



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**

**CAMPUS I**

**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E SAÚDE**

**DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**

**CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**MARIA EDUARDA DANTAS CÉSAR**

**DINÂMICA DA CIANOBACTÉRIA *Raphidiopsis raciborskii* E DA CIANOTOXINA  
SAXITOXINA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**CAMPINA GRANDE  
2023**

MARIA EDUARDA DANTAS CÉSAR

**DINÂMICA DA CIANOBACTÉRIA *Raphidiopsis raciborskii* E DA CIANOTOXINA  
SAXITOXINA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharelado em Ciências Biológicas.

**Área de concentração:** Ecologia e Limnologia.

**Orientadora:** Dra. Juliana dos Santos Severiano

**Coorientadora:** MSc. Tatiane Medeiros Queiroz

**CAMPINA GRANDE  
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

C421d Cesar, Maria Eduarda Dantas.  
Dinâmica da cianobactéria *Raphidiopsis raciborskii* e da cianotoxina saxitoxina em reservatórios do semiárido brasileiro [manuscrito] / Maria Eduarda Dantas Cesar. - 2023.  
44 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2023.

"Orientação : Profa. Dra. Juliana dos Santos Severiano, Coordenação de Curso de Biologia - CCBS. "

"Coorientação: Profa. Ma. Tatiane Medeiros Queiroz , Coordenação de Curso de Biologia - CCBS."

1. Eutrofização. 2. Florações de cianobactérias. 3. Neurotoxinas. 4. Mudanças climáticas. I. Título

21. ed. CDD 570

MARIA EDUARDA DANTAS CÉSAR

**DINÂMICA DA CIANOBACTÉRIA *Raphidiopsis raciborskii* E DA CIANOTOXINA  
SAXITOXINA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Ecologia e Limnologia.

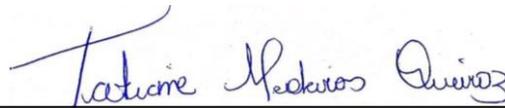
Aprovada em: 27/11/2023.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Juliana dos Santos Severiano (Orientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

MSc. Tatiane Medeiros Queiroz (Coorientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

MSc. Emmanuely da Silva Oliveira (Examinadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Dr. José Etham de Lucena Barbosa (Examinador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus por ter guiado os meus caminhos e ter me dado forças para chegar até aqui e aos meus pais por todo suporte, amor e cuidado,**DEDICO.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado até aqui, por ter sido a minha força durante todos esses anos e, na ausência da minha família quando a saudade batia mais forte, ter mostrado que todo esforço valeria a pena. Desde antes mesmo em escolher Ciências Biológicas, Deus me colocou em um processo, o qual por mais doloroso que tenha sido, me permitiu aproximar e conhecer a Deus completamente, mostrando que quanto maior o processo, melhor seria o propósito. Tive muitas experiências com Deus durante toda a graduação e hoje agradeço a ele pela dádiva da vida, por me proteger e guiar os meus caminhos. Por ter me ensinado que nada é impossível, que perante qualquer dificuldade quem acredita no seu agir encontra o caminho para tudo superar.

Aos meus pais Joana e Francineudo, quero dizer que finalizo um dos momentos mais importante da minha vida, ao qual cumpro mais uma etapa, e eu tenho muito a agradecer a vocês, que me incentivaram nos estudos, preparando o meu caminho para que esse dia chegasse, pela educação e por não ter medido esforços para me proporcionar o melhor durante todos esses anos. Aos meus irmãos Vitória e Wesley, vocês são tudo de melhor que tenho, são os melhores presentes que nossos pais poderia ter me dado, ao qual não trocaria por nada. Sempre estiveram do meu lado e foi graça ao incentivo de vocês que consegui forças para chegar até aqui, dedico esta formação a vocês, minha família, pois sem vocês nada disso seria possível, eu amo vocês. E a minha irmãzinha do coração Rayssa amo você, minha princesa.

Às minhas madrinhas, de modo especial a Maria do Socorro que foi uma segunda mãe, sempre preocupada comigo e disposta a me ajudar, é essencial na minha vida. A Naiane, por ser esse exemplo de força, coragem e determinação. A madrinha Corra, pelo seu jeito generoso e a sua força.

Às minhas companheiras de moradia, Mayara e Kelly, que são mais do que amigas e sim irmãs, parceiras e fortaleza. Vocês foram essenciais durante todo esse processo, por compartilhar todos os momentos comigo e serem presentes de Deus na minha vida. Não poderia deixar de demonstrar minha gratidão a vocês. Escolher está do lado de pessoas que lhe aproxima de Deus, que te incentive e tenha comunhão com o Senhor faz toda a diferença. Nosso lar era mais que uma simples casa, mas sim um lugar de adoração ao Senhor, até mesmo nos momentos difíceis, Deus nos confortava. Ao meu amigo Eduardo, obrigada pelo privilégio de tê-lo como amigo e apoiador, sua amizade é muito valiosa para mim.

À todos os meus amigos da igreja, pessoas essas que muitas vezes preencheram um vazio dentro de mim quando sentia falta do meu lar e se tornaram uma segunda família para mim, o carinho de vocês foram essenciais. Em especial, a Suelânia e Vinicius, por ter sido pais para mim, apoiadores e conselheiros, Amo vocês e sou grata por todos os momentos incríveis que me proporcionaram, vocês são a prova do amor de Deus na minha vida.

A Samuel, o parceiro que Deus colocou em minha vida, mesmo participando de poucos momentos da minha trajetória acadêmica, foi um incentivador e apoiador, suas palavras de força e ânimo fizeram total diferença, obrigada por acreditar em mim e por suas orações.

As minhas colegas do curso, Suelen, Laissa e Quênia, que também foram uma rede de apoio. Muito obrigada pelos quatro anos de convivência, por terem me aturado em todos os momentos kkkk. Vocês são excepcionais.

A Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), pela oportunidade do curso, que abriram portas para realização da minha tão sonhada formatura, e a todos os professores que transferiram seus conhecimentos. Ao laboratório de Ecologia Aquática (Leaq) ao qual se tornou parte da minha vida, pelo apoio e por ter me mostrado um novo mundo, a todos que de alguma forma me ajudaram e me orientaram as análises, em especial Rani, Camila e Patrícia.

À Tatiane Medeiros por todo o suporte que me foi dado durante todo esse tempo, grata pelo apoio, pelos conselhos e por ter me mostrado que sempre poderia melhorar. Você é um exemplo de força, determinação e coragem, sua história me ensinou que não importa os desafios, quando estamos dispostos a lutar nossos sonhos, valerá a pena.

Ao professor Etham, por ter me confiado o estágio e pela disponibilidade da bolsa. Alguém simples, sempre disposto a receber os estudantes com carinho, mostrando que o laboratório não é só um lugar de estudar e analisar, mais também de se familiarizar e se divertir. E não poderia deixar de externar meus sinceros agradecimentos a minha orientadora Juliana Severiano, pela confiança e pelo compartilhamento das suas experiências, orientações e incentivos em busca de melhorias.

## RESUMO

As florações de cianobactérias nos ambientes aquáticos vêm sendo relatadas como consequências das mudanças climáticas e da eutrofização, afetando todo o ecossistema aquático. Além disso, algumas espécies de cianobactérias são produtoras de cianotoxinas, como *Raphidiopsis raciborskii*, sendo produtora de saxitoxinas (STXs), podendo causar sérios riscos à saúde pública. Com isso, o objetivo deste trabalho é investigar a variabilidade espacial e temporal da biomassa de *R. raciborskii* e identificar fatores ambientais que influenciam a sua dominância e produção de saxitoxina em reservatórios de abastecimento público da região semiárida tropical. As seguintes hipóteses foram testadas: a) Os maiores valores de biomassa de *R. raciborskii* e produção de saxitoxina ocorrem durante a estação seca e na superfície da região da barragem; b) As variáveis ambientais que explicam a biomassa de *R. raciborskii* são as mesmas que explicam a STXs. O estudo foi realizado em quatro reservatórios do estado da Paraíba, na estação chuvosa e seca, em três zonas (Lêntica, transição e lótica) e em três profundidades (superfície, limite ZE e fundo), nos períodos de chuva e seca, nos meses de maio e novembro de 2022, respectivamente. Foram coletados parâmetros físico-químicos e amostras para análises de cianobactérias e cianotoxinas. Análises de Regressão Linear Múltipla foram realizadas para identificar os fatores ambientais que influenciaram as biomassas de *R. raciborskii* e produção de SXTs, e uma análise de regressão linear simples para verificar a relação entre biomassa de *R. raciborskii* e SXTs, também foi realizado um Modelo linear generalizado (glm) e uma PERMANOVA para observar as diferenças significativas em relação aos meses, zonas e profundidades entre os reservatórios. Nossos resultados mostraram que a biomassa da espécie foi maior na estação seca e na superfície da coluna d'água e a saxitoxina também mostrou ser influenciada pela seca e em águas superficiais. Além disso, observou-se a diferença significativa das variáveis entre os meses nos reservatórios, *R. raciborskii* foi favorecida nos reservatórios pela turbidez, temperatura, precipitação e nitrato (N-NO<sub>3</sub>), enquanto as STXs apresentaram relação com a temperatura da água, nitrato e pH. Diante disso, concluímos que o estudo pode auxiliar no contínuo monitoramento desses reservatórios e na mitigação das florações de *R. raciborskii* e a produção de saxitoxinas, visto que podem causar sérios riscos à saúde pública.

**Palavras-Chave:** Eutrofização; Florações de cianobactérias; Mudanças Climáticas; Neurotoxinas.

## ABSTRACT

Cyanobacteria blooms in aquatic environments have been reported as consequences of climate change and eutrophication, affecting the entire aquatic ecosystem. Furthermore, some species of cyanobacteria are producers of cyanotoxins, such as *Raphidiopsis raciborskii*, which produces saxitoxins (STXs), which can cause serious risks to public health. Therefore, the objective of this work is to investigate the spatial and temporal variability of *R. raciborskii* biomass and identify environmental factors that influence its dominance and saxitoxin production in public supply reservoirs in the tropical semi-arid region. The following hypotheses were tested: a) The highest values of *R. raciborskii* biomass and saxitoxin production occur during the dry season and on the surface of the dam region; b) The environmental variables that explain the biomass of *R. raciborskii* are the same as those that explain STXs. The study was carried out in four reservoirs in the state of Paraíba, in the rainy and dry seasons, in three zones (Lentic, transition and lotic) and at three depths (surface, ZE limit and bottom), in the rainy and dry periods, in the months may and november 2022, respectively. Physicochemical parameters and samples were collected for analysis of cyanobacteria and cyanotoxins. Multiple Linear Regression Analyzes were performed to identify the environmental factors that influenced *R. raciborskii* biomass and SXTs production, and a simple linear regression analysis to verify the relationship between *R. raciborskii* biomass and SXTs, a Model was also performed generalized linear (glm) and a PERMANOVA to observe significant differences in relation to months, zones and depths between reservoirs. Our results showed that the biomass of the species was greater in the dry season and at the surface of the water column and saxitoxin was also shown to be influenced by drought and in surface waters. Furthermore, a significant difference in variables was observed between months in the reservoirs, *R. raciborskii* was favored in the reservoirs by turbidity, temperature, precipitation and nitrate (N-NO<sub>3</sub>), while STXs were related to water temperature, nitrate and pH. Therefore, we conclude that the study can help in the continuous monitoring of these reservoirs and in the mitigation of *R. raciborskii* blooms and the production of saxitoxins, as they can cause serious risks to public health.

**Keywords:** Eutrophication; Cyanobacteria blooms; Climate changes; Neurotoxins.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização dos reservatórios Poções (A), Camalaú (B), Boqueirão (C) e Acauã(D), na bacia do Rio Paraíba do Norte, Paraíba, região Nordeste do Brasil.....20
- Figura 2.** Volume hídrico, precipitação pluviométrica média mensal entre janeiro a dezembro de 2022 nos reservatórios, Poções (A), Camalaú (B), Boqueirão (C) e Acauã (D), Paraíba. A Seta em laranja representa o período amostral.....25
- Figura 3.** Biomassa de *R. raciborskii* e a relação com a saxitoxina nos reservatórios Poções seca (A) e (B), Camalaú (C) e (D), Boqueirão (E) e (F) e Acauã (G) e (H), Paraíba. O sol representado no gráfico refere-se ao período de seca e a nuvem ao período de chuva.....28
- Figura 4.** Regressão linear simples para observar a relação entre a biomassa de *R. raciborskii*.....29

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Reservatório, cidade, coordenadas geográficas, zona climática, volume máximo, profundidade máxima e ano de construção dos reservatórios estudados no estado da Paraíba, Nordeste do Brasil. ....  | 21 |
| <b>Tabela 2.</b> Resultados PERMANOVA que mostra se houve diferença significativa das variáveis entre os meses, profundidades e zona sobre as variáveis físicas e químicas para os reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã, Paraíba- Brasil. ....   | 26 |
| <b>Tabela 3.</b> Regressão Linear Múltipla que explica a influência de fatores físicos e químicos sobre a biomassa <i>Raphidiopsis raciborskii</i> e saxitoxina nos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã. Todos os modelos foram significativos, considerando *(menor que 0,05%), ** (menor que 0,01%) e *** (menor que 0,001%). Turb: Turbidez, Prec: Precipitação, Temp: Temperatura da água, N-N03: Nitrato. .... | 30 |

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 11 |
| 2     | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 14 |
| 2.1   | <b>Cianobactérias e a formação de florações</b> .....  | 17 |
| 2.2   | <b>Região semiárida brasileira e a dominância das cianobactérias</b> .....   | 18 |
| 2.3   | <b>Origem e expansão das florações de <i>Raphidiopsis raciborskii</i></b> .....  | 19 |
| 2.4   | <b>Toxinas</b> .....   | 20 |
| 2.4.1 | <b>Saxitoxinas</b> .....   | 20 |
| 3     | <b>METODOLOGIA</b> .....   | 20 |
| 3.1   | <b>Área de estudo</b> .....  | 23 |
| 3.2   | <b>Amostragem e coleta de dados</b> .....  | 21 |
| 3.3   | <b>Variáveis físicas e químicas</b> .....  | 21 |
| 3.4   | <b>Análise quali-quantitativa do fitoplâncton e das cianobactérias</b> .....   | 22 |
| 3.5   | <b>Saxitoxina</b> .....  | 22 |
| 3.6   | <b>Análises estatísticas</b> .....   | 22 |
| 4     | <b>RESULTADOS</b> .....  | 23 |
| 4.1   | <b>Variáveis quali-quantitativa do fitoplâncton e das cianobactérias</b> .....   | 27 |
| 4.2   | <b>Florações de <i>R.raciborskii</i> e a produção de saxitoxina</b> .....  | 29 |
| 4.3   | <b>Fatores determinantes para a biomassa de <i>R. raciborskii</i> e a concentração de saxitoxina</b><br>.....  | 29 |
| 5     | <b>DISCUSSÕES</b> .....  | 31 |
| 6     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 34 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 38 |
|       | <b>APÊNDICE A- Características físico-química, biomassa de <i>R. raciborskii</i> e concentração de saxitoxina na zona lântica (Lên), transição (Tran) e lótica (Lót) na seca e chuva nos reservatório de Poções, Camaláu, Boqueirão e Poções Paraíba-Brasil. Temp, temperatura da água; DO, oxigênio dissolvido; CE, condutividade elétrica; pH, pH; TDS, sólidos totais dissolvidos; Turb, turbidez; N-NO<sub>3</sub>, nitrato; N-NO<sub>2</sub>, nitrito; N-NH<sub>4</sub>, amônia; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; PRS, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total</b> ..... | 45 |
|       | <b>APÊNDICE B- Biomassa (mg L<sup>-1</sup>) de fitoplâncton, outras cianobactérias e <i>R. raciborskii</i></b> .....   | 47 |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação de florações de cianobactérias vem sendo relatadas como consequências das mudanças climáticas e do processo de eutrofização (Barros et al., 2019; Yan et al., 2022). As florações de cianobactérias causam grandes consequências aos ecossistemas aquáticos, pois provocam alterações nas características da água como cor, odor e sabor, causando a diminuição da transparência da água, dificultando a penetração da luz na coluna d'água, provoca alterações nas cadeias alimentares e inviabiliza os serviços ecossistêmicos, como por exemplo, o abastecimento de água para o consumo (Lurling et al., 2020). Além disso, muitas espécies de cianobactérias são produtoras de cianotoxinas, as quais podem causar sérios riscos à saúde de humanos e de outros animais, podendo levar até a morte (Carmichael e Boyer, 2016; Veermam et al., 2022).

De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), a temperatura global aumentará cerca de 1,5 °C no planeta entre os anos de 2030 e 2052, e com maiores frequências de eventos extremos de seca, tempestades e oscilações no El Niño Sul (ENSO) até o final deste século, em consequência do aumento das atividades antrópicas e mudanças climáticas (Paerl et al., 2020). As zonas áridas e semiáridas são mais suscetíveis à essas alterações (IPCC, 2013), devido as condições de longos períodos de estiagem e altas taxas de evaporação, o que pode levar a mudanças no nível e no tempo de retenção das águas (Barbosa et al., 2012), favorecendo as frequentes florações de cianobactérias em reservatórios de abastecimento público da região semiárida tropical (Carey et al., 2012; O'Neil et al., 2012).

Os reservatórios são sistemas construídos para armazenar as águas dos rios nos períodos chuvosos a fim de controlar a seca nas regiões, formados por meio de barragens instaladas os cursos d'água, sendo importantes fontes de água potável (Barbosa et al., 2012). Esses corpos d'água apresentam características diferentes que baseia-se em uma região de transição que muda de região lótica para lêntica, implicando em alterações nas condições físicas e químicas e biológicas da água, que também estão associados aos eventos climatológicos (Becker et al., 2008; Batista e Giani et al., 2019). As zonas lóticas dos reservatórios são caracterizadas por tempos de retenção hidráulica mais curtos, entradas de nutrientes em grande quantidade, menor profundidade da coluna de água, baixa disponibilidade de luz e maior fluxo de água que, conseqüentemente, causa maior turbulência da água (Devercelli e O'Farrell, 2013; Ouyang et al., 2021), podendo limitar o crescimento de cianobactéria (Dai et al., 2013). Já nas zonas lênticas, é o oposto, e ainda podem apresentar maiores concentrações de nutrientes, visto que

nessas zonas a turbulência é menor, o que pode favorecer o crescimento de cianobactérias (Rangel et al., 2016). Ademais, as cianobactérias são mais frequentes em ambientes aquáticos não turbulentos, pois essas espécies contêm vesículas de gás que auxilia na sua flutuabilidade e migração na coluna de água em direção à superfície e luz, ou afundar em águas mais profundas para atender a demanda por nutrientes, caso seja necessário (Vardaka et al., 2008; Casali et al., 2017).

A espécie diazotrófica *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) Aguilera, Berrendero Gómez, Kastovsky, Echenique & Salerno (anteriormente conhecida como *Cylindrospermopsis raciborskii*) Aguilera et al. 2018, é dominante nos reservatórios da região Nordeste e sua ampla distribuição geográfica vem sendo associada aos efeitos combinados das mudanças climáticas e eutrofização (Burford et al. 2016; Tan, Fengjiao et al., 2021). Essa espécie é de origem em regiões tropicais e subtropicais que se expandiu para as regiões temperadas, nos ecossistemas de água doce é formadora de florações potencialmente tóxicas, principalmente, nas regiões semiáridas, onde formam florações perenes (Antunes et al., 2015; Aguilera et al., 2018). Além disso, *R. raciborskii* apresenta características ecofisiológicas que garante seu sucesso competitivo sobre outras espécies, como a presença de acinetos, heterócitos (O’neil et al. 2012; Ramos et al., 2021), apresenta alta plasticidade fenotípica conseguindo sobreviver em uma ampla faixa de luz (Bonilla et al., 2012), tolerância a condições de limitação de N e altas concentrações de fósforo (Soares et al., 2013), temperaturas baixas como 14 -17°C (Piccini et al., 2011) e ótimas taxas de crescimento entre 29 e 31 °C (Dokulil, 2016), salinidade (até 8,4) e pH alcalino (8 e 9) (Vilar e Molica, 2020) .

As concentrações de STXs em reservatórios de abastecimento público na região semiárida do Brasil, geralmente, tem sido relacionada a ocorrência da cianobactéria *R. raciborskii* (Silva et al., 2020). As STXs é uma neurotoxina paralisante de moluscos (PST) (Bittencourt - Oliveira et al., 2010; Bittencourt- Oliveira et al., 2014), sendo agrupada em 57 alcaloides neurotóxicos (Wiese et al., 2010). A toxicidade por STXs é mediada pela inibição da condução nervosa que bloqueiam os canais neuronais de sódio, podendo causar formigamentos, dormência e até a morte por insuficiência respiratória (Wiese et al., 2010; Casali et al., 2017, Buratti et al., 2017). A ingestão de STXs por seres humanos ocorre, geralmente, pela exposição aguda a altas quantidades, através da ingestão de água contaminada (Pearson et al., 2010).

As STXs são frequentemente detectadas em reservatórios de abastecimento público na região semiárida brasileira, com grande dominância em ambientes eutróficos e hipertróficos (Silva et al., 2020) e em períodos secos (Lima et al., 2020). Estudos vêm mostrando os fatores ambientais que podem estar associados as concentrações de STXs, como temperaturas elevadas

(25-30<sup>0</sup>C) e pH (Castro et al., 2004; Rangel et al., 2016), relação de N:P (Barros et al., 2019) e baixa disponibilidade de P pode sustentar a produção de STXs (Moraes et al., 2021), a turbidez da água (Moraes et al., 2021) e alta salinidade e alcalinidade da água (Bowling & Baker, 1996) e pH (9) (Pomati et al., 2004).

Estudos que abordem a compreensão da dinâmica de *R. raciborskii* por região, profundidade e períodos é importante para entender a ecologia da espécie e os fatores ambientais que regulam seu crescimento e produção de toxina. Para que assim seja possível entender os locais e condições que leva a maior produção de biomassa e produção de toxina, auxiliando na criação de planos de manejo, a fim de diminuir o risco de exposição da toxina pela população que consome água dos reservatórios de abastimento público da região semiárida. Diante disso, o objetivo deste estudo é investigar a variação espaço-temporal da biomassa de *Raphidiopsis raciborskii* e identificar fatores ambientais que influenciam a sua dominância e produção de saxitoxina em reservatórios de abastecimento público da região semiárida tropical. As seguintes hipóteses foram testadas: a) Os maiores valores de biomassa de *R. raciborskii* e produção de saxitoxina ocorrem durante a estação seca e na superfície da região da barragem; b) As variáveis ambientais que explicam a biomassa de *R. raciborskii* são as mesmas que explicam as concentrações de STXs.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Cianobactérias e a formação de florações**

As cianobactérias são consideradas o grupo de bactérias mais antigo, sua origem é estimada em cerca de 3,5 bilhões de anos (Huisman et al., 2018; Christensen e Khan, 2020), sendo provavelmente as primeiras espécies a liberarem oxigênio elementar na atmosfera primitiva (Sanchez-Baracaldo e Cardona, 2020). Essas espécies são abundantemente distribuídas nos mais diversos ambientes aquáticos, devido a sua capacidade de crescer em diferentes meios, costumando habitar principalmente ambientes de água doce, como lagos, rios e reservatórios, apresentando uma morfologia muito diversificada e sendo encontradas em formas de bastonetes, colônias e filamentos espirais (Demoulin et al., 2019; Mehdizadeh et al., 2022).

As cianobactérias exercem um importante papel evolutivo da vida e da terra, nos primeiros fluxos biogeoquímicos (Demoulin et al., 2019), como também no funcionamento do ecossistema, sendo parte importante da cadeia alimentar, fornecendo alimentos para os plactôres, além de exercer papel na ciclagem de nutrientes, atuando também na manutenção da disponibilidade de nutrientes (Gradíssimo et al., 2020).

A eutrofização é um processo natural de enriquecimento de nutrientes, principalmente de nitrogênio (N) e fósforo (P) nos ambientes aquáticos de água doce, salgada e salobra, que é intensificado pelas atividades antrópicas como, entrada de efluentes domésticos e industriais e fertilizantes que são descarregados nos ambientes aquáticos (Sha et al., 2021; Xião et al., 2022). A eutrofização associada mudanças climáticas, como aumento da temperatura global e mudanças nos padrões de precipitação, favorece a proliferação de cianobactérias e formação de florações potencialmente tóxicas, principalmente, em reservatórios tropicais (Soares et al., 2013; Barros et al., 2019; Yan et al., 2022).

Essas florações são causadas por múltiplos fatores ocorrendo simultaneamente nos ambientes aquáticos e contribuindo para a sua expansão, como o aumento do aporte de nutrientes (O'neil et al., 2012; Huisman et al., 2018), aumento da temperatura das águas superficiais (Paerl e Huisman, 2008). Além disso, em águas lóxicas e lânticas a dominância e sucessão de florações de cianobactérias apresentam condições semelhantes como aumento de temperatura, luminosidade, aumento de nutrientes e turbidez, favorecendo sua proliferação (Giblin e Gerrish, 2020).

O sucesso das cianobactérias nos ambientes aquáticos deve-se às características ecofisiológicas que faz com que sejam excelentes competidoras sobre outros organismos

fitoplanctônicos, como: a presença de vesículas de gás, que possibilita a regulação na coluna d'água e permite a formação de florações na superfície, favorecendo a assimilação de luz e a aquisição de nutrientes em condições limitantes; podem apresentar mucilagem, que confere defesas químicas e físicas as células; presença de heterócitos, que atuam na fixação de nitrogênio; e de acinetos, que são células de resistência, que estocam de nutrientes para conseguir sobreviver quando às condições ambientais não são favoráveis (O'niel et al., 2012; Mantzouki et al., 2016; Moura et al., 2018; Peng et al., 2021).

A estrutura e a dinâmica das cianobactérias variam espacialmente ao longo da distribuição dos reservatórios, como sazonalmente (Zhang et al., 2015). As espécies conseguem coexistir ou co-dominar no mesmo corpo aquático mudando sazonalmente e essas mudanças são refletidas nas propriedades físicas, químicas e biológicas (Figueredo e Giani, 2009; Zhang et al., 2015), onde as alterações sazonais influenciam no turnover (substituição) dos organismos aquáticos (Pannard; Bormans; Lagadeuc, 2008; Yang et al., 2017; Amorim et al., 2021).

## **2.2 Região semiárida brasileira e a dominância das cianobactérias**

Os reservatórios são importantes fontes de armazenamento de água para o abastecimento público, dessedentação animal, agricultura, piscicultura, dentre outros (Freitas; Righetto; Attayde 2011; Tundisi, 2018). Esses ambientes apresentam níveis de distúrbios diferentes advindos de atividades antrópicas (Gomes et al., 2018), como a instalação de reservatórios artificiais, distúrbios químicos por meio da contaminação da água, lançamentos de efluentes não tratados como também ao tipo de clima associado ao aumento das temperaturas, esses distúrbios podem diferir no tempo de duração, afetando negativamente a comunidade aquática (Feio et al., 2015; Sinha e Michalak, 2016 ; Ho e Michalak, 2019).

Em período de chuva há um aumento no escoamento das águas da chuva, contribuindo para o carreamento de nutrientes com a entrada de efluente humano, excrementos de animais e fertilizantes (Mooji et al., 2006). É esperado uma maior diluição dos nutrientes, devido ao aumento do fluxo de água da chuva, contribuindo para a redução no biovolume do fitoplanctônico e das cianobactérias, indicando que a precipitação é importante para interromper as florações de cianobactérias ( Reynolds, 2006; Senerpont Domis et al., 2013). Já os eventos de seca, diminui o escoamento, eleva a turbidez, e aumenta o tempo de retenção da água e nutrientes, o que pode ocasionar aumento da abundância das cianobactérias e alguns recursos passam a se tornar limitantes, como a redução do nitrogênio via desnitrificação (David et al. 2006; Jeppesen et al., 2015; Brasil et al., 2016). Sendo assim, estudos sugerem que em

condições limitantes de nitrogênio favorecerá as espécies de cianobactérias capazes de fixar N, aumentando o biovolume e produção de heterócitos em condições de seca (Schindler et al. 2008; Brasil et al., 2016).

A região Nordeste do Brasil possui clima semiárido com estações chuvosas e secas bem definidas, no qual os padrões climáticos alteram a precipitação e o regime hidrológico, apresentando características típicas de bacias hidrográficas de regiões semiáridas, com aumento da biomassa e dominância de cianobactérias associados às condições mais rasas (Amorim et al., 2020), eutróficas e aumento da turbidez dos reservatórios (Dantas et al., 2011), associados ao aporte de nutrientes, a mistura na coluna d'água e pH alcalino, tornando vulneráveis às cianobactérias (Vasconcelos et al., 2011). A temperatura também é um fator essencial para a proliferação de cianobactérias, no qual a taxa de crescimento para algumas espécies do fitoplâncton varia em média a 20 °C, enquanto para as cianobactérias tendem a aumentar (Barros et al., 2019), se tornando uma vantagem competitiva sobre as demais espécies em condições climáticas adversas (Carey et al., 2012; O'neil et al., 2012; Huisman et al., 2018).

Nessa região tem sido cada vez mais comum a ocorrência de florações perenes (isto é, que ocorrem durante todo o ano) de cianobactérias como *Planktotrix* (Anagnostidis e Komárek 1988), *Raphidiopsis* (Fritsch e Rich 1929), *Microcystis* (Kützing, 1833), e *Dolichospermum* (Ralfs ex Bornert e Flahault) (Bittencourt-oliveira et al., 2014; Brasil et al., 2016; Vanderley et al., 2021). Esses gêneros são produtores de diferentes tipos de cianotoxinas (neurotoxinas e hepatotoxinas), fato esse preocupante, uma vez que essas toxinas são capazes de causar prejuízos à saúde ambiental e humana (Duong et al., 2014; Bittencourt-oliveira et al., 2014).

Além disso, nos reservatórios da região Nordeste, são frequentemente encontradas florações de cianobactérias perenes ou de longo prazo (Lins et al., 2016) sendo mais relatadas na coluna d'água ou em águas rasas (Bittencourt-Oliveira et al., 2011), onde é observado dominância das florações dos gêneros *Dolichospermum* sp. e *Microcystis* sp. em períodos quentes- chuvosos e *Cylindropermopsis* sp. durante períodos secos e com sistemas mistos (Soares et al., 2013). Um estudo de Lima et al. (2020) mostrou maiores concentrações de cianobactérias no período seco quando comparado com o período chuvoso, aumentando a dominância de cianobactérias filamentosas nos reservatórios (Lins et al., 2016). As florações de cianobactérias também são favorecidas nas zonas lânticas, visto que esses ambientes apresentam disponibilidade de luz, menor turbulência e diminuição da disponibilidade de nutrientes, permitindo a flutuabilidade das cianobactérias na coluna d'água (O'neil et al., 2012), enquanto que as zonas lólicas controlam o fluxo das espécies, devido ao aumento da turbidez e baixa disponibilidade de luz (Devercelli e O'Farrel, 2013).

A intensificação das florações de cianobactérias (Bittencourt-Oliveira et al., 2012), na região semiárida, qual apresentam longos períodos de estiagem e irregularidades pluviométricas, assim, as altas temperaturas (média ~ 27° C) (Barbosa et al., 2012), o baixo volume anual (~400mm) (Romo et al., 2013) e as altas taxas de evaporação contribuem para a redução no nível da água, provocando a estagnação da coluna de água e diminuição da transparência (Padisák et al., 2016), pH alcalino (>8), altas taxas luminosas e níveis de nutrientes elevados, favorecendo as florações de cianobactérias e alterando a dinâmica do fitoplâncton (Moura et al., 2018; Huismam et al., 2018; Amorim et al., 2020).

### **2.3 Origem e expansão das florações de *Raphidiopsis raciborskii***

A espécie diazotrófica filamentosa *R. raciborskii* (Woloszynska) Aguilera, Berrendero Gómez, Kastovsky, Echenique & Salerno (anteriormente conhecida como *Cylindrospermopsis raciborskii*) Aguilera et al. 2018, foi descrita primeiramente como *Anabaena raciborskii* por Woloszynska (1912) em uma amostra de Java (Burford et al, 2016). Os lagos africanos foram sugeridos como a origem geográfica da evolução de *R. raciborskii* (Padisák, 1999). A espécie cosmopolita é originalmente das regiões tropicais, mas nas últimas décadas a ocorrência aumentou em todo o mundo, incluindo as regiões temperadas (Antunes et al., 2015), o qual sua capacidade de dispersão garante sua proliferação em quase todos os continentes (Yang et al., 2018), habitando em reservatórios, lagos e rios em todo o mundo (Sinha et al., 2012).

A expansão de *R. raciborskii* é potencialmente preocupante uma vez que é descrita como produtora de cilindrospermopsina ou saxitoxina, sendo considerado um problema ambiental grave em ecossistemas de água doce, sendo as produtoras de SXTs relatadas apenas na América do Sul (Antunes et al., 2015). No Brasil, essa espécie é encontrada principalmente em reservatórios de abastecimento de água, com grande dominância em ambientes eutróficos e hipertróficos na região semiárida do Nordeste brasileiro e com presença frequente de STXs (Silva et al., 2020).

A proliferação de *R. raciborskii* tem sido associada à plasticidade fenotípica (Burford et al., 2016) e sua alta tolerância a uma ampla gama de condições ambientais (Bonilla et al., 2012). Estudos mostram que *R. raciborskii* é dispersa por toda a coluna d'água, tolerando amplas faixas de luz e adaptada às condições de pouca luz encontradas em águas turvas e eutróficas (Recknagel et al., 2014). Outros estudos mostram que o aumento da estratificação térmica diminui a disponibilidade de nutrientes, assim, favorecendo a migração vertical na coluna d'água e promovendo condições favoráveis para espécies flutuantes, como *R. raciborskii*, visto

que essa espécie apresenta aerótopos, que são vesículas de gás que auxiliam na flutuação (Antunes et al., 2015, Machado et al., 2018). *Raphidioopsis raciborskii* também pode ser dominante nas águas superficiais onde apresenta maiores taxas de luminosidade quando comparado com as águas do fundo com menos intensidade luminosa, favorecendo sua competição com outras espécies diazotróficas (Zhang et al., 2014; Antunes et al., 2015), além disso, estudos mostraram a presença da espécie em áreas mais próximas da barragem, visto que essa região apresenta características que promovem sua dominância, como disponibilidade de luz, diminuição da turbulência e limitação de nutrientes (Casali et al., 2017; Vargas et al., 2020; Moraes et al., 2021). Estudos também mostram a abundância em reservatórios brasileiros nas estações seca e chuvosa (Vicentin et al., 2018), onde houve um aumento das populações de *R. raciborskii* no período chuvoso, tornando condições favoráveis para o seu crescimento da espécie como menor intensidade luminosa e temperaturas mais amenas (Bittencourt-Oliveira et al. 2011). Porém, em outro mostra que maiores valores da biomassa de *R. raciborskii* foram verificadas durante a estação seca, visto que apresenta temperaturas mais altas durante esse período, favorecendo a formação de florações perenes da espécie (Casali et al., 2017).

## 2.4 Toxinas

A produção das cianotoxinas é utilizada pelas cianobactérias como um mecanismo de proteção contra predação ou inibição das espécies concorrentes, causando a redução do crescimento de outras espécies do fitoplâncton e diminuição da vegetação aquática submersa (Freitas et al., 2014), no qual se expande devido ao acúmulo de nutrientes, que apresenta uma taxa de crescimento maior nos ambientes aquáticos, assim, dificultando a entrada de luz na água e prejudicando a presença de outros organismos (Gradíssimo et al., 2020).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) informou que 59 % das cianobactérias na água são prejudiciais, o qual o contato direto ou indireto com toxinas pode levar a distúrbios gastrointestinais (Facey et al., 2019), erupções cutâneas, irritações na pele, ouvido e olhos, reações adversas respiratórias (Jiang et al., 2013), câncer e até mesmo levar a morte (Zhang et al., 2022). Um caso marcante de acidente com cianotoxinas ocorreu em 1996 em Caruaru, onde 130 pacientes renais crônicos, após sessões de hemodiálise, apresentaram um quadro grave de hepatotoxicose. Dentre esses, 60 pacientes morreram no período de 10 meses após os sintomas, o qual foram vistas a presença de cianotoxinas no sistema de purificação da água da clínica (Carmichael, 1996; Brasil, Ministério da Saúde, 2003). Assim, o incidente de Caruaru colocou em foco as barragens nas regiões semiáridas do Brasil, onde na região de barragem apresentaram condições climáticas potencialmente favoráveis ao crescimento e o domínio de

cianobactérias em águas lânticas.

#### **2.4.1 Saxitoxinas**

A presença de STXs foi relatada em fontes para abastecimento humano de água na região Nordeste do Brasil (Fonseca et al., 2015) podendo causar sérios riscos à saúde humana dependendo da sua concentração, sendo estabelecido que nos reservatórios para consumo humano, o valor máximo não pode ultrapassar  $3 \mu\text{g L}^{-1}$  (Fitzgerald et al., 1999; Brasil, 2017). Um estudo realizado na região Nordeste, mostrou que maiores concentrações de STXs nos reservatórios esteve relacionado com casos de microcefalia, o qual a STXs dobrou a quantidade de morte de células neurais induzida pelo ZIKV, causando anormalidades cerebrais na prole de camundongos infectados pelo vírus (Pedrosa et al., 2020).

As STX s também estão relacionadas com as condições ambientais, onde estudos expondo cepas produtoras de STXs expostas em diferentes temperaturas, mostraram que as maiores concentrações de STXs por unidade de biomassa ocorreram em temperaturas mais elevadas (Rangel et al., 2016). O primeiro relato da produção de STXs por *R. raciborskii* foi por Lagos et al. (1999). Estudo de Bittencourt- Oliveira et al. 2014 mostrou uma relação entre a biomassa de *R. raciborskii* e as concentrações de STXs na região nordeste.

### 3 METODOLOGIA

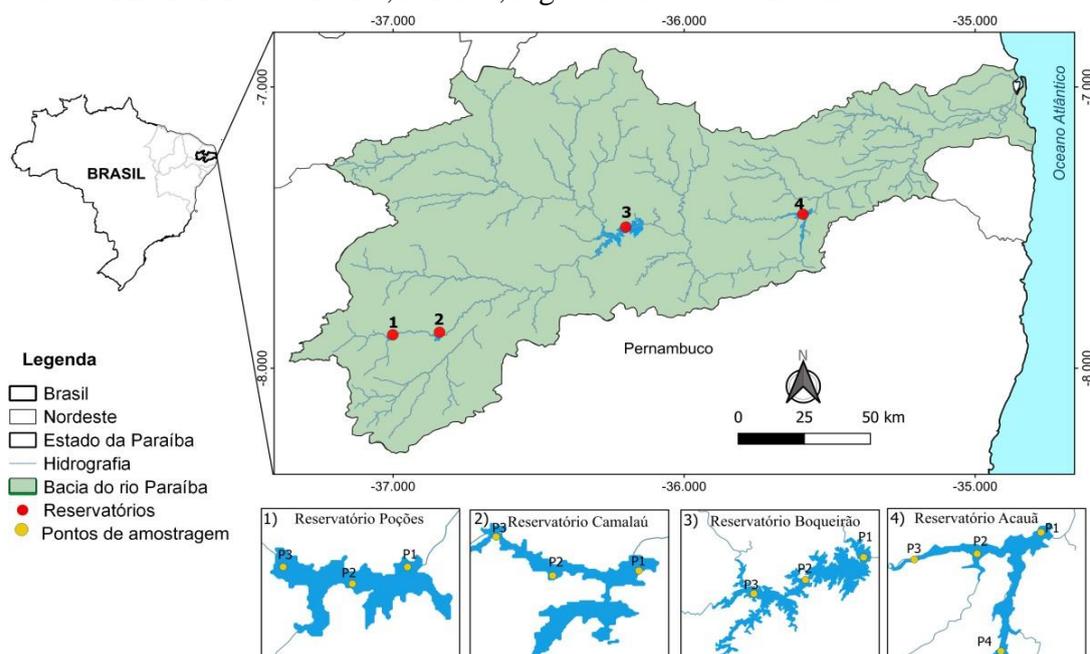
#### 3.1 Área de Estudo

Este estudo foi realizado nos reservatórios Epitácio Pessoa (popularmente conhecido como reservatório Boqueirão ( 7°28'9"S; 36°8'2"W), Poções (7°53'45"S; 37°0'50"W), Camalaú (7°53'10"S;36°49'25"W) e Argemiro de Figueiredo (popularmente conhecido como reservatório Acauã) (7°26'29"S; 35°33'39.24"W), localizados na bacia do rio Paraíba, Estado da Paraíba, Brasil. Tais sistemas são utilizados para o abastecimento público, recreação, irrigação, pesca e dessedentação de animais (AESAs, 2019).

A bacia hidrográfica do rio Paraíba é a segunda maior do estado da Paraíba, com área (20.071,83 Km<sup>2</sup>), ocupando 38% do território, com 1.828.178 habitantes que correspondem a 52% da população total do estado e abrange 19 cidades, incluindo a Capital do Estado João Pessoa, e o segundo maior centro urbano, a cidade de Campina Grande (AESAs, 2022). A região possui dois tipos de clima segundo a classificação de Köppen de Geiger (1928), o Úmido Costeiro (AS) e Semiárido Quente (BSh). A região semiárida tropical, possui temperaturas elevadas em torno de 21 a 32°C variando ao longo do ano, chuvas escassas e períodos de estiagem e precipitação média anual de 700 mm (Alvares et al., 2013; AESAs, 2022).

Uma informação importante é que esses reservatórios são receptores da da transferência de água interbacias do Rio São Francisco, que entrou em operação em março de 2017 (BARBOSA et al., 2021).

**Figura 1.** Localização dos reservatórios Poções (1), Camalaú (2), Boqueirão (3) e Acauã (4), na bacia do Rio Paraíba do Norte, Paraíba, região Nordeste do Brasil.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.

**Tabela 1.** Reservatório, cidade, coordenadas geográficas, zona climática, volume máximo, profundidade máxima e ano de construção dos reservatórios estudados no estado da Paraíba, Nordeste do Brasil.

| Reservatório | Cidade    | Latitude(S) | Longitude (W) | Zona Climática | Volume máximo (m <sup>3</sup> ) | Profundidade máxima (m) |
|--------------|-----------|-------------|---------------|----------------|---------------------------------|-------------------------|
| Poções       | Monteiro  | 7°53'20.4"  | 36°59'49.2"   | BSh            | 29.861.562,0                    | 13,50                   |
| Camalaú      | Camalaú   | 7°53'15.5"  | 36°50'03.4"   | BSh            | 46.437.520,0                    | 22,00                   |
| Boqueirão    | Boqueirão | 7°28'45.3"  | 36°08'13.8"   | BSh            | 411.686.287,0                   | 37,54                   |
| Acauã        | Itatuba   | 7°26'31.3"  | 35°33'40.6"   | AS1            | 253.142.247,0                   | 40,00                   |

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.

### 3.2 Amostragem e coleta de dados

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 em três locais: Local 1, região lântica (região de barragem); Local 2, região de transição (entre a barragem e a entrada do rio); e Local 3, região lótica (região da entrada do rio Paraíba). E em três profundidades: subsuperfície (0,5 m de profundidade), 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. As coletas nas profundidades amostradas foram realizadas com o auxílio de garrafa *Van Dorn*.

### 3.3 Variáveis físicas e químicas

Os dados do volume da água (%) e a precipitação pluviométrica acumulada mensal (mm) durante os períodos de amostragem foram obtidos pela Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs, 2022).

Foram mensurados *in situ* as variáveis ambientais temperatura da água e do ar (°C), pH, oxigênio dissolvido (mg L<sup>-1</sup>), sólidos dissolvidos totais (g L<sup>-1</sup>), turbidez (NTU), salinidade (ppt) e condutividade elétrica (μS cm<sup>-1</sup>), utilizando sonda multiparamétrica HORIBA® U-50.

As amostras para a análise de nutrientes foram armazenadas em frascos de polietileno e preservadas em isopor com gelo para serem conduzidas laboratório. As concentrações de nutrientes, como amônia (μg L<sup>-1</sup>), nitrato (μg L<sup>-1</sup>), nitrito (μg L<sup>-1</sup>), fósforo reativo solúvel (μg L<sup>-1</sup>) e fósforo total (μg L<sup>-1</sup>) foram determinadas de acordo com método *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). O nitrogênio inorgânico dissolvido (DIN), foi determinado através somando as concentrações de amônia (μg L<sup>-1</sup>), nitrato (μg L<sup>-1</sup>) e nitrito (μg L<sup>-1</sup>).

### 3.4 Análise quali-quantitativa do fitoplâncton e das cianobactérias

Para a análise qualitativa da comunidade fitoplanctônica e das cianobactérias, 50 litros de água foi coletada, filtrada e concentrada em rede de plâncton com abertura de malha de 20  $\mu\text{m}$ , e posteriormente acondicionadas em frascos de plástico e fixadas com formol 4%. Em laboratório, foram confeccionadas lâminas semi-permanentes, as quais foram analisadas em microscópio óptico da marca Zeiss modelo Axio Lab.A1. A identificação foi realizada seguindo instruções da literatura recomendada (Komárek e Anagnostidis, 1989, 1999; 2005; Komárek et al., 2002, 2013; Sant'Anna et al., 2007). Para avaliação quantitativa, as amostras foram coletadas com auxílio da garrafa de Van Dorn, armazenadas em garrafas plásticas de 100 mL e fixadas com solução de Lugol 1%. Para análise quantitativa, utilizou-se o microscópio invertido (Zeiss Axiovert 40°C) com ampliação de 400X (Uthermöhl, 1958), utilizando-se tempo de sedimentação de pelo menos três horas para cada centímetro de altura da câmara. O valor de densidade (indivíduos  $\text{mL}^{-1}$ ) foi obtido utilizando a fórmula descrita por Ross (1979) e o biovolume ( $\text{mm}^3 \text{L}^{-1}$ ) foi estimada multiplicando-se a densidade das espécies pelo volume médio das células. O volume da célula foi calculado a partir de modelos geométricos próximo ao formato da espécie- esferas, cilindros, cones, pirâmides, elipsoides e outros, conforme descrito por Hillebrand et al. (1999). A biomassa ( $\text{mg L}^{-1}$ ) foi determinada a partir do biovolume celular ( $\text{mm}^3 \text{L}^{-1}$ ), a conversão do biovolume em biomassa foi realizada assumindo o peso unitário fresco expresso em massa  $1 \text{ mm}^3 \text{L}^{-1} = 1 \text{ mg L}^{-1}$  (Wetzel e Likens, 2000).

### 3.5 Saxitoxina

Para as análises das concentrações de saxitoxinas, amostras de água foram coletadas em campo e armazenadas em Eppendorfs de 2 ml contendo 200  $\mu\text{L}$  de solução diluente. Posteriormente, essas amostras foram mantidas em ultrafreezer até o momento da análise. As concentrações totais ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) dessa cianotoxina toxinas foram determinadas pelo método de Ensaio de Imunoabsorção Enzimática (ELISA) usando kits específico para a toxina e placa Abraxis (Warminster, Pa), de acordo com as instruções do fabricante. Para o procedimento de extração da toxina das células, as amostras foram submetidas a três ciclos de congelamento e descongelamento foram realizados. A absorbância da reação de cor das corridas de ELISA foi medida com um leitor de microplaca ASYS A-5301 (ASYS Hitech GmbH, Eugendorf, Áustria).

### 3.6 Análises estatísticas

Foi realizada uma Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA),

para verificar a diferença entre os reservatórios considerando todo o conjunto de dados das variáveis físicas e químicas, tendo como fatores os meses (maio de 2022 e novembro de 2022), as profundidades (superfície, limite da zona eufótica e fundo) e as zonas (lêntica, transição e lótica) (ANDERSON, 2004), onde a função ‘adonis’ do pacote “vegan” foi usada com 999 permutações (coeficiente de distância euclidiana). Quando diferenças significativas foram identificadas, um teste *post hoc* foi realizado para separar as médias significativamente diferentes por meio da comparação pareada multinível da função “pairwise.adonis” (Arbizu, 2017).

Para verificar se houve diferença significativa na biomassa de *R. raciborskii*, concentração de SXTs e nas variáveis físicas, químicas entre os meses, profundidades e zonas para cada ambiente, foi realizada um modelo linear generalizado (GLM) com o erro de distribuição Gaussian (usando a função ‘glm’ do pacote “stats”). No caso das variáveis físicas, químicas previamente, foi testada a multicolinearidade potencial entre essas variáveis por meio do fator de inflação de variância ( $VIF > 5$ ; JAMES et al., 2013). A biomassa foi considerada variável dependente, enquanto as variáveis ambientais independentes (temperatura da água, temperatura do ar, pH, condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, nitrogênio inorgânico dissolvido, fósforo total, salinidade, volume e precipitação) foram consideradas explicativas. Essas variáveis independentes foram selecionadas a partir do melhor modelo de regressão stepwise baseado nos critérios de informação de Akaike (Akaike, 1974; Anderson, 2008). O  $R^2$  ajustado foi calculado refletindo a qualidade do ajuste do modelo. Nesta análise também foi testada a ocorrência da multicolinearidade entre variáveis independentes foi testada utilizando o fator de inflação de variância ( $VIF > 5$ ; JAMES et al., 2013). Todas as análises foram realizadas utilizando o software R, versão 4.2.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2023).

## 4 RESULTADOS

#### 4.1 Variáveis climáticas, físicas e químicas

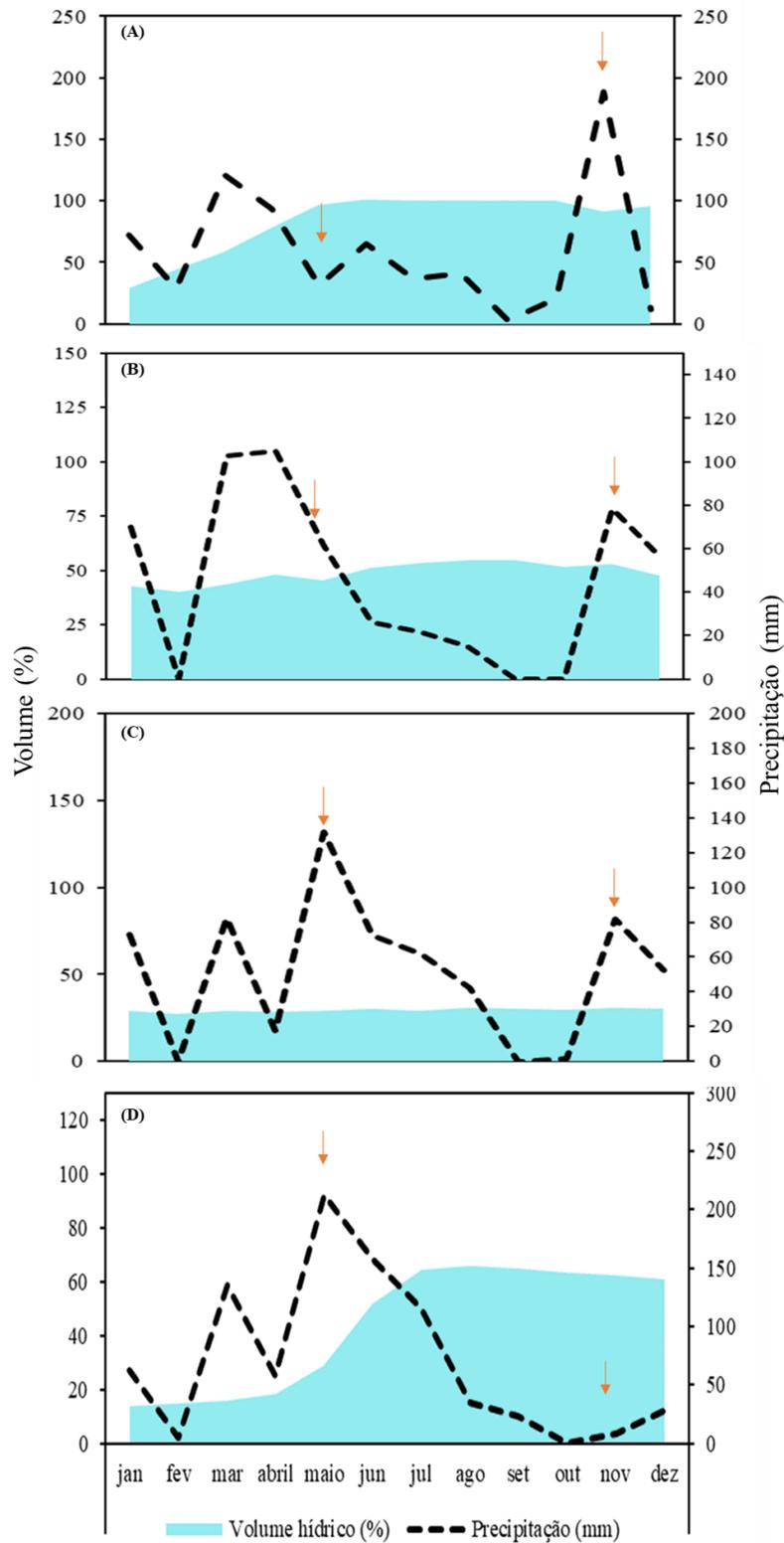
Durante o estudo foi verificado um aumento do volume hídrico nos reservatórios de Camalaú e Acauã no período da seca e no reservatório de Poções no período da chuva, enquanto que a precipitação foi maior nos reservatórios de Poções e Camalaú na seca e Boqueirão e Acauã na chuva (Fig. 2 A e B). No período de estudo não foi observada relação entre o volume e a precipitação, diferindo significativamente (glm,  $p < 0,01$ ) no qual verificou-se que a precipitação diminuiu durante o aumento do volume nos reservatórios de Poções, Boqueirão e Acauã (Fig. 2 A, C e D). O aumento do volume dos reservatórios Acauã e Camalaú tem sido em Novembro de 2022, fato que pode ser consequente da transposição do rio São Francisco.

As características climáticas, físicas e químicas dos reservatórios da região semiárida da Paraíba foram descritas (APÊNDICE A). A PERMANOVA mostrou diferença significativa para as variáveis independentes entre os meses (chuva e seca) nos reservatórios Poções (pseudo- $F_{1:16} = 12,62$  e  $p < 0,001$ ), Camalaú (pseudo- $F_{1:16} = 6,30$ , e  $p < 0,001$ ), Boqueirão (pseudo- $F_{1:16} = 5,43$  e  $p < 0,001$ ) e Acauã (pseudo- $F_{1:16} = 16,15$  e  $p < 0,001$ ) (Tabela 2). No entanto, não houve diferença significativa em relação às profundidades (isto é, superfície, limite da zona eufótica e fundo) (Tabela 3). A PERMANOVA mostrou diferença significativa entre as zonas apenas para o reservatório Camalaú (pseudo- $F_{1:16} = 2,67$  e  $p < 0,005$ ) (Tabela 2). Aumentos significativos entre os meses foram encontrados no reservatório Poções ocorreu para precipitação (glm,  $p = 0,02$ ), temperatura do ar (glm,  $p < 0,0001$ ), temperatura da água (glm,  $p < 0,001$ ), sólidos totais dissolvidos (glm,  $p < 0,001$ ), nitrato (glm,  $p < 0,001$ ), Volume (glm,  $p < 0,001$ ). Houve reduções significativas do pH (glm,  $p < 0,001$ ), turbidez (glm,  $p < 0,001$ ). O reservatório Camalaú mostrou aumentos significativos entre os meses no volume (glm,  $p < 0,001$ ) e precipitação (glm,  $p < 0,001$ ) e diminuição significativa no pH (glm,  $p < 0,001$ ), turbidez (glm,  $p < 0,001$ ). Além disso, quando comparado as Zonas (Lêntica, Lôtica e Transição) aumentos significativos na condutividade elétrica (glm,  $p < 0,001$ ) e sólidos totais dissolvidos (glm,  $p < 0,0001$ ) e reduções significativas ocorreu na temperatura da água (glm  $p < 0,001$ ).

Aumentos significativos para entre os meses foram observadas no reservatório Boqueirão para o volume (glm,  $p < 0,0001$ ), N-NH<sub>3</sub> (glm,  $p < 0,001$ ) e reduções significativas na precipitação (glm,  $p < 0,001$ ) e turbidez (glm,  $p < 0,01$ ).

O reservatório Acauã mostrou aumentos significativos do volume (glm,  $p < 0,001$ ), condutividade elétrica (glm,  $p < 0,0001$ ), oxigênio dissolvido (glm,  $p < 0,001$ ), sólidos totais dissolvidos (glm,  $p = 0,001$ ) e nitrato (glm,  $p < 0,001$ ).

**Figura 2.** Volume hídrico, precipitação pluviométrica média mensal entre janeiro a dezembro de 2022 nos reservatórios, Poções (A), Camalaú (B), Boqueirão (C) e Acauã (D), Paraíba. A Seta em laranja representa o período amostral.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.

**Tabela 2.** Resultados PERMANOVA que mostra se houve diferença significativa das variáveis entre os meses, profundidades e zona sobre as variáveis físicas e químicas para os reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã, Paraíba- Brasil.

|              | Poções    |              | Camalaú   |              | Boqueirão |              | Acauã     |              |
|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
|              | Pseudo- F | P            |
| Mês          | 12,62     | <b>0,001</b> | 6,3       | <b>0,001</b> | 5,43      | <b>0,001</b> | 16,15     | <b>0,001</b> |
| Profundidade | 0,69      | 0,74         | 1,01      | 0,43         | 0,97      | 0,05         | 1,88      | 0,07         |
| Zona         | 1,04      | 0,35         | 2,67      | <b>0,004</b> | 1,57      | 0,08         | 0,81      | 0,58         |

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

#### 4.2 Florações de *Raphidiopsis raciborskii* e a produção de saxitoxinas

Durante o estudo foram identificadas 16 espécies de cianobactérias, das quais cinco espécies de cianobactérias são potenciais produtores de STXs, sendo elas *Aphanizamenon gracile* (Lemmermann, 1907), *Gleiterinema amphibium* (Anagnostidis 1989), *Dolichospermum circinalis* (Rabenhorst ex Bornet et Flahault 1888), *Planktothrix agardhii* Gomont (Anagnostidis & Komárek, 1988) e *R. raciborskii* (APÊNDICE B). A biomassa total das cianobactérias variou entre 1,31 a 59,04 mg L<sup>-1</sup> no período da seca e no período da chuva 1,31 a 67,04 mg L<sup>-1</sup>, com maiores valores sendo registrados no reservatório de Acauã (APÊNDICE B).

*Raphidiopsis raciborskii* esteve presente em todos os reservatórios estudados (Fig 3; APÊNDICE B), com valores de biomassa excedendo 10 mg L<sup>-1</sup>, sendo considerado floração a partir desse valor (10,33 a 46,19 mg L<sup>-1</sup>).

No reservatório de Poções foi observado aumento significativo na biomassa de *R. raciborskii* em relação ao mês (glm,  $p=0,003$ ), foi observado maiores valores de biomassa na seca (19,06 mg L<sup>-1</sup>) e menores na chuva (7,99 mg L<sup>-1</sup>) (APÊNDICE B), e os maiores valores observados foi na região lântica na superfície na chuva (7,99 mg L<sup>-1</sup>) (Fig 2 A) e na seca houve um aumento em todas as zonas (superfície, zona eufótica e fundo) com maiores valores registrados na região transição na zona eufótica (30,74 mg L<sup>-1</sup>) (Fig 2C). A biomassa em Poções não diferiu significativamente em relação a profundidade e zona (glm,  $p>0,05$ ). Aumentos significativos entre os meses foram encontrados no reservatório Poções na biomassa de *R. raciborskii* (glm,  $p<0,001$ ) com maiores valores no período da seca (4,30 mg L<sup>-1</sup>).

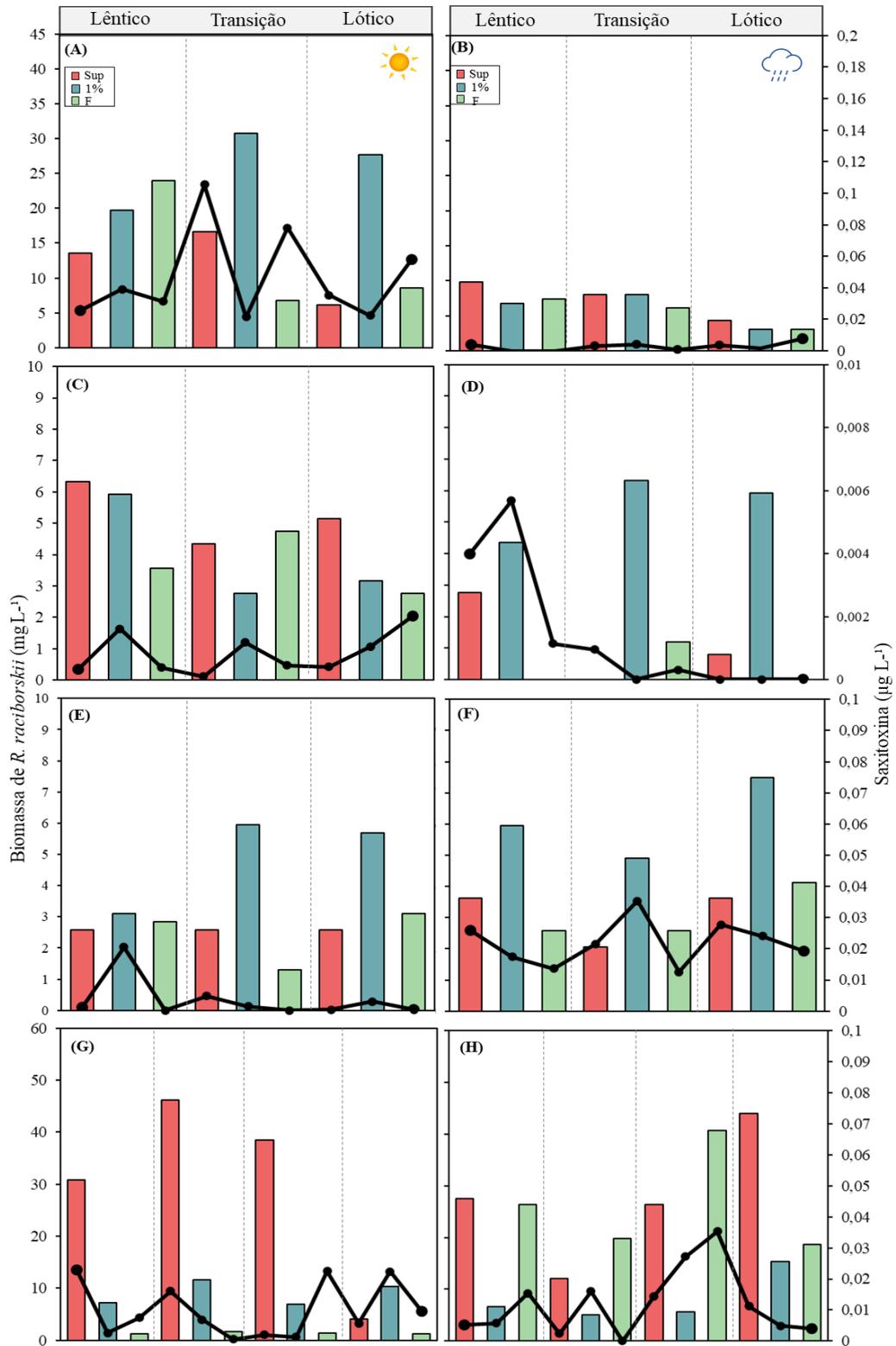
No reservatório Camalaú a biomassa de *R. raciborskii* não diferiu significativamente em relação ao mês, zona e profundidade (glm,  $p>0,05$ ) (APÊNDICE B). No entanto, foram observados maiores biomassa no período da seca na região lântica (6,32 mg L<sup>-1</sup>) (Fig 2C) e na chuva na região de transição na zona eufótica (6,32 mg L<sup>-1</sup>) (Fig 2D).

No reservatório Boqueirão foi observado diferenças significativas da biomassa de *R. raciborskii* em relação a profundidade com maiores valores na superfície ( $2,84 \text{ mg L}^{-1}$ ), (glm,  $p=0,0004$ ), no entanto não houve diferença significativa entre os meses e zona.

Diferenças significativas foi observada no reservatório Acauã em relação a profundidade superfície ( $28,69 \text{ mg L}^{-1}$ ), zona eufótica ( $8,57 \text{ mg L}^{-1}$ ) e fundo ( $13,87 \text{ mg L}^{-1}$ ) (glm,  $p<0,001$ ), não foram observadas diferenças significativas em relação a zona e meses. Em Acauã, maiores valores de biomassa foram registrados no período da seca ( $46,19 \text{ mg L}^{-1}$ ) na região de transição e na superfície.

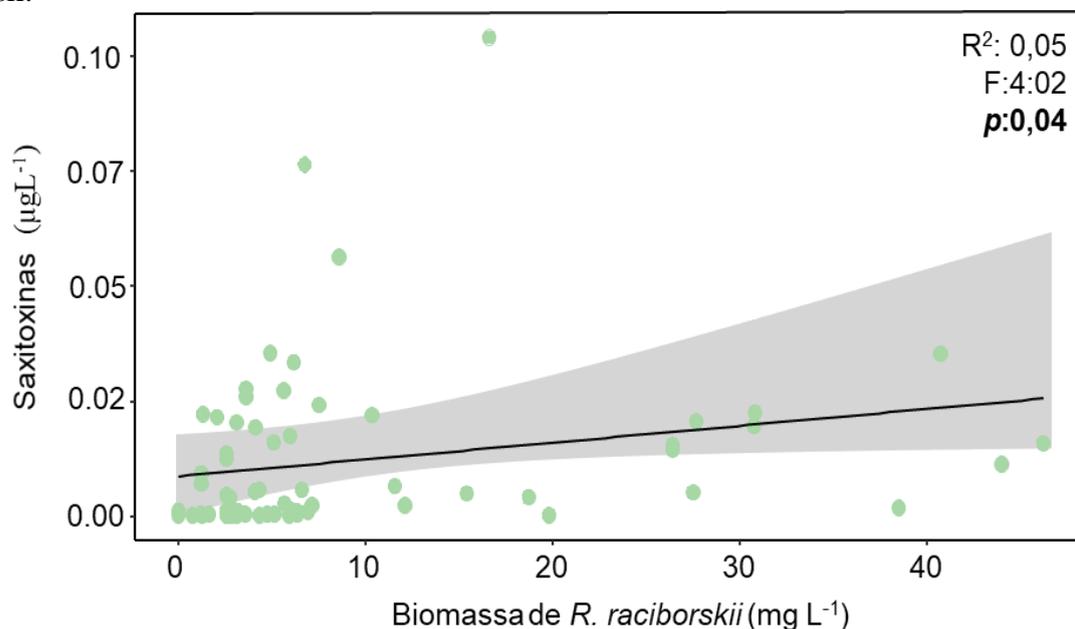
Durante o período de estudo, as concentrações as SXTs variaram entre  $0,0003$  a  $0,10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  durante os meses e zonas amostradas (Figura 3). No reservatório de Poções, as concentrações de STXs foram significativamente maiores ( $0,04 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) na seca (glm,  $p=0,006$ ) (Fig. 3A), sendo os maiores valores registrados na região de transição e na superfície ( $0,10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ), enquanto na chuva (maio/22) foram verificadas na região lótica e no fundo ( $0,007 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3B). No reservatório de Camalaú, o período chuvoso (maio/22) apresentou maior concentração das STXs na região lântica, na zona eufótica ( $0,005 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3D), enquanto que em novembro/22 foi maior na região lótica e no fundo ( $0,002 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3C), no entanto, esse reservatório não apresentou diferença significativa em relação aos meses (glm,  $p=0,38$ ), profundidade (glm,  $p=0,10$ ) e zona (glm,  $p=0,47$ ). Em Boqueirão valores mais elevados ocorreu no período da chuva na região de transição em na zona eufótica ( $0,003 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3F), já no período da seca a região lântica na zona eufótica apresentou maior concentração ( $0,020 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3E), no entanto não houve diferença significativa em relação a zona (glm,  $p=0,99$ ) e profundidade (glm,  $p=0,40$ ). No reservatório de Acauã foi observado que maiores valores das biomassas de *Raphidiopsis raciborskii* foram registradas na seca ( $46,19 \text{ mg L}^{-1}$ ), na região lótica (entrada do rio Paraibinha) apresentou concentração mais elevada no fundo no período de chuva ( $0,03 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3H), e na seca maiores concentrações foram registradas na estação lântica e na superfície ( $0,020 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ) (Fig. 3G). Observamos também que o reservatório Acauã não diferiu entre os meses (glm,  $p=0,59$ ), zona (glm,  $p=0,40$ ) e profundidade (glm,  $p=0,93$ ). Modelos de regressão linear simples mostraram uma relação significativa entre a produção de STXs com a biomassa de *R. raciborskii* durante o período de estudo (Figura 4).

**Figura 3.** Biomassa de *R. raciborskii* e a relação com a saxitoxina nos reservatórios Poções seca (A) e (B), Camalaú (C) e (D), Boqueirão (E) e (F) e Acauã (G) e (H), Paraíba. O sol representado no gráfico refere-se ao período de seca e a nuvem ao período de chuva.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

**Figura 4.** Regressão linear simples para observar a relação entre a biomassa de *R. raciborskii* e concentração de saxitoxina nos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã, Paraíba-Brasil.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.

#### 4.3 Fatores determinantes para a biomassa de *R. raciborskii* e a concentração de saxitoxina

O modelo de regressões múltiplas identificou as variáveis ambientais determinantes para a biomassa de *R. raciborskii* e concentrações de SXTs (Tabela 3). Além disso, foi observado que houve uma relação positiva e significativa entre a biomassa desta cianobactéria com a SXTs (Fig. 4). Esta cianobactéria foi influenciada de forma significativa positiva pela turbidez (glm,  $p=0,001$ ), precipitação pluviométrica mensal (glm,  $p=0,01$ ) e temperatura da água (glm,  $p=0,05$ ), enquanto o nitrato (glm,  $p=0,05$ ) afetou negativamente a biomassa de *R. raciborskii* (Tabela 3). As concentrações de STXs esteve relacionada positivamente com a temperatura da água (glm,  $p=0,05$ ) e negativamente com nitrato (glm,  $p=0,05$ ) e pH (glm,  $p=0,001$ ) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Regressão Linear Múltipla que explica a influência de fatores físicos e químicos sobre a biomassa *Raphidiopsis raciborskii* e saxitoxina nos reservatórios Poções, Camalaú, Boqueirão e Acauã. Todos os modelos foram significativos, considerando \*(menor que 0,05%), \*\* (menor que 0,01%) e \*\*\* (menor que 0,001%). Turb: Turbidez, Prec: Precipitação, Temp: Temperatura da água, N-NO3: Nitrato.

| Variável dependente             | Modelo de regressão linear múltipla   | F    | R <sup>2</sup> | Sig     |
|---------------------------------|---|------|----------------|---------|
| <i>Raphidiopsis raciborskii</i> | $Y = -5,25 + 0,50***\text{LogTurb} - 0,30*\text{LogN-NO}_3 + 0,18**\text{LogPrec} + 0,19*\text{Temp}$ | 11,1 | 0.42           | <0.001  |
| Saxitoxina                      | $Y = -0.24 + 0.09*\text{LogTemp} - 0,006***\text{LogpH} - 0.006*\text{Log N- NO}_3$                   | 6,09 | 0.31           | <0.0001 |

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.

## 5 DISCUSSÕES

Nossos resultados indicaram que a biomassa de *R. raciborskii* e as concentrações de STXs foram maiores na superfície da coluna d'água e no período da seca, corroborando com a nossa primeira hipótese. No nosso estudo também foi observado que a biomassa de *R. raciborskii* esteve relacionada positivamente com a turbidez, precipitação pluviométrica mensal e temperatura da água e nitrato negativamente, enquanto com as SXTs, foi a temperatura da água relacionada positivamente e nitrato e o pH negativamente. Estes resultados, corroboraram parcialmente com a nossa segunda hipótese, indicando que variáveis ambientais semelhantes que explicam a biomassa de *R. raciborskii* são as mesmas que explicam as concentrações de STXs.

Estudos mostram que as cianobactérias dominam mais de 90% sobre as demais classes do fitoplâncton na região semiárida do Nordeste (Lins et al., 2016; Lins et al., 2019), principalmente no período da seca, visto que essas espécies conseguem se sustentar em altas temperaturas, e são capazes de regular a flutuabilidade para superfície da coluna d'água para obter condições luminosas (Paerl e Otten, 2013), diminuindo a viscosidade da água e tornando uma vantagem competitiva as cianobactérias em relação as demais classes do fitoplâncton (O'neil et al., 2012). Além disso, outro estudo mostrou que a biomassa das cianobactérias variou entre os períodos, indicando respostas sazonais destas espécies (Machado et al., 2021). O estudo de Bosse et al. (2019) mostrou uma menor contribuição das cianobactérias à medida que a profundidade aumentou, apoiando nossa ideia que essas espécies têm preferência por águas da superfície, assim, sendo semelhantes aos resultados encontrados no nosso estudo.

A abundância de *R. raciborskii* em reservatórios brasileiros em relação ao clima é demonstrado em outros estudos, onde maiores biomassas foram registradas no período da seca (Casali et al., 2017) e em regiões superficiais da coluna d'água, isso porque a região semiárida brasileira apresenta longos períodos de estiagem e chuvas escassas, aumentando a temperatura por longos períodos e favorecendo as espécies adaptadas a essas condições e aumentando as florações (Barbosa et al., 2012).

No estudo, foi observado que maiores valores da biomassa de *R. raciborskii* foram registrados nas zonas lânticas e de transição, nas profundidades superfície e limite da zona eufótica. Estudos também têm mostrado a dominância de *R. raciborskii* em regiões mais próximas da barragem (Moraes et al., 2021), isso é devido ao fato da zona lântica apresentar condições como menor turbulência, assim possibilitando uma melhor entrada de luz, limitação de nutrientes e menor fluxo de água, o que favorece as espécies diazotróficas flutuarem na coluna d'água, além disso, maiores densidades das espécies próximas a barragem estão

relacionadas aos longos períodos de residência (Moura et al., 2018). As zonas de transição apresentam condições semelhantes a região lântica, onde observa-se uma diminuição do fluxo de água, maior transparência da água e penetração de luz na coluna d'água, favorecendo o crescimento de cianobactérias. Assim, esses resultados é de extrema relevância, uma vez que na região lântica ocorre a captação de água para abastecimento público e a presença de *R. raciborskii* interfere no fornecimento de água potável e também nas atividades recreativas, além disso, valores das florações de *R. raciborskii* excedendo 10 mg L<sup>-1</sup> foram verificadas no nosso estudo na região de captação de água.

Estudos também mostram que *R. raciborskii* parece ser dominante nas águas superficiais em comparação com as águas do fundo (Antunes et al., 2015). Nossos resultados mostraram que os reservatórios de Camalaú e Boqueirão apresentaram maiores biomassas na estação chuvosa, enquanto que os reservatórios de Poções e Acauã apresentaram maiores biomassas na estação seca. Estudos mostram a abundância de *R. raciborskii* em reservatórios brasileiros nas estações chuvosas e seca (Rodrigues et al., 2019), no qual apresenta preferência por períodos secos, relacionadas à altas temperaturas e em reservatórios bem estratificados (Mowe et al, 2015) o que também pode ser favorecido pelo longo período de seca decorrentes nas regiões semiáridas, diminuindo o nível da água e intensificando a dominância dessas espécies em águas rasas.

Relações positivas foram verificadas entre turbidez, temperatura água e biomassa de *R. raciborskii* e o nitrato negativamente. O que pode estar associado a características ecofisiológicas que essa espécie apresenta, o que permite se adaptarem em diferentes condições, obtendo altas taxas de crescimento em condições de baixa luminosidade e em águas túrbidas (da Costa et al., 2015), favorecendo a sua dominância, uma vez que essa espécie é altamente formadora de florações, provocando o aumento de partículas suspensas na coluna d'água, reduzindo a transparência da água e aumento da turbidez.

Estudos submetendo *R. raciborskii* em diferentes condições climáticas mostrou uma maior abundância em temperaturas mais altas em torno de 25 e 32°C, mostrando que o crescimento da espécie esteve correlacionado positivamente com a temperatura (Xião et al., 2017). Além disso, o aumento da temperatura associado com as mudanças climáticas torna um gatilho chave para a expansão de *R. raciborskii* (Sinha et al., 2012). Os nutrientes também é um fator impulsionador da biomassa de *R. raciborskii* (Zhang et al., 2018). Estudos vêm mostrando que a interação entre temperaturas e nutrientes, principalmente o nitrogênio, são significativas para o crescimento da espécie, no qual o estudo de Jia et al. (2021) observou que a biomassa de *R. raciborskii* esteve relacionada com as concentrações de nitrato (N-NO<sub>3</sub>).

A precipitação também é um fator que promove o crescimento de cianobactérias após o período da chuva, causando mudanças nas características da água e assim, tornando-as turvas, os quais nesses ecossistemas são dominados por cianobactérias formadores de florações, como *R. raciborskii* (Tang et al., 2021).

O nosso estudo mostrou que a saxitoxina esteve relacionada com efeito positivo sobre a temperatura e negativo do pH e nitrato. A saxitoxina mostrou que as maiores concentrações por unidade de biomassa ocorreram em temperaturas mais elevadas, sendo solúvel em altas temperaturas (Rangel et al., 2016), além disso, o aumento nos níveis de nitrogênio e temperatura juntamente atua nas concentrações de saxitoxinas, em que maiores valores dessas variáveis ocorre maior degradação da toxina (Moraes et al., 2021). A relação da saxitoxina com o nitrato mostra que o nitrogênio é um fator essencial para a síntese de saxitoxinas (Harke et al., 2013).

O pH da amostra controla a produção de saxitoxina, além disso, outro estudo mostrou que a estabilidade da saxitoxina depende do pH (Castro et al., 2004). Assim, sendo semelhantes com as variáveis que explicaram a saxitoxina no nosso estudo.

Regressão linear simples mostrou uma relação entre a saxitoxina e a biomassa de *R. raciborskii*. Um estudo também mostrou uma estreita relação entre a biomassa de *R. raciborskii* e os níveis de saxitoxinas registrados em reservatórios da região semiárida (Lorenzi et al., 2018), além disso, a liberação da saxitoxina pela espécie pode contribuir para a homeostase do organismo, regulando a permeabilidade celular e também estar relacionada com o gasto energético, sendo necessário para espécies fixadoras de nitrogênio, como *R. raciborskii* (Moraes et al., 2021). Além disso, a saxitoxina apresentou maiores concentrações nas águas mais superficiais e durante a seca, no qual estudos já vêm mostrando que a STXs produzida por *R. raciborskii* é comum em períodos secos e em águas mais superficiais (Casali et al., 2017). A presença de saxitoxinas nesses ambientes traz grandes preocupações, visto que a dominância de *R. raciborskii* relacionada com essa toxina podem causar sérios à saúde humana, uma vez que é considerada a saxitoxina mais potente e, além disso, o estudo de Silva et al. (2020) mostrou a saxitoxina em seu estudo foi a segunda com maior número de potenciais tóxicos, sendo uma das mais frequentes. Assim, a relação das florações de *R. raciborskii* e a saxitoxina podem alterar as características da água nesses reservatórios, causar a redução da biodiversidade aquática, como também impactar a qualidade da água para abastecimento e inviabilizar os serviços ecossistêmicos

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo revelaram que a biomassa de *R. raciborskii* apresentou uma relação com a produção de STXs. A biomassa de *R. raciborskii* e as concentrações de STXs apresentaram maiores valores no período da seca e em águas superficiais. Além disso, a biomassa da espécie esteve relacionada com a turbidez, temperatura da água, precipitação e nitrato, enquanto a STXs foi favorecida com a temperatura da água, nitrato e pH, assim, corroborando parcialmente com a nossa hipótese. Assim, esse estudo conclui que a relação da biomassa de *R. raciborskii* com as SXTs é um alerta de riscos futuros de intoxicação, pois considerando o aumento das mudanças climáticas e intensificação da eutrofização, favorece a expansão dessa cianobactéria. Dessa forma, é importante avaliar como os fatores ambientais podem influenciar na dinâmica e dominância das florações de *R. raciborskii*, para uma melhor compreensão das estratégias para controlar suas florações e reduzir os futuros riscos à saúde pública, uma vez que esses sistemas são utilizados para abastecimento público.

## REFERÊNCIAS

- AGUILERA, A.; GÓMEZ, E. B.; KAŠTOVSKÝ, J.; ECHENIQUE, R. O.; & SALERNO, G.L. The polyphasic analysis of two native Raphidiopsis isolates supports the unification of the genera *Raphidiopsis* and *Cylindrospermopsis* (Nostocales, Cyanobacteria). **Phycologia**, 57(2), 130-146, 2018.
- Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Available on internet<<https://www.aesa.pb.gov.br>>. Accessed 20 may 2019, 2022.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.** 22:711-728, 2013.
- AMORIM, C. A.; DANTAS, Ê. W.; & DO NASCIMENTO MOURA, A. Modeling cyanobacterial blooms in tropical reservoirs: The role of physicochemical variables and trophic interactions. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140659, 2020.
- AMORIM, C. A.; & DO NASCIMENTO MOURA, A. Ecological impacts of freshwater algal blooms on water quality, plankton biodiversity, structure, and ecosystem functioning. **Science of the Total Environment**, 758, 143605, 2021.
- ANTUNES, J. T.; LEÃO, P. N.; & VASCONCELOS, V. M. *Cylindrospermopsis raciborskii*: review of the distribution, phylogeography, and ecophysiology of a global invasive species. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 473, 2015.
- APHA (American Public Health Association), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21 Ed. Washington, DC, 1200 p. 2012.
- BARBOSA, J. E. D. L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. D. S.; CRISPIM, M. C. B.; & SILVA, G. H. G. D. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 24, 103-118, 2012.
- BARROS, M. U.; WILSON, A. E.; LEITÃO, J. I.; PEREIRA, S. P.; BULEY, R. P.; FERNANDEZ-FIGUEROA, E. G.; & CAPELO-NETO, J. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil. **Harmful algae**, 86, 128-137, 2019.
- BHATT, P.; ENGEL, B. A.; REUHS, M.; & SIMSEK, H. Cyanophage technology in removal of cyanobacteria mediated harmful algal blooms: A novel and eco-friendly method. **Chemosphere**, 137769, 2023.
- BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. D. C.; SANTOS, D. M. S.; & MOURA, N. A. Toxic cyanobacteria in reservoirs in northeastern Brazil: detection using a molecular method. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, p. 1005-1010, 2010.
- BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C. D.; PICCIN-SANTOS, V.; MOURA, A. N.; ARAGÃO-TAVARES, N.K.; CORDEIRO-ARAÚJO, M. K.; 2014. Cyanobacteria, microcystins and cylindrospermopsin in public drinking supply reservoirs of Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, 86, 297-310, 2014.
- BONILLA, S.; AUBRIOT, L.; SOARES, M. C. S.; GONZÁLEZ-PIANA, M.; FABRE, A.; HUSZAR, V.L.; LÜRLING, M.; ANTONIADES, D.; PADISÁK, J. and KRUK, C. What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agardhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii*? **FEMS Microbiology Ecology**, 79 (3): 594-607, 2012.

- BOWLING, L. C., & BAKER, P. D. Major cyanobacterial bloom in the Barwon-Darling River, Australia, in 1991, and underlying limnological conditions. **Marine and freshwater research**, 47(4), 643-657, 1996.
- BURFORD, M. A.; BEARDALLI, J.; WILLIS, A.; ORR, F. T.; MAGALHÃES, V. F.; RANGEL, L. M.; AZEVEDO, S. M. F. O. E; NEILAN, B. A. Understanding the winning strategies used by the bloom-forming cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii*. **Harmful Algae**, v.54, p.44–53, 2016.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria de Consolidação nº 5, de 03 de outubro de 2017. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, BurfoPoder Executivo, Brasília, DF, Seção 1, nº 190, p. 360.
- CASALI, S. P.; DOS SANTOS, A. C. A.; DE FALCO, P. B.; & CALIJURI, M. D. C. Influence of environmental variables on saxitoxin yields by *Cylindrospermopsis raciborskii* in a mesotrophic subtropical reservoir. **Journal of Water and Health**, 15(4), 509-518, 2017.
- CARMICHAEL, W. W.; EVANS, W. R.; YIN, Q. Q.; BELL, P.; & MOCZYDŁOWSKI, E. Evidence for paralytic shellfish poisons in the freshwater cyanobacterium *Lyngbya wollei* (Farlow ex Gomont) comb. nov. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 63, n. 8, p. 3104-3110, 1996.
- CARMICHAEL, W. W.; & BOYER, G. L. Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. **Harmful algae**, 54, 194-212, 2016.
- CAREY, C. C; IBELINGS, B. W; HOFFMANN, E. P; HAMILTON, D. P; & BROOKES, J. D. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. **Water research**, 46(5), 1394-1407, 2012.
- CASTRO, D.; VERA, D.; LAGOS, N.; GARCÍA, C.; & VÁSQUEZ, M. The effect of temperature on growth and production of paralytic shellfish poisoning toxins by the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* C10. **Toxicon**, 44(5), 483-489, 2004.
- CHRISTENSEN, V. G.; & KHAN, E. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: A review of anatoxin-a and saxitoxin. **Science of the Total Environment**, v. 736, p. 139515, 2020.
- DANTAS, Ê. W.; MOURA, A. D. N.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. D. C.; ARRUDA NETO, J. D. D. T.; & CAVALCANTI, A. D. D. C. Temporal variation of the phytoplankton community at short sampling intervals in the Mundaú reservoir, Northeastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 22, p. 970-982, 2008.
- DAI, H.; MAO, J.; JIANG, D.; WANG, L. Longitudinal Hydrodynamic Characteristics in Reservoir Tributary Embayments and Effects on Algal Blooms. **PLoS ONE** , 8, e68186, 2013.
- DEMOULIN, C. F.; LARA, Y. J.; CORNET, L.; FRANÇOIS, C.; BAURAIN, D.; WILMOTTE, A.; & JAVAUX, E. J. Evolução de cianobactérias: Insight a partir do registro fóssil. **Biologia e Medicina dos Radicais Livres**, v.140, p.206-223, 2019.

- DEVERCELLI, M.; & O'FARRELL, I. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river. **Limnologia**, 43(2), 67-78, 2013.
- DOKULIL, M. T. Vegetative survival of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) at low temperature and low light. **Hydrobiology**, 764, 241-247, 2016.
- FACEY, J. A.; APTE, S. C.; MITROVIC, S. M. A review of the effect of trace metals on freshwater cyanobacterial growth and toxin production. **Toxins**, v. 11, n. 11, p. 643, 2019.
- FITZGERALD, D. J.; CUNLIFFE, D. A.; BURCH, M. D. Development of health alerts for cyanobacteria and related toxins in drinking water in South Australia. **Environmental Toxicology: An International Journal**, v. 14, n. 1, p. 203-209, 1999.
- FREITAS, E. C.; PINHEIRO, C.; ROCHA, O.; & LOUREIRO, S. Can mixtures of cyanotoxins represent a risk to the zooplankton? The case study of *Daphnia magna* Straus exposed to hepatotoxic and neurotoxic cyanobacterial extracts. **Harmful Algae**, 31, 143-152, 2014.
- FONSECA, J. R.; VIEIRA, P. C. S.; KUJBIDA, P.; & COSTA, I. A. S. D. Cyanobacterial occurrence and detection of microcystins and saxitoxins in reservoirs of the Brazilian semi-arid. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 27, 78-92, 2015.
- GIBLIN, S. M.; GERRISH, G. A. Environmental factors controlling phytoplankton dynamics in a large floodplain river with emphasis on cyanobacteria. **River Research and Applications**, v. 36, n. 7, p. 1137-1150, 2020.
- HUISMAN, J.; CODD, G. A.; PAERL, H. W.; IBELINGS, B. W.; VERSPAGEN, J. M.; & VISSER, P. M. Cyanobacterial blooms. **Nature Reviews Microbiology**, 16(8), 471-483, 2018.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker T et al, IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA.
- IPCC, 2018. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker T et al, IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA.
- JIANG, X.; ZHANG, L.; LIANG, H.; LI, Q.; ZHAO, Y.; CHEN, L.; & ZHAO, S. Resistance variation within a *Daphnia pulex* population against toxic cyanobacteria. **Journal of plankton research**, 35(5), 1177-1181, 2013.
- LAGOS, N.; ONODERA, H.; ZAGATTO, P. A.; ANDRINOLO, D.; AZEVEDO, S. M.; & OSHIMA, Y. The first evidence of paralytic shellfish toxins in the freshwater cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii*, isolated from Brazil. **Toxicon**, 37(10), 1359-1373, 1999.
- LLEWELLYN, L. E. Saxitoxin, a toxic marine natural product that targets a multitude of receptors. **Natural product reports**, v. 23, n. 2, p. 200-222, 2006.
- LIMA, D. V. N.; PACHECO, A. B. F.; GOULART, C. L.; & AZEVEDO, S. M. F. D. O. Physiological responses of *Raphidiopsis raciborskii* (Cyanobacteria) strains to water conductivity: effect of sodium and magnesium ions. **Hydrobiology**, 847, 2449-2464, 2020.
- LINS, R. P.; BARBOSA, L. G.; MINILLO, A.; & DE CEBALLOS, B. S. Cyanobacteria in a eutrophicated reservoir in a semi-arid region in Brazil: dominance and microcystin events of blooms. **Brazilian Journal of Botany**, 39, 583-591, 2016

LINS, R. P.; BARBOSA, L. G.; MINILLO, A.; & DE CEBALLOS, B. S. Cyanobacteria in a eutrophicated reservoir in a semi-arid region in Brazil: dominance and microcystin events of blooms. **Brazilian Journal of Botany**, 39(2), 583-591, 2019.

LÜRLING, M.; & MUCCI, M. Attenuating the Hassle of eutrophication: the measures in the lakes are becoming inevitable in the Waters eutrophic of the Netherlands. **Hydrobiology**, v.847 (21), p.4447-4467, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04297-9>.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlagcondicionadas. **Justus Perthes**. n.p., 1928.

MENDES, C. F.; DOS SANTOS SEVERIANO, J.; DE MOURA, G. C.; DOS SANTOS SILVA, R. D.; MONTEIRO, F. M.; & DE LUCENA BARBOSA, J. E. 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**, 816, 151584, 2022.

MEHDIZADEH ALLAF, M.; & PEERHOSSAINI, H. Cyanobacteria: Model microorganisms and beyond. **Microorganisms**, 10(4), 696, 2022.

MORAES, M. A.; RODRIGUES, R. A.; SCHLÜTER, L.; PODDUTURI, R.; JORGENSEN, N. O.; & CALIJURI, M. C. Influence of environmental factors on occurrence of cyanobacteria and abundance of saxitoxin-producing cyanobacteria in a subtropical drinking water reservoir in Brazil. **Water**, v. 13, n. 12, p. 1716, 2021.

MOURA, A.N; ARAGAO-TAVARES, N. K.; AMORIM, C. A. Cyanobacterial blooms in freshwater bodies from a semiarid region, Northeast Brazil: A review. **J. Limnol**, 77 (2), 179-188, 2018.

MOREIRA, C., RAMOS, V., AZEVEDO, J., & VASCONCELOS, V. Methods to detect cyanobacteria and their toxins in the environment. **Applied microbiology and biotechnology**, 98, 8073-8082, 2014.

MOREIRA, C.; PIMENTEL, A.; VASCONCELOS, V.; & ANTUNES, A. Preliminary evidence for the presence of cyanobacteria and cyanotoxins from enrichment of crops followed by PCR analysis: new perspectives of countries of Africa (Mali) and the South Pacific (Fiji). **Environmental Science and Research on Pollution**, v.28, p.31731-31745, 2021.

MOREIRA, C.; GOMES, C.; VASCONCELOS, V.; & ANTUNES, A. Risk assessment of cyanobacteria toxic metabolites on freshwater ecosystems applying molecular methods. **Environmental Science and Pollution Research**, 30(1), 219-227, 2023.

OLIVER, S. L.; IKEFUTI, P. V.; RIBEIRO, H. Cyanobacteria bloom variations and atmospheric variables, an environmental health contribution. **Rev Ambient. Água**, 15, 2020.

O'NEIL, J. M.; DAVIS, T. W.; BURFORD, M. A.; & GOBLER, C. J. The emergence of harmful cyanobacteria: the potential roles of eutrophication and changes in climate. **Harmful algae**, v.14, p.313-334, 2012.

OUYANG, W., LI, Z., YANG, J., LU, L., & GUO, J. Spatio-temporal variations in Phytoplankton communities in sediment and surface water as reservoir drawdown—A case study of Pengxi River in Three Gorges Reservoir, China. **Water**, 13(3), 340, 2021.

- PAERL, H. W.; & HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. **Environmental microbiology reports**, 1(1), 27-37, 2008.
- PAERL, H. W.; & OTTEN, T. G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. **Microbial ecology**, 65, 995-1010, 2013.
- PAERL, H. W., & OTTEN, T. G. Duelling 'CyanoHABs': unravelling the environmental drivers controlling dominance and succession among diazotrophic and non-N<sub>2</sub>-fixing harmful cyanobacteria. **Environmental microbiology**, 18(2), 316-324, 2016.
- PEARSON, L.; MIHALI, T.; MOFFITT, M.; KELLMANN, R.; & NEILAN, B. On the chemistry, toxicology and genetics of the cyanobacterial toxins, microcystin, nodularin, saxitoxin and cylindrospermopsin. **Marine drugs**, v. 8, n. 5, p. 1650-1680, 2010.
- PADISÁK, J., VASAS, G. & BORICS, G. Phycogeography of freshwater phytoplankton: Traditional knowledge and new molecular tools. **Hydrobiology**, 764 (1), 3–27, 2016.
- PEDROSA, C. D. S.; SOUZA, L. R.; GOMES, T. A.; DE LIMA, C. V.; LEDUR, P. F.; KARMIRIAN, K.; & REHEN, S. K. The cyanobacterial saxitoxin exacerbates neural cell death and brain malformations induced by Zika virus. **PLoS Neglected Tropical Diseases**, v. 14, n. 3, p. e0008060, 2020.
- PICCINI, C.; AUBRIOT, L.; FABRE, A.; AMARAL, V.; GONZÁLEZ-PIANA, M.; GIANI, A.; & BONILLA, S. Genetic and eco-physiological differences of South American *Cylindrospermopsis raciborskii* isolates support the hypothesis of multiple ecotypes. **Harmful Algae**, 10(6), 644-653, 2011.
- POMATI, F.; ROSSETTI, C.; MANAROLLA, G.; BURNS, B. P.; & NEILAN, B. A. Interactions between intracellular Na<sup>+</sup> levels and saxitoxin production in *Cylindrospermopsis raciborskii* T3. **Microbiology**, 150(2), 455-461, 2004.
- RAMOS, T. K.; COSTA, L. D. F.; YUNES, J. S.; RESGALLA Jr, C.; BARUFI, J. B.; DE OLIVEIRA BASTOS, E.; & RÖRIG, L. R. Axitoxins from the freshwater cyanobacterium *Raphidiopsis raciborskii* can contaminate marine mussels. **Harmful Algae**, v.103, p.102004, 2021.
- RANGEL, L. M.; SOARES, M. C. S.; PAIVA, R.; & SILVA, L. H. S. Morphology-based Functional groups as effective indicators of phytoplankton dynamics in a tropical cyanobacteria-dominated transitional river–reservoir system. **Ecological Indicators**, 64, 217-227, 2016.
- RIGAMONTI, N.; AUBRIOT, L.; MARTIGANI, F.; BONILLA, S.; & PICCINI, C. Effect of nutrient availability on cylindrospermopsin gene expression and toxin production in *Cylindrospermopsis raciborskii*. **Aquatic Microbial Ecology**, 82(1), 105-110, 2018.
- ROMO, S.; SORIA, J.; FERNÁNDEZ, F.; OUAHID, Y.; & BARÓN-SOLÁ, Á. N. G. E. L. Water residence time and the dynamics of toxic cyanobacteria. **Freshwater Biology**, 58(3), 513-522, 2013.
- SHAH, S. T.; BASIT, A.; ULLAH, I.; & MOHAMED, H. I. Cyanobacteria and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens. **Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management**, 1-23, 2021.

- SÁNCHEZ-BARACALDO, P.; & CARDONA, T. On the origin of oxygenic photosynthesis and Cyanobacteria. **Nw Phytologist**, 225(4), 1440-1446, 2020.
- SINHA, R.; PEARSON, L. A.; DAVIS, T. W.; BURFORD, M. A.; ORR, P. T.; NEILAN, B. A. Increased incidence of *Cylindrospermopsis raciborskii* in temperate zones—is climate change responsible?. **Water research**, v. 46, n. 5, p. 1408-1419, 2012.
- SILVA, R. D. D. D.; SEVERIANO, J. S.; DE OLIVEIRA, D. A.; MENDES, C. F.; BARBOSA, V. V.; CHIA, M. A.; & DE LUCENA BARBOSA, J. E. Spatio-temporal variation of cyanobacteria and cyanotoxins in public supply reservoirs of the semi-arid region of Brazil. **Journal of Limnology**, v. 79, n. 1, 2020.
- SOARES, M. C. S.; HUSZAR, V. L.; MIRANDA, M. N.; MELLO, M. M.; ROLAND, F.; & LÜRLING, M. Cyanobacterial dominance in Brazil: distribution and environmental preferences. **Hydrobiology**, v. 717, p. 1-12, 2013.
- SOARES, M. C. S., ROCHA, M. I. D. A., MARINHO, M. M., AZEVEDO, S. M., BRANCO, C. W., & HUSZAR, V. L. Changes in species composition during annual cyanobacterial dominance in a tropical reservoir: physical factors, nutrients and grazing effects. **Aquatic Microbial Ecology**, 57(2), 137-149, 2009.
- SU, Z.; DAM, P.; CHEN, X.; OLMAN, V.; JIANG, T.; & XU, Y. Computational construction of nitrogen assimilation pathway cyanobacteria *Synechococcus* sp. WH8102. In: **Proceedings. IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference**,... p. 640-641, 2004.
- TAN, F.; XIAO, P.; YANG, J. R.; CHEN, H.; JIN, L.; YANG, Y.; & YANG, J. Precision early detection of invasive and toxic cyanobacteria: a case study of *Raphidiopsis raciborskii*. **Harmful Algae**, 110, 102125, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102125>
- VARGAS, S. R.; DOS SANTOS, P. V.; BOTTINO, F.; & CALIJURI, M. D. C. Effect of nutrient concentration on growth and saxitoxin production of *Raphidiopsis raciborskii* (Cyanophyta) interacting with *Monoraphidium contortum* (Chlorophyceae). **Journal of Applied Phycology**, 32, 421-430, 2020.
- VÁRKONYI, Z.; MASAMOTO, K.; DEBRECZENY, M.; ZSIROS, O.; UGHY, B.; GOMBOS, Z.; & SZALONTAI, B. Low-temperature-induced accumulation of xanthophylls and its structural consequences in the photosynthetic membranes of the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii*: an FTIR spectroscopic study. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 99(4), 2410-2415, 2002.
- VEERMAN, J.; KUMAR, A.; MISHRA, D. R. Exceptional landscape-wide cyanobacteria bloom in Okavango Delta, Botswana in 2020 coincided with a mass elephant die-off event. **Harmful algae**, v. 111, p. 102145, 2022.
- VILAR, M. C. P.; & MOLICA, R. J. R. Changes in pH and inorganic carbon dissolved in water affect the growth, saxitoxin production and toxicity of the cyanobacterium *Raphidiopsis raciborskii* ITP-A1. **Harmful Algae**, v.97, p.101870, 2020.
- VICENTIN, A. M.; RODRIGUES, E. H. C.; MOSCHINI-CARLOS, V.; & POMPEO, M. L. M. Is it possible to evaluate the Ecological Potential of a reservoir using the phytoplankton community?. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 30, 2018.

WIESE, M.; D'AGOSTINO, P. M.; MIHALI, T. K.; MOFFITT, M. C.; & NEILAN, B. A. Neurotoxic alkaloids: saxitoxin and its analogs. **Marine drugs**, 8(7), 2185-2211, 2010.

XIAO, M.; BURFORD, M. A.; WOOD, S. A.; AUBRIOT, L.; IBELINGS, B. W.; PRENTICE, M. J.; & HAMILTON, D. P. Schindler's legacy: from eutrophic lakes to the phosphorus utilization strategies of cyanobacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, 46(6), 2022.

YAN, L.; XU, Z.; HU, Y.; WANG, Y.; ZHOU, F.; GAO, X.; & CHEN, D. Cyanobacteria bloom hazard function and preliminary application in lake taihu, China. **Chemosphere**, 307, 136122, 2022.

YANG, Z.; BULEY, R. P.; FERNANDEZ-FIGUEROA, E. G.; BARROS, M. U.; RAJENDRAN, S.; & WILSON, A. E. Hydrogen peroxide treatment promotes chlorophytes over toxic cyanobacteria in a hyper-eutrophic aquaculture pond. **Environmental Pollution**, 240, 590-598, 2018.

ZHANG, S.; RENSING, C.; & ZHU, Y. G. Cyanobacteria-mediated arsenic redox dynamics is regulated by phosphate in aquatic environments. **Environmental science & technology**, 48(2), 994-1000, 2014.

ZHANG, Y.; GAO, M.; YU, C.; ZHANG, H.; YAN, N.; WU, Q.; & LI, X. Soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities differ among biocrust types and soil layers in a degraded karst ecosystem. **Catena**, 212, 106057, 2022.

**APÊNDICE A.** Características físico-química, biomassa de *R. raciborskii* e concentração de saxitoxina na zona lêntica (Lên), transição (Tran) e lótica (Lót) na seca e chuva nos reservatório de Poções, Camalaú, Boqueirão e Poções Paraíba-Brasil. Temp, temperatura da água; DO, oxigênio dissolvido; CE, condutividade elétrica; pH, pH; TDS, sólidos totais dissolvidos; Turb, turbidez; N-NO<sub>3</sub>, nitrato; N-NO<sub>2</sub>, nitrito; N-NH<sub>4</sub>, amônia; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; PRS, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total

| Variáveis                               |      | Poções                   |                          |        | Camalaú                  |                          |        | Boqueirão                 |                          |        | Acauã                     |                           |        |
|---|------|--------------------------|--------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|--------|---------------------------|--------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|--------|
|   |      | Maio                     | Nov                      | P      | Maio                     | Nov                      | P      | Maio                      | Nov                      | P      | Maio                      | Nov                       | P      |
| Temp (°C)                               | Lên  | 25,61±0,36 <sup>a</sup>  | 26,16±0,44 <sup>b</sup>  | < 0,01 | 25,54±0,18 <sup>a</sup>  | 25,25±0,35 <sup>a</sup>  | ns     | 26,80±0,16 <sup>a</sup>   | 26,39±0,41 <sup>a</sup>  | ns     | 28,01±0,10 <sup>a</sup>   | 26,01±1,52 <sup>b</sup>   | <0,05  |
|   | Tran | 25,78±0,41 <sup>a</sup>  | 27,70±0,76 <sup>b</sup>  | < 0,01 | 26,12±0,32 <sup>a</sup>  | 26,62±0,83 <sup>a</sup>  | ns     | 27,69±1,86 <sup>a</sup>   | 27,08±1,03 <sup>a</sup>  | ns     | 27,92±0,04 <sup>a</sup>   | 27,79±1,21 <sup>b</sup>   | <0,05  |
|   | Lót  | 26,35±0,78 <sup>a</sup>  | 27,73±0,17 <sup>b</sup>  | < 0,01 | 26,69±0,85 <sup>a</sup>  | 27,30±1,43 <sup>a</sup>  | ns     | 26,59±0,49 <sup>a</sup>   | 27,93±0,32 <sup>a</sup>  | ns     | 27,81±0,27 <sup>a</sup>   | 27,90±1,05 <sup>b</sup>   | <0,05  |
| OD (mg L <sup>-1</sup> )                | Lên  | 52,83±60,85 <sup>a</sup> | 51,36±39,73 <sup>a</sup> | ns     | 24,10±19,84 <sup>a</sup> | 50,40±28,09 <sup>a</sup> | ns     | 123,53±140,0 <sup>a</sup> | 78,90±25,26 <sup>a</sup> | ns     | 37,80±21,31 <sup>a</sup>  | 58,86±44,05 <sup>b</sup>  | <0,01  |
|   | Tran | 84,10±49,36 <sup>a</sup> | 57,46±21,52 <sup>a</sup> | ns     | 52,20±25,00 <sup>a</sup> | 61,06±21,47 <sup>a</sup> | ns     | 42,63±34,95 <sup>a</sup>  | 75,73±38,00 <sup>a</sup> | ns     | 16,5±7,91 <sup>a</sup>    | 82,80±59,32 <sup>b</sup>  | <0,01  |
|   | Lót  | 109,63±41,2 <sup>a</sup> | 94,53±14,25 <sup>a</sup> | ns     | 52,23±40,38 <sup>a</sup> | 59,00±49,36 <sup>a</sup> | ns     | 94,96±25,71 <sup>a</sup>  | 94,13±6,92 <sup>a</sup>  | ns     | 20,83±18,39 <sup>a</sup>  | 66,66±45,99 <sup>b</sup>  | <0,01  |
| pH                                      | Lên  | 8,78±0,72 <sup>a</sup>   | 5,69±1,39 <sup>b</sup>   | <0,01  | 8,96±0,92 <sup>a</sup>   | 7,99±0,13 <sup>b</sup>   | <0,001 | 8,53±0,16 <sup>a</sup>    | 7,97±0,91 <sup>a</sup>   | ns     | 9,41±0,47 <sup>a</sup>    | 9,86±0,68 <sup>a</sup>    | ns     |
|   | Tran | 9,33±0,59 <sup>a</sup>   | 7,49±1,30 <sup>b</sup>   | <0,01  | 8,58±0,29 <sup>a</sup>   | 7,90±0,05 <sup>b</sup>   | <0,001 | 8,83±0,27 <sup>a</sup>    | 9,40±0,44 <sup>a</sup>   | ns     | 8,97±0,14 <sup>a</sup>    | 9,43±0,63 <sup>a</sup>    | ns     |
|   | Lót  | 9,70±0,67 <sup>a</sup>   | 8,24±0,44 <sup>b</sup>   | <0,01  | 8,80±0,40 <sup>a</sup>   | 7,92±0,06 <sup>b</sup>   | <0,001 | 8,71±0,08 <sup>a</sup>    | 7,87±0,32 <sup>a</sup>   | ns     | 9,19±0,67 <sup>a</sup>    | 9,07±0,81 <sup>a</sup>    | ns     |
| Turb (NTU)                              | Lên  | 37,03±5,32               | 18,83±1,45               | ns     | 11,63±4,59 <sup>a</sup>  | 3,86±0,51 <sup>b</sup>   | <0,01  | 7,43±2,40 <sup>a</sup>    | 6,03±0,11 <sup>a</sup>   | <0,05  | 35,10±30,03 <sup>a</sup>  | 24±17,32 <sup>a</sup>     | ns     |
|   | Tran | 41,00±11,78              | 22,73±4,08               | ns     | 22,50±11,34 <sup>a</sup> | 4,76±0,70 <sup>b</sup>   | <0,01  | 15,80±7,62 <sup>a</sup>   | 7,23±0,20 <sup>a</sup>   | <0,05  | 45,90±1,60 <sup>a</sup>   | 29,96±22,19 <sup>a</sup>  | ns     |
|   | Lót  | 42,16±14,08              | 23,73±1,80               | ns     | 34,53±12,94 <sup>a</sup> | 7,60±0,51 <sup>b</sup>   | <0,01  | 27,43±7,86 <sup>a</sup>   | 8,36±0,32 <sup>a</sup>   | <0,05  | 50,10±18,09 <sup>a</sup>  | 33,81±24,35 <sup>a</sup>  | ns     |
| TDS (mg L <sup>-1</sup> )               | Lên  | 0,10±0,001 <sup>a</sup>  | 0,10±0,004 <sup>b</sup>  | <0,001 | 0,11±0,001 <sup>a</sup>  | 0,11±0,002 <sup>a</sup>  | ns     | 0,25±0,002 <sup>a</sup>   | 0,24±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,85±0,002 <sup>a</sup>   | 0,91±0,005 <sup>b</sup>   | <0,001 |
|   | Tran | 0,09±0,001 <sup>a</sup>  | 0,10±0,0005 <sup>b</sup> | <0,001 | 0,11±0,001 <sup>a</sup>  | 0,11±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,24±0,005 <sup>a</sup>   | 0,23±0,008 <sup>a</sup>  | ns     | 0,84±0,001 <sup>a</sup>   | 0,91±0,01 <sup>b</sup>    | <0,001 |
|   | Lót  | 0,09±0,003 <sup>a</sup>  | 0,10±0,001 <sup>b</sup>  | <0,001 | 0,10±0,001 <sup>a</sup>  | 0,11±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,22±0,005 <sup>a</sup>   | 0,22±0,002 <sup>a</sup>  | ns     | 0,81±0,04 <sup>a</sup>    | 0,92±0,003 <sup>b</sup>   | <0,001 |
| CE (mS cm <sup>-1</sup> )               | Lên  | 0,16±0,002 <sup>a</sup>  | 54,77±94,58 <sup>a</sup> | ns     | 0,18±0,002 <sup>a</sup>  | 0,17±0,004 <sup>a</sup>  | ns     | 0,36±0,03 <sup>a</sup>    | 0,37±0,002 <sup>a</sup>  | ns     | 1,33±0,005 <sup>a</sup>   | 1,43±0,01 <sup>b</sup>    | <0,001 |
|   | Tran | 0,15±0,003 <sup>a</sup>  | 0,16±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,175±0,001 <sup>a</sup> | 0,17±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,37±0,008 <sup>a</sup>   | 0,36±0,01 <sup>a</sup>   | ns     | 1,33±0 <sup>a</sup>       | 1,45±0 <sup>b</sup>       | <0,001 |
|   | Lót  | 0,14±0,005 <sup>a</sup>  | 0,16±0,001 <sup>a</sup>  | ns     | 0,16±0,002 <sup>a</sup>  | 0,17±0,004 <sup>a</sup>  | ns     | 0,34±0,007 <sup>a</sup>   | 0,34±0,003 <sup>a</sup>  | ns     | 1,27±0,07 <sup>a</sup>    | 1,44±0,005 <sup>b</sup>   | <0,001 |
| N-NH <sub>4</sub> (µg L <sup>-1</sup> ) | Lên  | 57,05±29,57              | 97,50±20,38              | ns     | 58,71±45,42 <sup>a</sup> | 75,37±82,29 <sup>a</sup> | ns     | 12,19±2,24 <sup>a</sup>   | 29,31±3,33 <sup>b</sup>  | <0,001 | 66,28±29,74 <sup>a</sup>  | 184,16±23,84 <sup>a</sup> | ns     |
|   | Tran | 73,40±24,80              | 95,22±16,21              | ns     | 32,80±18,30 <sup>a</sup> | 25,37±6,82 <sup>a</sup>  | ns     | 13,25±2,92 <sup>a</sup>   | 31,59±3,88 <sup>b</sup>  | <0,001 | 153,86±26,50 <sup>a</sup> | 181,89±26,38 <sup>a</sup> | ns     |
|   | Lót  | 64,31±25,95              | 69,16±32,49              | ns     | 30,68±13,45 <sup>a</sup> | 35,98±10,01 <sup>a</sup> | ns     | 6,89±3,53 <sup>a</sup>    | 39,92±5,32 <sup>b</sup>  | <0,001 | 35,98±22,08 <sup>a</sup>  | 157,19±244,9 <sup>a</sup> | ns     |
| N-NO <sub>2</sub> (µg L <sup>-1</sup> ) | Lên  | 2,18±0,16                | 0,61±0                   | ns     | 5,029±0,58               | 0,81±0,33                | ns     | 17,87±26,59               | 2,18±0,32                | ns     | 3,26±0,50                 | 1,59±1,11                 | ns     |
|   | Tran | 1,89±0,44                | 2,67±2,91                | ns     | 3,85±2,80                | 1,20±0,83                | ns     | 13,36±18,00               | 6,59±8,36                | ns     | 3,06±0,16                 | 1,50±1,28                 | ns     |
|   | Lót  | 1,89±0,61                | 2,23±2,28                | ns     | 4,14±1,24                | 8,85±13,51               | ns     | 15,81±6,98                | 2,97±1,63                | ns     | 3,01±0,34                 | 3,14±2,37                 | ns     |
| N-NO <sub>3</sub> (µg L <sup>-1</sup> ) | Lên  | 2,09±1,65 <sup>a</sup>   | 6,85±7,55 <sup>b</sup>   | <0,05  | 46,38±40,41 <sup>a</sup> | 8,76±6,75 <sup>a</sup>   | ns     | 66,85±111,34 <sup>a</sup> | 39,71±31,42 <sup>a</sup> | ns     | 13,04±7,86 <sup>a</sup>   | 23,52±2,18 <sup>b</sup>   | <0,001 |
|   | Tran | 2,57±1,42 <sup>a</sup>   | 9,23±2,18 <sup>b</sup>   | <0,05  | 11,61±18,14 <sup>a</sup> | 11,14±3,77 <sup>a</sup>  | ns     | 47,80±80,82 <sup>a</sup>  | 44,47±47,85 <sup>a</sup> | ns     | 17,33±3,59 <sup>a</sup>   | 21,61±9,18 <sup>b</sup>   | <0,001 |

(Continuação)

|   |      |                           |                            |        |                           |                           |    |                            |                            |        |                          |                          |        |
|---|------|---------------------------|----------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|----|----------------------------|----------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|--------|
| DIN ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )                    | Lót  | 4,00±2,85 <sup>a</sup>    | 5,42±7,42 <sup>b</sup>     | <0,05  | 30,19±37,53 <sup>a</sup>  | 20,66±20,81 <sup>a</sup>  | ns | 79,71±49,56 <sup>a</sup>   | 27,80±5,94 <sup>a</sup>    | ns     | 8,76±5,39 <sup>a</sup>   | 25,90±5,97 <sup>b</sup>  | <0,001 |
|   | Lên  | 61,33±28,61               | 104,76±27,2                | ns     | 110,12±54,12              | 84,95±87,05               | ns | 96,92±140,15               | 71,21±29,95                | ns     | 82,60±37,79              | 209,28±235,65            | ns     |
|   | Tran | 77,87±23,22               | 106,24±20,4                | ns     | 48,27±39,22               | 37,32±10,81               | ns | 74,42±97,80                | 82,66±42,54                | ns     | 174,26±25,32             | 205,01±253,14            | ns     |
| SRP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )                    | Lót  | 70,21±24,92               | 76,08±39,41                | ns     | 63,63±52,67               | 65,50±43,45               | ns | 102,42±57,37               | 70,70±10,97                | ns     | 47,76±20,34              | 185,72±239,20            | ns     |
|   | Lên  | 6,33±4,59                 | 6,33±10,72                 | ns     | 7,28±2,47                 | 3,00±2,85                 | ns | 8,71±7,55                  | 3,47±2,53                  | ns     | 213,47±29,28             | 218,71±28,13             | ns     |
|   | Tran | 8,23±2,18                 | 0,14±0                     | ns     | 5,38±0,82                 | 2,04±3,29                 | ns | 5,85±0                     | 2,52±4,12                  | ns     | 223,47±4,36              | 243,95±69,99             | ns     |
| DINSRP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )                 | Lót  | 8,23±12,80                | 7,76±13,19                 | ns     | 3,00±3,77                 | 4,90±7,04                 | ns | 14,90±14,30                | 7,28±0                     | ns     | 224,90±4,66              | 216,33±56,08             | ns     |
|   | Lên  | 15,13±14,46 <sup>a</sup>  | 418,89±358,10 <sup>b</sup> | <0,01  | 14,44±3,19 <sup>a</sup>   | 74,52±89,23 <sup>a</sup>  | ns | 7,61±6,44 <sup>a</sup>     | 278,27±356,52 <sup>a</sup> | ns     | 0,37±0,12 <sup>a</sup>   | 0,93±1,02 <sup>b</sup>   | ns     |
|   | Tran | 9,57±1,94 <sup>a</sup>    | 743,74±142,40 <sup>b</sup> | <0,01  | 8,744±6,34 <sup>a</sup>   | 165,92±154,5 <sup>a</sup> | ns | 12,70±16,69 <sup>a</sup>   | 449,07±458,11 <sup>a</sup> | ns     | 0,77±0,10 <sup>a</sup>   | 0,73±0,77 <sup>b</sup>   | ns     |
| TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )                     | Lót  | 173,59±272,2 <sup>a</sup> | 375,03±421,34 <sup>b</sup> | <0,01  | 73,91±90,46 <sup>a</sup>  | 88,70±93,99 <sup>a</sup>  | ns | 167,75±281,74 <sup>a</sup> | 9,70±1,50 <sup>a</sup>     | ns     | 0,21±0,08 <sup>a</sup>   | 0,74±0,7 <sup>b</sup>    | ns     |
|   | Lên  | 58,11±3,46                | 50,33±6,00                 | ns     | 31,44±21,49               | 7,00±5,00                 | ns | 14,77±13,57                | 7,55±3,70                  | ns     | 326,44±13,87             | 314,77±51,89             | ns     |
|   | Tran | 58,66±11,66               | 35,33±12,58                | ns     | 30,33±8,66                | 4,77±3,46                 | ns | 15,33±6,009                | 11,44±11,09                | ns     | 322,55±8,55              | 319,22±77,68             | ns     |
| <i>R. raciborskii</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Lót  | 72,55±13,36               | 65,33±28,43                | ns     | 33,11±7,87                | 10,88±7,69                | ns | 26,44±13,47                | 10,88±0,96                 | ns     | 314,22±38,17             | 310,33±73,79             | ns     |
|   | Lên  | 7,99±1,62 <sup>a</sup>    | 19,06±5,25 <sup>b</sup>    | <0,01  | 2,37±2,19 <sup>a</sup>    | 5,26±1,49 <sup>a</sup>    | ns | 4,04±1,71 <sup>a</sup>     | 2,84±0,17 <sup>a</sup>     | ns     | 20,16±11,76 <sup>a</sup> | 13,05±15,65 <sup>b</sup> | ns     |
|   | Tran | 7,37±1,06 <sup>a</sup>    | 18,03±12,05 <sup>b</sup>   | <0,01  | 2,50±3,35 <sup>a</sup>    | 3,95±1,04 <sup>a</sup>    | ns | 3,18±1,51 <sup>a</sup>     | 3,27±2,39 <sup>a</sup>     | ns     | 12,31±7,37 <sup>a</sup>  | 19,79±23,38 <sup>b</sup> | ns     |
| Saxitoxina<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ )          | Lót  | 3,48±0,71 <sup>a</sup>    | 14,14±11,78 <sup>b</sup>   | <0,01  | 2,23±3,21 <sup>a</sup>    | 3,68±1,26 <sup>a</sup>    | ns | 5,07±2,10 <sup>a</sup>     | 2,18±0 <sup>a</sup>        | ns     | 25,13±14,94 <sup>a</sup> | 10,39±14,20 <sup>b</sup> | ns     |
|   | Lên  | 0,004±0 <sup>a</sup>      | 0,03±0,006 <sup>b</sup>    | <0,001 | 0,003±0,002 <sup>a</sup>  | 0,0007±0,0 <sup>a</sup>   | ns | 0,01±0,006 <sup>a</sup>    | 0,007±0,008 <sup>b</sup>   | <0,001 | 0,008±0,005 <sup>a</sup> | 0,01±0,01 <sup>b</sup>   | ns     |
|   | Tran | 0,002±0,001 <sup>a</sup>  | 0,06±0,04 <sup>b</sup>     | <0,001 | 0,0007±0,003 <sup>a</sup> | 0,0005±0,0 <sup>a</sup>   | ns | 0,02±0,011 <sup>a</sup>    | 0,001±0,002 <sup>b</sup>   | <0,001 | 0,006±0,008 <sup>a</sup> | 0,007±0,007 <sup>b</sup> | ns     |
|   | Lót  | 0,004±0,003 <sup>a</sup>  | 0,036±0,01 <sup>b</sup>    | <0,001 | 0,0001±0 <sup>a</sup>     | 0,001±0,00 <sup>a</sup>   | ns | 0,02±0,004 <sup>a</sup>    | 0,001±0,001 <sup>b</sup>   | <0,001 | 0,01±0,01 <sup>a</sup>   | 0,01±0,009 <sup>b</sup>  | ns     |

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

**APÊNDICE B.** Biomassa (mg L<sup>-1</sup>) de fitoplâncton, outras cianobactérias, *R. raciborskii*

|                  | Fitoplâncton | Outras cianobactérias | <i>R. raciborskii</i> | Fitoplâncton | Outras cianobactérias | <i>R. raciborskii</i> |
|------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | Chuva        |                       |                       | Seca         |                       |                       |
| <b>Poções</b>    |              |                       |                       |              |                       |                       |
| <b>Lêntica</b>   |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 24,74        | 12,01                 | 9,84                  | 29,68        | 14,28                 | 13,53                 |
| Limite ZE        | 19,19        | 9,30                  | 6,76                  | 42,81        | 20,61                 | 19,68                 |
| Fundo            | 18,22        | 9,01                  | 7,38                  | 53,20        | 24,84                 | 23,98                 |
| <b>Transição</b> |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 20,64        | 9,94                  | 7,99                  | 37,57        | 17,67                 | 16,60                 |
| Limite ZE        | 23,22        | 8,27                  | 7,99                  | 65,07        | 31,78                 | 30,75                 |
| Fundo            | 18,39        | 7,26                  | 6,15                  | 17,48        | 7,67                  | 6,76                  |
| <b>Lótica</b>    |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 15,48        | 6,37                  | 4,30                  | 15,38        | 6,68                  | 6,15                  |
| Limite ZE        | 12,33        | 5,41                  | 3,075                 | 62,21        | 29,01                 | 27,67                 |
| Fundo            | 8,67         | 4,13                  | 3,07                  | 21,45        | 9,52                  | 8,61                  |
| <b>Camalaú</b>   |              |                       |                       |              |                       |                       |
| <b>Lêntica</b>   |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 10,16        | 3,63                  | 2,77                  | 14,23        | 6,55                  | 6,32                  |
| Limite ZE        | 12,16        | 5,29                  | 4,35                  | 14,74        | 6,26                  | 5,93                  |
| Fundo            | 1,54         | 0,70                  | 0,00                  | 8,98         | 4,13                  | 3,56                  |
| <b>Transição</b> |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 2,53         | 0,89                  | 0,00                  | 9,91         | 4,56                  | 4,35                  |
| Limite ZE        | 16,38        | 7,55                  | 6,32                  | 6,95         | 3,26                  | 2,77                  |
| Fundo            | 5,23         | 2,41                  | 1,19                  | 11,79        | 5,35                  | 4,74                  |
| <b>Lótica</b>    |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 4,47         | 2,04                  | 0,79                  | 11,34        | 5,39                  | 5,14                  |
| Limite ZE        | 16,18        | 7,43                  | 5,93                  | 7,46         | 3,37                  | 3,16                  |
| Fundo            | 2,32         | 1,06                  | 0,00                  | 6,52         | 2,89                  | 2,77                  |
| <b>Boqueirão</b> |              |                       |                       |              |                       |                       |
| <b>Lêntica</b>   |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 8,03         | 3,65                  | 3,62                  | 6,02         | 2,64                  | 2,58                  |
| Limite ZE        | 12,28        | 6,01                  | 5,94                  | 6,97         | 3,20                  | 3,10                  |
| Fundo            | 5,45         | 2,59                  | 2,58                  | 6,02         | 2,92                  | 2,84                  |
| <b>Transição</b> |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 4,57         | 2,11                  | 2,07                  | 5,88         | 2,68                  | 2,58                  |
| Limite ZE        | 10,37        | 5,03                  | 4,91                  | 12,44        | 6,09                  | 5,94                  |
| Fundo            | 5,42         | 2,59                  | 2,58                  | 2,80         | 1,31                  | 1,29                  |
| <b>Lótica</b>    |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 7,68         | 3,69                  | 3,62                  | 5,63         | 2,63                  | 2,58                  |
| Limite ZE        | 15,24        | 7,56                  | 7,49                  | 11,70        | 5,73                  | 5,68                  |
| Fundo            | 8,52         | 4,14                  | 4,13                  | 6,51         | 3,13                  | 3,10                  |
| <b>Acauã</b>     |              |                       |                       |              |                       |                       |
| <b>Lêntica</b>   |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 75,73        | 36,42                 | 27,50                 | 81,69        | 40,16                 | 30,80                 |
| Limite ZE        | 20,77        | 10,06                 | 6,60                  | 19,87        | 9,88                  | 7,15                  |
| Fundo            | 83,41        | 41,16                 | 26,40                 | 3,65         | 1,75                  | 1,21                  |
| <b>Transição</b> |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 45,17        | 21,25                 | 12,10                 | 121,05       | 59,04                 | 46,19                 |
| Limite ZE        | 15,09        | 7,33                  | 5,06                  | 31,99        | 15,88                 | 11,55                 |
| Fundo            | 65,47        | 31,57                 | 19,80                 | 3,811        | 1,83                  | 1,65                  |
| <b>Lótica</b>    |              |                       |                       |              |                       |                       |
| <b>Rio 1</b>     |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 86,25        | 40,99                 | 26,40                 | 103,51       | 49,97                 | 38,49                 |
| Limite ZE        | 15,79        | 7,64                  | 5,61                  | 19,65        | 9,75                  | 6,93                  |
| Fundo            | 109,51       | 53,10                 | 40,69                 | 3,77         | 1,81                  | 1,32                  |
| <b>Rio 2</b>     |              |                       |                       |              |                       |                       |
| Superfície       | 139,65       | 67,04                 | 43,99                 | 12,40        | 6,11                  | 4,07                  |
| Limite ZE        | 53,28        | 25,27                 | 15,40                 | 30,37        | 15,09                 | 10,34                 |
| Fundo            | 60,900       | 29,82                 | 18,70                 | 3,74         | 1,80                  | 1,21                  |

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2023.