



## AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE AMOSTRAS DE ÁGUA BRUTA E TRATADA DE GOIÂNIA E ANÁPOLIS: EFEITOS DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ORGANISMOS DE DIFERENTES NÍVEIS TRÓFICOS

**Pedro Henrique de Oliveira Carvalho<sup>(1)</sup>**

Farmacêutico e Mestre em Ciências Farmacêuticas. Técnico em Sistemas de Saneamento na empresa Saneago – Saneamento de Goiás.

**Carolina da Silva Pereira<sup>(1)</sup>**

Farmacêutica e Mestre em Ciências Farmacêuticas FF/UFG

**Bruna Cassimiro Batista<sup>(1)</sup>**

Farmacêutica, com Mestrado em andamento em Ciências Farmacêuticas FF/UFG

**Carlos Gravato<sup>(2)</sup>**

Professor Assistente na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa desde 2017. Doutor em Biologia (Universidade de Aveiro, 2002), com experiência em Fisiologia Animal, Biologia do Estresse, Ecotoxicologia e Ecofisiologia.

**Gisele Augusto Rodrigues de Oliveira<sup>(1)</sup>**

Farmacêutica e Professora Doutora na Faculdade de Farmácia da Universidade Federal de Goiás (FF/UFG) e é membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas (PPGCF) da FF/UFG.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Farmácia. Rua 240, s/n, 3º andar. Setor Leste Universitário. 74605170 - Goiânia, GO – Brasil Telefone: (62) 32096450 (62) 3243-3708.  
pedrofarmaciauc@gmail.com

### RESUMO

Este estudo avaliou os efeitos ecotoxicológicos de amostras de água bruta e tratada de Goiânia e Anápolis, Goiás, utilizando organismos de diferentes níveis tróficos: a alga *Raphidocelis subcapitata*, o microcrustáceo *Daphnia magna* e a planária *Girardia tigrina*. As amostras foram coletadas em períodos seco e chuvoso, com os resultados mostrando variação na toxicidade entre as estações e tipos de água. Os ensaios com a alga revelaram inibição significativa do crescimento, especialmente nas amostras tratadas, indicando a presença de compostos tóxicos resistentes ao processo de tratamento. No caso de *D. magna*, a toxicidade foi mais evidente nas amostras de água bruta, com uma redução após o tratamento, especialmente no período chuvoso, o que sugere uma diluição dos contaminantes. Por outro lado, *G. tigrina* não apresentou alterações letais ou comportamentais nas exposições, sugerindo maior resistência, embora efeitos subletais não possam ser descartados. Os resultados enfatizam que o tratamento convencional de água, embora eficaz para consumidores e predadores, ainda não elimina completamente os contaminantes que afetam os produtores primários, como as microalgas. Isso destaca a necessidade de aprimoramento dos processos de tratamento e de regulamentação dos contaminantes emergentes para garantir a saúde dos ecossistemas aquáticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Contaminantes Emergentes, Ecotoxicologia, Monitoramento Ambiental

### 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente detecção de contaminantes emergentes (CEs) em corpos hídricos tem se consolidado como um dos principais desafios para a gestão ambiental e para os sistemas de abastecimento público em todo o mundo (MEENA et al., 2025). Esses compostos, provenientes sobretudo de fontes antropogênicas, incluem uma ampla gama de substâncias como hormônios, produtos de higiene pessoal, pesticidas, plastificantes e outros compostos bioativos, comumente detectados em concentrações traço, variando entre nanogramas por litro (ng/L) e poucos microgramas por litro ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) (CENA et al., 2024). O aprimoramento de técnicas analíticas, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), tem sido decisivo para a identificação desses compostos nos ambientes aquáticos, superando as limitações dos métodos tradicionais (ASHRAF et al., 2024). Ainda assim, muitos desses contaminantes não são contemplados nas legislações ambientais vigentes, o que impede ações regulatórias eficazes e compromete a segurança ecológica e sanitária (RICHARDSON; KIMURA, 2020).



O estado de Goiás, particularmente os municípios de Goiânia e Anápolis, apresenta características que agravam a vulnerabilidade dos recursos hídricos frente aos contaminantes emergentes. A elevada densidade populacional, a significativa atividade agropecuária e a forte presença industrial — especialmente no Distrito Agroindustrial de Anápolis (DAIA) — contribuem para o lançamento contínuo de poluentes em corpos d'água da região (REZENDE; OLIVEIRA; MEIRA, 2005). Esse quadro é intensificado pela ausência de estruturas modernas e tecnológicas de pré-tratamento de efluentes nas indústrias e pela carência de monitoramento sistemático da qualidade da água (FERNANDES et al., 2020). Além disso, o regime hidrológico sazonal, com alternância entre períodos de estiagem e chuvas intensas, interfere diretamente na dinâmica de diluição, concentração e transporte dos poluentes, exigindo uma abordagem integrada de monitoramento nos diferentes períodos do ano. Diante desse contexto, é fundamental compreender os potenciais efeitos dos CEs sobre os ecossistemas aquáticos. Mesmo em concentrações muito baixas, esses compostos podem desencadear alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas, além de causar danos genéticos e desestabilização das populações aquáticas (BOXALL, 2004; CRANE et al., 2006).

A avaliação desses efeitos pode ser realizada por meio de bioensaios ecotoxicológicos utilizando organismos de diferentes níveis tróficos, capazes de revelar impactos sutis e acumulativos. A microalga *Raphidocelis subcapitata* é amplamente utilizada como organismo-teste por sua sensibilidade a compostos que interferem na fotossíntese e no crescimento celular, sendo essencial para avaliar riscos à base da cadeia alimentar (FAIRCHILD; RUESSLER; CARLSON, 1998). O microcrustáceo *Daphnia magna* é um modelo clássico na ecotoxicologia, com respostas rápidas e sensíveis a contaminantes que afetam a mobilidade, o desenvolvimento e a reprodução (NUNES, 2010; GIRI; PAL, 2014). Já a planária de água doce *Girardia tigrina* tem se destacado em estudos recentes por sua capacidade de revelar efeitos subletais e alterações bioquímicas, comportamentais e regenerativas, sendo especialmente eficaz para investigar ambientes com múltiplas fontes de poluição (DORNELAS et al., 2021; BUTTARELLI et al., 2008; KNAKIEVICZ, 2014; HAGSTROM et al., 2015; LAU et al., 2007; PRÁ et al., 2005).

A adoção desses modelos em estudos integrados permite uma compreensão mais robusta dos impactos ecotoxicológicos dos contaminantes emergentes e subsidia estratégias mais eficazes de vigilância, regulação e proteção dos recursos hídricos. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos ecotoxicológicos de amostras de água bruta (AB) e tratada (AT) provenientes dos sistemas de abastecimento das cidades de Goiânia e Anápolis — os dois municípios mais populosos do estado de Goiás — utilizando organismos-teste representativos de diferentes níveis tróficos.

## 2. METODOLOGIA

Este estudo teve como objetivo avaliar a ecotoxicidade de amostras de água bruta e tratada de estações de tratamento de água (ETAs) localizadas nos municípios de Goiânia e Anápolis, Goiás, utilizando ensaios ecotoxicológicos com organismos representativos de diferentes níveis tróficos: a alga verde *Raphidocelis subcapitata* (produtor primário), o microcrustáceo *Daphnia magna* (consumidor primário) e a planária de água doce *Girardia tigrina* (predador).

### 2.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

As amostras de água bruta e tratada foram coletadas nas ETAs Mauro Borges (Goiânia) e Sistema Piancó (Anápolis) em dois períodos distintos, representando as estações seca (setembro de 2022) e chuvosa (abril de 2023). Os pontos de coleta incluíram os mananciais utilizados para captação da água e a água já tratada e pronta para distribuição à população. As amostras foram coletadas em frascos de vidro ou plástico com capacidade de 1 litro, transportadas em caixas térmicas ao laboratório EnvTox da UFG e mantidas sob refrigeração ou congelamento até a realização dos testes.

### 2.2 ENSAIO ECOTOXICOLÓGICO COM A ALGA *Raphidocelis subcapitata*

O ensaio com *R. subcapitata* foi conduzido conforme a Diretriz n.º 201 da OECD (2011), com exposição por 72 horas a amostras não diluídas (100%). As culturas foram mantidas em meio sintético, sob temperatura controlada ( $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ), iluminação contínua (6.000–10.000 lux) e agitação constante. O crescimento das microalgas foi monitorado por espectrofotometria em 580 nm, com medições aos 0, 24, 48 e 72 horas. Os tratamentos foram realizados em triplicata, com controle negativo (meio OECD) e controle positivo ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), e a toxicidade foi avaliada pela inibição do crescimento celular.

### 2.3 ENSAIO DE TOXICIDADE AGUDA COM *Daphnia magna*



O ensaio de toxicidade aguda com *D. magna* seguiu as diretrizes da ABNT NBR 12713 (2016) e da OECD 202 (2004). Os organismos foram mantidos em água reconstituída padrão ASTM e alimentados com *R. subcapitata* e ração TetraMin®. Foram utilizados neonatos com menos de 24 horas de idade, expostos a amostras integrais (100%) por 48 horas, em sistema estático, a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e fotoperíodo de 16:8 horas. Cada tratamento consistiu na exposição de 20 organismos (cinco por tubo, em quatro réplicas). Os controles utilizados foram água de cultivo (negativo) e solução de 10 mg/L de ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (positivo). O parâmetro avaliativo foi a imobilidade dos organismos após 24 e 48 horas, analisada estatisticamente por ANOVA seguida de teste de Dunnett ( $\alpha = 0,05$ ).

## 2.4 ENSAIOS COM *Girardia tigrina*

As planárias *G. tigrina* foram mantidas no Laboratório de Fisiologia Animal e Planárias (PLANATORY), da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, em meio ASTM, sendo alimentadas com fígado bovino uma vez por semana. Antes da exposição, os organismos passaram por um período de jejum de sete dias. Foram selecionados indivíduos com idade entre quatro e cinco meses, sem danos aparentes. Os ensaios foram conduzidos em triplicata, com grupos de dez planárias expostas por 72 horas a cada amostra de água (AB e AT de cada ETA, nos dois períodos sazonais), em sistema estático, sob escuridão e temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ .

## 3. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam diferentes respostas ecotoxicológicas entre os organismos-teste expostos às amostras de água bruta e tratada das cidades de Goiânia e Anápolis, nos períodos seco e chuvoso. A seguir, apresentam-se os principais achados, organizados por nível trófico avaliado.

### 3.1 MICROALGA *Raphidocelis subcapitata*

Os bioensaios com *Raphidocelis subcapitata* revelaram elevado potencial tóxico nas amostras de água bruta e também nas amostras tratadas. Conforme apresentado na Tabela 1, observou-se inibição de crescimento de até 93% nas amostras da ETA Mauro Borges (MB) durante o período seco (água tratada e controle positivo), e de 78 a 83% nas amostras brutas. A amostra da ETA Piancó (SP), por sua vez, também apresentou inibição expressiva, com 95% na água tratada durante o período seco. Em contraste, o controle negativo (CN) não apresentou inibição significativa.

**Tabela 1 – Inibição do crescimento de *R. subcapitata* após 72h de exposição (valores expressos em % de inibição média)**

ETA / Período	Amostra	Inibição (%)
Mauro Borges – Estiagem	Água Bruta (AB)	83%
Mauro Borges – Estiagem	Água Tratada (AT)	93%
Mauro Borges – Chuvoso	Água Bruta (AB)	78%
Mauro Borges – Chuvoso	Água Tratada (AT)	93%
Piancó – Estiagem	Água Bruta (AB)	95%
Piancó – Estiagem	Água Tratada (AT)	95%
Piancó – Chuvoso	Água Bruta (AB)	88%
Piancó – Chuvoso	Água Tratada (AT)	73%



<b>Controle Positivo (CP)</b>	—	93%
<b>Controle Negativo (CN)</b>	—	0%

Esses resultados reforçam a elevada sensibilidade da microalga aos contaminantes presentes, inclusive após o processo de tratamento convencional, e confirmam que a eficiência das ETAs na remoção de compostos tóxicos não é absoluta. Os efeitos mais intensos durante o período seco podem ser atribuídos à menor diluição dos contaminantes e maior concentração relativa de substâncias bioativas.

### 3.2 MICROCRUSTÁCEO *Daphnia magna*

Os testes agudos com *Daphnia magna* apresentaram níveis moderados a baixos de toxicidade, com variação entre as amostras e os períodos sazonais. A Tabela 2 sintetiza os valores de imobilidade observados aos 24 e 48h de exposição.

**Tabela 2 – Imobilidade de *D. magna* após exposição às amostras de água (24h e 48h)**

ETA / Período	Amostra	Imobilidade 24h	Imobilidade 48h
<b>Mauro Borges – Estiagem</b>	Água Bruta (AB)	6,7%	20%
<b>Mauro Borges – Estiagem</b>	Água Tratada (AT)	6,7%	6,7%
<b>Mauro Borges – Chuvisco</b>	Água Bruta (AB)	0%	6,7%
<b>Mauro Borges – Chuvisco</b>	Água Tratada (AT)	0%	13,3%
<b>Piancó – Estiagem</b>	Água Bruta (AB)	0%	46,7%
<b>Piancó – Estiagem</b>	Água Tratada (AT)	6,7%	13,3%
<b>Piancó – Chuvisco</b>	Água Bruta (AB)	0%	13,3%
<b>Piancó – Chuvisco</b>	Água Tratada (AT)	0%	0%
<b>Controle Positivo (CP)</b>	—	20%	66,7%
<b>Controle Negativo (CN)</b>	—	0%	0%

De modo geral, as amostras de água bruta apresentaram maior toxicidade em comparação com as tratadas, especialmente durante o período seco. As ETAs demonstraram capacidade parcial de remoção de substâncias tóxicas para *D. magna*, mas ainda com efeitos residuais em algumas amostras tratadas (ex: Piancó – Estiagem). Durante o período chuvisco, os efeitos tóxicos foram substancialmente reduzidos, possivelmente devido à maior diluição dos poluentes nos mananciais.

### 3.3 PLANÁRIA *Girardia tigrina*

Durante os ensaios agudos com *G. tigrina*, nenhum dos indivíduos expostos às amostras ambientais (brutas ou tratadas) apresentou mortalidade após 72h de exposição, em nenhuma das condições testadas. Além disso, não foram observadas alterações comportamentais evidentes como letargia, perda de mobilidade ou resposta anormal a estímulos táteis, mesmo nos grupos expostos às amostras com maior toxicidade para os demais organismos.



Esse resultado sugere que *G. tigrina* pode apresentar maior resistência frente aos contaminantes presentes nessas amostras, ao menos em termos de efeitos letais e comportamentais agudos. No entanto, a ausência de resposta em testes agudos não descarta a possibilidade de efeitos subletais em exposições prolongadas ou em concentrações cumulativas. Estudos anteriores indicam que biomarcadores bioquímicos são mais sensíveis que a mortalidade e o comportamento para detectar estresse ambiental em planárias expostas a poluentes complexos (DORNELAS et al., 2021; HAGSTROM et al., 2015). Por isso, análises complementares com marcadores oxidativos e neurotóxicos tornam-se essenciais para uma avaliação mais abrangente da qualidade ambiental.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que as amostras de água bruta e tratada dos municípios de Goiânia e Anápolis, coletadas nos períodos seco e chuvoso, apresentaram diferentes níveis de toxicidade quando avaliadas com organismos pertencentes a distintos níveis tróficos. De forma geral, os resultados indicam que o tratamento convencional de água foi eficaz em reduzir a toxicidade das amostras, com diminuição consistente dos efeitos adversos nas amostras tratadas em comparação às brutais.

As exposições com *Girardia tigrina* não apresentaram qualquer indício de toxicidade aguda, uma vez que nenhum organismo morreu ou apresentou alterações comportamentais durante o período de exposição. Esse achado sugere que, nas condições avaliadas, as amostras não representam risco letal imediato para esse modelo biológico.

Nos ensaios com *Daphnia magna*, observou-se toxicidade baixa a moderada, principalmente nas amostras de água bruta durante o período seco. No entanto, essa toxicidade foi atenuada após o tratamento, o que reforça o papel das estações de tratamento de água na redução da carga tóxica de compostos bioativos para organismos sensíveis da fauna aquática.

Em contraste, os bioensaios com a microalga *Raphidocelis subcapitata* revelaram níveis elevados de inibição do crescimento, inclusive nas amostras de água tratada. Esses resultados requerem atenção, considerando que microalgas representam a base da cadeia alimentar aquática e alterações nesse nível trófico primário podem comprometer a estrutura e o funcionamento de todo o ecossistema.

Portanto, conclui-se que, embora o tratamento convencional contribua significativamente para a mitigação dos efeitos tóxicos em organismos consumidores e predadores, ele ainda se mostra insuficiente para remover completamente substâncias que afetam os produtores primários. Esses achados destacam a importância da inclusão de bioensaios multiespécies em programas de monitoramento ambiental e apontam para a necessidade de melhorias nos processos de tratamento e na regulamentação de contaminantes emergentes visando à preservação da integridade ecológica dos ambientes aquáticos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAF, Dina; MORSI, Rana; USMAN, Muhammad; MEETANI, Mohammed A. Recent advances in the chromatographic analysis of emerging pollutants in dairy milk: a review (2018–2023). *Molecules*, v. 29, n. 6, p. 1296, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29061296>.
- BOXALL, A. B. A. The environmental side effects of medication. *EMBO Reports*, v. 5, n. 12, p. 1110–1116, 2004.
- BUTTARELLI, F. R.; PELLICANO, C.; PONTIERI, F. E. Neuropharmacology and behavior in planarians: translations to mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, v. 147, n. 4, p. 399–408, 2008.
- CENA, Valdemar Luiz; OLIVATTO, Gláucia Peregrina; LOURENÇO, Felipe; LAURA, Ana. Microplásticos em ambientes aquáticos: ocorrência, riscos ambientais, técnicas analíticas, soluções e perspectivas futuras. *Revista Virtual de Química*, v. 16, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20240011>.
- CRANE, M.; WATTS, C.; BOUCARD, T. Chronic aquatic environmental risks from exposure to human pharmaceuticals. *Science of the Total Environment*, v. 367, p. 23–41, 2006.



6. DORNELAS, Aline S. P. et al. Effects of two biopesticides and salt on behaviour, regeneration and sexual reproduction of the freshwater planarian *Girardia tigrina*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 404, p. 124089, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124089>.
7. FAIRCHILD, J. F.; RUESSLER, D. S.; CARLSON, A. R. Comparative sensitivity of five species of macrophytes and six species of algae to atrazine, metribuzin, alachlor, and metolachlor. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 17, p. 1830–1834, 1998.
8. FERNANDES, C. E. et al. Saneamento ambiental: os desafios da estação de tratamento de esgoto do DAIA em Anápolis (GO). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 42426–42436, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-018>.
9. GIRI, P.; PAL, C. Ecotoxicological aspects of pharmaceuticals on aquatic environment. *American Journal of Drug Discover*, v. 1, p. 10–24, 2014.
10. HAGSTROM, D.; COCHET-ESCARTIN, O.; ZHANG, S.; KHUU, C.; COLLINS, E. M. S. Freshwater planarians as an alternative animal model for neurotoxicology. *Toxicological Sciences*, v. 147, n. 1, p. 270–285, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv129>.
11. KNAKIEVICZ, T. Avaliação ecotoxicológica com planárias: um modelo alternativo para estudos ambientais. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 14, n. 2, p. 121–128, 2014.
12. LAU, A. H.; KNAKIEVICZ, T.; PRÁ, D.; ERDTMANN, B. Freshwater planarians as novel organisms for genotoxicity testing: Analysis of chromosome aberrations. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, v. 48, n. 6, p. 475–482, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/em.20307>.
13. MEENA, V.; SWAMI, D.; CHANDEL, A.; JOSHI, N.; PRASHER, S. O. Selected emerging contaminants in water: global occurrence, existing treatment technologies, regulations and associated risk. *Journal of Hazardous Materials*, v. 483, p. 136541, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136541>.
14. NUNES, B. Fármacos no ambiente: implicações ecotoxicológicas. *CAPTAR – Ciência e Ambiente para Todos*, v. 2, n. 1, p. 9–20, jan. 2010.
15. OECD. Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test. Paris: OECD Publishing, 2011. Disponível em: <https://www.oecd.org/env/ehs/testing/test-no-201-freshwater-alga-and-cyanobacteria-growth-inhibition-test.htm>. Acesso em: 10 jun. 2025.
16. OECD. Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, Paris: OECD Publishing, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>.
17. PRÁ, D.; LAU, A. H.; KNAKIEVICZ, T.; CARNEIRO, F. R.; ERDTMANN, B. Environmental genotoxicity assessment of an urban stream using freshwater planarians. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, v. 585, n. 1–2, p. 79–85, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2005.04.002>.
18. RICHARDSON, Susan D.; KIMURA, Susana Y. Water analysis: emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, v. 92, n. 1, p. 473–505, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05269>.
19. REZENDE, A. G. A.; OLIVEIRA, T. B.; MEIRA, J. C. R. Determinação qualitativa e quantitativa dos resíduos gerados em indústrias farmacêuticas do Distrito Agroindustrial de Anápolis-DAIA. *Revista Eletrônica de Farmácia*, v. 2, n. 2, Suplemento, p. 172–175, 2005.