

Efeito do surfactante alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) e da temperatura em organismos aquáticos: discussões sobre a dimensão ecossistêmica da segurança hídrica

Giovanna da Silva Celeglim¹
Laiane Neri Sant'ana²
Caroline Ferreira da Silva³
Jurity Antônia Machado Milan⁴
Gilmar Perbiche Neves⁵
Irineu Bianchini Júnior⁶
Marcela Bianchessi da Cunha-Santino⁷

Água, Recursos Hídricos e Drenagem Urbana

Resumo

Bioensaios sobre os efeitos dos surfactantes em diferentes organismos (fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas) da biota aquática, em função do aumento da temperatura, são necessários para compreender as possíveis rupturas no funcionamento dos ecossistemas aquáticos com potencial de abastecimento público. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do surfactante alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) e a da temperatura em organismos aquáticos. Para tanto, experimentos foram desenvolvidos para testar as seguintes hipóteses: (1) A presença do LAS tem efeito negativo no crescimento e na sobrevivência de organismos aquáticos; (2) O efeito do LAS pode ser potencializado pelo aumento da temperatura global devido às mudanças climáticas e (3) A interação entre organismos aquáticos (planta-animal) pode atenuar o efeito do LAS, devido ao potencial aumento de absorção/adsorção de contaminantes pelas plantas. Em relação à presença de surfactantes nas águas continentais, ao analisarmos os resultados, podemos concluir que a hipótese (1) de que a presença do LAS tem efeito negativo no crescimento e na sobrevivência dos organismos aquáticos testados foi corroborada nos experimentos com as culturas fitoplanctônicas, nas taxas fotossintéticas de *Egeria densa* e na sobrevivência de *Simocephalus serrulatus*. Quanto à hipótese 2, de que o efeito do LAS pode ser potencializado pelo aumento da temperatura da água em cerca de 2 °C, o experimento que avaliou as taxas fotossintéticas de *Egeria densa* não corroborou essa hipótese, pois o LAS pode ser biodegradado mais rapidamente em temperaturas mais elevadas, o que diminui sua toxicidade. A hipótese 3, de que a interação planta-animal poderia diminuir o efeito do LAS, também não foi corroborada, pois a interação não reduziu os efeitos observados do surfactante. Bioensaios que possam elucidar os efeitos de contaminantes específicos ou associados a outros estressores (por exemplo, temperatura) que alteram a qualidade dos recursos hídricos podem contribuir para as discussões sobre a dimensão ecossistêmica da segurança hídrica.

Palavras-chave: macrófitas; zooplâncton; segurança hídrica; temperatura; bioensaios.

¹ Escola Técnica Estadual Conselheiro Antônio Prado. gigiceleghin@icloud.com

² Universidade Federal de São Carlos/PPG-ERN. laianenerisantana@estudante.ufscar.br

³ Universidade Federal de São Carlos/PPG-ERN. cferreiraufscar@gmail.com

⁴ Universidade Federal de São Carlos/Depto. de Hidrobiologia. jurity@ufscar.br

⁵ Universidade Federal de São Carlos/Depto. de Hidrobiologia. gpneves@ufscar.br

⁶ Universidade Federal de São Carlos/Depto. de Hidrobiologia. irineu@ufscar.br

⁷ Universidade Federal de São Carlos/Depto. de Hidrobiologia. cunha_santino@ufscar.br

INTRODUÇÃO

Os surfactantes, um grupo diversificado de produtos químicos, são amplamente utilizados em detergentes e outros produtos de limpeza. Após o uso doméstico ou industrial, os surfactantes residuais são lançados em sistemas de esgoto para tratamento ou diretamente nas águas superficiais, como nos rios. Quando não são tratados adequadamente, esses compostos acabam sendo dispersados em diversos compartimentos ambientais, como solo, água ou sedimento (Ivanković e Hrenović, 2010). Uma compilação sobre a ocorrência de surfactantes em diferentes matrizes aquosas em diversas regiões do mundo indicou que as concentrações variaram de 1 µg/L a 14.800 mg/L (Nunes e Teixeira, 2022). Os efeitos tóxicos dos surfactantes em vários organismos aquáticos estão amplamente documentados na literatura (Liu et al., 2019; Wanderley et al., 2021).

Uma das principais ameaças à qualidade das águas para abastecimento humano é a contaminação por diversos poluentes, como, por exemplo, os surfactantes, que são compostos amplamente utilizados. A presença de surfactantes nas águas pode ser prejudicial não só ao abastecimento público, mas também aos ecossistemas aquáticos e à biodiversidade. Nesse contexto, a segurança hídrica é um conceito fundamental utilizado para garantir o acesso contínuo e seguro à água potável em quantidade suficiente e com qualidade adequada para o abastecimento público (UN-Water, 2013). Em um cenário de mudanças climáticas, além da alteração dos padrões de precipitação, o aumento da temperatura pode afetar diretamente a qualidade da água disponível, interferindo negativamente na segurança hídrica. O aumento na temperatura global é um fator preocupante em função dos potenciais efeitos sobre a ação dos surfactantes na biota aquática. Em 2024, a temperatura média global foi de 13,9 °C, ou seja, 2,7 °C acima da média histórica de 11,2 °C registrada entre 1875 e 2024 (NOAA, 2024). Assim, bioensaios sobre os efeitos dos surfactantes em diferentes organismos aquáticos (fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas), em função do aumento da

temperatura, são necessários para compreender as possíveis disrupturas no funcionamento dos ecossistemas aquáticos com potencial de abastecimento público. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do surfactante alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) e a temperatura em organismos aquáticos. As hipóteses que guiaram esse estudo foram: (1) A presença do surfactante LAS tem efeito negativo no crescimento e na sobrevivência de organismos aquáticos; (2) O efeito do LAS pode ser potencializado pelo aumento da temperatura global devido às mudanças climáticas e (3) A interação entre organismos aquáticos (planta-animal) pode atenuar o efeito do LAS, devido ao aumento potencial de absorção/adsorção de contaminantes pelas plantas. Bioensaios que possam elucidar os efeitos de contaminantes específicos ou associados a outros estressores (e.g., temperatura) que alteram a qualidade dos recursos hídricos, poderão auxiliar nas discussões sobre a dimensão ecossistêmica da segurança hídrica.

METODOLOGIA

A concentração de LAS (100 mg de LAS/L; Sigma-Aldrich, com pureza de 98%) testada em diversos organismos aquáticos foi baseada nos experimentos de Li et al. (2019). Pelo enfoque ecológico deste estudo, as amostras de água utilizadas no preparo das soluções de LAS testadas foram coletadas em um ambiente lântico localizado em uma região de baixa ocupação antrópica (-21.97164123410313, -47.88748633553413), para garantir sua qualidade prístina, ou seja, sem a adução de esgotos. Considerando nossas hipóteses, os seguintes experimentos foram desenvolvidos:

Hipótese 1: A presença do surfactante LAS tem efeito negativo no crescimento e na sobrevivência de organismos aquáticos. Para testar essa hipótese, foram preparados 9 bioensaios em frascos de borossilicato (volume = 100 ml) contendo 70 ml de cultura não axênica de Chlorophyceae, divididos em 3 tratamentos: (i) Tratamento controle: bioensaios sem adição de surfactante, ou seja, apenas cultura algal (TC); (ii) Bioensaio com cultura fitoplanctônica submetida a diluição de 10% com uma solução de 100 mg LAS/L (T10%) e (iii) Bioensaio com cultura fitoplanctônica submetida a diluição de 50% com uma solução de 100 mg LAS/L (T50%). Para estimar o número de células algais em cada tratamento, foi utilizado o método colorimétrico (Bianchini Jr. et al., 1985), que utiliza uma relação entre a leitura das culturas fitoplanctônicas (com 5

réplicas por tratamento) em espectrofotômetro a 660 nm e uma curva-padrão elaborada com o número de células algais. Os bioensaios foram incubados a 21 °C por 10 dias e, após o período de incubação, as suspensões algais foram medidas para analisar o número de células fitoplanctônicas em função da adição de LAS (T10% e T50%).

Hipótese 2: O efeito do LAS pode ser potencializado pelo aumento da temperatura global devido às mudanças climáticas. Para testar essa hipótese, foram preparados 24 bioensaios contendo 70 ml de água e hastes apicais de *Egeria densa* (comprimento: 4 cm). Em 12 bioensaios, foram adicionados, juntamente com as hastes, LAS. Os 24 bioensaios (12 com adição de LAS e 12 com apenas água, ou seja, tratamento controle – TC-M) foram divididos em 2 grupos e incubados sob luz artificial, com fotoperíodo de 12 h/12 h claro:escuro, durante 10 dias, em duas temperaturas (19,5 °C e 21 °C). Dessa forma, os tratamentos foram: (i) Tratamento controle em duas temperaturas (TC-M19,5 e TC-M21) e (ii) Tratamento com adição de surfactante em duas temperaturas (TS-M19,5 e TS-M21). Após esse período, as hastes foram transferidas para frascos de DBO contendo 300 ml de água destilada e a determinação das concentrações de oxigênio dissolvido com auxílio de oxímetro foi realizada. Os frascos foram mantidos sob iluminação (181 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) e, após cerca de duas horas, as concentrações de oxigênio dissolvido foram medidas novamente. As massas das hastes de *Egeria densa* foram determinadas em balança de precisão analítica. Considerando a diferença inicial e final das concentrações de oxigênio dissolvido (antes e depois de 2 horas de incubação), foram realizados os cálculos da fotossíntese líquida (Littler & Arnold, 1985).

Hipótese 3: A interação entre organismos aquáticos (planta-animal) pode atenuar o efeito do LAS, devido ao aumento potencial de absorção/adsorção de contaminantes pelas plantas. Para avaliar se a presença da macrófita *Egeria densa* pode atenuar o efeito do LAS na sobrevivência do zooplâncton, bioensaios de toxicidade aguda foram preparados para avaliar a taxa de sobrevivência de *Simocephalus serrulatus* na presença de LAS em duas temperaturas (19,5 °C e 21 °C). Os bioensaios seguiram os procedimentos propostos por Schiffer & Liber (2017), sendo conduzidos em triplicata em frascos de borosilicato (100 ml), contendo 70 ml de solução de LAS e uma haste de *Egeria densa* (comprimento: 4 cm). Sete animais (> 24 h de idade) foram

usados em cada tratamento (total = 21). Também foram realizados bioensaios apenas com água (tratamento controle), sem a adição de LAS e de *Egeria densa*. Os indivíduos de *Simocephalus serrulatus* não foram alimentados durante o experimento e, após 48 horas, os organismos imóveis/mortos foram observados, contados e registrados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1A mostra a quantidade de células fitoplanctônicas (células/ml) em função do aumento da proporção do surfactante LAS (controle, LAS 10% e LAS 50%). No TC, observou-se o maior número de células ($7,8 \times 10^6$ células/ml), sugerindo que, na ausência do surfactante LAS, o meio apresenta condições favoráveis para o crescimento fitoplanctônico. Para verificar o efeito das diluições de LAS (T10% e T50%) sobre a quantidade de células fitoplanctônicas, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para confirmar a distribuição normal ($p > 0,05$), seguido pelo teste ANOVA e pelo pós-teste de Tukey, com o objetivo de verificar se houve diferença significativa entre os tratamentos e diferenciar os grupos homogêneos. Complementarmente, foi aplicado o teste de Qui-quadrado para tendência, a fim de avaliar a presença de uma tendência linear em proporções, indicando que houve uma tendência de diminuição no número de células em função do aumento das diluições de LAS ($p < 0,0001$).

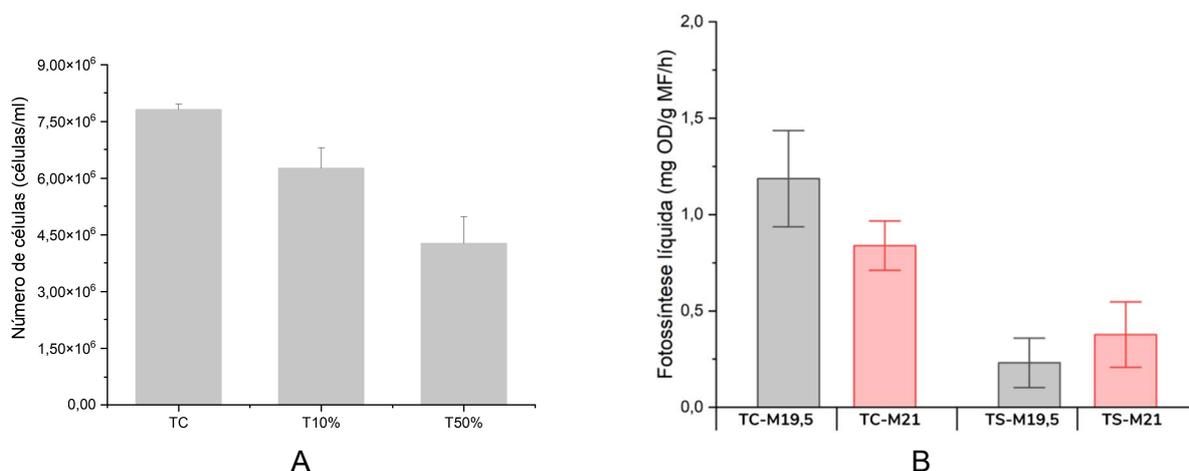


Figura 1 – (A) Número de células fitoplanctônicas (células/ml) em função do aumento da proporção do surfactante LAS nas culturas algais (TC: tratamento controle, T10%: LAS 10% e T50%: LAS 50%) e (B) Fotossíntese líquida (mg OD/g MF/h) em função da ausência (TC) ou presença de LAS (TS) em duas temperaturas: 19,5 °C e 21 °C (TC-M19,5, TC-M21, TS-M19,5 e TS-M21). Fonte: os autores.

O TC foi significativamente diferente do T10% e T50% ($p < 0,05$). Os dois tratamentos com LAS também diferiram entre si ($p < 0,05$). No T10%, observou-se uma leve redução no número de células em comparação ao TC, sugerindo que, em baixas concentrações, o LAS pode causar um impacto inicial no crescimento fitoplanctônico, mas não de forma severa. No T50%, observou-se uma redução expressiva no número de células, ficando abaixo de 5×10^6 células/ml. Essa queda significativa sugere que concentrações elevadas de LAS têm um efeito tóxico ou inibitório sobre o crescimento das células fitoplanctônicas. O surfactante LAS impacta negativamente o crescimento fitoplanctônico, com o efeito mais severo em altas concentrações (50%). O teste de tendência verificou a ocorrência de uma diminuição linear na quantidade de células fitoplanctônicas com o aumento da diluição do LAS. O LAS pode prejudicar a integridade das membranas celulares ou interferir nos processos metabólicos essenciais (Arora et al., 2022). Os resultados evidenciam uma relação dose-dependente entre a concentração de LAS e a diminuição no número de células fitoplanctônicas. Estes resultados indicam que o LAS, em concentrações elevadas, representa um risco ambiental para sistemas aquáticos, afetando a produção primária fitoplanctônica, que constitui a base da cadeia alimentar.

A Figura 1B mostra variação da fotossíntese líquida (mg OD/g MF/h) em função da ausência ou presença de LAS e da temperatura (TC-M19,5, TC-M21, TS-M19,5 e TS-M21). Análises estatísticas da fotossíntese líquida foram realizadas a fim de identificar se houve influência da presença de surfactante e diferenças nas temperaturas. Para isso, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, para verificar se a fotossíntese líquida seguia uma distribuição normal. Como os dados apresentaram distribuição normal, foi conduzido o teste de análise ANOVA bidirecional a um nível de significância de $p < 0,05$. Como o efeito da interação foi significativo, o pós-teste de Bonferroni foi aplicado (nível de significância de $p < 0,05$). Verificou-se que o LAS influenciou negativamente a fotossíntese líquida de *Egeria densa*, independentemente da temperatura ($p < 0,05$). Nos TC-M19,5 e TC-M21, onde não houve exposição ao LAS, as taxas de fotossíntese líquida foram, em média, 3,4 vezes maiores em relação aos TS-M19,5 e TS-M21. Ao analisar o efeito da temperatura, as maiores taxas de fotossíntese líquida foram observadas na menor temperatura. Quando

I SiCAm e VIII JoGAAm

expostas ao LAS, na maior temperatura, a fotossíntese líquida foi 1,6 vezes maior do que na menor temperatura.

A Tabela 1 mostra a média do número de sobreviventes em função dos tratamentos. Ao considerarmos os bioensaios sem macrófitas, o número de indivíduos sobreviventes foi maior no tratamento controle (TC) em ambas as temperaturas (19,5 °C: 7,0 ind; 21 °C: 6,7 ind). No tratamento com surfactante (TS), o número de indivíduos sobreviventes foi bastante reduzido, com o valor de 0,7 na menor temperatura e 0,0 na maior. Em relação à presença de *Egeria densa*, o TC apresentou menor número médio de indivíduos na maior temperatura (19,5 °C: 6,7 ind; 21 °C: 4,7 ind). No TS com *Egeria densa*, houve quase a total mortalidade dos indivíduos nas duas temperaturas (19,5 °C: 0,0 ind; 21 °C: 0,3 ind). O LAS teve um efeito negativo na sobrevivência dos indivíduos, independente da presença de *Egeria densa* e em ambas as temperaturas. Assim, a presença da macrófita não atenuou o efeito tóxico do LAS nas duas temperaturas, não influenciando a taxa de sobrevivência dos indivíduos de *Simocephalus serrulatus*.

Tabela 1 – Média do número de indivíduos (ind) de *Simocephalus serrulatus* nos bioensaios com e sem *Egeria densa*, na ausência (TC) e presença de LAS (TS: 100 mg LAS/L) em duas temperaturas (19,5 °C e 21 °C).

Condição do bioensaio	19,5 °C		21 °C	
	TC	TS	TC	TS
Sem <i>Egeria densa</i>	7,0	0,7	6,7	0,0
Com <i>Egeria densa</i>	6,7	0,0	4,7	0,3

Considerando os resultados experimentais que indicaram a toxicidade do LAS tanto para *Egeria densa* quanto para *Simocephalus serrulatus*, a substituição de surfactantes sintéticos por biossurfactantes, produzidos a partir de fontes renováveis como fungos, leveduras e bactérias, apresenta-se como uma medida sustentável. Os biossurfactantes são altamente biodegradáveis e menos tóxicos, reduzindo assim os impactos ambientais (Silva et al., 2023). Outra estratégia eficiente é a utilização de macrófitas aquáticas para biorremediação, aproveitando a capacidade dessas plantas de adsorver e acumular contaminantes, promovendo a restauração ambiental de águas contaminadas (Reis et al., 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese de que a presença do LAS tem efeito negativo no crescimento e na sobrevivência dos organismos aquáticos testados foi corroborada para o experimento com as culturas fitoplanctônicas, com as taxas fotossintéticas de *Egeria densa* e na sobrevivência de *Simocephalus serrulatus*. Sobre a hipótese de que o efeito do LAS pode ser potencializado pelo aumento da temperatura da água em cerca de 2°C, o experimento que avaliou as taxas fotossintéticas de *Egeria densa* não corroborou essa hipótese, pois o LAS pode ser biodegradado mais rapidamente em temperaturas mais elevadas, o que diminui sua toxicidade. A hipótese de que a interação entre organismos aquáticos (planta-animal) pode atenuar o efeito do LAS devido ao potencial de absorção/adsorção de contaminantes pelas plantas, não foi corroborada para a concentração testada. A *Egeria densa* não atenuou a ação do LAS na sobrevivência de *Simocephalus serrulatus*.

O uso contínuo de surfactantes em grande escala, com o lançamento inadequado de águas residuais em sistemas de esgoto ou diretamente em corpos hídricos, contribui para a contaminação das fontes de água potável. Destacam a necessidade de regulamentação no uso de surfactantes, uma vez que não há regulamentação específica para esses compostos nas legislações brasileiras para os ecossistemas aquáticos. Entre as normativas mais relevantes e vigentes para os corpos d'água superficiais, destaca-se a CONAMA nº 357 de 2005, a qual não estabelece valor máximo permitido para o LAS (Brasil, 2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Futuras Cientistas promovido pelo Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos para a primeira autora desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ARORA, J.; RANJAN, A.; CHAUHAN, A.; BISWAS, R.; RAJPUT, V. D.; SUSHKOVA, S.; MANDZHIEVA, S.; MINKINA, T.; JINDAL, T. Surfactant pollution, an emerging threat to ecosystem: Approaches for effective bacterial degradation. **Journal of Applied Microbiology**,

v. 133, n. 3, p. 1229–1244, 2022.

BIANCHINI, I.; VIEIRA, A. H. H.; TOLEDO, A. P. P. Colorimetric determination of the number of cells in axenic cultures of *Scenedesmus quadricauda* - A comparison with direct counting. **Hydrobiologia**, v. 122, p. 167-170, 1985.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005**. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 13.

IVANKOVIĆ, T.; HRENOVIĆ, J. Surfactants in the environment. **Arh Hig Rada Toksikol**, v. 61, n. 1, p. 95-110, 2010.

LITTLER, M. M.; ARNOLD, K. E. Electrodes and chemicals. In: LITTLER, M. M.; LITTLER, D. S. (Org.). **Handbook of phycological methods: Ecological field methods: macroalgae**. p. 349-375, 1985.

LIU, Y.; LIU, N.; ZHOU, Y.; WANG, F.; ZHANG, Y.; WU, Z. Growth and physiological responses in *Myriophyllum spicatum* L. exposed to linear alkylbenzene sulfonate. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 38, n. 9, p. 2073-2081, 2019.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) - NATIONAL WEATHER SERVICE - NWS. **Service annual average temperature by year. 2024**. Disponível em:

<https://www.weather.gov/media/slc/ClimateBook/Annual%20Average%20Temperature%20By%20Year.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

NUNES, R. F.; TEIXEIRA, A. C. S. C. An overview on surfactants as pollutants of concern: Occurrence, impacts and persulfate-based remediation technologies. **Chemosphere**, v. 300, p. 134507, 2022.

REIS, J. N. R. S.; SOUZA, A. B. B.; SILVA, L. P. C.; DINIZ, M. C. Macrófitas aliadas na restauração ambiental: prospecção tecnológica para biorremediação de águas contaminadas. **UniSanta Bioscience**, v. 13, n. 1, p. 228-237, 2024.

SCHIFFER, S.; LIBER, K. Toxicity of aqueous vanadium to zooplankton and phytoplankton species of relevance to the athabasca oil sands region. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 137, p. 1–11, 2017).

SILVA, I. E. D.; VIRGÍNIO, L. E. F.; SANTOS, C. C. L.; LIMA, S. O.; ARAÚJO, H. W. C. Produção de biossurfactantes a partir de resíduos agroindustriais: uma revisão. In: OLIVEIRA, A. M.; GUIMARÃES, O. S. (Orgs.). **Engenharia, Gestão e Inovação**, v. 7, p. 9-18. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2023.

WANDERLEY, E. L., CUNHA-SANTINO, M. B., BIANCHINI JR., I. Surfactant and temperature as forcing functions on the growth of *Egeria densa* and *Chara* sp.: a modeling approach. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 28, p. 26145-26153, 2021.

UNITED NATIONS WATER. What is water security? Infographic. 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/what-water-security-infographic>. Acesso em: 27 jan. 2025.