

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CIANOBACTÉRIAS NA EFICIÊNCIA DA TÉCNICA *FLOC AND SINK* E POTENCIAL RISCO DE LISE CELULAR

Johann Max Lutz Araujo Schuster^{1*}; Gustavo de Oliveira Porto¹; Daniely de Lucena-Silva²;;
Amanda Myrna de Meneses e Costa¹; Juliana dos Santos Severiano¹; José Etham de Lucena
Barbosa¹;

¹*Departamento de Biologia, Universidade Estadual da Paraíba 351 Baraúnas, Bodocongó,
Campina Grande, 58429-500;*

²*Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia da Universidade Federal
de Campina Grande - UFCG, Sítio Olho d'água da Bica, Zona Rural, Cuité – PB, CEP: 58175-
000.*

*Email: johann.schuster@aluno.uepb.edu.br

1) Introdução

O aumento das atividades antrópicas e a rápida expansão socioeconômica têm comprometido progressivamente a qualidade dos corpos d'água (Akinnawo et al., 2023). Entre as principais consequências destaca-se a eutrofização, resultante do enriquecimento dos ambientes aquáticos por nutrientes, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P) (Suresh et al., 2023; Lazar et al., 2024). Esse fenômeno favorece o aumento da ocorrência de florações algais, em particular de cianobactérias, cujo crescimento excessivo representa um risco à biodiversidade e à saúde humana, uma vez que algumas espécies são capazes de produzir toxinas (Song et al., 2023).

Os efeitos das cianotoxinas sobre a saúde humana são amplamente documentados, abrangendo casos de gastroenterites, citotoxicidade, danos hepáticos e neurológicos (Ricciardelli et al., 2023; Li et al., 2023). Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias eficazes para o controle da eutrofização e, conseqüentemente, da ocorrência de florações algais tóxicas (Lüring & Mucci, 2020). A geoengenharia tem se mostrado uma ferramenta promissora no desenvolvimento de métodos voltados à redução da

biomassa de cianobactérias em ecossistemas aquáticos (Yin et al., 2020). Essa abordagem baseia-se na manipulação da disponibilidade de nutrientes, especialmente P, que é determinante no processo de eutrofização (Liu et al., 2024), seu controle é mais simples, pois não apresenta fase gasosa nem é fixados por determinadas espécies de cianobactérias, como o nitrogênio, tornando o fósforo o alvo prioritário nas estratégias de mitigação (Ayele et al., 2021).

Entre as alternativas empregadas para o controle da eutrofização, a técnica *Floc and Sink* tem se mostrado uma abordagem eficiente (Lüring & van Oosterhout, 2013; Lucena-Silva et al., 2019). A técnica consiste na aplicação conjunta de um coagulante e de um adsorvente de fósforo, que promovem a formação de flocos capazes de se depositar no sedimento, imobilizando o fósforo e reduzindo sua disponibilidade na coluna d'água (Mucci et al., 2020).

No entanto, espécies fitoplanctônicas que apresentam mecanismos adaptativos tendem a demonstrar maior resistência aos processos de remoção da coluna d'água (Miranda et al., 2017; Gonzalez-Torres et al., 2019). Características morfológicas — como aerótopos, mucilagem e morfologia filamentosa — dificultam a sedimentação e favorecem a permanência das cianobactérias na zona eufótica, influenciam negativamente não apenas a eficiência dos processos de floculação e sedimentação, durante o tratamento (Lucena-Silva et al., 2019). Em determinadas condições como variações de pH, sedimentação e estado de senescência das células, espécies potencialmente tóxicas, como *Microcystis aeruginosa* e *Raphidiopsis raciborskii*, podem sofrer lise celular (Miranda et al., 2017). A ruptura das membranas libera o conteúdo intracelular, incluindo pigmentos, nutrientes e, sobretudo, cianotoxinas, o que representa risco adicional de contaminação da água (Greenstein et al., 2023).

2) Objetivo Geral e Específicos

2.1) Objetivo Geral

Avaliar a influência das características morfológicas de cianobactérias potencialmente tóxicas na eficiência da técnica *Floc and Sink* em dois

reservatórios com dominância de espécie filamentosa ou colonial, considerando os efeitos dessas adaptações estruturais sobre a remoção de fósforo e clorofila e o risco de lise celular durante o tratamento através da avaliação da eficiência fotossintética do Fotossistema II.

2.2) Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência de remoção de fósforo total e ortofosfato;
- Avaliar a eficiência de remoção de clorofila-a, como indicador da redução da biomassa fitoplanctônica.
- Investigar as alterações na eficiência fotossintética do Fotossistema II (PSII) da comunidade fitoplanctônica após os diferentes tratamentos

3) Metodologia

3.1 Área de estudo e procedimentos de campo.

As amostras de água utilizadas neste estudo foram coletadas nos reservatórios Argemiro de Figueiredo (Acauã), que apresenta dominância de cianobactérias filamentosas, sendo as principais *Planktothrix agardii* e *Geitlerinema splendidum* (Costa et al.,2025). e Açude Cordeiro caracterizado pela dominância de cianobactérias coloniais, principalmente *Microcystis* sp e *Coelomorion tropicalis* (Costa et al.,2025). ambos localizados na bacia hidrográfica do rio Paraíba, no estado da Paraíba, Brasil. Segundo o Índice de Estado Trófico (IET), esses mananciais foram classificados como hipereutrófico com(67,20) e supereutrófico (71,9) respectivamente (Costa et al.,2025).

Para os ensaios de floculação-sedimentação em bancada, a água foi coletada com baldes, filtrada em rede de plâncton (68 µm) para remoção de organismos maiores, acondicionada em bombonas de 20 L e mantida sob condições controladas e transportadas ao laboratório.

3.2 Coagulante e Argila

Nos ensaios, foram utilizados dois materiais: o policloreto de alumínio (PAC) $[Aln(OH)mCl_{3n-m}, \rho = 1,36 \text{ kg L}^{-1}]$, empregado como coagulante e fornecido pela CAGEPA (Paraíba, Brasil), e a bentonita modificada com lantânio

(BML), utilizada como material adsorvente, disponibilizada pela empresa HydroScience (Rio Grande do Sul, Brasil).

3.3 Ensaios de floculação-sedimentação

Nos ensaios de floculação-sedimentação, utilizou-se o PAC como coagulante, padronizado a $1000 \text{ mg Al L}^{-1}$ e armazenado em frasco âmbar à temperatura ambiente. A BML foi empregada nas condições recomendadas para aplicação. Como unidades experimentais foram utilizadas provetas de vidro de 250 mL contendo água, submetidas, em triplicata, aos seguintes tratamentos: Controle, PAC, BML e PAC + BML. As concentrações testadas foram de 4, 8 e 16 mg Al L^{-1} para o PAC e 25, 50 e 100 mg L^{-1} para a BML. Após a adição dos materiais, as amostras foram homogeneizadas manualmente por 1 minuto e mantidas em repouso. Decorridas duas horas, retiraram-se alíquotas de 120 mL da camada superior da coluna d'água (a 5 cm da superfície) para análises de fósforo total (PT), fósforo reativo solúvel (PRS), clorofila-a e eficiência fotossintética do Fotossistema II.

3.4 Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas com amostras das unidades experimentais, mantidas à temperatura ambiente até o processamento. A concentração de clorofila-a e determinação de fotossistema II foi realizada com o analisador de fitoplâncton PHYTOPAM (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanha). Paralelamente, as análises de fósforo total (PT) e ortofosfato foram conduzidas conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023).

3.5 Análises estatísticas

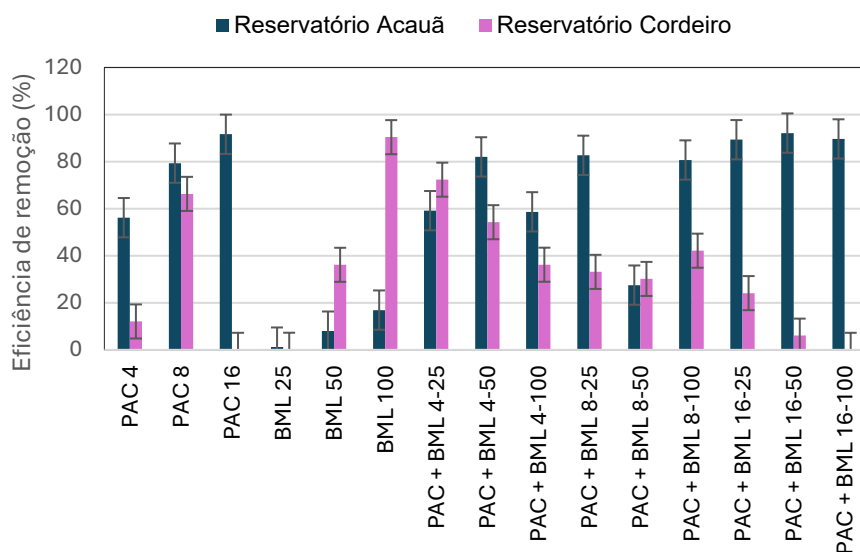
A normalidade e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Quando os pressupostos paramétricos foram atendidos, aplicou-se análise de variância (ANOVA) para avaliar diferenças nas eficiências de remoção de fósforo total (PT), ortofosfato e clorofila-a e determinação da eficiência fotossintética do Fotossistema II entre

tratamentos, dosagens e reservatórios, seguida do teste de Tukey. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025), adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

4) Resultados e Discussões

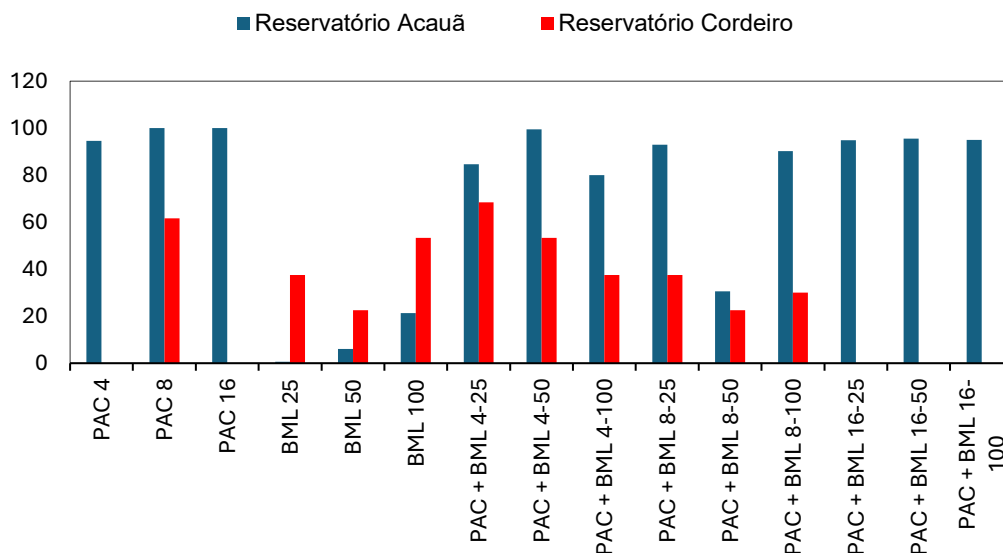
O presente estudo apresentou a eficiência do coagulante PAC na remoção de fósforo total (PT) e ortofosfato nas águas dos açudes Acauã e Cordeiro, apresentando resultados positivos em diferentes dosagens testadas. No açude Acauã, as dosagens de 8 e 16 mg Al L⁻¹ isoladas e combinadas apresentaram resultados positivos, destacando a remoção de até (92.1 ± 0,00%) de fósforo total na dosagem 16-50mg Al L⁻¹ de PAC combinado com a BML, o que demonstra a elevada capacidade de precipitação e adsorção do coagulante em condições locais favoráveis. Já no açude Cordeiro, a eficiência foi menor, com máximo de 66,67 ± 47,14% de remoção de fósforo total na dosagem de 8 mg Al L⁻¹ de PAC isolado e 4-25 mg Al L⁻¹ do PAC combinado com o BML, possivelmente em função das características químicas da água e da influência do pH sobre os mecanismos de coagulação e adsorção (Figura 1).

Figura 1. Eficiência de remoção (%) de fósforo total do policloreto de alumínio/PAC, bentonita modificada com lantânio/BML e PAC+BML, os números utilizados nos tratamentos representam 4-8-16 mg Al L⁻¹ PAC; 5-25-50 mg Al L⁻¹ PAC BML.



Semelhantes aos dados de fósforo total, a utilização do PAC no açude Acauã teve números expressivos em todas as dosagens, com a eficiência de remoção de ortofosfato ($100 \pm 0,00\%$) na dosagem de 16 mg Al L^{-1} , isolado ou combinado com o BML. Melhores resultados foram observados no açude Cordeiro em dosagens específicas como de $4-25 \text{ mg Al L}^{-1}$ (Figura 2). Os tratamentos com BML isolado apresentaram menores números em ambos os reservatórios, chegando a menos de 5% de eficiência na dosagem 25 mg Al L^{-1} no açude de Acauã. Estudos relatam que a BML apresenta maior eficiência de remoção na faixa de PH entre 7 e 8, uma vez que o lantânio (La^{3+}) permanece disponível em sua forma livre e pode reagir diretamente com o fosfato (Lucena-Silva et al., 2019).

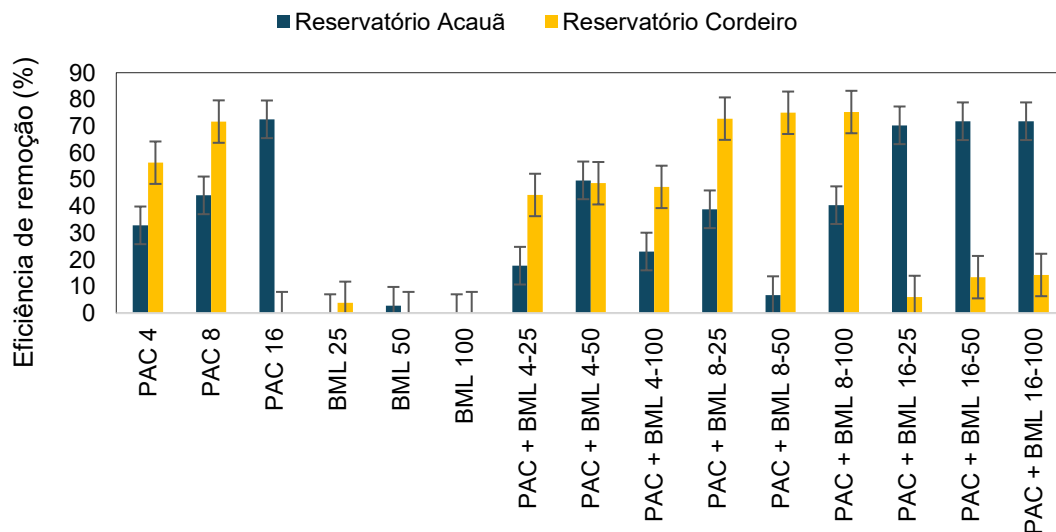
Figura 2. Eficiência de remoção (%) de Ortofosfato do policloreto de alumínio/PAC, bentonita modificada com lantânio/BML e PAC+BML, os números utilizados nos tratamentos representam as dosagens. $4-8-16 \text{ mg Al L}^{-1}$ PAC ; $5-25-50 \text{ mg Al L}^{-1}$ PAC BML.



Na eficiência de remoção da clorofila, o açude Cordeiro apresentou melhores resultados em dosagens menores ou intermediárias, chegando à $75,27 \pm \%$ de remoção na dosagem de 8 mg Al L^{-1} . Em contraste, os resultados obtidos

para Acauã, com as mesmas dosagens, apresentaram valores inferiores, como $7,18 \pm 7,76 \%$ na dosagem $8-50 \text{ mg Al L}^{-1}$. No entanto, nos tratamentos com PAC nas dosagens de 16 mg Al L^{-1} , seja ela isolada ou combinada, a eficiência aumentou para $72,55 \pm \%$ (Figura 3). Essa diferença pode estar associada à dominância de espécies de cianobactérias filamentosas no sistema Acauã, as quais apresentam aerótopos, estruturas que podem interferir no processo de sedimentação envolvido na técnica *Floc and Sink* (Lucena-Silva et al., 2019).

Figura 3. Eficiência de remoção (%) de Ortofosfato do policloreto de alumínio/PAC, bentonita modificada com lantânio/BML e PAC+BML, os números utilizados nos tratamentos representam as dosagens. 4-8-16 mg Al L^{-1} PAC ; 5-25-50 mg Al L^{-1} PAC BML.

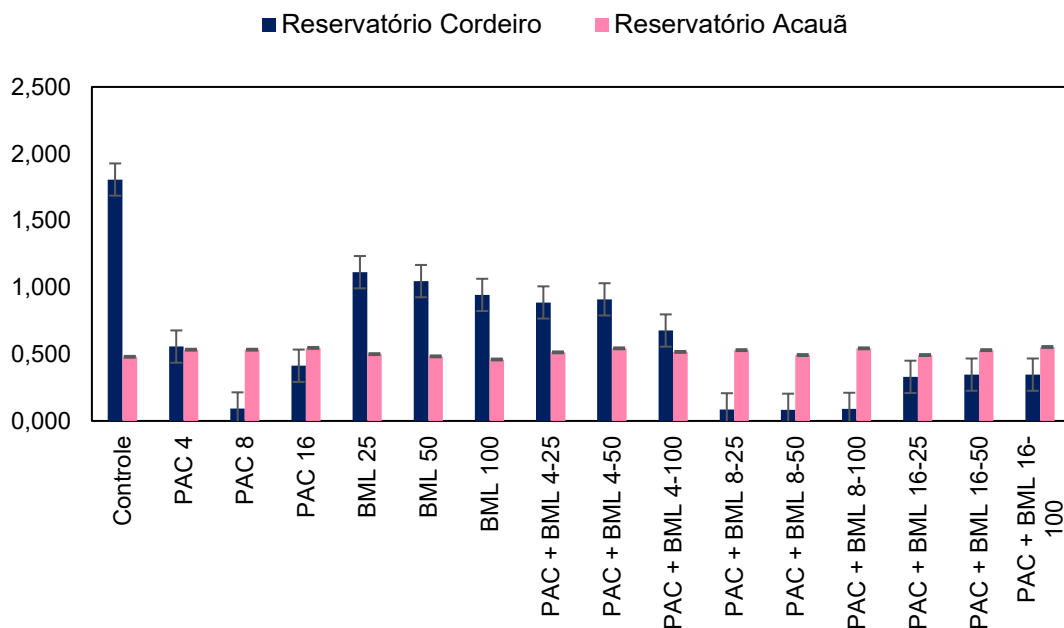


Na eficiência fotossintética do Fotosistema II (PSII), os resultados obtidos para o açude Acauã apresentaram baixa variação, com valores entre 0,46 e 0,55, semelhantes aos observados no tratamento controle. Em contraste, o açude Cordeiro apresentou maior atividade fotossintética no controle, seguida de reduções expressivas após a aplicação das dosagens de 8 mg Al L^{-1} e 16 mg Al L^{-1} , atingindo valores mínimos de $0,08 \pm 0,09$ (Figura 4).

De acordo com Schreiber (2004) e Franklin e Forster (1997), valores de PSII entre 0,65 e 0,85 indicam organismos fotossinteticamente saudáveis, enquanto valores inferiores a 0,5 refletem estresse fisiológico, e valores abaixo

de 0,3 correspondem a danos irreversíveis ou morte celular. Dessa forma, os resultados sugerem que, embora ambos os reservatórios tenham apresentado sinais de estresse fisiológico, o efeito foi mais pronunciado em Cordeiro, onde os valores extremamente baixos de PSII indicam ocorrência de morte celular. Essa resposta pode estar associada à maior sensibilidade das cianobactérias coloniais presentes nesse reservatório às perturbações físico-químicas promovidas pelos coagulantes e argilas. Além disso, a possibilidade de lise celular em espécies como *Microcystis aeruginosa* representa um risco adicional, pois pode resultar na liberação de cianotoxinas no ambiente aquático, comprometendo a qualidade da água (Miranda et al., 2017).

Figura 4. Média do PSII do policloreto de alumínio/PAC, bentonita modificada com lantânio/BMLPAC+BML, os números utilizados nos tratamentos representam as dosagens. 4-8-16 mg Al L⁻¹ PAC ; 5-25-50 mg Al L⁻¹ PAC BML.



3) Referências

AKINNAWO, O. *et al.* Effects of polyaluminum chloride and lanthanum-modified

bentonite on the growth rates of three *Cylindrospermopsis raciborskii* strains. **Natal, Rio Grande do Norte**, 2018.

AYELE, H. S. *et al.* Review of characterization, factors, impacts, and solutions of lake eutrophication: lesson for lake Tana, **Ethiopia**, 2021.

COPETTI, D. *et al.* Eutrophication management in surface waters using lanthanum modified bentonite: a review. **Water Research**, v. 97, p. 162–174, 15 jun. 2016.

COSTA, A. M. M. Modelando As Eficiências De Remoção De Fósforo E Clorofila-A Em Águas De Reservatórios Do Semiárido Pela Técnica *Floc And Sink*, 2025.

FRANKLIN, L. A.; FORSTER, R. M. The changing irradiance environment: consequences for marine macrophyte physiology, productivity and ecology. **European Journal of Phycology**, v. 32, n. 3, p. 207–232, 1997.

GREENSTEIN, K. E. *et al.* Comparative assessment of physical and chemical cyanobacteria cell lysis methods for total microcystin-LR analysis. **Toxins**, v. 13, n. 9, p. 596, 2021.

LI, Z. *et al.* Recent advances in cyanotoxin synthesis and applications: a comprehensive review. **Microorganisms**, v. 11, n. 11, p. 2636, 2023.

LIU, X. *et al.* Management of eutrophication using combined the “flock & sink” mitigation technique and submerged plants restoration: a mesocosm study, 2024.

LUCENA-SILVA, *et al.* Removal efficiency of phosphorus, cyanobacteria and cyanotoxins by the “flock & sink” mitigation technique in semi-arid eutrophic waters, 2019.

LÜRLING, M. *et al.* Removal of positively buoyant *Planktothrix rubescens* in lake restoration. **Toxins**, v. 12, p. 700, 2020.

MIRANDA, M. *et al.* The efficiency of combined coagulant and ballast to remove harmful cyanobacterial blooms in a tropical shallow system. **Ecological Engineering**, v. 120, p. 126–133, 2018.

MUCCI, M. *et al.* Lanthanum modified bentonite behaviour and efficiency in adsorbing phosphate in saline waters. **Chemosphere**, v. 249, p. 126131, 2020.

RICCIARDELLI, A. *et al.* Harmful and beneficial properties of cyanotoxins: two sides of the same coin. **Biotechnology Advances**, v. 68, p. 108235, 2023.

SCHREIBER, U. Pulse-Amplitude-Modulated (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview. **Photosynthesis Research**, v. 79, n. 3, p. 209–231, 2004.

SURESH, K. *et al.* Recent advancement in water quality indicators for eutrophication in global freshwater lakes. **Environmental Research Letters**, v. 18, p. 063004, 2023.

YIN, H. *et al.* Use of lanthanum/aluminum co-modified granulated attapulgite clay as a novel phosphorus (P) sorbent to immobilize P and stabilize surface sediment in shallow eutrophic lakes, 2020.