

A TOXICIDADE DA FORMULAÇÃO HERBICIDA SUMYSIN 500 SC® VIA ALIMENTAÇÃO INIBE O DESENVOLVIMENTO E A REPRODUÇÃO DE *Daphnia magna* STRAUS (CRUSTACEA: CLADOCERA)

¹Tamires de Freitas Oliveira; ²Larissa Fonseca Andrade Vieira

¹Universidade Federal de Lavras, e-mail: tami.dfo@gmail.com; ²Universidade Federal de Lavras, e-mail: larissa.vieira@ufla.br

Grupo temático: Biodiversidade e Preservação
Eixo: Soluções baseadas na natureza

Resumo

Herbicidas à base de flumioxazina são utilizados na agricultura devido à sua eficácia, mas seu uso levanta preocupações sobre os riscos aos ecossistemas aquáticos. Embora existam evidências crescentes de toxicidade direta pela água, pouco se sabe sobre os efeitos indiretos mediados por produtores contaminados e consumidos pelo zooplâncton. Este estudo avaliou a toxicidade aguda da formulação comercial Sumysin 500 SC® para *Daphnia magna* e investigou os efeitos crônicos por exposição trófica utilizando microalgas contaminadas como alimento. Nos testes agudos, o valor de EC₅₀ foi de 29,59 mg L⁻¹, indicando sensibilidade moderada da espécie. Em ensaios tróficos, *Raphidocelis subcapitata* foi pré-exposta a 0,852 µg L⁻¹ de flumioxazina, equivalente à EC₅₀ da espécie. O consumo de algas contaminadas causou 100% de inibição da produção de ovos, redução da expectativa de vida em até 13 dias e atraso no desenvolvimento em todos os estágios ontogenéticos. As algas apresentaram aumento do teor de carboidratos. Os resultados evidenciam que a exposição trófica à flumioxazina pode afetar processos essenciais para a persistência de populações de invertebrados aquáticos, destacando a necessidade de incorporar essas vias de exposição em avaliações de risco voltadas à prevenção da perda de biodiversidade e de extinções locais.

Palavras-chave: *Raphidocelis subcapitata*; flumioxazina; cadeia trófica; alimentação.

Introdução

O aumento do uso de pesticidas em escala global e seu potencial de escoamento e lixiviação para os corpos d'água (Cosgrove; Jefferson; Jarvis, 2019; Mojiri et al., 2020) elevam o risco de exposição de organismos aquáticos a esses contaminantes. Além da absorção direta pela água, a ingestão de alimentos contaminados representa uma importante via de entrada de pesticidas nos organismos aquáticos (Bessa da Silva et al., 2016), podendo comprometer processos fisiológicos essenciais e afetar a dinâmica das cadeias tróficas.

A flumioxazina é um herbicida amplamente empregado no controle de plantas daninhas (Boyd, 2014; Ferrell; Vencill, 2003) e apresenta elevada toxicidade para algas e plantas aquáticas, além de riscos ao desenvolvimento e à reprodução de organismos não alvo (PPDB, 2024). Sua detecção em efluentes de estações de tratamento de água (Maurer et al.,

2023) evidencia o potencial de contaminação de ambientes aquáticos próximos a áreas urbanas e agrícolas.

As microalgas constituem a base da produção primária e da transferência de energia nos ecossistemas aquáticos (Ma et al., 2002; Prado et al., 2009). A espécie *Raphidocelis subcapitata* é sensível à ação de herbicidas e pode acumular flumioxazina em suas células (Ando; Fujisawa; Katagi, 2017), tornando-se uma potencial via de transferência desse contaminante para consumidores primários, como os cladóceros (Rodgher; Lombardi; Melão, 2009). Alterações na qualidade nutricional desses produtores podem comprometer o crescimento, a sobrevivência e a reprodução dos consumidores, reduzindo a produção secundária e afetando a estabilidade das cadeias alimentares aquáticas (Faupel; Ristau; Traunspurger, 2011).

Apesar da relevância da exposição alimentar, a maioria dos estudos disponíveis concentra-se na transferência trófica de metais (Geffard et al., 2008; Rodgher; Lombardi; Melão, 2009; Souza et al., 2014; Wang; Yan; Hyne, 2010), havendo escassez de informações sobre os efeitos de herbicidas por essa via, especialmente da flumioxazina.

Diante desse contexto, este estudo avaliou os efeitos da exposição alimentar ao herbicida comercial Sumysin 500 SC® à base de flumioxazina sobre a história de vida de *Daphnia magna*, utilizando *Raphidocelis subcapitata* previamente contaminada como fonte de alimento. Essa abordagem reproduz uma rota de exposição ecologicamente relevante e contribui para o aprimoramento da avaliação de risco ambiental, fornecendo subsídios para estratégias de conservação da biodiversidade aquática.

Metodologia

Modelos de estudo

A microalga verde *Raphidocelis subcapitata* foi obtida do Laboratório de Limnologia da Universidade Federal de Alfenas e cultivada em meio L.C. Oligo (AFNOR, 1980), sob temperatura de 23 ± 2 °C e fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro. O cladóceros *Daphnia magna* foi aclimatado e cultivado conforme a ABNT NBR 12713:2016, em água reconstituída, sendo alimentado com *R. subcapitata* e suplementação de levedura e ração para peixes.

Solução-teste e exposição de *R. subcapitata* ao herbicida

A microalga foi exposta ao herbicida comercial Sumysin 500 SC® na concentração de

0,852 $\mu\text{g L}^{-1}$ de flumioxazina, correspondente à CE_{50} para *R. subcapitata* (PPDB), durante 96 h. Após a exposição, as células foram lavadas para remoção do meio contaminado e utilizadas como alimento para *D. magna* na densidade de 2×10^5 células mL^{-1} (ABNT NBR 13373:2017). A densidade celular foi monitorada por contagem em câmara de Fuchs-Rosenthal.

Análise bioquímica da microalga

O teor de carboidratos totais foi determinado após 96 h de exposição pelo método colorimétrico com ácido sulfúrico descrito por Albalasmeh *et al.* (2013). As leituras de absorvância foram realizadas em espectrofotômetro a 315 nm, utilizando curva de calibração preparada com glicose.

Exposição de *D. magna* à microalga contaminada com o herbicida

D. magna foi exposta por via alimentar à microalga *R. subcapitata* previamente contaminada com flumioxazina, durante um período máximo de 21 dias, com base em Souza *et al.* (2014). Neonatos com 6–24 h de vida foram individualizados em recipientes contendo 10 mL de água reconstituída (ABNT, 2016) e alimentados exclusivamente com algas na densidade de 2×10^5 células mL^{-1} , contaminadas com 0,852 $\mu\text{g L}^{-1}$ de flumioxazina. Um grupo controle recebeu algas não contaminadas.

O ensaio foi conduzido a 23 ± 2 °C, sob fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro, com dez repetições por tratamento. A água e o alimento foram renovados a cada 48 h, e os parâmetros físico-químicos da água (pH, condutividade e oxigênio dissolvido) foram monitorados em cada renovação. Durante a exposição, foram avaliados sobrevivência, reprodução, tamanho corporal e alterações morfológicas dos organismos.

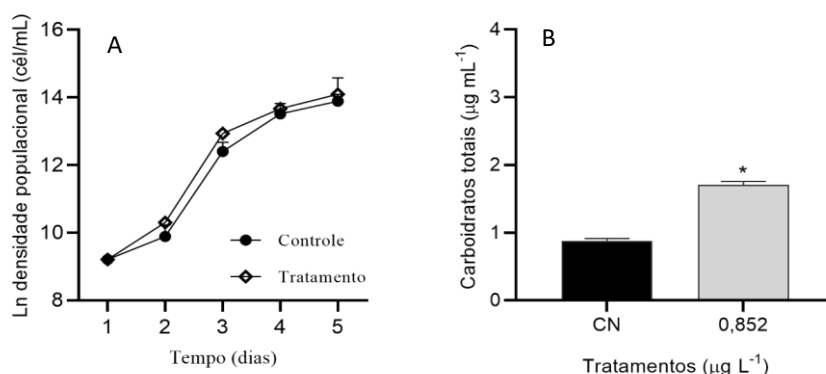
Análises estatísticas

Os resultados obtidos para os parâmetros do crescimento, ciclo de vida e teor de carboidratos foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk. Em seguida, os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e seguido pelo Teste de Dunnett utilizando-se o software Minitab 17, e as diferenças entre os tratamentos foram consideradas significativas com níveis de significância de 95% ($p < 0,05$).

Resultados e Discussão

A microalga *R. subcapitata* foi previamente exposta à flumioxazina para avaliar a toxicidade do herbicida por via trófica em *D. magna*. A densidade celular não diferiu do grupo controle (Fig. 1A), indicando que o herbicida não afetou seu crescimento. Entretanto, o teor de carboidratos totais aumentou 2,1 vezes (Fig. 1B), evidenciando alterações metabólicas induzidas pelo estresse. Essa resposta, também observada em microalgas expostas a herbicidas (Markou; Angelidaki; Georgakakis, 2012; Shabana et al., 2001), pode favorecer a manutenção do crescimento celular, mas comprometer a qualidade nutricional da microalga e a transferência de energia ao longo da cadeia trófica.

Figura 1: (A) Densidade celular (célula mL⁻¹) de *R. subcapitata* após exposição ao herbicida à base de flumioxazina na dose de 0,852 µg L⁻¹. (B) Teor de carboidratos totais da microalga *R. subcapitata* quantificados após 96 horas de exposição ao herbicida à base de flumioxazina. Legenda: O símbolo * indica diferença estatística (Dunnett p<0,05) em relação ao tratamento controle. As barras representam o desvio-padrão da média.



Fonte: Do autor.

A alimentação de *D. magna* com microalgas contaminadas (0,852 µg L⁻¹ de flumioxazina) promoveu alterações significativas (Dunnett, $p < 0,05$) em todos os parâmetros do ciclo de vida (Tabela 1). Os organismos apresentaram natação irregular, sinais de estresse e redução da atividade, com sobrevivência limitada a 13 dias, enquanto o grupo controle permaneceu viável durante todo o experimento. Também foram observados redução do comprimento corporal, atraso no desenvolvimento e inibição completa da reprodução. A análise morfológica (Fig. 3) evidenciou a persistência de características juvenis, como a manutenção da cauda, indicando comprometimento da metamorfose e da transição para a fase adulta (Pereira; Marques; Gonçalves, 2004).

Embora a biomassa algal tenha sido mantida, o aumento de carboidratos não garantiu a qualidade nutricional do alimento. Alterações na composição bioquímica das microalgas podem comprometer processos fisiológicos essenciais em *D. magna* (Bessa da Silva et al., 2016), corroborando estudos que demonstram a influência da qualidade da dieta sobre o

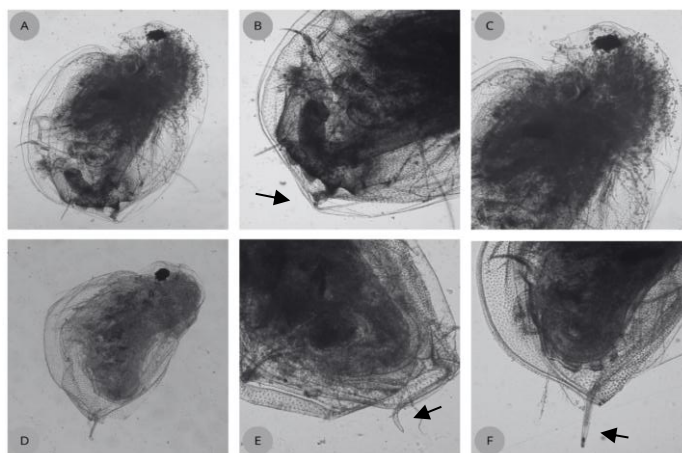
crescimento, a sobrevivência e a reprodução de cladóceros (Martínez-Jerónimo et al., 1994; Koch; Von Elert; Straile, 2009). Além disso, a ingestão de microalgas contaminadas constitui uma importante via de transferência da flumioxazina ao consumidor primário, favorecendo sua bioacumulação e intensificando efeitos sobre sobrevivência e reprodução (Ferrando et al., 1996; Bessa da Silva et al., 2016). Assim, a exposição trófica potencializa os impactos do herbicida, comprometendo a viabilidade populacional e reforçando a necessidade de incluir vias alimentares nas avaliações ecotoxicológicas para melhor estimar riscos à biodiversidade e a extinções locais.

Tabela 1: Médias e desvio padrão dos parâmetros analisados da história de vida de *D. magna* para controle e tratamento de toxicidade do herbicida à base de flumioxazina via alimento com tempo de duração experimental de 21 dias.

Parâmetros	Controle	Tratamento (0,852 µg cél ⁻¹)
Sobrevivência (nº indivíduos/dias)	8 / 21	1 / 13*
Média de ovos por fêmea	6,97±0,94	0*
Média de neonatos por fêmea	7,12±0,83	0*
Comprimento máximo (µm)	2460,95±0,93	1903,73±0,76*

O símbolo * indica diferença estatística (Dunnet p<0,05) em relação ao tratamento controle.

Figura 3: Diferenças anatômicas observadas entre tratamento controle (A, B e C) e tratamentos com alimentação contaminada com herbicida à base de flumioxazina (D, E e F) no 12º dia experimental. Legenda: B – Fêmea adulta com ausência da cauda. E e F – Jovens com cauda.



Fonte: Do autor.

Considerações Finais

A flumioxazina pode causar efeitos ecotoxicológicos significativos por meio da exposição trófica, mesmo quando não compromete o crescimento do produtor primário. A alteração da qualidade nutricional da microalga foi suficiente para afetar a sobrevivência, o desenvolvimento e a reprodução de *D. magna*, evidenciando que vias indiretas de exposição podem comprometer a viabilidade de populações de organismos aquáticos. Esses resultados reforçam a necessidade de incorporar a transferência trófica nas avaliações de risco ambiental, contribuindo para uma estimativa mais realista dos impactos de herbicidas sobre a biodiversidade e sobre processos ecológicos associados à persistência das espécies.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Laboratório de Limnologia da Universidade Federal de Alfenas.

Referências

- BESSA DA SILVA, M. *et al.* Effects of dietary exposure to herbicide and of the nutritive quality of contaminated food on the reproductive output of *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology*, v. 179, p. 1-7, 2016.
- COSGROVE, S.; JEFFERSON, B.; JARVIS, P. Pesticide removal from drinking water sources by adsorption: a review. *Environmental Technology Reviews*, v. 8, n. 1, p. 1-19, 2019.
- FERRANDO, M. D.; SANCHO, E.; ANDREU-MOLINER, E. Accumulation of tetradifon in an algae (*Nannochloris oculata*) and the cladoceran, *Daphnia magna*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 57, n. 1, p. 139-145, 1996.
- FERRELL, J. A.; VENCILL, W. K. Flumioxazin soil persistence and mineralization in laboratory experiments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, n. 16, p. 4719-4721, 2003.
- KOCH, U.; VON ELERT, E.; STRAILE, D. Food quality triggers the reproductive mode in the cyclical parthenogen *Daphnia* (Cladocera). *Oecologia*, v. 159, n. 2, p. 317-324, 2009.
- MARKOU, G.; ANGELIDAKI, I.; GEORGAKAKAKIS, D. Microalgal carbohydrates: an overview of the factors influencing carbohydrate production and of the main bioconversion technologies for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 96, n. 3, p. 631-645, 2012.
- MARTÍNEZ-JERÓNIMO, F. *et al.* Effect of food type and concentration on the survival, longevity, and reproduction of *Daphnia magna*. *Hydrobiologia*, v. 287, n. 2, p. 207-214, 1994.
- MAURER, L. *et al.* Contamination pattern and risk assessment of polar compounds in snow melt: an integrative proxy of road runoffs. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 10, p. 4143-4152, 2023.
- SHABANA, E. F. *et al.* Effect of pendimethalin on growth and photosynthetic activity of *Protosiphon botryoides* in different nutrient states. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 49, n. 2, p. 106-110, 2001.