

XVII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

AValiação DA QUALIDADE DA ÁGUA E SUA RELAÇÃO COM AS CIANOBACTÉRIAS EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tatiane Medeiros Queiroz¹ ; Gabriel Moiano Cesar²; Nayara Barreto da Costa³; Marcela Miranda⁴; Felipe Siqueira Pacheco⁵; Jean Pierre Henry Balaud Ometto⁶; Juliana dos Santos Severiano⁷ & José Etham de Lucena Barbosa⁸

RESUMO – Em ecossistemas aquáticos artificiais, como os reservatórios, as atividades antrópicas deterioram a qualidade da água e aumentam as florações de cianobactérias, reduzindo a diversidade das comunidades aquáticas. Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar a relação entre a biomassa de cianobactérias e o Índice de Estado Trófico (IET) em dois reservatórios na região semiárida, além de analisar o uso e ocupação da terra nas proximidades desses reservatórios. O estudo foi realizado em dois reservatórios do estado da Paraíba, nos meses de maio (chuva) e novembro (seca) de 2022. Foram coletados parâmetros físico-químicos e amostras de cianobactérias. Utilizou-se Regressão Simples para avaliar a relação entre a biomassa de cianobactérias e o IET, o modelo linear generalizado (GLM) para verificar diferenças nas concentrações de nutrientes entre os reservatórios, teste t para comparar os reservatórios, PCA para analisar variáveis ambientais e qui-quadrado para avaliar o uso da terra. Foram identificadas 17 espécies de cianobactérias, com as maiores biomassas de *Planktothrix agardhii* em Poções e *Raphidiopsis raciborskii* em Boqueirão. Poções foi classificado como eutrófico, enquanto Boqueirão foi classificado como mesotrófico. O GLM indicou diferenças significativas nas concentrações de nutrientes, com Poções apresentando níveis mais altos de amônia e fósforo total, e Boqueirão exibindo maiores concentrações de nitrato e nitrito. A análise PCA destacou variáveis ambientais distintas para cada reservatório. O teste qui-quadrado revelou diferenças significativas no uso da terra entre os dois locais. Esses resultados reforçam a necessidade de implementar estratégias de manejo para reduzir a entrada de nutrientes nos reservatórios, auxiliando na mitigação da eutrofização e garantindo a qualidade da água para múltiplos usos na região semiárida do Brasil.

ABSTRACT– In artificial aquatic ecosystems, such as reservoirs, human activities deteriorate water quality and increase cyanobacterial flora, reducing the diversity of aquatic communities. The objective of this study is to evaluate the relationship between cyanobacteria biomass and the Trophic State Index (TIS) in two semi-arid reserves, in addition to analyzing the use and occupation of land surrounding the reserves. The study was carried out in two reserves in the state of Paraíba, in the months of May (rainy) and November (dry) 2022. Physicochemical parameters and cyanobacteria

¹) Área de Ecologia, Departamento de Biologia, Universidade Estadual da Paraíba- UEPB, Rua Baraúnas, nº. 351, Universitário, 58.429-500, Campina, (83)987340905, tatianemedeiros5892@gmail.com

²) Sensoriamento remoto, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da granja, São José dos Campos -SP, CCST, sala 21, 1º andar, (12)988595379, gabrielmoiano@gmail.com

³) Ciência do Sistema Terrestre, Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, (82)981708556, nayara.costa@inpe.br

⁴) Ciência do Sistema Terrestre, Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, (82)981708556, marcelaacmiranda@gmail.com

⁵) Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva, Cornell University, Ithaca, Nova York. . Fone 32988499146 e-mail: felipe.pacheco@cornell.edu

⁶) Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos, SP. (12) 32087904, jean.ometto@inpe.br

⁷) Área de Ecologia, Departamento de Biologia, Universidade Estadual da Paraíba- UEPB, Rua Baraúnas, nº. 351, Universitário, 58.429-500, Campina, (83)996972446, jsantosseveriano@gmail.com

⁸) Área de Ecologia, Departamento de Biologia, Universidade Estadual da Paraíba- UEPB, Rua Baraúnas, nº. 351, Universitário, 58.429-500, Campina, (83)988222179, ethambarbosa@hotmail.com

samples were collected. Simple Regression was used to evaluate the relationship between cyanobacteria biomass and IET, or the generalized linear model (GLM) to verify differences in nutrient concentrations between reservoirs, t-test to compare reservoirs, PCA to analyze environmental variations and chi - square to validate the use of the land. 17 species of cyanobacteria were identified, the largest biomasses being *Planktothrix agardhii* in Poções and *Raphidiopsis raciborskii* in Boqueirão. Poções was classified as eutrophic, while Boqueirão was classified as mesotrophic. The GLM indicates significant differences in nutrient concentrations, with Piscinas having higher levels of ammonia and total phosphorus, and Boqueirão having higher concentrations of nitrate and nitrite. The PCA analysis highlighted several different environments for each reserve. The chi-square test revealed significant differences in land use between the two locations. These results reinforce the need to implement management strategies to reduce the entry of nutrients into reservoirs, helping to mitigate eutrophication and ensuring water quality for multiple uses in the semi-arid region of Brazil.

Palavras-Chave – Algas nocivas; Eutrofização; Atividades antrópicas.

INTRODUÇÃO

Os reservatórios são importantes ecossistemas aquáticos que são utilizados para diversas finalidades, sendo essencial para o abastecimento de água potável, irrigação, recreação, dessedentação de animais e agricultura, dentre outros (Bouvy *et al.* 2000; Attayde *et al.* 2011). Esses ambientes apresentam níveis de distúrbios diferentes advindos de atividades antrópicas (GOMES *et al.* 2018), como a instalação de estruturas artificiais, distúrbios químicos por meio da contaminação da água como também ao tipo de clima associado ao aumento das temperaturas (Feio *et al.* 2015; Ho e Michalak, 2019). A região árida e semiárida, é caracterizada por apresentar características climáticas bem específicas como altas taxas de evaporação, baixos índices pluviométricos, elevada intensidade luminosa, alto escoamento superficial e baixa capacidade de infiltração da água no solo (Bouy *et al.* 2000; Barbosa, 2011; Costa, 2016). No entanto, tais condições climáticas e ações antrópicas afetam a qualidade da água e consequentemente o aumento de aporte de nutrientes nitrogenados e fosfatados, acelerando o processo de eutrofização no corpo aquático e levando ao crescimento da comunidade fitoplanctônica, principalmente a dominância de cianobactérias (Naselli-Flores *et al.*, 2007; Dantas *et al.* 2012; Brasil *et al.* 2016).

A eutrofização interfere no equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, impactando a transparência da água, seu sabor e odor, reduzindo os níveis de oxigênio e dificultando o tratamento nas estações de tratamento de água (Havens *et al.* 2017). O aumento da urbanização, industrialização e intensificação das atividades agrícolas tem exacerbado a degradação da qualidade dos recursos hídricos (Varol, 2020; Dodds e Smith, 2017). A eutrofização dos ecossistemas aquáticos representa um dos principais desafios para os gestores públicos na tentativa de manter e combater a degradação da qualidade da água, pois altera os parâmetros físicos e químicos da água e desencadeia o florescimento de cianobactérias potencialmente produtoras de cianotoxinas, compostos que ameaçam

a saúde dos seres humanos e de animais, representando um risco à saúde pública e aos ecossistemas aquáticos (Markad *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2021).

Em reservatórios de regiões tropicais, as florações de cianobactérias são perenes (isto é, que ocorrem durante todo o ano) sendo favorecidas por altas concentrações de nutrientes provenientes de atividades humanas, altos valores de turbidez, salinidade e pH (>8), condições climáticas (altas temperaturas, luminosidade e baixa precipitação) e hidrológicas (alto tempo de residência da água) (Bittencourt-Oliveira *et al.* 2014; Brasil *et al.*, 2016; Vanderley *et al.* 2021). As mudanças no uso da terra, como a conversão de áreas naturais em áreas agrícolas, urbanas e aumento do solo exposto, afetam diretamente os corpos d'água e as bacias hidrográficas devido ao aumento na aplicação de fertilizantes e escoamento agrícola (Sinha e Michalak, 2016; Nobre *et al.* 2020). Por sua vez, aumenta as entradas de nutrientes como nitrogênio e fósforo, estimulando o crescimento de cianobactérias que consequentemente piora a qualidade da água (Peng *et al.* 2021; Wang *et al.*, 2022).

Portanto, é crucial entender como os ambientes são caracterizados em relação aos impactos da entrada de efluentes domésticos e industriais e de fertilizantes pois são fatores significativos que contribuem para o enriquecimento de nutrientes, como fósforo, nos corpos d'água, acelerando o processo de eutrofização e consequentemente das florações de cianobactérias potencialmente tóxicas. Isto é essencial para controlar a poluição terrestre em rios e reservatórios (Soares *et al.* 2008; Pacheco *et al.* 2015). Neste sentido, o estudo teve objetivo deste avaliar a relação entre a biomassa de cianobactérias e o Índice de Estado Trófico (IET) em dois reservatórios na região semiárida, e analisar o uso e ocupação da terra próximo a esses reservatórios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado em dois reservatórios localizados na Bacia do Rio Paraíba, Estado da Paraíba- Brasil, no reservatório Eptácio Pessoa, popularmente conhecido como Boqueirão ($7^{\circ}28'9''S$; $36^{\circ}8'2''W$) e Poções ($7^{\circ}53'45''S$, $37^{\circ}0'50''W$) (Fig 1). Esses reservatórios são utilizados para a captação de água, abastecimento público, irrigação e agricultura (AESAs, 2023). A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Norte é a segunda maior do estado da Paraíba, com área ($20.071,83 \text{ Km}^2$) ocupando 38% do território, abrigando 52% da população total do estado (AESAs 2023).

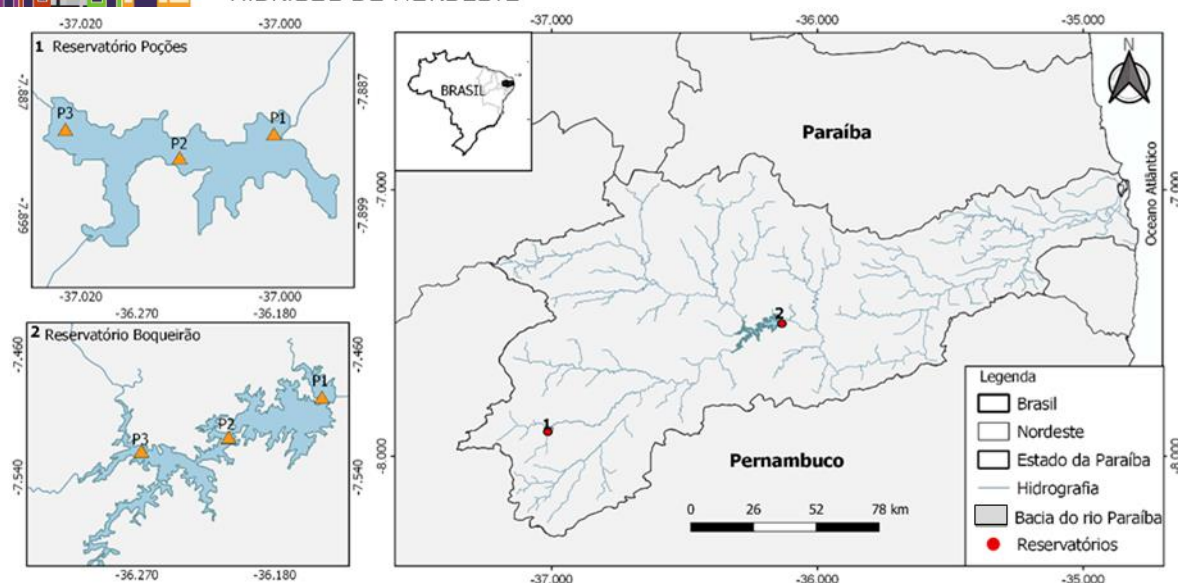


Figura 1. Localização reservatórios estudados Epitácio Pessoa (Boqueirão) e Poções, Paraíba-Brasil .

A amostragem foi realizada em maio de 2022 (estação chuvosa) e novembro (estação de seca na região) de 2022. As amostras de água foram coletadas no local 1, região lântica (região de barragem), região de transição (entre a barragem e a entrada do rio), local 2; e o local 3, e lótica (região da entrada do rio) dos reservatórios, em três profundidades: subsuperfície (0,5 m), camada limite inferior da zona eufótica (Zeu) e fundo (profundidade máxima dos reservatórios). A zona eufótica (Zeu) foi estimada multiplicando-se a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi (cm) por 2,7, conforme descrito por Cole (1994), e a profundidade máxima utilizando um profundímetro portátil HONDEX OS-7. Em cada local, foi realizada amostragem para a análise da biomassa das cianobactérias, variáveis climáticas e variáveis químicas e físicas. O volume hídrico e precipitação pluviométrica dos reservatórios foi obtido a partir da Agência Nacional das Águas, AESA (2022). Foram mensuradas in situ com o auxílio de uma sonda multiparâmetro HORIBA© U-50 os parâmetros, oxigênio dissolvido (mg L^{-1}), turbidez (NTU), condutividade elétrica (mS cm^{-1}), temperatura da água e ar ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e sólidos dissolvidos (g L^{-1}) e pH.

As amostras para a análise de nutrientes foram armazenadas em frascos de polietileno, acondicionadas em caixas com gelo e transportadas para o laboratório. As concentrações de amônia ($\mu\text{g L}^{-1}$), nitrato ($\mu\text{g L}^{-1}$), nitrito ($\mu\text{g L}^{-1}$), fósforo reativo solúvel ($\mu\text{g L}^{-1}$) e fósforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$) foram medidos de acordo com as técnicas descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA (2012). O nitrogênio inorgânico dissolvido (DIN), foi determinado através da soma das concentrações de amônia, nitrato e nitrito. A concentração de clorofila-a foi determinada utilizando um fluorômetro Phyto-PAM da marca Heinz Walz GmbH, seguindo os protocolos do fabricante para preparo de amostras e leitura da fluorescência. Para análise das cianobactérias quantitativas, amostras coletadas com auxílio da garrafa de Van Dorn, armazenadas em frascos âmbar

e fixadas com solução de Lugol 1%. Lâminas semipermanentes das amostras foram preparadas e visualizadas em um microscópio óptico Zeiss Axioskop (Carl Zeiss, Jena, Alemanha).

A identificação dos táxons foi realizada com o auxílio das chaves fornecidas por Komárek *et al.* (2002) e Komárek (2013). A análise quantitativa foi realizada usando um microscópio invertido Zeiss Axiovert. Um transecto por amostra foi realizado para quantificação da densidade. A densidade (indivíduos mL⁻¹) foi obtida através da fórmula descrita por Ross (1979) e o biovolume (mm³ L⁻¹) foi estimado multiplicando a densidade das espécies pelo volume médio das células (~ 20 indivíduos). O volume das células foi calculado a partir de modelos geométricos conforme descrito por Hillebrand *et al.* (1999). A conversão do biovolume em biomassa foi realizada assumindo o peso fresco unitário expresso como massa de 1 mm³ L⁻¹ = 1 mg L⁻¹ (Wetzel e Likens, 2000).

Para calcular o Índice de estado trófico (IET), que foi empregado para avaliar características limnológicas utilizado como base nos valores correspondentes ao fósforo total (TP) e clorofila-a (Chl), conforme proposto por Cunha *et al.*, 2013, foram considerados ultraoligotrófico sistemas que apresentam valores de (0-20), oligotrófico (20-40), mesotrófico (40-60), eutrófico (60–80) e supereutrófico (80– 100) (Cunha *et al.*, 2013). Para a realização da composição do uso e ocupação da terra foram construídos mapas temáticos de uso e ocupação da terra, usando o método de classificação semissupervisionada a partir de imagens do satélite Sentinel-2, processadas na plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017).

Foram obtidas imagens em mosaico, calculando a mediana por pixel para o período de 1º de novembro de 2021 a 31 de dezembro de 2022, com cobertura máxima de nuvens de 10%. Utilizamos as bandas espectrais B11, B8 e B4, junto com dados de coordenadas geográficas obtidos em campo, para criar áreas de treinamento (70%) e validação (30%) para a classificação. As classes de uso e cobertura da terra incluíram água, aquicultura, várzea, formação florestal, macrófitas, mosaicos de uso do solo, terreno descoberto e áreas construídas. A acurácia da classificação foi avaliada pelo Índice Kappa, com resultados excelentes para Eptácio Pessoa (K=0,997) e Poções (K=0,999). Os mapas finais foram georreferenciados para SIRGAS 2000, Sul (EPSG: 4674) e criados usando QGIS versão 3.10.7)

Análise Estatística

Para verificar se houve diferença significativa na biomassa de cianobactérias, IET, concentrações de nitrito, nitrato, fósforo reativo solúvel e fósforo total entre os reservatórios, foi realizada um modelo linear generalizado (GLM) com o erro de distribuição Gaussian (usando a função ‘glm’ do pacote “stats”). Antes disso, a normalidade foi avaliada com o teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias entre os grupos com o teste de Levene. Além disso, foi realizado

um teste t de Student para avaliar diferenças entre os reservatórios. Para determinar as relações entre as variáveis ambientais entre os reservatórios, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), e a significância dos resultados foi confirmada por meio de uma GLM baseada no modelo linear ajustado. A potencial multicolinearidade entre as variáveis ambientais foi considerada fator de Inflação da Variância ($VIF < 5$). O teste qui-quadrado avaliou a significância das diferenças dos tipos de uso da terra entre os reservatórios. Todas as análises estatísticas foram realizadas no RStudio

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificadas 17 espécies de cianobactérias, entre as quais nove são consideradas produtoras de cianotoxinas: *Aphanizomenon gracile* (Lemmermann, 1907), *Dolichospermum solitarium* (Wacklin *et al.*, 2009), *Dolichospermum circinalis* (Wacklin *et al.*, 2009), *Microcystis* sp. (Lemmermann, 1907), *Merismopedia tenuissima* (Lemmermann 1989), *Planktothrix agardhii* (Anagnostidis e Komarek, 1988), *Pseudanabaena catenata* (Lauterborn, 1915), *Pseudanabaena galeata* (Böcher, 1949), *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Aguilera *et al.* (2018). A biomassa total entre os reservatórios apresentou diferenças significativas ($F = -3,66$, $df = 17,05$, $p\text{-valor} = 0,001$). O reservatório de Boqueirão apresentou uma média de $(5,86 \mu\text{g/L}^{-1} \pm 8,39)$ e a espécie que apresentou maior biomassa no reservatório Boqueirão foi *R. raciborskii*, potencialmente produtora de saxitoxina e cilindrospermopsina, com biomassa variando de $(0,42$ a $29,45 \mu\text{g/L}^{-1})$.

No reservatório de Poções, a biomassa total apresentou uma média de $(188,01 \mu\text{g/L}^{-1} \pm 210,92)$, e as espécies *P. agardhii* potencialmente produtora de microcistina, apresentou a maior biomassa variando de $(3,54 \mu\text{g/L}^{-1}$ a $515,42 \mu\text{g/L}^{-1})$ (Fig 2A), seguida por *R. raciborskii* $(2,45 \mu\text{g/L}^{-1}$ a $17,83 \mu\text{g/L}^{-1})$. Estudos mostra que reservatórios do semiárido brasileiro, mostraram elevada dominância de cianobactérias, representando até 90% da comunidade fitoplanctônica (Brasil *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2018). Essas espécies compartilham características fenotípicas como produção de cianotoxinas, tolerância a condições de turbidez e sombreamento, regulação da flutuabilidade (Reynolds, 1993; Padisák, 2003), além de estocar fósforo, um nutriente abundante em ambientes eutróficos, (FERNANDES, et al, 2009).

Os resultados do índice de estado trófico (IET) indicaram uma diferença estatisticamente significativa entre os reservatórios ($F = -12,41$, $df = 22,29$; $p = 0,001$). O reservatório de Poções apresentou características eutróficas em todos os períodos amostrados, com um IET médio de $60,71 \pm 0,80$ (Fig. 2B). Em contrapartida, o IET do reservatório de Boqueirão variou entre $54,38 \pm 2,00$, classificado como mesotrófico (Fig. 2B). A análise de regressão linear simples mostrou uma relação significativa foi observada entre a biomassa de cianobactérias e o IET ($r^2 = 0,30$; $p = 0,0005$) dos reservatórios amostrados durante todo o período de estudo (Figura 3). Diante disso, o índice de estado trófico dos reservatórios pode ter influenciado a biomassa das cianobactérias, mostrando que

reservatórios mais eutroficados tendem a ter maior biomassa de cianobactérias. Estudos mostram que reservatórios com níveis eutróficos apresentam aumento na concentração de nutrientes, tais como fósforo e nitrogênio, e favorecem o aumento das florações de cianobactérias, uma vez que participam das funções metabólicas das cianobactérias (Varol, 2020; Mam *et al.* 2021). O reservatório Boqueirão é historicamente caracterizado como mesoeutrófico, contendo águas claras e extensos bancos de *Egeria* densa (Araújo-Junior, 2009). No mais, as macrófitas submersas produzem substâncias alelopáticas que afetam o crescimento do fitoplâncton (GAO *et al.*, 2017). Com isso, destaca-se que o estudo da trofia de reservatórios é de grande importância para obter planos de manejo que diminuam a emissão de nutrientes, evitando assim, a eutrofização acelerada nos reservatórios.

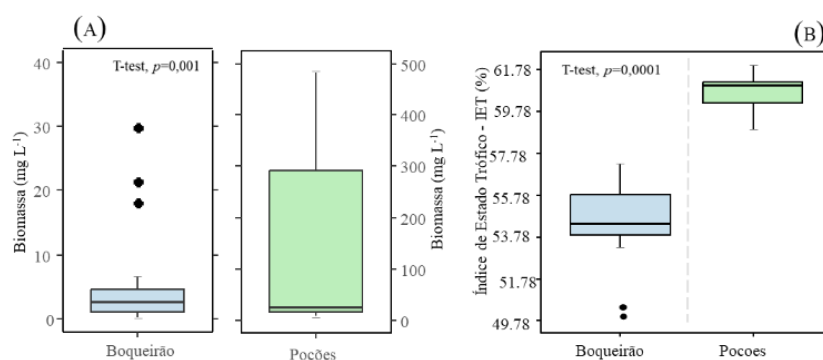


Figura 2. Biomassa de cianobactérias (mg L⁻¹) nos reservatórios Boqueirão e Poções (A) e (B) Índice de estado Trófico em reservatórios na região semiárida brasileira.

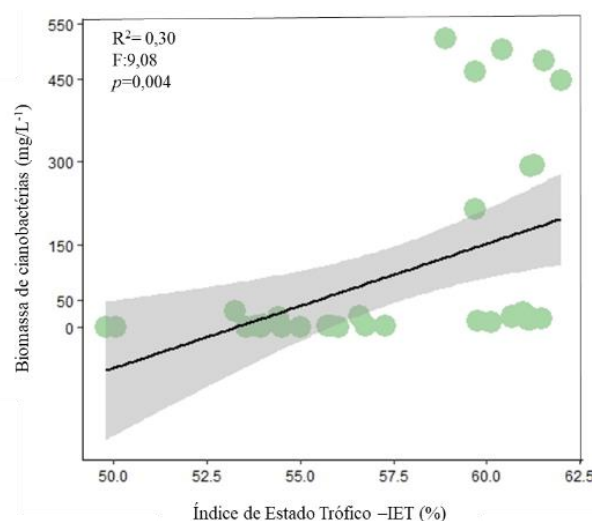


Figura 3. Análise de regressão simples do Índice de Estado Trófico (IET) sobre a biomassa de cianobactérias nos reservatórios Boqueirão, Poções na região semiárida brasileira

A Análise de Variância (GLM) do modelo da Análise de Componentes Principais (PCA) mostrou que houve diferenças significativas entre os reservatórios ($F=631,03$; $p < 0,0001$). A PCA indicou que os dois primeiros eixos explicaram 42,4% da variância total (PCA1 = 44,1; PCA2 = 19,1) (Figura 4). Para o reservatório Poções, a PCA mostrou que no lado positivo do eixo 1, houve correlações com turbidez, fósforo total e IET. No eixo 2, observou-se relação com volume e clorofila.

Por outro lado, para o reservatório Boqueirão, no lado negativo do eixo 1, foram observadas correlações com pH, sólidos totais dissolvidos (STD) e salinidade, seguidas pela temperatura da água no eixo 2 (Fig. 4). Relações entre o volume hídrico e variáveis nitrogenadas, turbidez e estado trófico, pH, salinidade, sólidos totais dissolvidos, estado trófico observadas pela análise de PCA em nosso estudo são similares com resultados observados em reservatórios do semiárido (Brasil *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2016; Vanderley *et al.*, 2021; Mendes *et al.*, 2020; Santos-Silva *et al.*, 2024). Além disso, a amostragem foi realizada no período da seca (dezembro 2021) e chuva (maio 2022), e essa redução do volume hídrico e mudanças nos padrões de precipitações é um fator chave no aumento das concentrações de nutrientes, intensificando o processo de eutrofização e aumentando turbidez (Barbosa *et al.*, 2012; Mendes *et al.*, 2021).

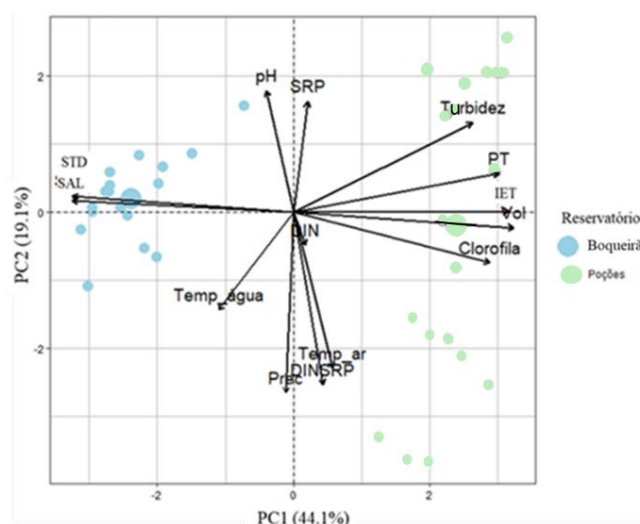


Figura 4. Análise de Componentes Principais das Características Químicas e Físicas da Água nos reservatórios de Epitácio Pessoa e Poções na região semiárida brasileira.

A classificação do uso da terra mostrou que, a vegetação esparsa, composta predominantemente por pastagens, é típica da pecuária extensiva, onde rebanhos de caprinos, ovinos e bovinos têm acesso a grandes áreas de terra com vegetação natural ao redor desses reservatórios. Com o tempo, as áreas de vegetação arbórea e arbustiva tem sido substituída por pastagens, áreas urbanas e terras nuas, especialmente nas margens dos reservatórios, onde a vegetação da Área de Preservação Permanente (APP) deveria ser mantida em um raio de 100 metros. Essa prática facilita a locomoção e a alimentação dos animais, mas o pisoteio intenso e a sobrecarga alimentar podem levar à degradação da mata nativa, expondo o solo e contribuindo significativamente para a classificação de grandes áreas de solos expostos na região. E em relação a classificação de uso da terra mostrou que os tipos de agricultura nessas áreas incluem tomate, pimentão, milho, feijão, banana e hortaliças. A ocupação humana é composta por residências isoladas e pequenas cidades. No entorno do reservatório Epitácio Pessoa, predominam áreas de vegetação, cobrindo 229,99 km² (46,77% da área total), seguidas por áreas de solo exposto, com 204,77 km² (41,64%), e uma pequena área urbana de

1,94 km² (0,39%) (Tab. 1, Fig. 5). Em contraste, no reservatório Poções, a vegetação é mais predominante, cobrindo 66,08 km² (56,01%), enquanto as áreas agrícolas representam 12,84 km² (10,88%) (Tab. 1, Fig. 5). A agricultura é menos significativa em ambas as localidades. Testes qui-quadrado revelaram diferenças significativas na distribuição do uso da terra entre Boqueirão (qui-quadrado = 61,88; $p = 0,0001$) e Poções (qui-quadrado = 61,986; $p = 0,0001$) (Tab. 1). A prática de agricultura e pecuária, como evidenciado em ambos os reservatórios, está associada a impactos negativos na qualidade da água. A falta de vegetação e o uso inadequado do solo nas áreas adjacentes aos reservatórios podem exacerbar a erosão e a perda de nutrientes para os corpos d'água (Cavalcante *et al.*, 2017; Coelho *et al.*, 2011). Demograficamente os municípios de Monteiro e Boqueirão apresentam perfis distintos que podem influenciar suas dinâmicas ambientais e socioeconômicas. O município de Monteiro cobre uma área de 986,370 km² e possui uma população total de 32.277 habitantes, com 20.261 habitantes vivendo na área urbana e 10.591 na área rural (IBGE, 2016). Esta configuração revela uma predominância de população urbana, o que pode estar associado a diferentes padrões de uso do solo e impactos ambientais na qualidade da água. Por outro lado, o município de Boqueirão tem uma área de 424,646 km² e uma população total de 17.589 habitantes, sendo 12.006 na área urbana e 4.882 na área rural (IBGE, 2016). A menor extensão territorial e a diferença na proporção entre áreas urbanas e rurais em Boqueirão indicam que as pressões urbanas e rurais sobre o meio ambiente podem variar em comparação com Monteiro. Em ecossistemas de baixa conexão, como os reservatórios em regiões semiáridas, onde os rios são intermitentes, as práticas agrícolas, criação de gado e ocupação humana constituem as principais fontes externas de nutrientes, ampliando sua disponibilidade junto às fontes naturais como plantas aquáticas, algas e o carreamento de nutrientes do solo abaixo da superfície (Kaiserli *et al.*, 2002; Paula Filho *et al.*, 2019; Barbosa *et al.*, 2020). Além disso, em reservatórios da região semiárida 75% das concentrações de nutrientes em reservatórios no semiárido brasileiro são de origem antrópica, excedendo em até 10 vezes as contribuições naturais (Paula Filho *et al.*, 2019).

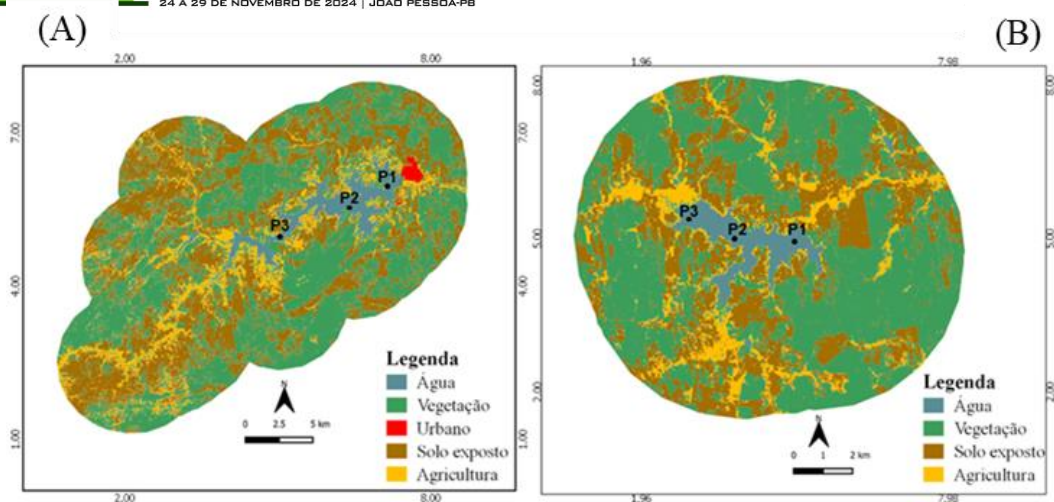


Figura 5. Mapas de o uso e ocupação da terra dos reservatórios Boqueirão e Poções (bacia hidrográfica do Rio Paraíba, Paraíba/Brasil) nos anos de 2021 e 2022.

	Boqueirão				Poções			
Classificação	Área (Km ²)	%	qui-quadrado	<i>p</i>	Área (Km ²)	%	qui-quadrado	<i>p</i>
Vegetação	229,99	46,77	61,88	0,0001	66,08	56,01	61,98	0,0001
Urbano	1,94	0,39			0	0		
Agricultura	55,03	11,19			12,84	10,88		
Solo exposto	204,77	41,64			39,05	33,1		
Total	491,73	100			117,97	100		

Tabela 1. Porcentagem do uso e ocupação da terra às margens dos reservatórios Boqueirão e Poções (bacia hidrográfica do Rio Paraíba, Paraíba/Brasil) nos anos de 2021 e 2022.

Os dados de nutrientes foram escolhidos para comparação devido à sua relevância no contexto de eutrofização, um dos principais processos que afetam a qualidade da água em reservatórios. Nitrogênio, nas suas diferentes formas (amônia, nitrato, nitrito) e fósforo total, são considerados os principais nutrientes limitantes para o crescimento de fitoplâncton, incluindo cianobactérias (Fig 6A e B) que podem estar presentes em grandes quantidades no solo, devido às atividades nele desenvolvidas (como agricultura e pecuária), podendo ser transportados nos corpos d'água, ou por lixiviação para perdas de solo por erosão. Os resultados mostram que no reservatório de Poções foram observados aumentos significativos na concentração de amônia (76,1 µg/L, glm, $p < 0,001$) e no fósforo total (56,7 µg/L, glm, $p < 0,001$) (Fig 5A e B). Houve um aumento significativo na concentração de nitrato (5,0 µg/L, glm, $p = 0,04$). Por outro lado, reduções significativas foram encontradas na concentração de nitrito (1,96 µg/L, glm, $p = 0,04$) (Fig 5A e B). A concentração de fósforo reativo solúvel (6,2 µg/L) não apresentou diferenças significativas (glm, $p = 0,71$). No reservatório de Boqueirão, foram observados aumentos significativos na concentração de nitrato (51,1 µg/L, glm, $p < 0,001$), nitrito (8,5 µg/L, glm, $p = 0,05$) e fósforo total (14,4 µg/L, glm, $p < 0,001$). As concentrações de amônia (22,2 µg/L, glm, $p = 0,47$) e fósforo reativo solúvel (7,1 µg/L, glm, $p = 0,71$) não mostraram diferenças significativas (Fig 5A e B). Esses resultados indicam que Poções apresenta

concentrações significativamente mais altas de amônia e fósforo total, além de um aumento no nitrato, em comparação com Boqueirão. Esse aumento de amônia e fósforo total pode estar relacionado à alta proporção de atividades agrícolas, que contribuem para o aumento da carga de nutrientes. Em contraste, Boqueirão tem níveis mais elevados de nitrato e nitrito intensificação do processo de eutrofização pode está associada a sazonalidade e acúmulo e concentração de nutrientes pelo ao aumento da importância relativa dos processos de fertilização interna que liberam nutrientes do sedimento para a coluna d'água (Barbosa et al., 2012). O aumento de nitrato e nitrito sugere uma influência mais intensa de atividades que geram nitrogênio, como fertilização e pecuária. O fato de que a concentração de fósforo reativo solúvel não apresentou diferenças significativas pode indicar uma rápida captura desse nutriente por fitoplâncton ou macrófitas, conforme discutido por Monteiro (2016). Os usos múltiplos dos reservatórios na região semiárida têm sido significativamente impactados pela deterioração da qualidade da água (Rocha Junior et al., 2018; Wiegand et al., 2021). Análise do uso da terra na região semiárida pode revelar uma forte correlação entre as práticas de ocupação do solo e a qualidade da água nos reservatórios, refletida pelas concentrações de nutrientes. A pecuária extensiva, predominante na região, substituiu grande parte da vegetação nativa por pastagens, resultando em solos expostos. Essa degradação da vegetação, somada ao pisoteio intenso e à sobrecarga alimentar dos rebanhos, facilita a erosão e o transporte de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, para os corpos d'água. Assim, a distribuição do uso da terra na região, especialmente a conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas e pastagens, está diretamente ligada ao aumento das concentrações de nutrientes nos reservatórios, evidenciando a necessidade urgente de práticas de gestão e conservação para mitigar os impactos dessas atividades humanas na qualidade da água.

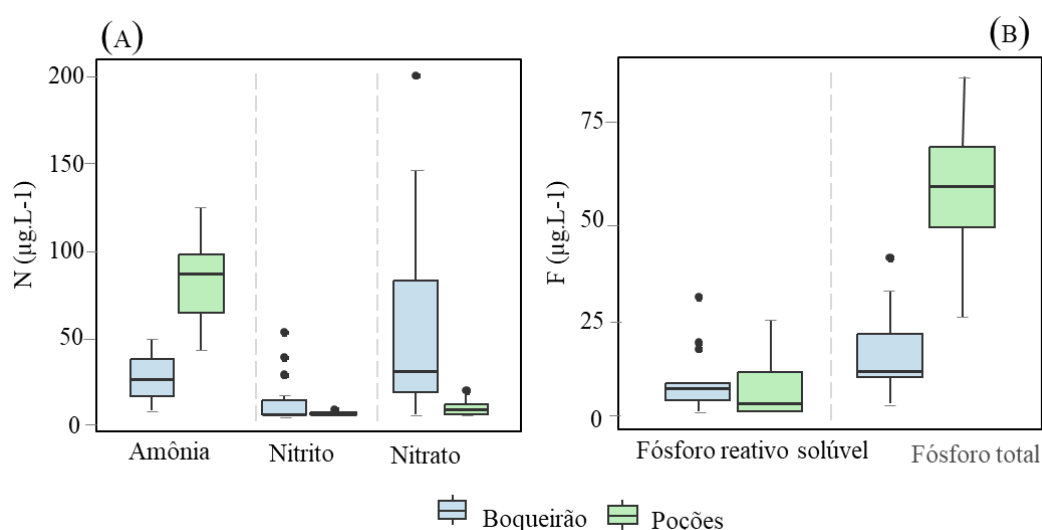


Figura 6. Amônia, Nitrato, Nitrito, Fósforo reativo solúvel e Fósforo total dos reservatórios (A) Boqueirão e (B) Poções na região semiárida brasileira.

CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos neste estudo, é evidente a relevância do monitoramento contínuo dos reservatórios, especialmente em regiões semiáridas, onde as atividades agrícolas, pecuárias e a ocupação humana são as principais fontes externas de nutrientes que aceleram o processo de eutrofização. Além disso, a dominância de espécies como *Raphidiopsis raciborskii* e *Planktothrix agardhii* com potencial produtor de cianotoxinas, destaca os riscos à qualidade da água e à saúde pública durante as florações dessas espécies. O Índice de Estado Trófico influenciou o aumento da biomassa de cianobactérias, indicando que reservatórios mais eutróficos tendem a apresentar maiores concentrações dessas espécies. Diante disso, esses resultados mostra a necessidade de estratégias de manejo que visem reduzir os nutrientes e consequentemente diminuição da dominância das cianobactérias nos reservatórios semiáridos, além de uma compreensão mais detalhada das interações entre uso da terra, condições ambientais é crucial para promover a sustentabilidade desses ecossistemas aquáticos para garantindo a qualidade da água e a saúde pública diante dos desafios crescentes impostos pela intensificação dos processos de eutrofização.

FINANCIAMENTO

O recurso de execução do trabalho foi financiado pelo Projeto Diagnóstico e Estratégia de Restauração Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte, financiado pelo edital Fapesp/Fapesq 2022, sob o número 2022/08775-0. Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudos, que viabilizou a realização deste estudo

REFERÊNCIA

- APHA – American Public Health Association. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed. Washington, DC, 1200.
- ARAÚJO-JÚNIOR RJ, 2009. [Evolução temporal dos níveis tróficos do açude Epitácio Pessoa, semiárido Paraibano]. [PhD Thesis in Portuguese]. Universidade Estadual da Paraíba
- ATTAYDE, J. L., BRASIL, J., & MENESCAL, R. A. (2011). Impacts of introducing Nile tilapia on the fisheries of a tropical reservoir in North-eastern Brazil. *Fisheries Management and Ecology*, 18(6), 437-443.
- BARBOSA, José Etham de Lucena *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 24, p. 103-118, 2012.
- Barbosa, L. G., Barbosa, P. M. M., & Barbosa, F. A. R. (2011). Vertical distribution of phytoplankton functional groups in a tropical shallow lake: driving forces on a diel scale. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 23, 63-73.
- BOUVY, Marc *et al.* Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. *Aquatic microbial ecology*, v. 23, n. 1, p. 13-27, 2000.
- CONGALTON, R.G., GREEN, K., 2008. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, London, New York. <https://doi.org/10.1201/9781420055139>

DOS SANTOS SILVA, R. D., SEVERIANO, J. S., DE OLIVEIRA, D. A., MENDES, C. F., BARBOSA, V. V., CHIA, M. A., & DE LUCENA BARBOSA, J. E. (2020). Spatio-temporal variation of cyanobacteria and cyanotoxins in public supply reservoirs of the semi-arid region of Brazil. *Journal of Limnology*, 79(1).

FEIO, M.J. S. DOLÉDEC, S.; GRAÇA M. A.S. Human disturbance affects the long-term spatial synchrony of freshwater invertebrate communities. *Environ.Pollut.*, 196, pp. 300-308, 2015.

GAO, Xiaofei *et al.* Invasive and toxic cyanobacteria regulate allochthonous resource use and community niche width of reservoir zooplankton. *Freshwater Biology*, v. 67, n. 8, p. 1344-1356, 2022.

GOMES, Wilma Izabelly Ananias *et al.* Functional attributes of Chironomidae for detecting anthropogenic impacts on reservoirs: a biomonitoring approach. *Ecological Indicators*, v. 93, p. 404-410, 2018.

HAVENS, Karl E. *et al.* Dynamics of cyanobacteria blooms are linked to the hydrology of shallow Florida lakes and provide insight into possible impacts of climate change. *Hydrobiologia*, v. 829, n. 1, p. 43-59, 2019.

HO, J. C., MICHALAK, A. M., & PAHLEVAN, N. (2019). Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 574(7780), 667-670.

MAMUN, M., KIM, J. Y., & AN, K. G. (2021). Multivariate statistical analysis of water quality and trophic state in an artificial dam reservoir. *Water*, 13(2), 186.

MENDES, C. F. *et al.* 2022. The reduction in water volume favors filamentous cyanobacteria and heterocyst production in semiarid tropical reservoirs without the influence of the N: P ratio. *Science of the Total Environment*, v. 816, p. 151584, 2022.

MOURA, A.N. *et al.* 2018. Cyanobacterial blooms in freshwater bodies from a semiarid region, Northeast Brazil: a review *J. Limnol.*, 77, pp. 179-188

PAERL, HANS W.; PAUL, VALERIE J. 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water research*, v. 46, n. 5, p. 1349-1363, 2012.

PENG, Xue *et al.* 2021. The changing characteristics of phytoplankton community and biomass in subtropical shallow lakes: Coupling effects of land use patterns and lake morphology. *Water Research*, v. 200, p. 117235, 2021.

REYNOLDS, C. S., 1993. Scales of disturbance and their role in plankton ecology. *Hydrobiologia* 249: 157–171.

SINHA, E., Michalak, A. M. 2016. Precipitation dominates interannual variability of riverine nitrogen loading across the continental United States. *Environmental Science & Technology*, 50(23), 12874–12884.

VANDERLEY, R. F. *et al.* 2021 Abiotic factors driving cyanobacterial biomass and composition under perennial bloom conditions in tropical latitudes. *Hydrobiologia*, v. 848, p. 943-960, 2021.

VAROL, M. (2020). Use of water quality index and multivariate statistical methods for the evaluation of water quality of a stream affected by multiple stressors: A case study. *Environmental Pollution*, 266, 115417.