

## **Das chamas para os rios: a influência indireta das queimadas nas macrófitas aquáticas**

<sup>1</sup> Caroline Ferreira da Silva

<sup>2</sup> Laiane Neri Sant'ana

<sup>3</sup> Irineu Bianchini Júnior

<sup>4</sup> Gilmar Perbiche-Neves

<sup>5</sup> Marcela Bianchessi da Cunha-Santino

### **Água, recursos hídricos e drenagem urbana**

#### **Resumo**

O fogo afeta os ecossistemas de maneira complexa, podendo ter efeitos benéficos ou prejudiciais, dependendo das circunstâncias. A chuva preta, resultante das cinzas das queimadas, pode impactar a qualidade da água e a vegetação aquática. No entanto, estudos sobre os efeitos desse fenômeno em ecossistemas e organismos aquáticos são escassos. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos dos compostos originados pelas queimadas, volatilizados para as águas pluviais, sobre o crescimento da macrófita *Salvinia auriculata* Aubl.. Foram realizados bioensaios para avaliar a toxicidade da chuva preta no crescimento da macrófita. Os resultados demonstraram que a chuva preta não provocou alterações significativas no meio aquático que afetassem o crescimento de *S. auriculata*. No entanto, o coeficiente de crescimento foi sutilmente maior no tratamento que foi acrescido de chuva preta, após 21 dias, indicando um possível enriquecimento nutricional dos corpos d'água nos quais houve a introdução de águas pluviais contaminadas com cinzas e fuligem de queimadas, como a chuva preta analisada.

Palavras-chave: chuva; queimada; contaminação aquática; macrófita aquática; crescimento.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos/PPG-ERN. cferreiraufscar@gmail.com

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

<sup>3</sup> Universidade Federal de São Carlos/DHb. irineu@ufscar.br

<sup>4</sup> Universidade Federal de São Carlos/DHb. gpneves@ufscar.br

<sup>5</sup> Universidade Federal de São Carlos/DHb. cunha\_santino@ufscar.br

## INTRODUÇÃO

O fogo é um fator ecológico que pode ser benéfico ou prejudicial, variando conforme o local, a frequência, a intensidade em que ocorre e as espécies atingidas (Berlink *et al.*, 2021). Entretanto, as mudanças climáticas têm modificado o padrão do fogo, resultando em incêndios florestais mais intensos devido a longos períodos de estiagem, maior carga de combustão e temperaturas mais altas (IPCC, 2023). As cinzas das queimadas também constituem fatores ecológicos de atenção, pois podem alterar a composição do solo e, em ambientes aquáticos, introduzir novos elementos e nutrientes, dependendo do tipo de material carbonizado (Campos *et al.*, 2015). Além disso, o escoamento superficial transporta as cinzas para os corpos hídricos após os incêndios. Estudos relatam efeitos adversos desse fenômeno, como a diminuição da decomposição microbiana e mudanças na estrutura de comunidades ecológicas. Os impactos podem variar de acordo com a composição das cinzas (Vidal *et al.*, 2021).

Outra forma de introdução de cinzas nos ambientes aquáticos é a chamada "chuva preta", que ocorre quando a matéria particulada dos incêndios, composta por cinzas e fuligens, é transportada por massas de ar e, durante a precipitação, é novamente lançada à superfície (Seinfeld, 2004). Em 2020, um episódio de chuva preta no Rio Grande do Sul foi possivelmente originado de incêndios na Amazônia e no Pantanal (Santiago *et al.*, 2021). Em 2019, um evento similar na região metropolitana de São Paulo teve origem em queimadas intensas na bacia amazônica e na Bolívia (Pereira *et al.*, 2021). Contudo, estudos sobre os impactos da chuva preta são escassos.

Nesse contexto, a análise de organismos aquáticos para compreender a influência da chuva preta sobre os corpos d'água superficiais é fundamental. A *Salvinia auriculata* Aubl. é uma macrófita comum em ecossistemas de água doce, de reprodução rápida e alta capacidade de colonização em curto espaço de tempo. Além de apresentar elevado potencial fitorremediador e atuar como um bioindicador ambiental (Wolff *et al.*, 2012). Adicionalmente, o processo metabólico de *S. auriculata* está diretamente relacionado à sua sensibilidade a diferentes agentes tóxicos, o que a torna um modelo ideal para estudos sobre os efeitos da contaminação aquática nas comunidades de macrófitas (dos Santos *et al.*, 2020). Portanto, o objetivo deste trabalho foi investigar os

efeitos dos compostos originados pelas queimadas, volatilizados para as águas pluviais, ie., chuva preta, sobre crescimento de *Salvinia auriculata*.

## METODOLOGIA

Para investigar os efeitos dos compostos voláteis e particulados liberados pela combustão sobre o ecossistema aquático, foram conduzidos bioensaios utilizando a macrófita *S. auriculata* como organismo-teste e a água captada da precipitação atmosférica da chuva preta (15 de setembro de 2024) como meio de crescimento. Para isso, foi realizada uma diluição de 10% da chuva preta em água coletada no córrego do Monjolino (-21.985536, -47.878056), mesmo local de coleta das macrófitas. O rio é o principal corpo d'água do município de São Carlos-SP e integra a sub-bacia do Monjolino, que está inserida na Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré (CBH-TJ) (Atlas Sanca, 2025). São Carlos está situada no interior do estado de São Paulo (IBGE, 2023). A chuva preta foi coletada no mesmo município.

Exemplares de *S. auriculata* (n=50) foram expostos às concentrações de 0 (tratamento controle – TC com apenas água do córrego) e soluções com diluição de 10% de água da chuva preta (CP). O procedimento de dissolução da chuva preta na água do Monjolino foi realizado visando simular o processo de entrada de águas pluviais em corpos d'água superficiais. Os bioensaios que avaliaram o crescimento de *S. auriculata*, continham 50 exemplares da macrófita no TC e 50 exemplares no CP. Semanalmente, as amostras foram fotografadas e as suas áreas foliares computadas através do software *Image J*. Com base nas medições das áreas foliares, foi determinada a cinética de crescimento de *S. auriculata* de acordo com o modelo logístico (Bianchini Jr. *et al.*, 2010). Também foram realizadas as determinações dos pigmentos fotossintéticos de *S. auriculata* como indicadores fisiológicos para avaliar o possível efeito da chuva preta após 96 h de exposição. Aproximadamente 50 mg de biomassa fresca da planta foram macerados com álcool etílico 90% (v/v) para a extração de clorofila-a, clorofila-b e carotenoides. Após a extração, as amostras foram submetidas a choque térmico e refrigeração por 24 h no escuro. As absorbâncias dos pigmentos foram medidas no espectrofotômetro UV-VIS (marca: Pro Pharmacia; modelo: Ultrospec 2100) nos comprimentos de onda de 470, 645, 662 e 710 nm. Os

teores de clorofilas e carotenoides foram calculados e expressos em  $\text{mg g}^{-1}$  MS (massa seca). As concentrações de pigmentos e as áreas foliares não seguiram uma distribuição normal de acordo com o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, portanto, foi aplicado o teste não paramétrico de *Mann-Whitney* para verificar se houve diferença significativa entre os tratamentos e posteriormente, a comparação das medianas para diferenciar os grupos homogêneos utilizando o nível de significância de  $p < 0,05$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores médios de pigmentos fotossintéticos variaram de 5,85 (TC) a 5,79 (CP)  $\text{mg g}^{-1}$  MS para a clorofila-a, de 2,29 (TC) a 2,38 (CP)  $\text{mg g}^{-1}$  MS para a clorofila-b e de 622,75 (TC) a 633 (CP)  $\text{mg g}^{-1}$  MS para os carotenoides. Não foram evidenciadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) nos teores de pigmentos dos TC e CP (Figura 1).

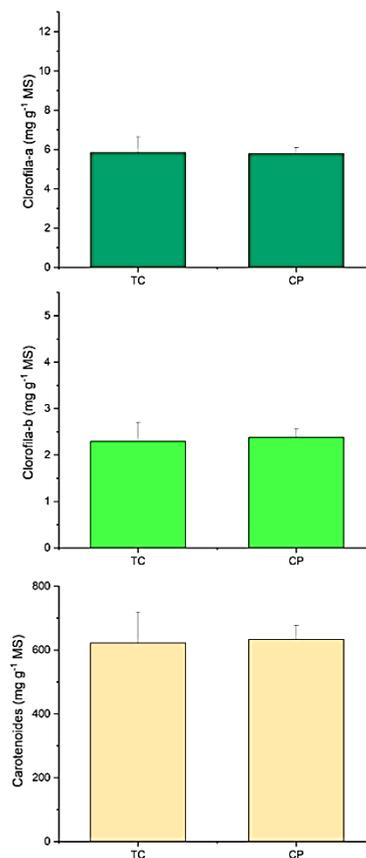


Figura 1 – Teores dos pigmentos fotossintéticos (clorofila-a, clorofila-b e carotenoides) nas folhas de *S. auriculata* em  $\text{mg g}^{-1}$  MS (massa seca).

Mudanças nas concentrações de clorofila-a podem indicar a presença de um estressor na água (Pereira *et al.*, 2012), entretanto durante o crescimento no CP, não ocorreu variação nos teores de pigmentos de *S. auriculata*, indicando que a composição da água da chuva contaminada com fuligem e compostos voláteis não alterou as capacidades fotossintéticas da macrófita.

Em relação ao crescimento, observou-se que os bioensaios com a chuva preta (CP) apresentaram aumento da área foliar e do número médio de folhas em comparação ao TC (Figura 2). Os parâmetros derivados da cinética de crescimento de *S. auriculata* indicaram um crescimento levemente mais acelerado para a planta exposta à chuva preta (CP). O coeficiente de crescimento ( $\mu$ ) foi de  $0,05 \text{ dia}^{-1}$  (tempo de duplicação = 11,5 dias) para o tratamento controle (TC) e  $0,06 \text{ dia}^{-1}$  (tempo de duplicação = 13,2 dias) para o tratamento com chuva preta (CP). Não houve diferença entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ), apesar do  $\mu$  ter sido 14% maior no CP que no TC (controle).

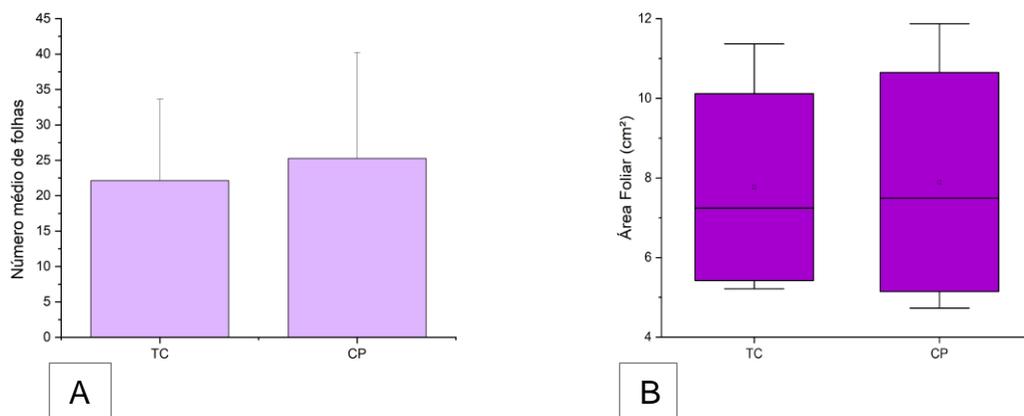


Figura 2 – Gráficos *boxplot* dos parâmetros de crescimento de *Salvinia auriculata* nos tratamentos controle (TC) e com chuva preta (CP): (A) Número médio de folhas e (B) Variação da área foliar (cm<sup>2</sup>).

A Figura 2A mostra a distribuição do número médio de folhas nos bioensaios do TC e CP. O número médio inicial de folhas para cada tratamento foi de 10 unidades. Ao final do tempo experimental (21 dias), o número médio de folhas no CP foi sutilmente

maior, com 25 unidades, enquanto TC apresentou 22 unidades. O *boxplot* da Figura 2B mostra a distribuição da área foliar (cm<sup>2</sup>) entre TC e CP. As medianas encontram-se próximas, embora o tratamento CP tenha alcançado valores um pouco maiores que o TC.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que perturbações não pontuais, como a entrada de água da chuva contaminada por fuligem e outros compostos voláteis resultantes das queimadas, frequentemente observadas no Brasil e no mundo, não provocaram alterações significativas no meio aquático que afetassem o crescimento de *S. auriculata* na concentração e período de ensaio testados neste trabalho. De fato, as concentrações de pigmentos fotossintéticos não foram alteradas quando a macrófita cresceu em meio com chuva preta. No entanto, é possível que o período de exposição de 96 h não tenha sido suficiente para que a CP manifestasse toxicidade sobre os pigmentos fotossintéticos da *Salvinia*. Por outro lado, na análise de crescimento que teve um período de teste mais extenso (21 dias), foi possível observar uma pequena alteração fisiológica nas plantas. Ao considerar os parâmetros de crescimento de *S. auriculata* na condição experimental, o coeficiente de crescimento foi sutilmente maior no tratamento acrescido de chuva preta, indicando um possível enriquecimento nutricional dos corpos d'água nos quais houve a introdução de águas pluviais contaminadas com cinzas e fuligem de queimadas

O enriquecimento nutricional pode contribuir para a proliferação excessiva de plantas aquáticas. O excesso de biomassa resulta na eutrofização do ecossistema aquático, uma problemática ambiental que afeta negativamente a disponibilidade de oxigênio e pode resultar na morte de diversos organismos aquáticos, além de comprometer os serviços ecossistêmicos como os usos múltiplos da água.

A partir dos resultados obtidos, é possível destacar a importância de conduzir mais estudos sobre os efeitos da chuva preta nos ecossistemas aquáticos e seus organismos associados.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, número do processo: 146124/2023-5.

## REFERÊNCIAS

ATLAS SANCA. **Sub-bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho**. 2025. Disponível em: <https://sites.usp.br/atlassanca/sub-bacia-do-rio-monjolinho/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

BERLINK, C. N. Historical survey of research related to fire management and fauna conservation in the world and in Brazil. **Biota Neotropica**, v. 23, n. 3, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bn/a/5kjZRQYczV3zz3GwCPWpDHm/?lang=en>. Acesso em: 03 fev. 2025.

BIANCHINI JR., I. *et al.* Growth of *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle under controlled conditions. **Hydrobiologia**, v. 644, p. 301-312, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0191-1>. Acesso em: 04 fev. 2025.

CAMPOS, I. *et al.* Effects of wildfire on mercury mobilization in eucalypt and pine forests. **Catena**, v. 131, p. 149-159, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816215000934?via%3Dihub>. Acesso em: 03 fev. 2025.

DOS SANTOS, N. B. C. *et al.* Assessing the effects of water quality on leaf morphoanatomy, ultrastructure and photosynthetic pigment content of *Salvinia auriculata* Aubl. (Salviniaceae). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110061, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110061>. Acesso em: 22 fev. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **São Carlos: Panorama**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>. Acesso em: 22 fev. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. *In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, 2023.

- PEREIRA, G. M. *et al.* Physical and chemical characterization of the 2019 “black rain” event in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 248, p. 118229, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231021000479>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- PEREIRA, S. A. *et al.* Macrófitas aquáticas como indicadores da qualidade da água em pequenos lagos rasos subtropicais, Sul do Brasil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 52-63, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000026>. Acesso em: 04 fev. 2025.
- SANTIAGO, M. M. *et al.* Preliminary study on the case of black rain in Rio Grande do Sul, Brazil: A synoptic point of view. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1268-1281, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249678/38725>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- SEINFELD, J. H. Air pollution: a half century of progress. **Aiche Journal**, v. 50, n. 6, p. 1096-1108, 2004. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.10102>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- VIDAL, T. *et al.* Testing the response of benthic diatom assemblages to common riverine contaminants. **Science of the Total Environment**, v. 755, n. 1, p. 142534, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720360630?via%3Dihub>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- WOLFF, G. *et al.* The use of *Salvinia auriculata* as a bioindicator in aquatic ecosystems: biomass and structure dependent on the cadmium concentration. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, p. 71-77, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000100009>. Acesso em: 22 fev. 2025.