

Bioacumulação de microcistinas em hortaliças irrigadas com águas de um reservatório superficial do semiárido brasileiro

Bioaccumulation of microcystins in vegetables irrigated with water from a surface reservoir in the Brazilian semi-arid region

Thiago Santos de Almeida Lopes^{1*} , Amanda Myrna de Meneses e Costa² ,
Whelton Brito dos Santos² , Weruska Brasileiro Ferreira² , Patricia Herminio Cunha¹ 

RESUMO

A eutrofização de reservatórios favorece o surgimento de cianobactérias e cianotoxinas em suas águas, frequentemente utilizadas na irrigação de culturas agrícolas. Isso tem gerado preocupação devido ao potencial de bioacumulação de cianotoxinas, como as microcistinas (MCs), em hortaliças destinadas ao consumo humano. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a bioacumulação de MCs em hortaliças irrigadas com águas do Reservatório Epitácio Pessoa, localizado em Boqueirão-PB, no semiárido brasileiro. O estudo foi conduzido em três propriedades que apresentavam cultivos agrícolas com características diversificadas. As águas de irrigação foram avaliadas em termos de parâmetros físico-químicos e MCs, que também foram determinadas nas hortaliças para avaliação da bioacumulação. Conforme a caracterização das águas de irrigação, verificou-se que no ponto de captação o Reservatório Epitácio Pessoa estava eutrofizado. As MCs foram detectadas nas águas das três propriedades e promoveram a bioacumulação nas hortaliças estudadas, em concentrações médias que variaram entre $0,63 \pm 0,06$ e $5,47 \pm 0,25 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$. Com relação às diferentes espécies vegetais, observou-se que coentro e salsa demonstraram maior suscetibilidade ao acúmulo de MCs, e que o método de irrigação pode influenciar nas concentrações finais nas plantas. Por fim, constatou-se que os consumos diários de MCs, a partir das hortaliças avaliadas, foram inferiores à ingestão diária total estabelecida pela Organização Mundial da Saúde, de $0,04 \text{ } \mu\text{g.MCs.kg}^{-1}$ de peso corpóreo. Apesar disso, ficou evidente que a bioacumulação de cianotoxinas em plantas agrícolas irrigadas com águas eutrofizadas constitui uma nova rota de contaminação humana.

Palavras-chave: cianobactérias; cianotoxinas; eutrofização; irrigação, produtos agrícolas.

ABSTRACT

The eutrophication of reservoirs favors the emergence of cyanobacteria and cyanotoxins in their waters, which are commonly used to irrigate agricultural crops. This has raised concerns due to the potential for bioaccumulation of cyanotoxins, such as microcystins (MCs), in vegetables intended for human consumption. In this scenario, the objective of this work was to evaluate the bioaccumulation of MCs in vegetables irrigated with water from the Epitácio Pessoa reservoir, located in Boqueirão, Paraíba, in the Brazilian semi-arid region. The study was carried out on three properties that had agricultural crops with diverse characteristics. Irrigation waters were evaluated in terms of physicochemical parameters and MCs, which were also determined in vegetables to evaluate bioaccumulation. According to the characterization of the irrigation waters, it was found that the Epitácio Pessoa reservoir was eutrophic at the collection point. MCs were detected in the waters of the three properties and promoted bioaccumulation in the vegetables studied, in mean concentrations that ranged between 0.63 ± 0.06 and $5.47 \pm 0.25 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$. Regarding different plant species, it was found that coriander and parsley demonstrated greater susceptibility to the accumulation of MCs and that the irrigation method can influence the final concentrations in the plants. Finally, it was found that daily intakes of MCs, from the vegetables evaluated, were lower than the total daily intake established by the World Health Organization, of $0.04 \text{ } \mu\text{g.MCs.kg}^{-1}$ of body weight. Despite this, it has become clear that the bioaccumulation of cyanotoxins in agricultural plants irrigated with eutrophicated waters constitutes a new route of human contamination.

Keywords: cyanobacteria; cyanotoxins; eutrophication; irrigation, agricultural products.

¹Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB), Brasil.

²Universidade Estadual da Paraíba - Campina Grande (PB), Brasil.

*Endereço para correspondência: Rua Aprígio Veloso, 882 - Universidade Federal de Campina Grande - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais. Campina Grande, PB. CEP: 58429-900. E-mail: thiago.s16@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

Reservatórios são corpos d'água construídos ou modificados pelo homem com o intuito de atender diversas necessidades, como o fornecimento de água potável, irrigação, produção de energia e recreação. No entanto, a pressão antrópica tem causado a degradação da qualidade de suas águas. Uma das consequências é o aumento das concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo) na água, caracterizando o fenômeno da eutrofização (BARBOSA *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2022). A eutrofização, aliada às condições ideais de luminosidade, temperatura e pH, favorece o crescimento exacerbado (florações) de cianobactérias, um grupo de procariontes fotossintéticos unicelulares ou multicelulares com distribuição ubíqua. Geralmente, essas permanecem na água por um período entre dois e quatro meses; contudo, em regiões quentes e subtropicais, podem persistir por muito mais tempo (CORDEIRO *et al.*, 2021; PRAXEDES *et al.*, 2023).

Algumas espécies de cianobactérias podem produzir cianotoxinas, metabólitos tóxicos para humanos e outros mamíferos, aves, peixes, crustáceos, moluscos e zooplâncton, capazes de ocasionar danos ao fígado, citotoxicidade, neurotoxicidade, distúrbios gastrointestinais, toxicidade cutânea e até mesmo a morte (CHORUS e BARTRAM, 1999; SILVA *et al.*, 2020; ZHANG, WHALEN e SAUVÉ, 2021). A exposição humana às cianotoxinas pode ocorrer de diferentes formas, incluindo a ingestão de água contaminada e o contato em atividades recreativas. Outra via bastante estudada é o consumo de animais aquáticos como peixes, moluscos e crustáceos, que podem absorver e acumular cianotoxinas em seus corpos e transportar para níveis superiores da cadeia trófica (ABDALLAH *et al.*, 2021; ZAMORA-BARRIOS, NANDINI e SARMA, 2019).

Os vegetais também podem apresentar a capacidade de bioacumulação de cianotoxinas. A irrigação de culturas agrícolas comumente é realizada com águas de reservatórios superficiais que, em muitos casos, encontram-se eutrofizados, em condições que promovem o surgimento de florações de cianobactérias. O consumo de plantas irrigadas com essas águas categoriza uma possível rota de intoxicação humana com cianotoxinas, que podem desencadear

prejuízos para a saúde (NERY, NERY e MEDEIROS, 2020; ZHANG, WHALEN e SAUVÉ, 2021).

Estudos apontam que microcistinas (MCs), um dos tipos de cianotoxinas predominantes e que são encontradas entre 40 – 75% das florações de cianobactérias em todo o mundo, tendem a se acumular nos tecidos comestíveis de hortaliças folhosas. Estas constituem uma via direta de contaminação, visto que são consumidas cruas. No entanto, mesmo após fervura, fritura ou cozimento a vapor, as MCs são capazes de permanecer em sua forma química original, o que indica que não há uma forma segura de preparar vegetais contaminados por essas toxinas para consumo humano (BURATTI *et al.*, 2017; ZHANG, WHALEN e SAUVÉ, 2021).

Apesar disso, a quantidade de estudos acerca da bioacumulação de cianotoxinas em culturas agrícolas ainda é limitada, sendo a grande maioria realizada em escala laboratorial sob condições controladas, que muitas vezes não retratam as condições ambientais reais (NERY, NERY e MEDEIROS, 2020; WERALUPITIYA *et al.*, 2022). Nesse seguimento, este trabalho tem como objetivo avaliar a bioacumulação de MCs em hortaliças irrigadas com águas eutrofizadas do Reservatório Epitácio Pessoa, localizado no semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em três propriedades localizadas nas proximidades do Reservatório Epitácio Pessoa (**Figura 1**), que apresentavam diferentes culturas agrícolas, portes e sistemas hidráulicos (**Tabela 1**). Este manancial está situado no município de Boqueirão-PB, possui capacidade de 466.525.964 m³ e está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, na região do Alto Curso do Rio Paraíba, sob as coordenadas geográficas 07°29'52" S e 36°08'31" W. Ele desempenha um papel de grande importância social e econômica para o Estado, abastecendo 25 sedes municipais e distritos, incluindo a cidade de Campina Grande, um dos principais centros urbanos do interior do Nordeste brasileiro. Suas principais demandas de retirada de água são: abastecimento humano urbano (69%), irrigação (24%), abastecimento humano rural (4%) e dessedentação animal (3%) (ANA, 2017; PARAÍBA, 2019).

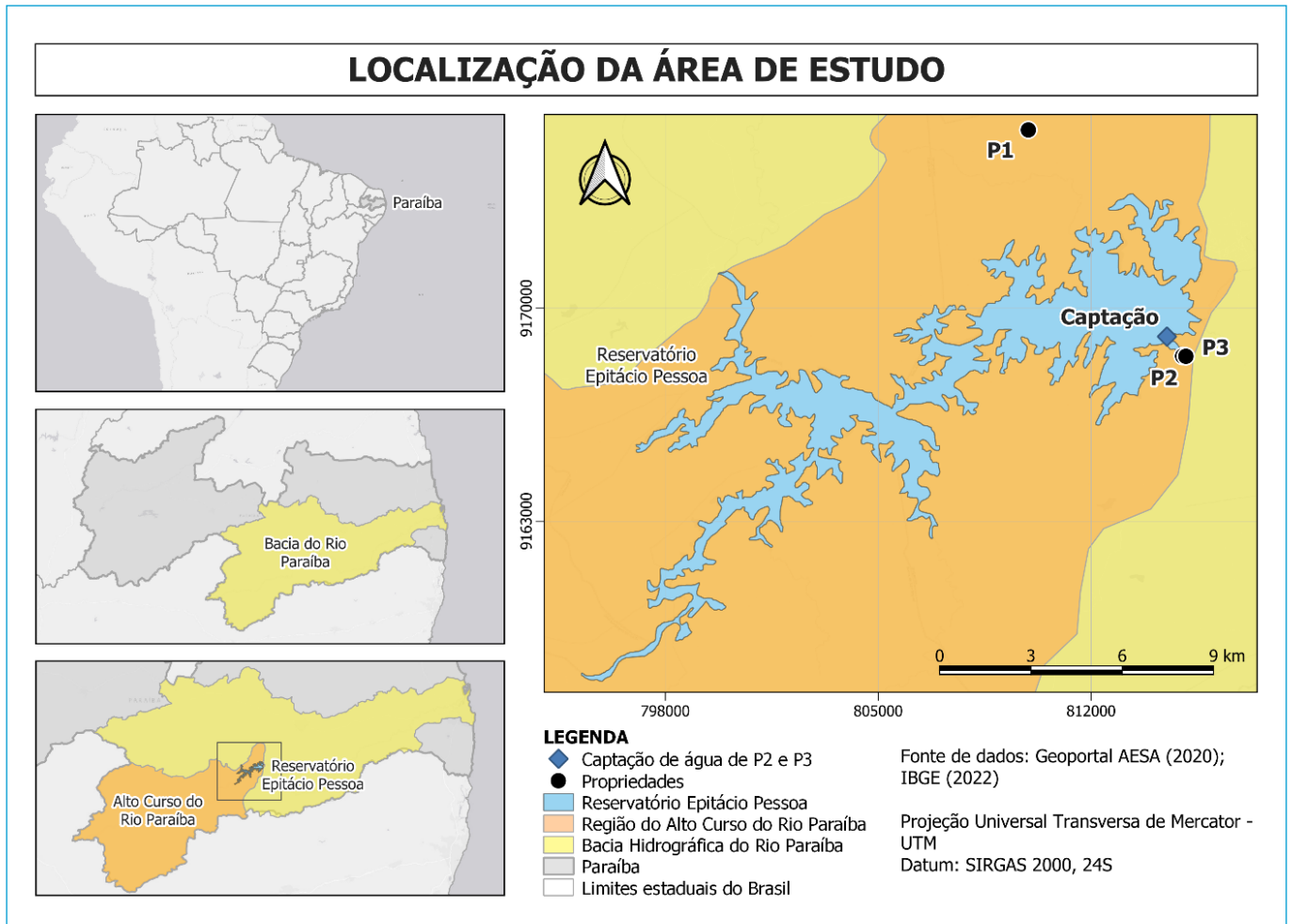


Figura 1 – Localização do Reservatório Epitácio Pessoa e das propriedades estudadas.

Tabela 1 – Informações das culturas agrícolas observadas em cada uma das propriedades.

Localização	Porte do cultivo	Espécies cultivadas	Tipo de irrigação e qualidade da água	Área molhada
P1: 7°26'49" S e 36°11'32" O	Agricultura familiar, para consumo próprio	Alface, coentro, couve, espinafre, rúcula e salsa	Manual com regador, a partir de água transportada por carro pipa e armazenada em cisterna	Folhas e solo
P2: 7°30'49" S e 36°08'45" O	Pequeno porte, comercialização na região	Alface	Hidropônica, a partir de água bruta do reservatório armazenada em cisterna	Raízes
P3: 7°30'49" S e 36°08'41" O	Médio porte, comercialização nacional	Pimentão	Gotejamento, com água bruta bombeada diretamente do reservatório	Solo

Apesar de as três propriedades utilizarem águas do Reservatório Epitácio Pessoa para irrigação, elas adotaram formas diferentes de tratamento e armazenamento. Em P1, a água era coletada na Estação de Tratamento de Águas Gravatá e fornecida mensalmente por meio de carro-pipa à propriedade, sendo armazenada em cisterna. Em P2, a água usada nos cultivos era bombeada do reservatório, sem nenhum tratamento, e armazenada em cisterna, que alimentava o

sistema hidropônico. Já em P3, a água era bombeada diretamente do reservatório para o sistema de gotejamento, sem tratamento e sem armazenamento. Vale salientar que P2 e P3 eram propriedades próximas e faziam a captação de água no mesmo ponto (7°30'29" S e 36°09'02" W).

A coleta de amostras nas propriedades ocorreu em junho de 2021. A coleta, preservação e armazenamento das amostras de água seguiram os protocolos do Guia

Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB, 2011). Em P1 e P2, a coleta de amostras de águas de irrigação foi realizada nas cisternas, visto que era a partir delas que a água era direcionada aos cultivos. Já em P3, a amostragem de água foi realizada no ponto de captação do sistema de gotejamento, no Reservatório Epitácio Pessoa.

Para as amostras de água, foram determinados in loco os parâmetros de sólidos totais dissolvidos, por meio de sonda multimétrica (HANNA HI 9829), e pH e temperatura, por meio de pHmetro portátil (KASVI). Os demais parâmetros foram analisados no LARTECA/UEPB, sendo as análises realizadas em triplicata. A **Tabela 2** elenca os parâmetros físico-químicos determinados nas águas de irrigação e seus métodos de análise.

No Brasil, não há regulamentação das concentrações de MCs em águas de irrigação; contudo, a Portaria de potabilidade para águas de abastecimento (BRASIL, 2021) estabelece o limite máximo de $1,0 \mu\text{g.L}^{-1}$ de MCs, sendo este o padrão considerado para o estudo. Em relação ao estado trófico da água, adotou-se a classificação de Thornton e Rast (1993), adequada para regiões semiáridas.

A coleta de amostras vegetais foi realizada em triplicata nas plantas adultas, sendo estas armazenadas em sacos plásticos do tipo *zip lock* (NERY, NERY e MEDEIROS, 2020). Todas as amostras de águas e vegetais foram encaminhadas, em caixas de isopor com gelo, para o Laboratório de Referência em Tecnologia de Águas (LARTECA), localizado na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), onde foram realizadas as análises.

Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos e metodologias empregadas nas análises.

Parâmetro	Método
uC	Colorímetro portátil (PoliControl AquaColor Cor)
uT	Turbidímetro portátil (PoliControl AP2000)
STD	Sonda multimétrica modelo HANNA HI 9829
pH	pHmetro portátil (KASVI)
Temperatura	pHmetro portátil (KASVI)
Ptotal	<i>Standard Methods</i> , Método do Ácido Ascórbico (4500-PE)
Clorofila a	<i>Standard Methods</i> , Espectrofotométrico (10200H)
MCs	Imunoenzimático ELISA (Eurofins Abraxis)

uC: cor aparente; uT: turbidez; STD: sólidos dissolvidos totais; Ptotal: fósforo total; MCs: microcistinas.

As concentrações de MCs nas águas foram determinadas pelo método imunoenzimático ELISA por meio de kits Abraxis (Warminster, PA, EUA), seguindo o protocolo do fabricante e a leitura das amostras realizada em uma leitora de microplacas ELISA com comprimento de onda de 450 nm. Para a extração das MCs das células foram efetuados três ciclos de congelamento e descongelamento das amostras, conforme Silva *et al.* (2020).

A extração e determinação de MCs nos tecidos vegetais foram realizadas com base em protocolos de estudos que utilizaram o método ELISA para quantificação de MCs em plantas frescas (BITTENCOURT-OLIVEIRA *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2017). De cada hortaliça foram analisadas apenas as folhas, com exceção do pimentão, onde também foram avaliados os frutos.

Para avaliar as diferenças entre as concentrações de MCs acumuladas nas hortaliças estudadas foi realizada uma análise de variância (*one-way* ANOVA) seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey. A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk. As análises estatísticas foram realizadas considerando um nível de significância de 5%, por meio do software Past 4.13 (HAMMER e HARPER, 2001).

Para avaliar os impactos da bioacumulação de MCs nos tecidos vegetais, calculou-se o consumo diário estimado (CDE) (Equação 1) para cada hortaliça e comparou-se os resultados com a ingestão diária total (IDT) recomendada pela Organização Mundial da Saúde, de $0,04 \mu\text{gMCs.kg}^{-1}$ de peso corpóreo (WHO, 2011).

$$\text{CDE} (\mu\text{g.kg}^{-1}) = (\text{CCH} * \text{CMDH}) / \text{PC} \quad (1)$$

Em que CCH é a concentração de cianotoxina na hortaliça ($\mu\text{g.g}^{-1}$), CMDH é o consumo médio diário de hortaliças (g) e PC é o peso do consumidor (kg). Para o cálculo considerou-se que uma pessoa de 60 kg consome em média 40 g de hortaliças por dia (BITTENCOURT-OLIVEIRA *et al.*, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Tabela 3** apresenta a caracterização das águas de irrigação em termos de parâmetros físico-químicos.

Tabela 3 – Caracterização das águas de irrigação em termos de parâmetros físico-químicos.

Parâmetro	Unidade	P1	P2	P3	Classe 1*
Cor aparente (uC)	uC	10,7 ± 0,4	28,7 ± 1,2	31,9 ± 0,5	-
Turbidez (uT)	uT	0,2 ± 0,02	1,6 ± 0,2	2,3 ± 0,2	40,0
Sólidos dissolvidos totais (STD)	mg.L ⁻¹	54 ± 1	161 ± 1	148 ± 3	500
pH	-	9,9 ± 0,2	8,9 ± 0,2	9,8 ± 0,2	6,0 a 9,0
Temperatura	°C	25,6 ± 0,5	27,5 ± 0,5	27,2 ± 0,5	-
Fósforo total (Ptotal)	mg.L ⁻¹	0,5 ± 0,01	0,3 ± 0,03	0,3 ± 0,03	0,02
Clorofila a	µg.L ⁻¹	1,1 ± 0,05	8,7 ± 0,8	32,5 ± 1,0	10,0
Microcistinas (MCs)	µg.L ⁻¹	0,08 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,12 ± 0,01	-

*Padrões de qualidade para a Classe 1 de águas doces, conforme Resolução CONAMA nº 357; uC: cor aparente; uT: turbidez; STD: sólidos dissolvidos totais; Ptotal: fósforo total; MCs: microcistinas.

Thornton e Rast (1993) definem que a partir de 60 µg.L⁻¹ de fósforo total e 12 µg.L⁻¹ de clorofila a, o ambiente pode ser classificado como eutrófico em regiões semiáridas. Com base neste estudo e nos dados obtidos em P3 (água coletada diretamente no Reservatório Epitácio Pessoa), pode-se determinar que neste ponto a água estava eutrofizada. Barbosa *et al.* (2021) monitoraram a qualidade da água do Reservatório Epitácio Pessoa entre os anos 2015 e 2019 e verificaram que, durante todo este período, ele foi classificado como eutrófico. No estudo de Silva *et al.* (2020), quatro reservatórios da bacia do Rio Paraíba, incluindo o Epitácio Pessoa, foram avaliados entre 2016 e 2017 e foram classificados como eutróficos, além de apresentarem espécies tóxicas de cianobactérias e cianotoxinas. Já Nery, Nery e Medeiros (2020) avaliaram a água do Reservatório Epitácio Pessoa em 2019 e detectaram a presença de cianobactérias e cianotoxinas.

Dentre os fatores que contribuem para a eutrofização deste reservatório, destacam-se a intensa atividade antrópica em sua bacia de drenagem, bem como o elevado tempo de residência (entre 3 e 5 anos) decorrente do ciclo hidrológico com longos períodos de estiagem, que propicia uma maior retenção dos nutrientes e poluentes carregados para ele (MEDEIROS *et al.*, 2018). Como resposta aos estresses antropogênicos e ambientais, incluindo os climáticos, suas águas encontram-se eutrofizadas, favorecendo o surgimento de florações potencialmente tóxicas de cianobactérias, como relatado por Silva *et al.* (2020) e Nery, Nery e Medeiros (2020).

A classificação trófica das águas coletadas em P1 e P2 não foi avaliada, pois elas estavam fora do reservatório e sofreram

mudanças de qualidade provocadas pelo tratamento (P1) e/ou armazenamento em cisterna (P1 e P2). Isso pode ser evidenciado pelos dados de clorofila a, cujo valor médio em P3 (32,41 µg.L⁻¹) foi bastante superior aos encontrados em P1 e P2 (1,08 µg.L⁻¹ e 8,66 µg.L⁻¹, respectivamente).

Conforme os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 1 de águas doces (**Tabela 3**), que são as águas que podem ser empregadas para a irrigação de hortaliças que são consumidas cruas, observa-se que as águas estudadas não atendiam a pelo menos 1 dos parâmetros avaliados. Não obstante, as concentrações médias de MCs apresentaram baixas variações (0,08 a 0,12 µg.L⁻¹) e encontraram-se abaixo do limite máximo (1,0 µg.L⁻¹) estabelecido pela Portaria de potabilidade brasileira (BRASIL, 2021).

Apesar disso, Silva *et al.* (2020) identificaram MCs nas águas do Epitácio Pessoa em concentrações superiores a 1,0 µg.L⁻¹, entre 2016 e 2017, indicando que a presença de MCs neste reservatório pode oscilar para valores acima dos estabelecidos na referida Portaria. A **Tabela 4** apresenta as concentrações médias de MCs detectadas nas hortaliças de P1, P2 e P3 e os consumos diários estimados de MCs a partir destas.

Observa-se que as MCs foram detectadas em todas as hortaliças avaliadas. Com isso, constata-se que as concentrações de MCs presentes nas águas estudadas (**Tabela 3**), apesar de estarem em conformidade com o padrão da Portaria de potabilidade brasileira (BRASIL, 2021), foram suficientes para promover bioacumulação nos tecidos vegetais.

Tabela 4 - Concentrações médias e concentrações diárias estimadas de microcistinas para as hortaliças de P1, P2 e P3.

Propriedade	Hortaliça	MCs (ng.g ⁻¹)	CDE (µg.kg ⁻¹)
P1	Alface	2,17 ± 0,16 d	0,0014
	Coentro	7,83 ± 0,49 a	0,0052
	Couve	2,31 ± 0,10 d	0,0015
	Espinafre	4,12 ± 0,12 c	0,0027
	Rúcula	0,63 ± 0,06 f	0,0004
	Salsa	5,47 ± 0,25 b	0,0036
P2	Alface	1,55 ± 0,07 e	0,0010
P3	Pimentão (folha)	4,36 ± 0,09 c	0,0029
	Pimentão (5,0 cm)*	1,59 ± 0,02 e	0,0011
	Pimentão (7,5 cm)*	1,41 ± 0,07 e	0,0009

Dados com a mesma letra não diferem estatisticamente ($p < 0,05$); *diâmetro do pimentão (fruto).

As MCs são as cianotoxinas mais estudadas devido à sua elevada toxicidade e detecção frequente em águas superficiais, em concentrações que muitas vezes excedem a recomendada pela OMS, de 1,0 µg.L⁻¹ (CORBEL *et al.*, 2015). Neste estudo, o fato de as MCs promoverem bioacumulação em vegetais (**Tabela 4**) irrigados com águas do Reservatório Epitácio Pessoa reforça a sua relevância no meio científico e o seu potencial de atingir o ser humano por meio do consumo de hortaliças contaminadas.

Um dos fatores que pode contribuir para a bioacumulação de MCs em hortaliças é a sua elevada estabilidade química nas águas de irrigação. Estas cianotoxinas possuem meia-vida entre 5 e 60 dias no solo, a partir do qual podem ser absorvidas pelas plantas ou, ainda, infiltrar e comprometer a qualidade de águas subterrâneas, levando a problemas de saúde pública (CORBEL, MOUGIN e BOUAÏCHA, 2014; MACHADO *et al.*, 2017).

Com relação aos cultivos avaliados nas diferentes propriedades, verificou-se que as maiores bioacumulações de MCs ocorreram no coentro e na salsa (**Tabela 4**). A suscetibilidade destas hortaliças para o acúmulo de MCs tem sido relatada no meio científico. Nery, Nery e Medeiros (2020) analisaram amostras de coentros cultivados nas proximidades do Reservatório Epitácio Pessoa, cujas águas apresentavam 0,73 ± 0,35 µg.L⁻¹ de MCs, e detectaram, em plantas com 30 e 60 dias de idade, concentrações acima de 1,0 e 3,0 µgMCs.kg⁻¹, respectivamente. Já a

salsa, conforme Zhang, Whalen e Sauvé (2021), pode acumular 3 vezes mais MCs em suas partes comestíveis que outras hortaliças.

No tocante ao método de irrigação, verifica-se que a alface de P1, irrigada com regador manual, acumulou mais MCs que a alface de P2, cultivada em hidroponia. Isso indica que os métodos de irrigação que molham a folhagem da planta podem promover maior bioacumulação de MCs nessa região do que a irrigação localizada no solo, como o gotejamento, ou nas raízes, como é o caso da hidroponia. Tal assertiva é corroborada por Zhang, Whalen e Sauvé (2021), que afirmam que o nível de bioacumulação de cianotoxinas em hortaliças depende do local de exposição à água contaminada.

O método de irrigação está intimamente ligado ao mecanismo pelo qual a cianotoxina irá se acumular na planta. Em métodos que molham a folhagem, ocorre a deposição química na região que entra em contato com a água contaminada. Já na irrigação localizada no solo ou por hidroponia, as cianotoxinas presentes na água são absorvidas por meio das raízes (KITTLER *et al.*, 2012; MOHAMED e AL SHEHRI, 2009).

Zhang, Whalen e Sauvé (2021) apontam que nos sistemas hidropônicos há uma maior biodisponibilidade de cianotoxinas que nos cultivos baseados em solo, o que pode favorecer a absorção e transporte destas ao longo da planta, visto que permanecem na água. Apesar disso, a alface em P1 apresentou maior bioacumulação de MCs nas folhas que a alface em P2. Uma justificativa para esse caso é o fato de cultivos com irrigação localizada acumularem mais cianotoxinas nas raízes do que nas demais partes da planta, como indicam os estudos de Gutiérrez-Praena *et al.* (2013) e Zhang, Whalen e Sauvé (2021).

Sabendo-se que na irrigação localizada apenas uma fração das cianotoxinas absorvidas é transportada das raízes para as folhas e que a deposição química resultante da irrigação por aspersão promove a bioacumulação nas folhas de modo que a lavagem pode não ser suficiente para garantir a segurança alimentar, como observado por Codd, Metcalf e Beattie (1999), o método de irrigação mais recomendado para cultivos irrigados com águas contaminadas por MCs será aquele que molha apenas o solo ou as raízes.

No entanto, vale salientar que essa recomendação é válida para hortaliças folhosas, cujas raízes não são consumidas.

Em P3, verifica-se mais uma vez a capacidade de deslocamento das MCs ao longo da planta, visto que, apesar da irrigação ser via gotejamento em um sistema solo-planta, MCs foram detectadas tanto nas folhas como nos frutos do pimentão. Nessa hortaliça, a maior bioacumulação de MCs ocorreu nas folhas ($4,36 \pm 0,09 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$), o que também foi observado no estudo de Nery, Nery e Medeiros (2020) e é corroborado por Zhang, Whalen e Sauvé (2021), que relatam que MCs tendem a se acumular preferencialmente nas raízes e folhas, seguidos pelos caules e depois pelos grãos e frutos. No caso do pimentão, isso pode ser considerado uma vantagem, visto que a parte comestível são os frutos.

Gutiérrez-Praena *et al.* (2014) e Nery, Nery e Medeiros (2020) registraram a diminui o das concentra es de MCs durante o amadurecimento de pimentões e tomates, respectivamente, indicando que o crescimento e a maturac o dos frutos estão relacionados com a depura o dos níveis de cianotoxinas. Esse fen meno também pode ocorrer em hortaliças folhosas, conforme estudo de Cordeiro-Araújo *et al.* (2016), em que alfaces expostas durante sete dias a 5 e 10 $\mu\text{g.L}^{-1}$ de MC-LR apresentaram elimina o da cianotoxina após 29 e 37 dias, respectivamente.

Todavia, neste trabalho, as concentra es de MCs foram estatisticamente semelhantes para os pimentões de 5,0 e 7,5 cm de diâmetro, isto  , com diferentes idades. O fato de as hortaliças estudadas serem continuamente irrigadas com as águas do Reservatório Epitácio Pessoa contendo MCs pode ter impedido o processo de depura o ou até mesmo reduzido a sua eficácia, visto que a interrupc o da exposi o da planta às cianotoxinas   um dos fatores importantes para a ocorrência desse fen meno.

As concentra es diárias estimadas (CDEs) apresentados na **Tabela 4** não excederam o IDT recomendado pela OMS ($0,04 \text{ } \mu\text{gMCs.kg}^{-1}$), sendo o maior valor (coentro = $0,0052 \text{ } \mu\text{gMCs.kg}^{-1}$) correspondente a apenas 13% do IDT. Apesar disso, o potencial de bioacumula o de MCs em tecidos vegetais fica evidente, uma vez que, mesmo as concentra es de MCs nas águas estando em conformidade com o padrão de potabilidade brasileiro, observou-se bioacumula o nas hortaliças estudadas.

Assim, com a crescente explora o dos recursos hídricos e as condi es ambientais do semiárido, que favorecem o crescimento exacerbado de cianobactérias, a ingestão de culturas irrigadas com águas eutrofizadas configura-se como uma nova rota de contamina o humana por cianotoxinas e possível preocupa o a longo prazo nesta região.

A problemática mencionada tem sido observada em diversas regiões do planeta. Chia *et al.* (2019) adquiriram amostras de alface e repolho em quatro mercados na Nigéria, detectando a presença de MCs em todas elas. Os valores de CDEs atingiram máximos de $1,41 \text{ } \mu\text{g.kg}^{-1}$ e $2,94 \text{ } \mu\text{g.kg}^{-1}$, respectivamente, superando o  ndice de Dose Tolerável (IDT) recomendado pela Organiza o Mundial da Saúde (OMS) de $0,04 \text{ } \mu\text{g.kg}^{-1}$.

Levizou *et al.* (2020) conduziram um estudo em que cultivaram rabanete e cenoura utilizando águas de um reservatório na Nigéria, apresentando concentra es de $3,76 \text{ } \mu\text{gMCs.L}^{-1}$. Os resultados indicaram níveis de bioacumula o que excedem até 4 vezes o IDT da OMS, em caso de ingestão dessas hortaliças.

Bakr *et al.* (2022) avaliaram cultivos de alface e rúcula irrigados com águas de um lago no Sul do Egito, contendo entre $45\text{-}600 \text{ } \mu\text{g MCs.L}^{-1}$. A pesquisa revelou a bioacumula o de MCs em ambas as hortaliças, alcançando níveis que ultrapassariam o IDT com o consumo de 300 g desses vegetais.

Levizou *et al.* (2017) utilizaram água do reservatório Karla, na Grécia, contendo $1,81 \text{ } \mu\text{gMCs.L}^{-1}$, para irrigar alfaces. Os resultados mostraram espécimes com CDE de $0,240 \text{ } \mu\text{gMCs.kg}^{-1}$, correspondente a 6 vezes o IDT da OMS. Concentra es de MCs próximas e até superiores às encontradas no reservatório Karla já foram detectadas em diferentes mananciais do semiárido brasileiro, incluindo Epitácio Pessoa, Camala , Mucut  e Po es (NERY; NERY; MEDEIROS, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, destaca-se a importância do monitoramento e controle de flora es de cianobactérias potencialmente tóxicas em reservatórios de usos múltiplos e a necessidade do estabelecimento de uma legisla o específica que limite as concentra es máximas de cianotoxinas em águas de irriga o e hortaliças no Brasil.

4. CONCLUSÃO

Nas águas de irrigação analisadas, provenientes do Reservatório Epitácio Pessoa, foram identificadas MCs, o que pode ser atribuído a fatores como a eutrofização do reservatório e as condições ambientais da região. As concentrações de MCs nessas águas, apesar de estarem em conformidade com a portaria de potabilidade brasileira durante o período estudado, foram suficientes para promover a bioacumulação nas hortaliças irrigadas, indicando que a única maneira de evitar esse fenômeno é controlar as características da água em relação à presença de cianobactérias e cianotoxinas.

Observou-se que a espécie vegetal, o método de irrigação e os processos de crescimento e maturação das plantas influenciam na bioacumulação. Entre as diversas hortaliças estudadas, coentro e salsa demonstraram maior sensibilidade ao acúmulo, o que está em conformidade com o que

é relatado na literatura. Quanto ao método de irrigação, verificou-se que aqueles que molham a folhagem podem induzir a um maior acúmulo, como observado na alface; no entanto, estudos envolvendo mais espécies vegetais são necessários. Em relação à idade da planta, não foi observada diferença significativa nos níveis de MCs acumulados em pimentões com 5,0 e 7,5 cm de diâmetro.

Por fim, constatou-se que os consumos diários estimados de MCs a partir das hortaliças estudadas foram inferiores ao IDT recomendado. No entanto, o potencial de bioacumulação de MCs em plantas agrícolas ficou evidente, considerando a crescente exploração dos recursos hídricos e a consequente eutrofização de reservatórios no semiárido. A ingestão de hortaliças irrigadas configurou-se como uma nova rota de contaminação humana por cianotoxinas e uma possível preocupação a longo prazo nesta região.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, M.F.; VAN HASSEL, W.H.; ANDJELKOVIC, M.; WILMOTTE, A.; RAJKOVIC, A. Cyanotoxins and Food Contamination in Developing Countries: Review of Their Types, Toxicity, Analysis, Occurrence and Mitigation Strategies. *Toxins*, v. 13, n. 11, p. 786, 2021. <https://doi.org/10.3390/toxins13110786>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Reservatórios do Semiárido Brasileiro*: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Anexo A. Brasília: ANA, 2017. 103 p.

BAKR, A.; ALZAIN, M.N.; ALZAMEL, N.M.; LOUTFY, N. Accumulation of microcystin from *Oscillatoria limnetica* Lemmermann and *Microcystis aeruginosa* (Kützing) in two leafy green vegetable crop plants *Lactuca sativa* L. and *Eruca sativa*. *Plants (Basel)*, v. 11, n. 13, p. 1733, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11131733>

BARBOSA, J.E.L.; SEVERIANO, J.S.; CAVALCANTE, H.; LUCENA-SILVA, D.; MENDES, C.F.; BARBOSA, V.V.; SILVA, R.D.S.; OLIVEIRA, D.A.; MOLOZZI, J. Impacts of inter-basin water transfer on the water quality of receiving reservoirs in a tropical semi-arid region. *Hydrobiologia*, v. 848, n. 3, p. 651-673, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04471-z>

BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C.; CORDEIRO-ARAÚJO, M.K.; CHIA, M.A.; ARRUDA-NETO, J.D.T.; DE OLIVEIRA, Ê.T.; DOS SANTOS, F. Lettuce irrigated with contaminated water: Photosynthetic effects,

antioxidative response and bioaccumulation of microcystin congeners. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 128, p. 83-90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.014>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2021.

BURATTI, F.M.; MANGANELLI, M.; VICHI, S.; STEFANELLI, M.; SCARDALA, S.; TESTAI, E.; FUNARI, E. Cyanotoxins: producing organisms, occurrence, toxicity, mechanism of action and human health toxicological risk evaluation. *Archives of Toxicology*, v. 91, n. 3, p. 1049-1130, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1913-6>

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

- CHIA, M.A.; AUTA, Z.Z.; ESSON, A.E.; YISA, A.G.; ABOLUDE, D.S. Assessment of microcystin contamination of *Amaranthus hybridus*, *Brassica oleracea*, and *Lactuca sativa* sold in markets: a case study of Zaria, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7725-4>
- CHORUS, I.; BARTRAM, J. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. London: E&FN Spon, 1999.
- CODD, G.A.; METCALF, J.S.; BEATTIE, K.A. Retention of *Microcystis aeruginosa* and microcystin by salad lettuce (*Lactuca sativa*) after spray irrigation with water containing cyanobacteria. *Toxicon*, v. 37, n. 8, p. 1181-1185, 1999. [https://doi.org/10.1016/s0041-0101\(98\)00244-x](https://doi.org/10.1016/s0041-0101(98)00244-x)
- CORBEL, S.; MOUGIN, C.; BOUAÏCHA, N. Cyanobacterial toxins: Modes of actions, fate in aquatic and soil ecosystems, phytotoxicity and bioaccumulation in agricultural crops. *Chemosphere*, v. 96, p. 1-15, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.056>
- CORBEL, S.; MOUGIN, C.; MARTIN-LAURENT, F.; CROUZET, O.; BRU, D.; NÉLIEU, S.; BOUAÏCHA, N. Evaluation of phytotoxicity and ecotoxicity potentials of a cyanobacterial extract containing microcystins under realistic environmental concentrations and in a soil-plant system. *Chemosphere*, v. 128, p. 332-340, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.008>
- CORDEIRO-ARAÚJO, M.K.; CHIA, M.A.; ARRUDA-NETO, J.D.T.; TORNISIELO, V.L.; VILCA, F.Z.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C. Microcystin-LR bioaccumulation and depuration kinetics in lettuce and arugula: Human health risk assessment. *Science of the Total Environment*, v. 566, p. 1379-1386, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.204>
- CORDEIRO, R.; AZEVEDO, J.; VASCONCELOS, V.; FONSECA, A.; GONÇALVES, V. First occurrence of *Cylindrospermopsis* in the Azores (Lake Sao Bras, S. Miguel Island). *Limnology*, v. 22, p. 269-275, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10201-021-00656-0>
- GUTIÉRREZ-PRAENA, D.; JOS, Á.; PICHARDO, S.; MORENO, I. M.; CAMEÁN, A. M. Presence and bioaccumulation of microcystins and cylindrospermopsin in food and the effectiveness of some cooking techniques at decreasing their concentrations: A review. *Food and Chemical Toxicology*, v. 53, p. 139-152, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.062>
- GUTIÉRREZ-PRAENA, D.; CAMPOS, A.; AZEVEDO, J.; NEVES, J.; FREITAS, M.; GUZMÁN-GUILLÉN, R.; CAMEÁN, A.M.; RENAUT, J.; VASCONCELOS, V. Exposure of *Lycopersicon Esculentum* to microcystin-LR: Effects in the leaf proteome and toxin translocation from water to leaves and fruits. *Toxins (Basel)*, v. 6, n. 6, p. 1837-1854, 2014. <https://doi.org/10.3390/toxins6061837>
- HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, p. 1, 2001.
- KITTLER, K.; SCHREINER, M.; KRUMBEIN, A.; MANZEI, S.; KOCH, M.; ROHN, S.; MAUL, R. Uptake of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in *Brassica* vegetables. *Food Chemistry*, v. 133, n. 3, p. 875-879, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.107>
- LEE, S.; JIANG, X.; MANUBOLU, M.; RIEDL, K.; LUDSIN, S. A.; MARTIN, J.F.; LEE, J. Fresh produce and their soils accumulate cyanotoxins from irrigation water: implications for public health and food security. *Food Research International*, v. 102, p. 234-245, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.079>
- LEVIZOU, E.; STATIRIS, G.; PAPADIMITRIOU, T.; LASPIDOU, C.S.; KORMAS, K.A. Lettuce facing microcystins-rich irrigation water at different developmental stages: Effects on plant performance and microcystins bioaccumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 143, p. 193-200, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.037>
- LEVIZOU, E.; PAPADIMITRIOU, T.; PAPAVALSILEIOU, E.; PAPADIMITRIOU, N.; KORMAS, K.A. Root vegetables bioaccumulate microcystins-LR in a developmental stage-dependent manner under realistic exposure scenario: The case of carrot and radish. *Agricultural Water Management*, v. 240, p. 106274, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106274>
- LIMA, F.J.DO.; LOPES, F.B.; ANDRADE, E.; ROCHA, F.C.D.; MEIRELES, A.C. Spatio-temporal dynamics of toxic cyanobacteria in an artificial lake in the Brazilian semi-arid region. *Revista Caatinga*, v. 35, p. 423-435, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n218rc>
- MACHADO, J.; CAMPOS, A.; VASCONCELOS, V.; FREITAS, M. Effects of microcystin-LR and cylindrospermopsin on plant-soil systems: A review of their relevance for agricultural plant quality and public health. *Environmental Research*, v. 153, p. 191-204, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.09.015>
- MEDEIROS, C.; AZEVEDO, E.; BARBOSA, E.; MOLOZZI, J. Effectiveness of abundance and biomass curves in detecting environmental alterations in semi-arid region reservoirs. *Biota Neotropica*, v. 18, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2017-0423>
- MOHAMED, Z.A.; AL SHEHRI, A.M. Microcystins in groundwater wells and their accumulation in vegetable plants irrigated with contaminated waters in Saudi Arabia. *Journal of Hazardous Materials*, v. 172, n. 1, p. 310-315, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.010>
- NERY, J.F.; NERY, G.K.M.; MEDEIROS, S.S. Microcystin bioaccumulation in cultures irrigated with eutrophized waters in Brazilian Semi-arid. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 6, n. 2, p. 5-9, 2020.

- PARAÍBA. Governo do Estado. *Nota técnica AESA/GEMOH: 001/2019*. Dispõe sobre as atualizações das curvas Cota x Área x Volume (CAV) com respectiva alteração dos volumes finais de reservatórios do Estado. Campina Grande: Secretaria da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente, Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - AESA, 2019.
- PRAXEDES, C.F.; LOPES, F.B.; DE ANDRADE, E.M.; DA SILVA, T.T.; BECKER, H. Evaluation of nitrogen and phosphorus in surface reservoirs of the semi-arid region of Brazil using mass balance. *Revista Ciência Agronômica*, v. 54, p. e20228421, 2023. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230057>
- SILVA, R.D.S.; SEVERIANO, J.S.; OLIVEIRA, D.A.; MENDES, C.F.; BARBOSA, V.V.; CHIA, M.A.; BARBOSA, J.E.L. 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, p. 13-29, 2020. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2019.1893>
- THORNTON, J.A.; RAST, W. A test of hypotheses relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, p. 1-24, 1993. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1096-1_1
- WERALUPITIYA, C.; WANIGATUNGE, R.P.; GUNAWARDANA, D.; VITHANAGE, M.; MAGANA-ARACHCHI, D. Cyanotoxins uptake and accumulation in crops: Phytotoxicity and implications on human health. *Toxicon*, v. 211, p. 21-35, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2022.03.003>
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Cyanobacterial toxins: microcystin-LR in drinking-water. Guidelines for drinking-water quality*. 4. ed. Geneva: WHO, 2001.
- ZAMORA-BARRIOS, C.A.; NANDINI, S.; SARMA, S.S.S. Bioaccumulation of microcystins in seston, zooplankton and fish: A case study in Lake Zumpango, Mexico. *Environmental Pollution*, v. 249, p. 267-276, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.029>
- ZHANG, Y.; WHALEN, J.K.; SAUVÉ, S. Phytotoxicity and bioconcentration of microcystins in agricultural plants: Meta-analysis and risk assessment. *Environmental Pollution*, v. 272, p. 115966, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115966>