Toxicidade do lixiviado de resíduos de cigarros eletrônicos para dois invertebrados aquáticos: *Artemia salina e Echinometra lucunter*

Giovani Ferreira Gianinni[1]; Renata de Britto Mari[1], Gabriela Pustiglione Marinsek[1,2].

[1]Universidade Estadual Paulista (UNESP - IB/CLP), São Vicente, SP, Brasil
[2]Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos, SP, Brasil.
Email: giovani.gianinni@unesp.br

Resumo: Cigarros eletrônicos (CE) constituem resíduos complexos com potencial de liberar contaminantes por lixiviação. Este estudo avaliou a toxicidade do lixiviado de CE sobre *Artemia salina* e *Echinometra lucunter*. Em *A. salina*, foram avaliadas mortalidade, emersão e eclosão; em *E. lucunter*, o desenvolvimento embrio-larval. Em *A. salina*, a mortalidade aumentou, com NOEC de 1,0 g L^{-1}, LOEC de 1,1 g L^{-1} e LC50-48 h de 1,337 g L^{-1}, enquanto a eclosão foi reduzida nas maiores concentrações. Em *E. lucunter*, houve aumento concentração-dependente do desenvolvimento anormal, com LOEC de 0,1 g L^{-1} e EC50-36 h de 0,883 g L^{-1}. Os resultados evidenciam efeitos letais e subletais nas condições experimentais avaliadase reforçam a importância do uso de diferentes organismos na avaliação ecotoxicológica.
Palavras-chave: Ecotoxicologia; Poluição aquática; Resíduos eletrônicos; Desenvolvimento embrio-larval; Toxicidade aguda.

Toxicity of electronic cigarette waste leachate to two aquatic invertebrates: *Artemia salina* and *Echinometra lucunter*

Abstract: Electronic cigarettes (ECs) constitute complex waste products with the potential to release contaminants through leaching. This study evaluated the toxicity of EC leachate to *Artemia salina* and *Echinometra lucunter*. Foam from a discarded EC was subjected to leaching. In *A. salina*, mortality, emergence, and hatching were assessed, whereas embryo-larval development was evaluated in *E. lucunter*. In *A. salina*, mortality increased, with a NOEC of 1.0 g L^{-1}, a LOEC of 1.1 g L^{-1}, and a 48-h LC50 of 1.337 g L^{-1}, while hatching decreased at the highest concentrations. In *E. lucunter*, abnormal development increased, with a LOEC of 0.1 g L^{-1} and a 36-h EC50 of 0.883 g L^{-1}. These results demonstrate lethal and sublethal effects and reinforce the importance of using different organisms in ecotoxicological assessments.
Key-words: Ecotoxicology; Aquatic pollution; Electronic waste; Embryo-larval development; Acute toxicity.

Introdução

Os cigarros eletrônicos (CE), ou dispositivos eletrônicos para fumar, produzem aerossóis pelo aquecimento de líquidos compostos principalmente por propilenoglicol, glicerol, nicotina, e aromatizantes, além deoutros aditivos [1,2]. Após o descarte, seus componentes eletrônicos, plásticos, baterias e resíduos químicos podem atuar como fontes de contaminantes no ambiente [1,3].

Embora a maioria dos estudos se concentre nos efeitos sobre a saúde humana, constituintes de CE também podem afetar organismos aquáticos. Em embriões de *Danio rerio*,

líquidos aromatizados de CE provocaram alterações morfológicas e comportamentais [7]. Entretanto, ainda são limitadas as informações sobre a ecotoxicidade de lixiviados obtidos diretamente de dispositivos descartados [1,3]. Nesse contexto, ensaios com organismos aquáticos podem contribuir para avaliar os efeitos ecotoxicológicos associados ao descarte desses resíduos.

Objetivo

Avaliar o potencial ecotoxicológico obtido da espuma de um cartucho de cigarros eletrônicos descartado sobre *Artemia salina* e *Echinometra lucunter*.

Material e Métodos

Foram realizados bioensaios com *A. salina* e *E. lucunter* utilizando lixiviado obtido da espuma do cartucho de um cigarro eletrônico descartado. Para o preparo da solução estoque, 5 g de espuma foram adicionados a 100 mL de água destilada (50 g L^{-1}). A mistura foi mantida sob agitação a 300 rpm por três dias e, posteriormente, filtrada em membrana de nitrato de celulose de 0,45 µm.

Náuplios de *A. salina* em estágio II–III foram expostos por 48 h às concentrações de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3 e 1,4 g L^{-1}, além do controle, conforme a ABNT NBR 16530. Após a exposição, foram avaliadas a mortalidade e o comprimento corporal.

Para avaliação da emergência e da eclosão, 20 cistos foram distribuídos em placas de Petri contendo 3 mL da solução-teste, com seis réplicas por tratamento. Foram avaliadas as respostas após 24 e 48 h de exposição às concentrações de 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 e 1.3, além do controle.

Em *E. lucunter*, o desenvolvimento embrio-larval foi avaliado após 36 h de exposição às concentrações de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0 e 1,3 g L^{-1}, além do controle, conforme a ABNT NBR 15350. Ao final da exposição, os organismos foram fixados em formaldeído 10% e classificados quanto ao desenvolvimento normal ou anormal.

As análises foram realizadas no R. Mortalidade, emergência, eclosão e desenvolvimento embrio-larval foram analisados por modelos lineares generalizados (GLM) com distribuição binomial,seguido de comporações com o controle pelo teste de Dunnett. Foram determinados os valores de NOEC eLOEC, bem como LC50-48 h para a mortalidade de *A. salina* e EC50-36 h para o desenvolvimento anormal de *E. lucunter*. O comprimento de *A. salina* foi analisado

pelo teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn, adotando-se nível de significância de $p < 0,05$.

Resultados

A exposição ao lixiviado afetou significativamente a sobrevivência de *A. salina* após 48 h (GLM binomial; $\chi^2 = 52,055$; gl = 6; $p < 0,001$), com mortalidade de 2,5% no controle e 57,5% em 1,4 g L^{-1}. A mortalidade foi significativamente superior ao controle a partir de 1,1 g L^{-1}, com NOEC de 1,0 g L^{-1}, LOEC de 1,1 g L^{-1} e LC50-48 h de 1,337 g L^{-1} (IC95%: 1,242–1,432).

A emergência em 24 h foi significativamente afetada ($\chi^2 = 39,968$; gl = 5; $p < 0,001$), com redução em todas as concentrações testadas, resultando em LOEC de 0,8 g L^{-1} e NOEC < 0,8 g L^{-1}. Em 48 h, a emergência foi baixa em todos os grupos e não diferiu significativamente entre os tratamentos ($\chi^2 = 7,674$; gl = 5; $p = 0,175$). A eclosão diferiu significativamente entre os tratamentos em 24 h ($\chi^2 = 13,266$; gl = 5; $p = 0,021$), com aumento significativo em 1,3 g L^{-1} em relação ao controle. Em 48 h, houve redução significativa da eclosão em 1,2 e 1,3 g L^{-1} ($\chi^2 = 21,608$; gl = 5; $p < 0,001$), com NOEC de 1,1 g L^{-1} e LOEC de 1,2 g L^{-1}.

O comprimento de *A. salina* diferiu entre os tratamentos (Kruskal-Wallis; $\chi^2 = 20,837$; gl = 5; $p < 0,001$), com maiores valores em 0,8; 1,0 e 1,3 g L^{-1}. Entretanto, devido à impossibilidade de recuperar a réplica experimental de origem das medidas, esses resultados foram considerados exploratórios e não foram utilizados para inferir efeitos do lixiviado sobre o crescimento.

Em *E. lucunter*, observou-se aumento significativo e concentração-dependente do desenvolvimento embrio-larval anormal (GLM binomial; $\chi^2 = 623,39$; gl = 7; $p < 0,001$), de 2,0% no controle para 65,0% em 1,3 g L^{-1}. Todas as concentrações diferiram do controle (p ajustado < 0,0001), com LOEC de 0,1 g L^{-1}, NOEC < 0,1 g L^{-1} e EC50-36 h de 0,883 g L^{-1} (IC95%: 0,821–0,944).

Discussão

O lixiviado de CE apresentou efeitos letais e subletais nos organismos avaliados. Em *Artemia salina*, a mortalidade aumentou nas maiores concentrações, com efeitos significativos a partir de 1,1 g L^{-1} e LC50-48 h de 1,337 g L^{-1}. Resultados com lixiviado de bitucas de cigarro também demonstraram toxicidade aguda para *Artemia* sp. [9], embora diferenças na composição dos resíduos e nos procedimentos de lixiviação limitem comparações diretas. A

toxicidade observada pode estar associada à ação conjunta de nicotina residual, metais e outros compostos presentes nos resíduos de CE [1,3]. Entretanto, como o lixiviado não foi caracterizado quimicamente, os efeitos não podem ser atribuídos a substâncias específicas.

A toxicidade observada provavelmente resulta da ação conjunta dos constituintes presentes no lixiviado. Resíduos de CE podem conter nicotina residual, metais e compostos associados aos e-liquids e aos componentes do dispositivo [3].

Como não foi realizada caracterização química do lixiviado, não é possível atribuir os efeitos a substâncias específicas. Portanto, os resultados caracterizam a toxicidade do lixiviado como uma mistura complexa nas condições experimentais, enquanto a identificação dos compostos responsáveis requer análises químicas complementares.

Além da mortalidade, foram observados efeitos sobre a emergência e a eclosão de *A. salina*. A emergência em 24 h foi reduzida em todas as concentrações, embora sem resposta monotônica, enquanto em 48 h não houve diferença entre os tratamentos. A eclosão foi reduzida nas maiores concentrações após 48 h, com LOEC de 1,2 g L^{-1}, indicando que endpoints subletais podem complementar a avaliação da toxicidade [10,11]. Os resultados de comprimento foram considerados apenas exploratórios devido à impossibilidade de recuperar a réplica experimental de origem.

As diferenças no comprimento corporal foram consideradas exploratórias devido à impossibilidade de recuperar a réplica experimental de origem de cada indivíduo medido. Assim, embora tenham sido observados maiores valores em algumas concentrações, esses resultados não permitem inferir efeito estimulatório do lixiviado sobre o crescimento.

Em *Echinometra lucunter*, o desenvolvimento embrio-larval anormal aumentou de 2,0% no controle para 65,0% em 1,3 g L^{-1}, com LOEC de 0,1 g L^{-1} e EC50-36 h de 0,883 g L^{-1}. Esses resultados são consistentes com estudos que demonstram alterações no desenvolvimento embrio-larval da espécie após exposição a contaminantes [8]. As respostas ocorreram em concentrações inferiores às associadas à mortalidade e à eclosão de *A. salina*, evidenciando diferenças entre os organismos e endpoints avaliados.

A extrapolação para condições ambientais deve ser feita com cautela, pois as concentrações expressas em g L^{-1} correspondem à massa de material utilizada na obtenção do lixiviado, e não às concentrações ambientais de seus constituintes. Estudos futuros devem integrar caracterização química, diferentes tipos de dispositivos e cenários de exposição mais próximos das condições ambientais. Os resultados reforçam a importância do uso de múltiplos organismos e endpoints na avaliação ecotoxicológica de resíduos de CE.

Conclusões

O lixiviado obtido da espuma do cartucho de um cigarro eletrônico descartado promoveu efeitos letais e subletais em *Artemia salina* e alterações no desenvolvimento embrio-larval de *Echinometra lucunter*. A resposta de *E. lucunter* ocorreu desde a menor concentração testada, reforçando a importância do uso de diferentes organismos e endpoints em avaliações ecotoxicológicas. A ausência de caracterização química, entretanto, limita a identificação dos compostos responsáveis e a extrapolação dos resultados para condições ambientais.

Referências

1. Ngambo G, Hanna EG, Gannon J, Marcus H, Lomazzi M, Azari R. A scoping review on e-cigarette environmental impacts. Tobacco Prevention & Cessation. 2023 Oct 2;9:30.
2. Woo W, Tran LN, Tian L, Canchola A, Lin YH. Dynamic chemistry and toxicity of E-cigarette aerosols and their product waste. Chemical Research in Toxicology. 2026.
3. Iturralde K, Karunarathne S, Selby P, Zawertailo L. A review of the environmental impacts of post-consumer electronic cigarette waste and disposal. Nicotine & Tobacco Research. 2026;28(5):700-709. doi:10.1093/ntr/ntaf202.
4. das Candeias NPC, Barbara LP, Ferreira KLP, Montefusco C, Tristan-Cheever E, de Carvalho CS, et al. Circulação ilícita de dispositivos eletrônicos para fumar no Brasil: análise das respostas regulatórias, fiscalizatórias e sociais do estado. Journal of Human Growth and Development. 2026;36(3):572-587. doi:10.36311/jhgd.v36.19582.
5. Krause MJ, Townsend TG. Hazardous waste status of discarded electronic cigarettes. Waste Management. 2015 May;39:57-62. doi:10.1016/j.wasman.2015.02.005.
6. Cheng T. Chemical evaluation of electronic cigarettes. Tobacco Control. 2015;23(Suppl 2):ii11-ii17. doi:10.1136/tc.2014.051016.
7. Holden L, et al. Assessing the hazard of E-cigarette flavor mixtures using zebrafish. Food and Chemical Toxicology. 2020 Feb;136:110945. doi:10.1016/j.fct.2019.110945.
8. Pauly GFE, Vallim A, Merguizo RA, Daniel G, Ramaglia A, Cortez FS, et al. Fluoxetine can make marine organisms unhappy: a study on the sub-lethal effects on marine invertebrates. Ecotoxicology and Environmental Contamination. 2021;16(1):19-25.
9. Abessa DM, Ortega A, Marinsek GP, Roselli L, Chelotti L, Perina F. Toxicidade aguda do lixiviado de bitucas de cigarro sobre náuplios de Artemia sp. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 2021;4(1). doi:10.34188/bjaerv4n1-055.
10. Olaru II, Olaru OT, Mihai DP, Gird CE, Zanfirescu A, Boscencu R, et al. A dual bioassay for evaluation of embryotoxicity and acute toxicity of common solvents and surfactants in *Artemia salina*. Toxics. 2025 May 27;13(6):442.
11. Ñañez Pacheco GK, Sanabio Maldonado NS, Pastrana Alta RY, Aguilar Vitorino H. Short exposure of *Artemia salina* to group-12 metals: comparing hatchability, mortality, lipid peroxidation, and swimming speed. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021;213:112052. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112052.