de riachos e do rio Parnaíba em Floriano-PI: fatores abióticos, risco ecológico e implicações para a gestão ambiental**RESUMO**

Objetivo - Analisar a qualidade da água em riachos urbanos e no rio Parnaíba para caracterizar os efeitos do impacto urbano sobre variáveis abióticas e suas implicações ecológicas.

Metodologia - O estudo adotou uma metodologia de campo comparativa e sazonal, com amostras de 16 pontos de coleta (nascentes, fozes e pontos à montante e jusante do rio Parnaíba) em dois períodos sazonais (seco e chuvoso) ao longo de dois anos. As variáveis analisadas incluíram parâmetros físico-químicos (temperatura, OD, pH, condutividade, turbidez, nutrientes e sólidos suspensos).

Originalidade/Relevância - O gap relaciona-se ao estudo da degradação de ecossistemas aquáticos em cidades de menor porte do Nordeste brasileiro que estão crescente rapidamente associados aos intensos impactos sobre os ambientes naturais. A relevância está em documentar e validar, no contexto local de Floriano-PI, a "Síndrome de córregos urbanos", fenômeno amplamente reportado em grandes centros, fornecendo dados concretos sobre os impactos da urbanização em regiões semiáridas.

Resultados - Os resultados indicaram um gradiente espacial de degradação, com nascentes apresentando melhores condições (OD elevado, baixos nutrientes e turbidez) e as fozes exibindo alto grau de poluição ($\text{NH}_4^+ > 2 \text{ mg/L}$, OD $< 3 \text{ mg/L}$, turbidez $> 150 \text{ NTU}$). O período chuvoso promoveu diluição parcial dos poluentes, mas sem recuperação plena da qualidade. Este padrão tende a causar alterações na comunidade fitoplanctônica, com predominância de cianobactérias potencialmente tóxicas nos trechos mais degradados, comprometendo a potabilidade das águas.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo reforça e aplica o conceito teórico da "Síndrome de córregos urbanos" em um novo contexto sócio-ambiental aplicado às realidades dos ambientes urbanizados. Metodologicamente, demonstra a eficácia da abordagem de gradiente (nascente-foz) combinada com o monitoramento sazonal para diagnosticar com precisão o impacto da urbanização em cursos d'água.

Contribuições sociais e ambientais - O estudo fornece evidências científicas críticas para a gestão pública, apontando os riachos urbanos como fontes significativas de degradação do rio Parnaíba. Os achados servem de base para políticas públicas urgentes de saneamento básico, restauração de matas ripárias e a implementação de um programa de monitoramento contínuo da qualidade da água, visando à saúde ambiental e da população.

PALAVRAS-CHAVE: riachos urbanos; eutrofização; cianobactérias; cianotoxinas; microcistinas.

Water quality in streams and in points along the Parnaíba River, Floriano city, Brazil: abiotic factors, ecological risk and implications for environmental management**ABSTRACT**

Objective - We wanted to analyze the water quality in urban streams and the Parnaíba River to characterize the effects of urban impact on abiotic variables and their ecological implications.

Methodology - The study adopted a comparative and seasonal field methodology. Samples from 16 collection points (springs, mouths, and points upstream and downstream of the Parnaíba River) were analyzed over two years during two seasonal periods (dry and rainy). The analyzed variables included physico-chemical parameters (temperature, DO, pH, conductivity, turbidity, nutrients, and suspended solids).

Originality/Relevance - The research addresses the gap in studies on the degradation of aquatic ecosystems in smaller cities in the Brazilian Northeast. Its relevance lies in documenting and validating, within the local context of Floriano-PI, the "Urban Stream Syndrome," a phenomenon widely reported in large urban centers, providing concrete data on the impacts of urbanization in semi-arid regions.

Results - The results indicated a spatial gradient of degradation, with springs presenting better conditions (high DO, low nutrients and turbidity) and mouths exhibiting a high degree of pollution ($\text{NH}_4^+ > 2 \text{ mg/L}$, DO $< 3 \text{ mg/L}$, turbidity $> 150 \text{ NTU}$). The rainy season led to partial dilution of pollutants but without full recovery of water quality.

Theoretical/Methodological Contributions - The study reinforces and applies the theoretical concept of "Urban Stream Syndrome". Methodologically, it demonstrates the effectiveness of a gradient approach (spring-mouth) combined with seasonal monitoring to accurately diagnose the impact of urbanization on watercourses.

Social and Environmental Contributions - The study provides critical scientific evidence for public management, identifying urban streams as significant sources of degradation for the Parnaíba River. Its conclusions form a basis for

demanding urgent public policies on basic sanitation, restoration of riparian forests, and the implementation of a continuous water quality monitoring program, aiming for environmental and public health.

KEYWORDS: urban streams; Parnaíba River; eutrophication; cyanobacteria; cyanotoxins; microcystin.

Análisis de la calidad del agua en arroyos y el río Parnaíba en Floriano, Piauí, Brasil: factores abióticos, riesgo ecológico e implicaciones para la gestión ambiental

RESUMEN

Objetivo - Analizar la calidad del agua en arroyos urbanos y en el río Parnaíba para caracterizar los efectos del impacto urbano sobre variables abióticas y sus implicaciones ecológicas.

Metodología - El estudio adoptó una metodología de campo comparativa y estacional. Se analizaron muestras de 16 puntos de recolección (manantiales, desembocaduras y puntos aguas arriba y aguas abajo del río Parnaíba) en dos períodos estacionales (seco y lluvioso) a lo largo de dos años. Las variables analizadas incluyeron parámetros físico-químicos (temperatura, OD, pH, conductividad, turbidez, nutrientes y sólidos suspendidos).

Originalidad/Relevancia - La investigación se inserta en el vacío de estudios sobre la degradación de ecosistemas acuáticos en ciudades de menor porte del Noreste brasileño. Su relevancia radica en documentar y validar, en el contexto local de Floriano-PI, el "Síndrome de arroyos urbanos", un fenómeno ampliamente reportado en grandes centros urbanos, proporcionando datos concretos sobre los impactos de la urbanización en regiones semiáridas.

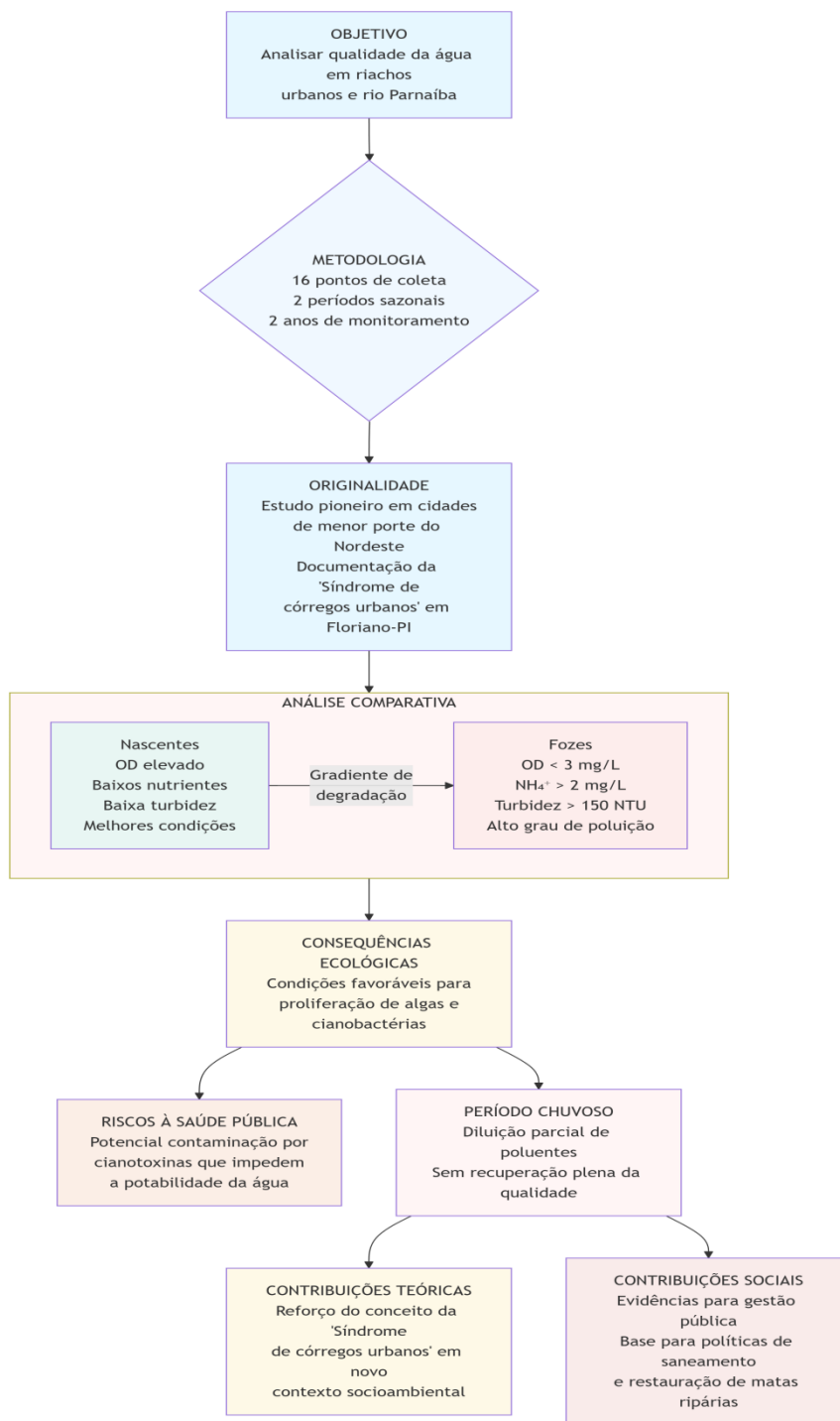
Resultados - Los resultados indicaron un gradiente espacial de degradación, con los manantiales presentando mejores condiciones (OD elevado, bajos nutrientes y turbidez) y las desembocaduras exhibiendo un alto grado de contaminación ($\text{NH}_4^+ > 2 \text{ mg/L}$, $\text{OD} < 3 \text{ mg/L}$, turbidez $> 150 \text{ NTU}$). El período lluvioso promovió una dilución parcial de los contaminantes, pero sin una recuperación plena de la calidad del agua.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas - El estudio refuerza y aplica el concepto teórico del "Síndrome de arroyos urbanos" en un nuevo contexto geográfico y urbano. Metodológicamente, demuestra la eficacia del enfoque de gradiente (manantial-desembocadura) combinado con el monitoreo estacional para diagnosticar con precisión el impacto de la urbanización en cursos de agua.

Contribuciones Sociales y Ambientales - El estudio proporciona evidencia científica crítica para la gestión pública, señalando los arroyos urbanos como fuentes significativas de degradación del río Parnaíba. Sus conclusiones sirven de base para demandar políticas públicas urgentes de saneamiento básico, restauración de bosques riparios y la implementación de un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua, con miras a la salud ambiental y de la población.

PALABRAS CLAVE: arroyos urbanos; río Parnaíba; eutrofización; cianobacterias; cianotoxinas; microcistinas.

RESUMO GRÁFICO



1. INTRODUÇÃO

A acelerada urbanização, caracterizada pela impermeabilização do solo, alteração da hidrologia natural e descarte de efluentes, impõe pressões severas sobre os ecossistemas aquáticos continentais, particularmente sobre riachos e rios que atravessam áreas urbanas. Este fenômeno, globalmente reconhecido como a "Síndrome dos Riachos Urbanos" (WALSH et al., 2005), manifesta-se de forma aguda no Brasil, onde a carência de infraestrutura sanitária adequada intensifica a degradação dos recursos hídricos.

O escopo deste processo abrange desde as alterações físico-químicas imediatas na água, como o aumento de nutrientes e sólidos em suspensão, até as complexas implicações ecológicas, incluindo mudanças na estrutura das comunidades biológicas e o surgimento de riscos à saúde pública devido à proliferação de organismos potencialmente tóxicos. Neste contexto, a análise da qualidade da água torna-se fundamental não apenas para diagnosticar o grau de degradação, mas também para embasar estratégias eficazes de gestão e restauração ambiental.

Conforme sintetizado por Fonseca et al. (2021) a urbanização em regiões tropicais promove uma homogeneização negativa dos habitats aquáticos, resultando em uma perda significativa de biodiversidade da comunidade aquática. Cunha et al. (2016) corroboram essa visão, argumentando que os riachos urbanos no Brasil são sistemas subestudados e criticamente ameaçados, funcionando como condutos de poluição para os grandes rios receptores. Essa dinâmica é especialmente preocupante em ecossistemas como a Caatinga e o Cerrado nordestino, nos quais a sazonalidade climática acentua os períodos de estresse hídrico, concentrando poluentes e exacerbando impactos durante a estiagem.

Entre as alterações abióticas mais críticas induzidas pela urbanização, destacam-se o enriquecimento excessivo de nutrientes (eutrofização) e o comprometimento do oxigênio dissolvido. O aporte de nitrogênio (nas formas de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) e fósforo ortofosfato (PO_4^{3-}) proveniente de esgotos domésticos não tratados é o principal vetor deste processo, criando um ambiente ideal para a proliferação de algumas algas verdes e das cianobactérias. Como demonstrado por Fernandes et al. (2017) e Carvalho et al. (2018), o desequilíbrio na razão N:P em reservatórios tropicais é um fator determinante para o sucesso competitivo de cianobactérias por possuírem adaptações fisiológicas para aproveitar essas condições. Esse cenário é agravado pela alta turbidez, que limita a penetração de luz e afeta a produção primária por outros grupos de algas, favorecendo o "bloom" das cianobactérias potencialmente tóxicas (PAERL; OTTEN, 2013).

A consequência ecológica mais direta desse ambiente alterado é a depleção da riqueza de espécies nas comunidades fitoplantônicas, as quais passam a serem dominadas por cianobactérias, muitas das quais são capazes de produzir potentes toxinas (cianotoxinas), notadamente quando suas altas taxas de reprodução atingem níveis que conduzem à ocorrência de "florações" expressivas (blooms). Harke et al. (2016) destacam a ampla distribuição e a plasticidade ecológica de um gênero de algas bastante comum nestas situações (*Microcystis* sp), que se constitui em um dos principais produtores de microcistinas (cianotoxinas com efeitos hepatotóxicos em mamíferos).

No Brasil, a ocorrência desses organismos e suas toxinas é um problema presente em diversas regiões que dependem de mananciais para o seu abastecimento. Neste contexto, Cunha et al. (2018) alertam para a subnotificação de casos e a necessidade urgente de

monitoramento sistemático das águas como forma de evitar situações como a relatada por Leal & Soares (2004) associado aos riscos de intoxicação aguda por estas toxinas algais. Moreira (2021) em estudos específicos no rio Parnaíba, já associou a turbidez elevada e o aporte de nutrientes com alterações significativas na biodiversidade fitoplanctônica, sinalizando para um risco iminente para a qualidade da água, incluindo a sua potabilidade e balneabilidade.

Assim, a presença de cianotoxinas na água representa um dos aspectos mais perigosos da degradação ambiental, impondo sérios riscos à saúde pública e demandando soluções tecnológicas complexas para seu controle no abastecimento. Cartaixo et al. (2020) revisaram os desafios na remoção de cianotoxinas durante o tratamento convencional de água, concluindo que processos oxidativos avançados (POAs) são frequentemente necessários para uma degradação eficiente e segura. Albuquerque et al. (2020) aprofundam-se nessa temática, avaliando a eficiência de diferentes POAs, como ozonização e fotocatalise, na quebra das moléculas de microcistinas, enfatizando que a escolha do método depende da matriz da água e da infraestrutura disponível, onerando o custo do saneamento. Porém, a seleção da tecnologia a dos métodos de tratamento da água é fundamental, uma vez que a seleção apenas pelo critério econômico pode conduzir a sérios riscos na saúde humana e animal.

Todo o ecossistema aquático sofre com as condições degradadas, pois a hipóxia, comum em trechos poluídos, é um fator limitante crítico para a sobrevivência da fauna. Pereira et al. (2013) documentaram o declínio da biodiversidade bentônica em reservatórios tropicais eutrofizados, onde a decomposição da matéria orgânica consome o oxigênio dissolvido (OD), criando zonas mortas. Paralelamente, a alta carga de sedimentos em suspensão, conforme observado por Paranhos et al. (2013) na bacia do médio Parnaíba, afeta diretamente organismos fotossintetizantes e os filtradores como o zooplâncton, comprometendo a base da cadeia alimentar e a ciclagem de nutrientes.

Diante desse quadro complexo, a busca por estratégias de mitigação e restauração é fundamental para a conservação da biodiversidade e para a manutenção de boa qualidade da água quanto à sua potabilidade. Medidas de saneamento básico, como a universalização da coleta e tratamento de esgotos, são a solução primária e mais eficaz a longo prazo. Contudo, ações complementares de infraestrutura verde têm se mostrado altamente promissoras. Auricchio et al. (2019) demonstraram que a restauração florestal ripária é uma estratégia eficiente para melhorar a qualidade da água em bacias urbanas, atuando na filtragem de sedimentos, na absorção de nutrientes (bioremediação), na estabilização de margens e na regulação microclimática, mitigando vários dos sintomas da síndrome de riachos urbanos.

Desta forma, a degradação de riachos urbanos e sua influência sobre grandes rios, como o Parnaíba, constituem um problema socioambiental multifacetado, com ramificações ecológicas e de saúde pública. Estudos locais, como o de Rocha (2016) em Teresina e o que embasa esta discussão em Floriano, são vitais para aumentar o conhecimento sobre a síndrome dos riachos urbanos associando-o às particularidades tropicais e semiáridas. O monitoramento contínuo de variáveis abióticas e bióticas, incluindo a detecção de cianotoxinas (SILVA et al., 2023), associado à implantação de políticas públicas que integrem saneamento, gestão de bacias e restauração ecológica, são procedimentos indispensáveis na reversão deste cenário, visando a garantir a segurança no uso dos recursos hídricos.

1.1. Objetivos

Este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da água em riachos urbanos que atravessam a área urbana de Floriano - PI e do rio Parnaíba (à montante e à jusante desta Cidade) para investigar possíveis efeitos da poluição hídrica sobre variáveis abióticas, as quais potencialmente afetam a composição da comunidade algal, com reflexos sobre a qualidade/potabilidade da água.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo:

O estudo foi realizado no município de Floriano, Piauí, cujo relevo é predominantemente plano, mas possui áreas de várzeas e planícies aluviais de vários cursos d'água que fluem para o rio Parnaíba, o qual juntamente o rio Gurguéia, que desagua a montante, são usados no abastecimento de água, bem como para pesca, natação e navegação. O clima regional é tropical semiárido, chuvoso de novembro a abril e seco de maio a outubro. Os ecossistemas terrestres são uma transição entre Caatinga e Cerrado e a vegetação apresenta condições ecotonais entre ambientes secos e úmidos (IBGE, 2024). A recente expansão urbana e as demais atividades humanas têm exercido pressão sobre a ocupação das áreas que ainda possuem remanescentes dos ecossistemas naturais na região, além do escoamento crescente de esgotos *in natura* nos leitos dos cursos d'água.

2.2. Métodos de coleta e de análises

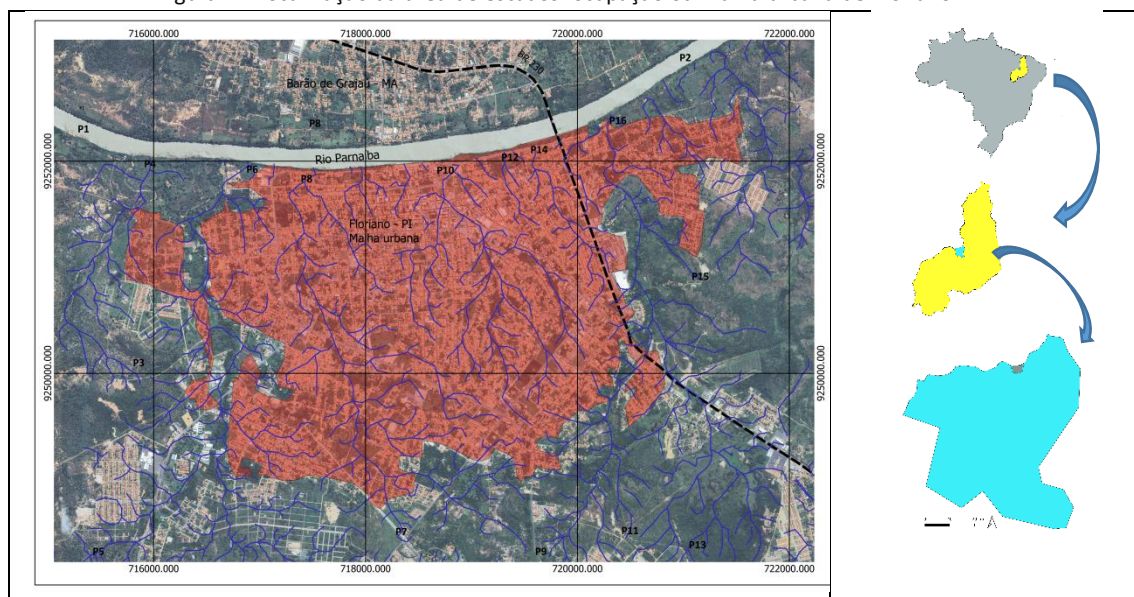
A amostragem consistiu em coletar amostras de água do rio Parnaíba de sete riachos urbanos que deságuam nesse rio (seguindo os procedimentos estabelecidos pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA - AWWA - WEF, 2017). Assim, foram definidos 16 pontos de coleta (Figura 1): dois no rio Parnaíba, sendo um a montante da Cidade (P1) e outro a jusante dela (P2) e 14 distribuídos em sete riachos que atravessam a sua região urbana, sendo selecionados dois pontos para cada riacho: um próximo às nascentes e localizados antes da área urbana (P3, P5, P7, P9, P11, P13, P15) e outro após atravessarem a Cidade, próximos da foz no rio Parnaíba (P4, P6, P8, P10, P12, P14, P16). Essa disposição visou analisar se haveria gradientes ambientais físico-químicos das variáveis hídricas desde áreas de cabeceira relativamente conservadas até os trechos diretamente impactados por descargas urbanas de esgotos domésticos/industriais.

As coletas ocorreram em dois anos consecutivos (2023 e 2024), em quatro campanhas: duas no período seco (julho a setembro) e duas no período chuvoso (dezembro a março). A repetição sazonal possibilitou avaliar efeitos da variabilidade climática sobre os parâmetros da água, comparando períodos de maior escoamento superficial com épocas de menor aporte hídrico.

Foram mensurados os seguintes parâmetros físico-químicos: pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica, turbidez (NTU), temperatura da água e do ar, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de nutrientes (nitrato, amônia e fósforo total) e sólidos totais dissolvidos (STD). A escolha dos parâmetros buscou captar tanto a influência antrópica direta (esgotos, descargas superficiais, erosão urbana) quanto as condições naturais de sazonalidade hídrica.

Amostras foram coletadas em frascos plásticos previamente lavados, transportadas sob refrigeração e analisadas em laboratório. Os métodos utilizados foram: Oxigênio dissolvido (OD) - método de Winkler (azul de iodo) e oxímetro portátil; pH - medidor portátil calibrado em campo; Condutividade elétrica - condutivímetro digital; Turbidez - turbidímetro digital em escala NTU; DBO - incubação em frascos escuros e leitura manométrica; Nutrientes (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}) - análises colorimétricas segundo protocolos padronizados; Sólidos totais dissolvidos - método gravimétrico a partir de filtração e secagem.

Figura 1 - Localização da área de estudos: ocupação ou malha urbana de Floriano - PI.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os dados foram submetidos a análises descritivas, comparação entre períodos sazonais e entre classes de pontos (nascentes, fozes urbanas, montante e jusante do rio). Para avaliar gradientes ambientais e associações entre variáveis, aplicaram-se técnicas multivariadas como PCA (Análise de Componentes Principais) para identificar gradientes de variação entre pontos; NMDS (Escalonamento Multidimensional Não-Métrico) para explorar dissimilaridades entre ambientes; RDA (Análise de Redundância) para relacionar parâmetros físico-químicos com as possíveis implicações sobre a biodiversidade de cianobactérias e algas (a serem estudadas futuramente) e que podem resultar em interferências indesejáveis na qualidade da água, principalmente quanto à sua potabilidade.

3. RESULTADOS

Os resultados (Tabela 1) revelaram diferenças claras entre os ambientes amostrados. As nascentes dos riachos urbanos que ainda estão em locais relativamente distantes de fontes de poluição (P3, P5, P7, P9, P11, P13, P15) apresentaram águas mais transparentes, pH próximo à neutralidade, condutividade baixa ($< 50 \mu\text{S}/\text{cm}$), turbidez reduzida ($< 10 \text{ NTU}$), oxigênio dissolvido (OD) elevado ($> 7 \text{ mg/L}$) e concentrações baixas de nutrientes, caracterizando condições oligomesotróficas, ou seja, com baixa a moderada quantidade de nutrientes (Wetzel, 2001).

Nos pontos próximos às fozes dos riachos urbanos (P4, P6, P8, P10, P12, P14, P16), os valores contrastaram fortemente, sendo que a condutividade e os sólidos dissolvidos aumentaram até quatro vezes, a turbidez superou 150 NTU em alguns trechos, o OD caiu frequentemente abaixo de 3 mg/L (condições de hipóxia) e os nutrientes atingiram valores característicos de eutrofização. O ponto no rio Parnaíba a jusante de Floriano (P2) refletiu esse padrão cumulativo, apresentando maiores concentrações de nutrientes e turbidez que no ponto a montante (P1), evidenciando forte influência da poluição urbana.

Tabela 1 - Parâmetros físico-químicos médios das coletas nos 16 pontos (períodos seco e chuvoso).

Ponto	Local	pH Seco Chuva	Condutividade de (µS/cm) Seco/ Chuva	OD (mg/L) Seco/ Chuva	Temperatura (°C) Seco/ Chuva	Turbidez (NTU) Seco/ Chuva	Nitrato (mg/L) Seco/ Chuva	Fósforo total (mg/L) Seco/ Chuva
P1	Rio Parnaíba montante	7,2 / 7,0	65 / 72	7,8 / 7,5	28,0 / 27,0	10 / 12	0,45 / 0,50	0,020 / 0,025
P2	Rio Parnaíba jusante	7,0 / 6,9	85 / 92	7,2 / 6,9	28,5 / 27,2	14 / 18	0,60 / 0,75	0,035 / 0,050
P3	Riacho 1 nascente	7,4 / 7,2	50 / 55	8,2 / 8,0	26,8 / 26,0	8 / 10	0,30 / 0,35	0,015 / 0,020
P4	Riacho 1 foz	6,8 / 6,7	110 / 125	6,5 / 6,2	28,7 / 27,5	22 / 28	0,85 / 1,10	0,050 / 0,080
P5	Riacho 2 nascente	7,3 / 7,1	48 / 52	8,3 / 8,1	26,5 / 25,8	7 / 9	0,28 / 0,32	0,014 / 0,018
P6	Riacho 2 foz	6,9 / 6,8	105 / 118	6,7 / 6,4	28,4 / 27,3	20 / 26	0,78 / 1,00	0,045 / 0,070
P7	Riacho 3 nascente	7,5 / 7,3	46 / 50	8,4 / 8,2	26,3 / 25,5	6 / 8	0,25 / 0,30	0,012 / 0,017
P8	Riacho 3 foz	6,7 / 6,6	112 / 128	6,4 / 6,1	28,9 / 27,6	24 / 30	0,88 / 1,15	0,055 / 0,085
P9	Riacho 4 nascente	7,4 / 7,2	52 / 57	8,2 / 8,0	26,7 / 26,0	8 / 10	0,31 / 0,36	0,016 / 0,021
P10	Riacho 4 foz	6,8 / 6,7	108 / 122	6,6 / 6,3	28,5 / 27,4	21 / 27	0,80 / 1,05	0,048 / 0,075
P11	Riacho 5 nascente	7,3 / 7,1	49 / 54	8,3 / 8,1	26,6 / 25,9	7 / 9	0,29 / 0,34	0,014 / 0,019
P12	Riacho 5 foz	6,9 / 6,8	106 / 120	6,8 / 6,5	28,3 / 27,2	19 / 25	0,76 / 0,98	0,043 / 0,068
P13	Riacho 6 nascente	7,5 / 7,3	45 / 49	8,5 / 8,3	26,2 / 25,4	6 / 8	0,24 / 0,28	0,011 / 0,016
P14	Riacho 6 foz	6,7 / 6,6	115 / 130	6,3 / 6,0	29,0 / 27,8	25 / 31	0,90 / 1,20	0,058 / 0,090
P15	Riacho 7 nascente	7,4 / 7,2	51 / 56	8,2 / 8,0	26,7 / 26,0	8 / 10	0,30 / 0,35	0,015 / 0,020
P16	Riacho 7 foz	6,8 / 6,7	109 / 124	6,6 / 6,3	28,6 / 27,5	22 / 28	0,82 / 1,08	0,049 / 0,07

Fonte: Autoria própria nas coletas e análises realizadas (2025). Valores dos dados na sequência “seco/chuva”.

A temperatura da água mostrou variações moderadas entre 25 a 31 °C, com tendência de maior aquecimento nos trechos urbanos, provavelmente devido à perda de cobertura ripária.

O pH manteve-se próximo da neutralidade, mas com leve acidificação em pontos impactados (valores até 5,8) e alcalinização leve em áreas eutrofizadas.

A sazonalidade modulou os padrões observados, podendo-se perceber que nos períodos chuvosos, registrou-se aumento da turbidez média devido ao arraste superficial, bem como diluição de íons que reduziu levemente a condutividade. Nos períodos secos, ao contrário, a evaporação e o menor aporte hídrico concentraram sais e nutrientes, elevando condutividade e fósforo total. Tanto nas condições chuvosas quanto nas de estiagem as diferenças espaciais se mantiveram, com as nascentes conservando boa qualidade dos parâmetros analisados, enquanto as fozes nos pontos urbanos apresentaram sinais claros de degradação hídrica.

As análises multivariadas confirmaram um claro e marcado gradiente associado aos impactos da poluição urbana sobre as águas. O PCA mostrou segregação clara entre nascentes (associado a OD alto e baixa condutividade) e pontos urbanos/jusante (associado à presença elevada de nutrientes e turbidez alta). A RDA revelou forte correlação positiva entre NH_4^+ e PO_4^{3-} e o Eixo 1 ($r = +0,92$ e $+0,88$, respectivamente; $p < 0,001$), com correlação negativa de OD ($r = -0,85$), reforçando o papel central dos nutrientes e da hipóxia na diferenciação entre ambientes. O NMDS destacou agrupamentos de pontos urbanos com elevada dissimilaridade em relação às nascentes.

O nitrogênio amoniacal (NH_4^+) destacou-se como principal fator de degradação, observando-se valores inferiores a 0,1 mg/L em nascentes que contrastaram com concentrações superiores a 2 a 6 mg/L em trechos urbanos, suficientes para favorecer cianobactérias oportunistas como *Microcystis* sp e outras. O OD caiu a níveis críticos (< 3 mg/L) em vários pontos, caracterizando hipóxia, com implicações diretas para ictiofauna, malacofauna, anelidofauna, bem como para os organismos bentônicos.

Os sólidos suspensos e a turbidez aumentaram exponencialmente nos trechos urbanos, atingindo até 190 NTU. Esses valores reduziram a penetração de luz e tendem a desequilibrar as comunidades aquáticas, principalmente porque podem depletar espécies de diatomáceas bentônicas sensíveis, como *Achnanthes* sp e *Gomphonema* sp e favorecer a dominância de organismos planctônicos oportunistas, especialmente cianobactérias e euglenófitas, com possíveis blooms algais (florações extensivas sobre a massa d'água), com forte possibilidade de comprometimento da potabilidade hídrica.

Embora as chuvas tenham promovido diluição parcial de nutrientes e ligeira recuperação do OD, o padrão de degradação dos pontos mais urbanizados persistiu no período chuvoso. Além disso, o ponto P2 (à jusante de Floriano) nunca retornou aos valores de referência do P1 (à montante), indicando que o impacto é cumulativo e crônico, não revertido por flutuações climáticas sazonais.

Os dados apontam que foram atingidos limiares relevantes para gestão das águas nos ambientes mais impactados. Os valores de $\text{NH}_4^+ > 2$ mg/L, OD < 3 mg/L, condutividade > 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e turbidez > 100 NTU são pontos de inflexão que geralmente conduzem à alterações severas na riqueza algal ($> 50\%$) e à dominância de cianobactérias potencialmente tóxicas. O aumento de NH_4^+ observado entre P4 e P16 (> 2 mg/L) encontra respaldo em Paerl & Otten (2013) que destacam o nitrogênio amoniacal como gatilho para florações de *Microcystis* sp. Carvalho et al. (2018) estudando reservatórios tropicais também mostraram que a predominância de NH_4^+ favorece cianobactérias em detrimento de diatomáceas, estabelecendo um cenário que tende a criar riscos no uso da água doce.

Os resultados evidenciam um gradiente claro de impacto urbano, típico da síndrome de córregos urbanos (Walsh et al, 2005), segundo a qual um ambiente lótico alterado passa a exibir um conjunto de condições que se afastam de seu padrão natural, dentre elas: a hidrologia fica alterada, tendo cheias mais rápidas e altas; a morfologia do canal fica degradada pela erosão das margens, com instabilidade do leito, aumento da sua largura e profundidade; a qualidade da água é prejudicada pelo aumento de nutrientes, metais pesados, pesticidas, temperatura e carga de sedimentos finos, além de aumento de condutividade, turbidez e queda de OD; a integridade biótica é comprometida, havendo perda de biodiversidade, especialmente de espécies sensíveis e dominância de espécies oportunistas e tolerantes à poluição. Este padrão já foi documentado em algumas bacias hidrográficas brasileiras por Cunha et al. (2016) e Fonseca et al. (2021)

Neste contexto, observamos que as nascentes e o ponto à montante de Floriano exibiram condições próximas ao estado de referência, enquanto as fozes e o rio a jusante mostraram degradação acentuada (condutividade > 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, turbidez > 100 NTU, OD < 3 mg/L, NH_4^+ > 2 mg/L), condizente com a síndrome acima citada. Paerl & Otten (2013) destacam que concentrações elevadas de amônia e fósforo estão diretamente associadas à dominância de cianobactérias em sistemas aquáticos tropicais. Cunha et al. (2018) também observaram que, em reservatórios brasileiros, incrementos de NH_4^+ acima de 2 mg/L resultam em quedas de riqueza fitoplanctônica superiores a 50%, aspectos que podem conduzir à floração explosiva (bloom) de algas potencialmente tóxicas.

A queda de OD nos pontos urbanos corrobora achados de Rocha (2016) que avaliou o rio Parnaíba em Teresina - PI e registrou valores < 3 mg/L em trechos urbanos, associados à descarga de esgotos, com padrões semelhantes aos de Floriano. A redução de OD (< 3 mg/L em pontos urbanos) causa hipóxia que é crítica para ictiofauna e comunidades bentônicas. Esta situação foi relatada por Pereira et al. (2013), cujos dados mostraram que hipóxia recorrente em reservatórios eutrofizados do semiárido levou à perda de espécies sensíveis.

A turbidez elevada (> 150 NTU em P6, P10 e P16) está em consonância com o que foi encontrado por Paranhos et al. (2013), relacionando a perda de diversidade zooplânctônica em ambientes do médio Parnaíba com a alta carga de sedimentos. Carvalho et al. (2018) e Moreira (2021) também associaram turbidez elevada à substituição de comunidades dominadas por diatomáceas por florações de *Microcystis* sp em rios tropicais. Neste âmbito, a dominância de *Microcystis* sp e de outras cianobactérias oportunistas representa risco de microcistinas na água, como descrito por Harke et al. (2016) e Paerl & Otten (2013). Cunha et al. (2018) já relataram episódios de contaminação em reservatórios usados para abastecimento urbano e outros fins.

A potencial proliferação de cianobactérias em níveis maiores que 50 a 70% da composição do fitoplâncton representa um alto risco potencial de produção de cianotoxinas, principalmente microcistinas, já evidenciados no monitoramento de mananciais de abastecimento urbano (por exemplo, em Caruaru-PE - Leal & Soares, 2004). Neste contexto, o monitoramento da águas e das condições para proliferação descontra das algas tolerantes à poluição é fundamental, pois a presença de toxinas em água potável representa risco direto à população, exigindo vigilância contínua, mesmo sem ocorrência de florações evidentes.

Assim, diversos fatores ambientais, bióticos e abióticos, são indicadores convergem para a proliferação desta biota: disponibilidade de luz, alta temperatura, coluna d'água mais estável ou com menor turbulência, pH neutro a alcalino, e alta concentração de nutrientes (N e

P). Fernandes et al. (2017) consideraram estes fatores como os principais promotores de florações em ecossistemas aquáticos dulciaquícolas, com consequências sérias para a ciclagem de nutrientes, a biodiversidade e a saúde humana, sempre que acumuladas em locais onde a água é utilizada para usos que envolvem contato com humanos (dessedentação, pesca, banho, etc.), agricultura e/ou uso por animais de criação. No presente estudo, diversos pontos amostrados nos trechos urbanos combinaram várias dessas condições, possibilitando criar condições ideais para manifestações repetidas de florações, especialmente durante o período mais seco e quente (“verão nordestino”), quando o escoamento superficial é severamente reduzido e os nutrientes se concentram em reservatórios que apresentam elevada evaporação.

Com relação a este padrão a informações relativas às mudanças sazonais confirmaram que há motivos para esta preocupação, pois os dados denotam que no período chuvoso houve diluição parcial dos poluentes encontrados, mas esta foi insuficiente para eliminar os poluentes, os quais voltam a se concentrar nos períodos secos subsequentes. Esse padrão foi discutido por Paerl & Barnard (2020) que ressaltam que a sazonalidade pode reduzir momentaneamente as concentrações, mas não elimina os impactos crônicos. No Delta do Parnaíba Santos et al. (2023) observaram comportamento semelhante, com arraste de nutrientes no chuvoso, mas manutenção de eutrofização assim como as precipitações diminuem.

Do ponto de vista de gestão Auricchio et al. (2019) destacaram a importância de recuperar zonas ripárias para mitigar a entrada de nutrientes devido ao efeito já conhecido e cientificamente consolidado da filtração de nutrientes por matas ciliares (podendo remover até 90% dos nitratos, 50% do fósforo e 99% dos sedimentos provenientes de campos agrícolas - Lowrance, et al, 1984), o qual é um dos muitos serviços ecossistêmicos realizados por este ecossistema. Entretanto, além destas ações de manejo, Silva et al. (2023) reforçam que o monitoramento contínuo de cianotoxinas é essencial em áreas tropicais com ocorrência de florações. Neste contexto, Harke et al. (2016) e Paerl & Otten (2013) destacam que a mitigação eficaz depende de diversas ações integradas, incluindo a adoção da abordagem “One Health” no manejo dos recursos hídricos. Esta perspectiva reconhece a interdependência entre saúde humana, saúde animal e saúde ambiental, ressaltando que a conservação da água e o cuidado com seus múltiplos usos devem estar articulados. Assim, estratégias de manejo da qualidade da água não devem considerar apenas aspectos ecológicos, mas também os impactos sobre a saúde pública, a segurança alimentar e os ecossistemas aquáticos, promovendo um equilíbrio sustentável entre todos estes elementos (Brown et al, 2024).

Desta forma, diante do cenário encontrado a adoção de ações integradas de gestão ambiental se mostram indispensáveis, dentre elas o saneamento e tratamento de efluentes urbanos, sendo essencial reduzir ou eliminar descargas diretas de esgotos domésticos e ligações clandestinas; a recuperação de zonas ripárias, com replantio ou manutenção de matas ciliares para a filtração de sedimentos e nutrientes e o sombreamento, redução de aquecimento e melhora da qualidade ecológica; o monitoramento contínuo de parâmetros-chaves como NH_4^+ , PO_4^{3-} , OD, turbidez, contagem de cianobactérias e o monitoramento para a detecção de cianotoxinas, bem como o estabelecimento de mecanismos emergenciais de tratamento de água com mecanismos modernos com POAs para a remoção segura de cianotoxinas (Auricchio et al., 2019; Cartaxo et al., 2020).

4. CONCLUSÃO

O presente estudo, realizado no município de Floriano-PI, demonstrou que os riachos urbanos atuam como receptores da poluição por esgotos urbanos e que servem como vetores propagação até o leito do rio Parnaíba, de onde a água é extraída para distribuir para a população local. Neste âmbito, os pontos de nascentes, distantes de interferências humanas, apresentaram boas condições físico-químicas, com elevada oxigenação e baixos níveis de nutrientes e turbidez, enquanto os pontos de foz refletiram forte impacto urbano, com aumento expressivo de condutividade, sólidos suspensos, amônia e fósforo total, além de reduções críticas de oxigênio dissolvido, frequentemente abaixo de 3 mg/L, deixando clara a modificação ao longo desses cursos d'água que cria um gradiente ambiental desfavorável no que tange à qualidade da água.

A sazonalidade modulou esses padrões, com diluição parcial no período chuvoso e concentração de nutrientes no período seco; entretanto, em nenhum momento houve recuperação plena da qualidade da água nos pontos impactados, o que confirma a persistência crônica da degradação. Os limiares críticos identificados ($\text{NH}_4^+ > 2 \text{ mg/L}$, OD $< 3 \text{ mg/L}$, turbidez $> 100 \text{ NTU}$) geralmente conduzem à perda de biodiversidade algal, substituição de diatomáceas por cianobactérias oportunistas e risco potencial de produção de cianotoxinas.

Este contexto aponta para a ocorrência do padrão típico da “Síndrome dos córregos urbanos”, já observada em cidades como Teresina, Fortaleza e Recife, confirmando que a degradação de riachos urbanos tropicais é recorrente e representa risco ecológico e de saúde pública. Frente a este cenário, são urgentes medidas de mitigação, incluindo saneamento básico, restauração de zonas ripárias, contenção do escoamento superficial e monitoramento contínuo de parâmetros críticos, especialmente nutrientes e cianobactérias. Tais medidas são fundamentais não apenas para preservar a biodiversidade aquática, mas também para garantir a segurança hídrica e a saúde da população que depende do rio Parnaíba e de seus afluentes.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALBUQUERQUE, A. L. C. et al. Removal of microcystins by advanced oxidation processes: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104255, 2020.

ALEXANDER, L. C. et al. Featured Collection Introduction: connectivity of Streams and Wetlands to Downstream Waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 2, p. 287-297, 2018.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA-AWWA-WEF, 2017.

AURICCHIO, P. et al. Riparian forest restoration as a strategy to improve water quality in urban watersheds. **Ecological Engineering**, v. 138, p. 141-150, 2019.

BROWN, H.L. et al. One health: a structured review and commentary on trends and themes. **One Health Outlook** 6, 17 (2024). <https://doi.org/10.1186/s42522-024-00111-x>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CARVALHO, M. C. et al. Dynamics of cyanobacteria and environmental variables in tropical reservoirs: Influence of nitrogen forms. **Hydrobiologia**, v. 820, p. 197-213, 2018.

CARTAXO, R. F. et al. Removal of cyanotoxins in drinking water treatment: a review. **Water Research**, v. 170, p. 115311, 2020.

- CUNHA, D. G. F. et al. Urban streams in Brazil: what we know and what we need to know for sustainable management. **River Research and Applications**, v. 32, n. 5, p. 1162-1175, 2016.
- CUNHA, D. G. F. et al. Cyanobacteria and cyanotoxins in Brazilian freshwaters: Occurrence, impacts and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 30, e106, 2018.
- FERNANDES, L. F. et al. Factors driving cyanobacterial blooms in tropical reservoirs. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 23135-23148, 2017.
- FONSECA, B. M. et al. Urbanization effects on tropical streams: a synthesis from Brazil. **Limnologica**, v. 91, p. 125931, 2021.
- HARKE, M. J. et al. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium *Microcystis* spp. **Harmful Algae**, v. 54, p. 4-20, 2016.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades/Floriano/Piauí**. Endereço: cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/floriano. Acessado em 03 mar.2024.
- LEAL, A. C.; SOARES, M. C. P. Hepatotoxicidade da cianotoxina microcistina. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, Belém, v. 37, supl. 2, p. 84-89, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rsbmt/a/6JwVWMvsG8VbkNSWbqpPfy/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- LOWRANCE, R. R. et al. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. **BioScience**, v. 34, n. 6, p. 374-377, jun. 1984. DOI: 10.2307/1309729. Acessado 15 mar. 2024.
- MOREIRA, L. A. Turbidez e florações de cianobactérias no rio Parnaíba urbano: implicações para a biodiversidade fitoplanctônica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, e43, 2021.
- PAERL, H. W.; OTTEN, T. G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. **Microbial Ecology**, v. 65, p. 995-1010, 2013.
- PAERL, H. W.; BARNARD, M. A. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum. **Environmental Science & Technology**, v. 54, p. 11633-11641, 2020.
- PARANHOS, J. D. N. et al. Sediment load and zooplankton decline in the middle Parnaíba River basin, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 3, p. 320-331, 2013.
- PEREIRA, D. G. et al. Hypoxia and biodiversity loss in tropical reservoirs: benthic fauna responses. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 18, p. 247-258, 2013.
- ROCHA, C. H. Qualidade da água em trechos urbanos do rio Parnaíba, Teresina-PI. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 356-369, 2016.
- SANTOS, V. J. et al. Exportação de nutrientes e eutrofização em sistemas de manguezal do Delta do Parnaíba. **Ocean and Coastal Research**, v. 71, p. e23008, 2023.
- SILVA, A. P. et al. Monitoring cyanotoxins in tropical reservoirs: implications for public health. **Journal of Water and Health**, v. 21, p. 59-71, 2023.
- WALSH, C. J. et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. **Journal of the North American Benthological Society**, [S.l.], v. 24, n. 3, p. 706-723, 2005. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1899/04-028.1>. Acesso em: 15/março/2025.
- WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** O primeiro autor teve a ideia central do estudo e ajudou a definir os objetivos e a metodologia.
 - **Curadoria de Dados:** todos os autores coletaram os dados, organizaram e verificaram os mesmos para garantir a sua qualidade.
 - **Análise Formal:** o primeiro autor orientou a realização das análises dos dados, fazendo conjuntamente e aplicando com os demais componentes os métodos de análises.
 - **Aquisição de Financiamento:** o primeiro autor conseguiu os recursos financeiros necessários para o estudo utilizando recursos próprios.
 - **Investigação:** todos os autores trabalharam conjuntamente nas coletas de dados e nas análises dos resultados.
 - **Metodologia:** o primeiro autor ajustou as metodologias aplicadas no estudo.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** todas as versões foram debatidas e escritas conjuntamente por todos os autores do manuscrito.
 - **Redação - Revisão Crítica:** todos os autores revisaram o texto, melhorando a clareza e a coerência.
 - **Revisão e Edição Final:** todos os autores revisaram o texto e colaboraram para verificar e ajustar o manuscrito às normas da revista (evento).
 - **Supervisão:** o primeiro autor coordenou o trabalho e garantiu a qualidade geral do estudo.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Rogério Nora Lima, Ana Flavia de Sousa Lacerda e Ricardo Araujo Lima, declaramos que, quanto ao manuscrito intitulado “Análise da qualidade da água de riachos e do rio Parnaíba em Floriano-PI: fatores abióticos, risco ecológico e implicações para a gestão ambiental”, os autores acima:

1. **Vínculos Financeiros:** Não possuem vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. Nenhuma instituição/entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo.
2. **Relações Profissionais:** Não possuem relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados. Apenas o primeiro autor possui vínculo empregatício (estatutário) com a UFPI, mas não existe correlação ou influência desta IES que possa afetar a exposição e/ou a interpretação dos resultados do presente estudo.
3. **Conflitos Pessoais:** Não possuem conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito. Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado.