

Efeitos toxicológicos de nanopartículas no Plâncton: implicações para a Saúde Ambiental

Edison Barbieri¹  Pedro Luiz Barbosa²  Pinto Leonidio Hanamulamba³  Thalassia Giaccone^{4,5} 

¹Instituto de Pesca – Governo do Estado de São Paulo. Cananéia/SP, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade de Ambientes Costeiros – PPG-BAC, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. São Vicente/SP, Brasil.

³Universidade do Namíbe, Angola.

⁴Anton Dohrn Zoological Station, Integrative Marine Ecology Department, Sicily Marine Centre. Messina, Itália.

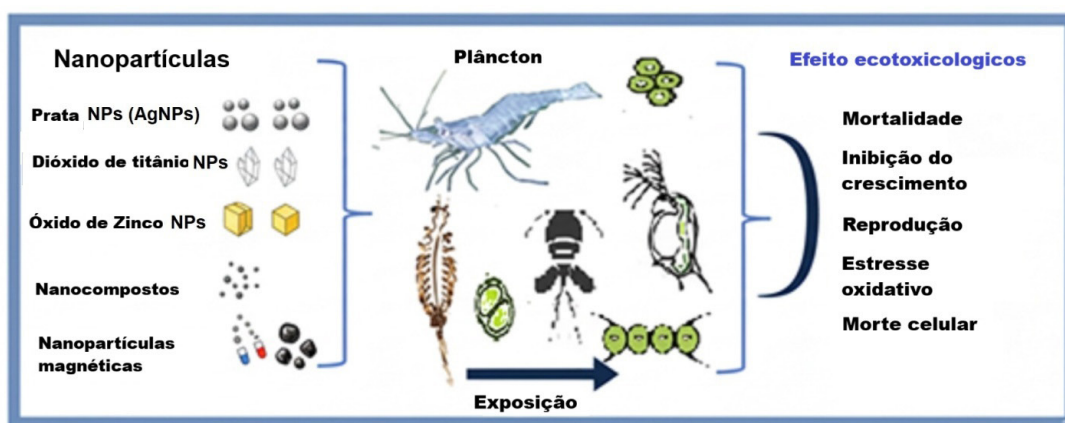
⁵National Biodiversity Future Center. Palermo, Itália.

E-mail: edisonbarbieri@yahoo.com.br

Highlights

- As nanopartículas (NPs) prejudicam o crescimento e a reprodução do plâncton, além de induzirem estresse.
- As formas iônicas das NPs são mais tóxicas ao plâncton.
- A exposição crônica às NPs causa efeitos subletais, comprometendo as teias alimentares e os ecossistemas.
- Estudos ecológicos de longo prazo ainda são escassos.
- É necessário compreender a toxicidade das misturas de NPs com outros poluentes.

Resumo Gráfico



Resumo

As nanopartículas (NPs) emergiram como contaminantes onipresentes em ambientes aquáticos devido às suas extensas aplicações industriais, biomédicas e agrícolas. Seu pequeno tamanho, alta reatividade superficial e potencial de liberação de íons tóxicos conferem a essas partículas uma capacidade singular de interação com a biota aquática, particularmente com as comunidades planctônicas, que constituem a base das cadeias tróficas aquáticas. Esta revisão compila e analisa achados ecotoxicológicos recentes sobre os efeitos de nanopartículas metálicas (Ag, ZnO, TiO₂, Cu, Fe₃O₄), poliméricas e compósitas sobre o zooplâncton e o fitoplâncton, com ênfase nas respostas fisiológicas, bioquímicas e em nível populacional. As evidências indicam que as NPs podem induzir estresse oxidativo, danos de membrana, inibição do crescimento, comprometimento reprodutivo e distúrbios metabólicos em espécies como *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia silvestrii* e *Chlorella vulgaris*. A dissolução iônica (por exemplo, Ag⁺, Zn²⁺) e a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) foram identificadas como as principais vias de toxicidade, embora as interações de superfície e a formação da corona proteica também modulem sua biodisponibilidade e toxicidade. Exposições subletais e crônicas frequentemente desestruturam a composição e a produtividade das comunidades planctônicas, com potenciais efeitos em cascata sobre níveis tróficos superiores e sobre a estabilidade dos ecossistemas. Apesar dos avanços, persistem lacunas significativas de conhecimento quanto às consequências ecológicas de longo prazo, à toxicidade de misturas com outros poluentes e ao comportamento das NPs sob condições ambientalmente realistas. Pesquisas futuras devem integrar a toxicologia mecanística, a nanoinformática e a modelagem ecológica para prever o destino ambiental e os impactos das NPs. A síntese de nanopartículas verdes e a implementação de protocolos padronizados de ensaio são cruciais para a mitigação de riscos e para o direcionamento de práticas sustentáveis em nanotecnologia. Ao elucidar as complexas interações entre NPs e os organismos planctônicos, este estudo contribui para a compreensão mais ampla das perturbações induzidas por nanopartículas nos ecossistemas aquáticos e suas implicações para a saúde ambiental.

Palavras-chave: Nanopartículas. Zooplâncton. Fitoplâncton. Efeitos. Nanotoxicologia.

Editor de área: Léo Cordeiro de Mello da Fonseca

Revisora: Francine Côa 

Mundo Saúde. 2025;49:e18092025

O Mundo da Saúde, São Paulo, SP, Brasil.

<https://revistamundodasaude.emnuvens.com.br>

Recebido: 10 setembro 2025.

Aprovado: 27 novembro 2025.

Publicado: 16 dezembro 2025.

INTRODUÇÃO

Os nanomateriais tornaram-se parte integrante da sociedade moderna, com aplicações que se expandem rapidamente nos setores da agricultura, medicina, produção de energia e manufatura industrial. Seu uso extensivo e a consequente liberação no meio ambiente têm despertado preocupações crescentes quanto às suas potenciais implicações ecológicas, particularmente nos ecossistemas aquáticos, que frequentemente atuam como o destino final de poluentes de origem antrópica^{1,2}. Devido ao seu pequeno tamanho (1–100 nm), elevada área superficial e reatividade singular, as nanopartículas (NPs) exibem comportamentos e interações que diferem substancialmente de seus equivalentes em escala macroscópica, podendo alterar processos biogeoquímicos e impor novos desafios ecotoxicológicos³.

Em ambientes aquáticos, os efeitos das nanopartículas sobre as comunidades planctônicas tornaram-se um foco central da toxicologia ambiental contemporânea. O zooplâncton e o fitoplâncton são componentes fundamentais das cadeias tróficas aquáticas, representando os principais produtores e consumidores que sustentam os níveis tróficos superiores. Seus ciclos de vida curtos, elevada sensibilidade às variações físico-químicas e importância ecológica tornam esses organismos excelentes bioindicadores de contaminação por nanopartículas. Distúrbios nesses organismos podem propagar-se ao longo da cadeia alimentar, conduzindo a consequências mais amplas para o funcionamento e a estabilidade dos ecossistemas.

Pesquisas anteriores demonstraram que as nanopartículas podem induzir uma ampla gama de efeitos adversos na biota aquática, incluindo estresse oxidativo, danos às membranas, inibição do crescimento e comprometimento reprodutivo em bactérias, algas, crustáceos e peixes^{4,5,6}. Entre os

nanomateriais mais estudados, as nanopartículas de prata (AgNPs)⁴, de óxido de zinco (ZnONPs) e de dióxido de titânio (TiO₂NPs) têm sido associadas à bioacumulação, transferência trófica e toxicidade subletal em espécies como *Daphnia magna*, *Calanus finmarchicus* e *Chlorella vulgaris*^{7,8,9,10}. Adicionalmente, a formação de coronas proteicas e as interações complexas com a matéria orgânica ou com co-contaminantes podem modular a biodisponibilidade e a toxicidade das nanopartículas, introduzindo uma camada adicional de complexidade às avaliações de risco ambiental¹¹.

O estudo da toxicidade das nanopartículas apresenta múltiplos desafios, principalmente em razão da natureza dinâmica dessas partículas nos meios aquáticos. Fatores como agregação, dissolução, transformação e interação com coloides naturais alteram significativamente suas propriedades físico-químicas e seus efeitos biológicos ao longo do tempo. Ademais, os protocolos padronizados de ensaio toxicológico foram originalmente desenvolvidos para substâncias químicas dissolvidas e podem não capturar com precisão os comportamentos específicos das nanopartículas ou suas vias de exposição. Esses desafios metodológicos e conceituais evidenciam a necessidade de abordagens integrativas que combinem caracterização físico-química, ensaios biológicos e modelagem ecológica.

Nesse contexto, o presente estudo investiga os efeitos das nanopartículas sobre o zooplâncton e o fitoplâncton, com o objetivo de ampliar a compreensão da ecotoxicologia das nanopartículas e de suas implicações para a saúde dos ecossistemas aquáticos. Ao abordar as interações entre espécies planctônicas-chave e nanomateriais engenheirados, esta pesquisa contribui para o desenvolvimento de estruturas mais precisas para a avaliação de risco ambiental e para a gestão sustentável da nanotecnologia.

METODOLOGIA

Identificação e seleção das fontes de dados

As bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *DOAJ* e *SciELO* foram sistematicamente pesquisadas para a identificação de estudos relevantes sobre os efeitos das nanopartículas no plâncton, abrangendo o período de janeiro a dezembro de 2024.

Foram utilizados termos de busca apropriados, como “nanoparticles”, “plankton”, “ecotoxicology”, “aquatic organisms”, “effects”, “zooplankton” e “phytoplankton”, entre outros, a fim de garantir ampla cobertura da literatura.

A busca foi restrita a artigos publicados em periódicos científicos com revisão por pares.

Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão concentraram-se em estudos que investigaram os impactos das NPs sobre o zooplâncton e o fitoplâncton, incluindo a supressão do crescimento e alterações na dinâmica das comunidades.

Os critérios de exclusão incluíram estudos com dados insuficientes sobre impacto ambiental, trabalhos

sem revisão por pares e estudos que enfocaram organismos não planctônicos.

Triagem de títulos e resumos

Realizou-se a revisão dos títulos e resumos dos artigos identificados na busca inicial para determinar sua relevância em relação ao objetivo da revisão.

Foram selecionados para análise detalhada apenas os artigos que atenderam aos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

Análise do texto completo

Procedeu-se à leitura integral dos artigos selecionados para avaliação de sua qualidade metodológica e relevância para a revisão.

Foram extraídos dados relevantes, como métodos de estudo, tipos de nanopartículas utilizadas, concentrações testadas, grupos planctônicos avaliados e principais resultados.

Síntese e análise dos dados

Os dados extraídos foram agrupados visando iden-

tificar padrões e tendências nos efeitos das nanopartículas sobre o plâncton.

Realizou-se a avaliação crítica dos resultados dos estudos incluídos, considerando a consistência e a confiabilidade das evidências apresentadas.

Foram identificadas lacunas de conhecimento e áreas prioritárias para pesquisas futuras.

Redação da revisão científica

A revisão foi estruturada de acordo com as seções padrão de um artigo científico, incluindo introdução, metodologia, resultados, discussão e conclusão.

Os métodos utilizados foram descritos de forma clara e precisa, incluindo os detalhes da busca bibliográfica, dos critérios de seleção dos estudos e da análise dos dados.

Foram apresentados os principais achados da revisão, destacando os efeitos das nanopartículas sobre o plâncton e suas implicações para o ambiente aquático.

Os resultados foram discutidos à luz da literatura existente, com conclusões sobre o estado atual do conhecimento e direções para pesquisas futuras.

Efeitos das nanopartículas sobre o zooplâncton

Efeitos das nanopartículas de prata

O enfoque ecológico na síntese de nanopartículas de prata (AgNPs) vem ganhando significativa atenção devido aos desafios atualmente associados à sua produção. Embora os métodos químicos para a síntese de AgNPs sejam bem estabelecidos, eles apresentam elevado custo de produção e geram resíduos tóxicos que representam riscos significativos ao meio ambiente¹². Como resultado, há uma crescente discussão no campo da nanotecnologia sobre a busca por alternativas ambientalmente amigáveis para a síntese de nanopartículas¹¹.

A síntese biológica de AgNPs surge como uma solução promissora para a redução da contaminação ambiental, uma vez que não gera resíduos tóxicos durante o processo. Entretanto, antes de sua adoção em larga escala, é fundamental estudar de forma aprofundada os riscos potenciais associados à liberação dessas AgNPs no ambiente. Alterações nas condições ambientais podem modificar suas propriedades e toxicidade, tornando necessária uma avaliação abrangente de seus impactos ecológicos¹³. A ênfase em aspectos ecológicos na síntese de AgNPs e em suas implicações ambientais é essencial para práticas sustentáveis e responsáveis em nanotecnologia.

Estudos que avaliaram os impactos potenciais das nanopartículas sintéticas de prata (AgNPs) em sistemas aquáticos demonstraram, de forma consistente, sua toxicidade para uma ampla gama de

organismos nesses ecossistemas, incluindo micro e macroalgas, plantas aquáticas, bactérias, crustáceos e peixes^{11,14}. Como as AgNPs podem sofrer alterações em suas propriedades físico-químicas em ambientes naturais, sua toxicidade pode ser potencializada, gerando efeitos deletérios sobre a biota aquática. Os organismos aquáticos são particularmente vulneráveis às nanopartículas devido ao seu pequeno tamanho, o que não apenas facilita sua absorção, mas também intensifica seu potencial de causar danos fisiológicos significativos¹⁵ e disfunções celulares¹⁶. Consequentemente, a presença de AgNPs em ambientes aquáticos representa um risco substancial à saúde e à estabilidade desses ecossistemas, tornando necessária a realização de estudos mais detalhados para a plena compreensão e mitigação desses impactos.

Estudos ecotoxicológicos que investigam a toxicidade potencial das nanopartículas de prata (AgNPs) têm utilizado uma ampla diversidade de modelos biológicos, incluindo bactérias, algas, fungos, invertebrados e peixes¹⁷. Essas investigações visam elucidar o impacto ambiental das AgNPs e seus potenciais efeitos sobre diversos organismos ao longo de diferentes níveis tróficos. A toxicidade das AgNPs sintéticas apresenta elevada variabilidade em função da espécie avaliada, ressaltando a necessidade de estudos mais refinados para determinar a sensibilidade de diferentes espécies dentro das comunidades planctônicas e estabelecer con-

centrações-limite para esses nanomateriais¹⁸. Dada a importância crítica das questões ecológicas aquáticas, é imprescindível avaliar de forma rigorosa os riscos potenciais representados pelas AgNPs para salvaguardar a saúde e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

Os efeitos tóxicos *in vitro* das AgNPs têm sido amplamente estudados em diversos organismos componentes do plâncton, incluindo bactérias⁴, algas^{11,19}, plantas¹¹, moluscos²⁰, crustáceos²¹ e insetos²². No ambiente aquático, as AgNPs exercem impactos deletérios sobre procariotos, invertebrados e peixes¹¹. Embora os mecanismos precisos de toxicidade da maioria das nanopartículas, incluindo a prata, ainda não estejam completamente elucidados, estes podem envolver a desestabilização da integridade da membrana celular²³, citotoxicidade²⁴, genotoxicidade²⁵ e catabolismo proteico²⁶.

Devido ao seu tamanho reduzido, as nanopartículas (NPs) podem penetrar nos sistemas biológicos por múltiplas vias de exposição¹¹. Em águas naturais, espera-se que as emissões de NPs gerem partículas de diferentes tamanhos, o que pode atenuar alguns efeitos²⁷. Ainda assim, mesmo partículas agregadas tendem a se dissolver ao longo do tempo, liberando íons tóxicos de Ag⁺²⁸. A compreensão dos impactos das AgNPs sobre organismos planctônicos é vital para a proteção do delicado equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e da diversidade biológica que eles sustentam.

Os invertebrados representam uma parcela significativa, aproximadamente 95%, das espécies da Terra e encontram-se amplamente distribuídos, com populações abundantes, o que os torna organismos-chave em estudos de ecotoxicidade²⁷. Atuando como consumidores primários, desempenham papel fundamental nos ecossistemas ao se alimentarem de microalgas e matéria orgânica em suspensão. Qualquer alteração na qualidade ou quantidade das populações de dáfnideos pode desencadear efeitos em cascata sobre outros níveis tróficos, impactando diretamente diversos organismos aquáticos e gerando consequências ambientais relevantes^{28,29}.

Entre esses invertebrados, a espécie planctônica *Daphnia similis* apresenta importância particular devido à sua elevada sensibilidade a poluentes e ao seu papel como espécie basal em ecossistemas de água doce, constituindo a base da cadeia alimentar^{29,30}. Essas características tornam essa espécie um modelo biológico ideal para estudos em ecotoxicologia. Além disso, estudos de exposição envolvendo *D. magna* têm sido realizados com diversas nano-

partículas comerciais para avaliar a bioacumulação e determinar a LC₅₀ (concentração letal para 50% da população) de nanopartículas sintéticas com diferentes características³¹. Ao investigar os efeitos das nanopartículas nesses invertebrados ecologicamente relevantes, é possível obter informações cruciais sobre seus impactos ambientais potenciais e desenvolver estratégias para mitigar os efeitos adversos sobre os ecossistemas aquáticos.

As nanopartículas (NPs) também afetam copépodos planctônicos maiores que 500 µm³² e protozoários como os ostracodes, com tamanhos entre 5 e 15 µm³³. Os efeitos tóxicos das NPs sobre os organismos aquáticos podem resultar em alterações significativas na estrutura das comunidades. Álvarez-Manzaneda *et al.*³⁴ conduziram um estudo para investigar o impacto de concentrações ambientalmente relevantes de nanopartículas de prata (AgNPs) sobre comunidades planctônicas em seu habitat natural, utilizando concentrações nominais de 4, 16 e 64 µg/L. Os pesquisadores detectaram alterações na estrutura de tamanho das comunidades zooplânctônicas durante exposições crônicas às AgNPs. Além disso, nos tratamentos agudos, observou-se uma redução na abundância e na biomassa do zooplâncton, indicando que exposições de curto prazo a altas concentrações de AgNPs produzem efeitos distintos daqueles observados em exposições crônicas. De forma geral, o estudo demonstrou diferentes níveis de toxicidade das AgNPs ao longo dos níveis tróficos, com impactos mais pronunciados sobre o zooplâncton. Esses efeitos observados levantam preocupações, uma vez que sugerem que a contaminação por AgNPs tem potencial para desestruturar as teias alimentares aquáticas³⁴. Os resultados reforçam a importância de compreender os efeitos das NPs sobre organismos diversos para a preservação do equilíbrio e da funcionalidade dos ecossistemas aquáticos.

A principal causa da toxicidade das nanopartículas de prata (AgNPs) em organismos aquáticos é frequentemente atribuída à liberação de íons prata (Ag⁺). Contudo, a distinção entre AgNPs e Ag⁺ em matrizes biológicas permanece complexa, impondo desafios significativos à plena compreensão do comportamento de dissolução das AgNPs em organismos vivos. Em um estudo abrangente realizado por Yan *et al.*³⁵, a liberação de Ag⁺ a partir de AgNPs de diferentes tamanhos foi quantificada ao longo do tempo utilizando o zooplâncton *Daphnia magna* como modelo. Os resultados demonstraram que as AgNPs ingeridas por *D. magna* sofreram dissolução em Ag⁺, posteriormente detectado em

altas concentrações no intestino anterior. Aproximadamente 8,3–9,7% das AgNPs ingeridas, com tamanhos de 20 e 60 nm, foram liberadas na forma de Ag^+ . Além disso, um sensor de pH indicou que a dissolução das AgNPs foi parcialmente influenciada pela distribuição heterogênea de pH ao longo das diferentes seções do intestino do zooplâncton. O Ag^+ também foi observado atravessando as brânquias e penetrando nos dáfnideos, indicando uma via potencial de toxicidade das AgNPs nessa espécie^{31,35}.

Esse estudo reforça a necessidade crítica de compreender a dinâmica de dissolução das AgNPs e a subsequente liberação de Ag^+ nos organismos aquáticos. Tal conhecimento é essencial para a compreensão dos impactos ambientais mais amplos das AgNPs e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação dos riscos associados à exposição a nanopartículas em ecossistemas aquáticos. Essa complexa interação entre o comportamento das nanopartículas e as respostas biológicas evidencia a importância de avaliações ecotoxicológicas detalhadas para a proteção da saúde da biota aquática frente ao aumento da poluição por nanopartículas.

Lekamge *et al.*¹⁷ realizaram um estudo ecotoxicológico para avaliar a toxicidade aguda de nanopartículas de prata revestidas com tirosina (tyr-AgNPs, aproximadamente 30 nm) em duas espécies de crustáceos, *Hydra vulgaris*, *Daphnia carinata* e *Paratya australiensis*. Os autores determinaram a concentração letal média (LC_{50}) das tyr-AgNPs para ambas as espécies após 24 h de exposição, obtendo valores similares de 62,04–64,24 $\mu\text{g/L}$. Entretanto, após 48 h de exposição, observou-se sensibilidade diferencial entre as espécies: *D. carinata* apresentou LC_{50} significativamente menor (35,48 $\mu\text{g/L}$), indicando maior sensibilidade em comparação a *P. australiensis*, que exibiu LC_{50} de 55,34 $\mu\text{g/L}$. Os autores atribuíram essas diferenças aos distintos hábitos alimentares dos crustáceos. *Daphnia*, como organismo filtrador, ingere grandes volumes de água, o que provavelmente resulta em maior internalização das nanopartículas. Em contraste, *P. australiensis*, que se alimenta principalmente de detritos, utiliza a água sobretudo para respiração, reduzindo potencialmente a absorção de nanopartículas.

Esse estudo destaca a importância de considerar comportamentos específicos e características fisiológicas das espécies na avaliação da toxicidade de nanopartículas em organismos aquáticos. A sensi-

bilidade diferencial observada entre os dois crustáceos evidencia a complexidade das interações entre nanopartículas e sistemas biológicos, bem como a necessidade de avaliações abrangentes em diferentes espécies e condições de exposição³⁶. A compreensão dessas nuances é fundamental para a correta avaliação dos riscos ambientais das nanopartículas e para o desenvolvimento de marcos regulatórios que protejam os ecossistemas aquáticos da poluição por nanomateriais.

Yoo-iam *et al.*³⁷ realizaram um estudo aprofundado para avaliar a toxicidade, bioacumulação e biomagnificação de materiais à base de nanopartículas de prata (AgNPs) em um contexto de cadeia alimentar. A pesquisa comparou duas formas de prata: prata iônica (Ag^+) e nanosilver (AgNPs), considerando seus impactos sobre as espécies *Barbonymus gonionotus*, *Chironomus* spp., *Chlorella* sp. e *Moina macrocopa*. Os resultados demonstraram que o Ag^+ apresentou toxicidade superior à das AgNPs em todos os quatro organismos testados. A concentração efetiva (EC_{50}) para Ag^+ em *Chlorella* sp. foi de $0,39 \pm 0,32$ mg/L, enquanto a concentração letal (LC_{50}) para *M. macrocopa* foi de $0,026 \pm 0,43$ mg/L. Em contraste, *Chlorella* sp. exposta às AgNPs apresentou EC_{50} de $0,89 \pm 0,68$ mg/L, e a LC_{50} para *M. macrocopa* exposta às AgNPs foi de $1,11 \pm 0,86$ mg/L.

Esses resultados reforçam a maior toxicidade da prata iônica em relação à sua forma nanoparticulada, evidenciando a necessidade de considerações distintas nas avaliações de risco ecológico de materiais à base de prata. Os dados também fornecem informações valiosas sobre a variabilidade de sensibilidade entre diferentes espécies aquáticas aos contaminantes à base de prata, ressaltando a importância de estudos toxicológicos direcionados para subsidiar políticas de segurança ambiental e práticas de gestão voltadas à proteção dos ecossistemas aquáticos contra a poluição por prata.

No estudo de bioacumulação, *Chlorella* sp. apresentou o maior fator de bioacumulação (BAF) de Ag^+ , com valor de 101,84 g/L, enquanto o menor BAF para AgNPs foi observado em *B. gonionotus* (1,89 g/L)³⁷. A transferência de AgNPs ao longo da cadeia alimentar ocorreu apenas a partir de *Chlorella* sp., não havendo evidências de biomagnificação em *M. macrocopa*. Esses resultados reforçam a importância de compreender as interações entre nanopartículas e diferentes organismos ao longo da cadeia alimentar para a adequada avaliação de riscos ambientais e impactos ecológicos.

Efeitos das nanopartículas de titânio

A exposição crônica de *Daphnia magna* a nanopartículas de titânio (TiO_2), comumente utilizadas em protetores solares, tem sido associada a baixa mortalidade, porém com redução significativa no crescimento e na reprodução dos organismos. Esses efeitos podem ser parcialmente atribuídos a alterações na fisiologia digestiva de *D. magna*^{7,38,39}. Além de *Daphnia* sp., alguns estudos também investigaram a toxicidade de nanopartículas de prata (AgNPs) no zooplâncton utilizando organismos como *Artemia salina*. A determinação dos valores de EC_{50} após 24 h e 72 h resultou em valores de 19,63 mg/L e 10,70 mg/L, respectivamente^{8,19,40,41}. Esses achados evidenciam a importância de compreender os potenciais efeitos adversos das nanopartículas sobre os organismos aquáticos e seus ecossistemas, destacando a necessidade de estudos adicionais para avaliar e mitigar tais impactos.

Na investigação de Lucca¹⁰, os efeitos agudos e crônicos do nano- TiO_2 sobre o cladóceros *Ceriodaphnia silvestrii* foram amplamente examinados, utilizando exposição por meio de alimento contaminado (*Pseudokirchneriella subcapitata*). Os testes de toxicidade aguda revelaram um valor médio de EC_{50} (48 h) de 77,57 mg/L. Nos ensaios crônicos, diferenças significativas na taxa de sobrevivência foram observadas em concentrações tão baixas quanto 0,01 mg/L. Além disso, efeitos deletérios sobre o comprimento corporal, produção de ovos e geração de neonatos foram constatados a partir de concentrações de 1 mg/L. Esses resultados ressaltam a necessidade de uma avaliação abrangente tanto dos efeitos agudos quanto dos crônicos do nano- TiO_2 sobre os organismos aquáticos. Tal abordagem é fundamental para uma análise criteriosa dos riscos potenciais associados à sua exposição ambiental, subsidiando ações regulatórias e de gestão voltadas à proteção dos ecossistemas aquáticos⁴².

Efeitos das nanopartículas de zinco

No estudo de Vijayakumar et al.⁴³, os efeitos ecotoxicológicos das nanopartículas de óxido de zinco (ZnONPs) foram avaliados no crustáceo planctônico de água doce *Ceriodaphnia cornuta*. O trabalho teve como objetivo comparar os impactos das ZnONPs sintetizadas biologicamente com o acetato de zinco sobre a mortalidade desse crustáceo aquático. Os resultados revelaram um contraste pronunciado nos perfis de toxicidade, com as ZnONPs apresentando letalidade relativamente inferior ao acetato de zinco. Especificamente, após 24 horas de exposição, as ZnONPs induziram uma taxa de mortalidade de 42% em *C. cornuta* na con-

centração de 50 $\mu\text{g/L}$, enquanto, nas mesmas condições, o acetato de zinco provocou mortalidade de 80%.

Análises adicionais por microscopia confocal a laser elucidaram a cinética de absorção e o subsequente acúmulo de ZnONPs no ambiente intestinal de *C. cornuta* após exposição à concentração de 50 $\mu\text{g/L}$ por 24 h. Concomitantemente, foram observadas anomalias morfológicas nos organismos tratados com 50 $\mu\text{g/L}$ de ZnONPs⁴³. Esses resultados reforçam a necessidade de uma compreensão aprofundada dos potenciais impactos ambientais das ZnONPs, bem como a urgência de investigações sobre seus efeitos toxicológicos na biota aquática, essenciais para estratégias de manejo e mitigação de seus impactos sobre ecossistemas de água doce.

Prato et al.⁴⁴ avaliaram a toxicidade aguda das nanopartículas de óxido de zinco (ZnONPs) no zooplâncton *Tigriopus fulvus* (Copepoda, Harpacticoida), obtendo um valor de LC_{50} (48 h) de 1,27 (1,15–1,40) mg/L. De modo semelhante, Wong et al.³⁸ registraram um LC_{50} (96 h) de 0,85 mg/L para o copépode *Tigriopus japonicus*, enquanto para *Elasmopus rapax* o LC_{50} (96 h) foi de 1,19 mg/L sob exposição às ZnONPs. Em consonância, Park et al.³⁶ investigaram o perfil de toxicidade das ZnONPs em *T. japonicus*, relatando um LC_{50} (96 h) de 2,44 mg/L.

É importante salientar que todos esses valores situam-se na mesma ordem de grandeza. Entretanto, variações em estudos ecotoxicológicos com nanopartículas são esperadas devido a diferenças nos procedimentos experimentais, principalmente quanto à preparação e suspensão das NPs (como presença ou ausência de veículos de solubilização, filtração, centrifugação e sonicação), à natureza dos nanomateriais e às diferenças interespecíficas, o que dificulta comparações diretas^{44,45}. Apesar dessas limitações, tais estudos fornecem informações valiosas sobre o impacto potencial das ZnONPs nos organismos aquáticos, enfatizando a importância de metodologias padronizadas em avaliações ecotoxicológicas de nanomateriais.

Nos experimentos conduzidos por de Souza⁴⁶, testes agudos e crônicos foram realizados com *Ceriodaphnia silvestrii* exposta a nanopartículas de zinco (ZnONP). Nos testes agudos, após 48 h de exposição, foi determinado um valor de EC_{50} (48 h) de 0,35 mg/L de ZnONP. Durante os testes crônicos de 8 dias, foram observados efeitos marcantes, incluindo uma redução significativa de 11,3% no tamanho médio corporal na concentração de 0,1 mg/L, além de uma expressiva diminuição de 53,9% no número médio de ovos acumulados e

de neonatos produzidos por fêmea. Adicionalmente, observaram-se bioacumulação e ausência de eclosão dos ovos (aborto) nas maiores concentrações avaliadas de ZnONP. Esses achados indicam que tanto a exposição aguda quanto a crônica às ZnONPs podem induzir efeitos tóxicos em *C. silvestrii*. Ademais, a exposição crônica em concentrações tão baixas quanto 0,006 mg/L afetou os parâmetros de crescimento e reprodução desses microcrustáceos, evidenciando o elevado potencial ecotoxicidade das ZnONPs.

Em outro estudo, Prato *et al.*⁴⁴ investigaram a exposição crônica de copépodes às ZnONPs. Os autores observaram que o tempo de desenvolvimento do estágio de náuplio até copepodito ou adulto não foi significativamente afetado pelas nanopartículas. Todavia, os parâmetros reprodutivos apresentaram claros efeitos negativos, incluindo atrasos em eventos fenológicos, como o surgimento de fêmeas ovígeras e o tempo necessário para a liberação da prole, especialmente nas concentrações mais elevadas de ZnONPs. O efeito reprodutivo mais significativo foi observado na fecundidade, com redução expressiva no número de náuplios produzidos por fêmea ao longo dos 28 dias de exposição, mesmo em baixas concentrações. Esses resultados destacam a relevância de se compreender os impactos reprodutivos das ZnONPs nos copépodes, organismos cruciais para a estabilidade das populações e das teias tróficas aquáticas.

Huang *et al.*⁴⁷ investigaram a exposição crônica de ZnONPs no nematoide *Caenorhabditis elegans*, identificando prejuízos expressivos no crescimento e na fecundidade reprodutiva. De forma complementar, Garbutt e Little⁴⁸ descreveram efeitos deletérios das ZnONPs tanto sobre a fecundidade quanto sobre a taxa de ingestão alimentar do cladóceros *Daphnia magna*. Em conjunto, esses resultados fornecem forte evidência de que as ZnONPs são capazes de desencadear efeitos adversos em diferentes táxons aquáticos, afetando crescimento, reprodução e comportamento trófico.

O principal determinante da toxicidade das ZnONPs está associado, predominantemente, à cinética de dissolução dos íons Zn^{2+} a partir da estrutura nanoparticulada^{48,49}. Esse processo desencadeia uma cascata de eventos citotóxicos, incluindo perturbações na homeostase intracelular de zinco, ruptura lisossomal e mitocondrial, culminando em apoptose celular^{44,50,51}. Baun *et al.*⁵² propuseram ainda um modo adicional de toxicidade, segundo o qual as ZnONPs aderem ao exoesqueleto quitinoso dos crustáceos, promovendo a redução ou até a perda completa da capacidade locomotora desses organismos. Em conjunto, essas evidências re-

forçam a natureza multifacetada da citotoxicidade induzida por ZnONPs, enfatizando a necessidade imperativa de investigações adicionais para uma compreensão abrangente de seus efeitos sobre os ecossistemas aquáticos.

Efeitos de diversos nanocompostos de nanopartículas

No estudo de Shokry *et al.*⁵³, a toxicidade aguda de diversos nanocompostos de nanopartículas (NC) sobre larvas de *Artemia salina* e o ostracode de água doce *Cypridopsis vidua* foi investigada ao longo de 48 horas. Observou-se que ambos os organismos experimentais ingeriram os nanocompostos, sendo que os resultados de toxicidade para *C. vidua* revelaram um efeito altamente tóxico dos NC na concentração de 250 mg/L após 48 horas, resultando em um valor de EC_{50} de $157,6 \pm 6,4$ mg/L. Em contrapartida, indivíduos de *Artemia salina* apresentaram menor sensibilidade em comparação com *C. vidua*, com um valor de EC_{50} de $476 \pm 25,1$ mg/L após 48 horas. Esses resultados evidenciam as diferentes sensibilidades dos organismos aquáticos aos nanocompostos e reforçam a necessidade de compreender as potenciais implicações ecológicas desses materiais em diferentes espécies de ambientes aquáticos.

Em sua investigação, Cedervall *et al.*⁵⁴ exploraram a composição molecular da corona proteica que envolve nanopartículas de poliestireno, elucidando potenciais riscos biológicos tanto em nível de organismo quanto de ecossistema. Assim como ocorre com numerosas nanopartículas esféricas, o poliestireno pode interferir no metabolismo lipídico. Os pesquisadores observaram que, à medida que as nanopartículas de poliestireno se deslocam ao longo da cadeia alimentar, elas afetam negativamente o metabolismo lipídico de consumidores primários, como os peixes. Esses resultados ressaltam a necessidade de compreender as interações entre nanopartículas e sistemas biológicos, uma vez que podem influenciar significativamente a saúde e a estabilidade dos ecossistemas aquáticos.

Além disso, as nanopartículas também podem afetar o comportamento do zooplâncton, com potenciais repercussões para os peixes e para o funcionamento geral do ecossistema⁶. Esses achados destacam a importância de se compreender as interações entre nanopartículas e sistemas biológicos, bem como suas potenciais consequências ecológicas. Tal conhecimento é essencial para a avaliação dos riscos ambientais associados à exposição a nanopartículas e para o desenvolvimento de estratégias de proteção dos ecossistemas aquáticos e de seus organismos.

Efeitos de nanomateriais de carbono

Os nanomateriais de carbono, incluindo nanotubos de carbono oxidados, óxido de grafeno e carbon dots, foram avaliados quanto aos seus efeitos sobre dáfnias, revelando boa biocompatibilidade e efeitos tóxicos agudos muito baixos, mesmo em concentrações elevadas (100 mg/L)^{55,56}. Recentemente, pesquisas demonstraram a influência crítica da formação da corona proteica sobre a toxicidade dos nanotubos de carbono quando coexpostos com metais para *Daphnia similis*. Essencialmente, a formação da corona proteica mitigou a toxicidade do metal ao reduzir sua biodisponibilidade para o zooplâncton⁵⁷.

Estudos de toxicidade de misturas envolvendo nanopartículas e poluentes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, requerem maior atenção, levando em consideração cenários de exposição ambientalmente realistas aos nanomateriais. Para isso, a ciência de dados e a nanoinformática emergiram como técnicas promissoras para integração de dados, modelagem e predição de riscos de misturas complexas envolvendo nanopartículas e poluentes ambientais⁵⁷. Essas abordagens desempenham papel fundamental no avanço da compreensão dos potenciais impactos ecológicos dos nanomateriais e de suas interações com poluentes ambientais, subsidiando o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para a proteção dos ecossistemas aquáticos.

Efeitos de micropartículas magnéticas

Nos últimos anos, as micropartículas magnéticas (MPs) têm surgido como uma alternativa promissora para a remediação de ambientes aquáticos eutrofizados⁵⁸. No entanto, os impactos ambientais dessas nanopartículas, especialmente sobre a biota aquática, como o zooplâncton, ainda carecem de avaliação abrangente. Com o intuito de preencher essa lacuna, Álvarez-Manzaneda *et al.*⁵⁴ conduziram um estudo investigando os efeitos agudos (imobilização) e crônicos de MPs de ferro (Fe) sobre *Daphnia magna*. A avaliação crônica contemplou a dinâmica reprodutiva da prole (tanto machos quanto fêmeas) no contexto de indivíduos de *D. magna* expostos às variações dessas partículas nanoparticuladas.

Na avaliação da toxicidade aguda, determinou-se que a concentração de MPs capaz de provocar 50% de imobilização dos indivíduos de *D. magna* (EC₅₀) foi de 0,913 g/L. Em contraste, os ensaios de toxicidade crônica demonstraram que a presença de ferro dissolvido (dFe) influenciou significativamente a reprodução partenogenética dessa espécie de dáfnia. Esses resultados reforçam a neces-

sidade de pesquisas mais aprofundadas sobre as potenciais implicações das MPs nos ecossistemas aquáticos e sobre seu impacto em organismos-chave como o zooplâncton. Tal compreensão é crucial para orientar, de forma segura, a aplicação dessas tecnologias em programas de restauração de ambientes aquáticos.

No estudo conduzido por Gebara⁵⁹, os efeitos de nanopartículas de Fe₃O₄ sobre *Ceriodaphnia silvestrii* foram avaliados por meio de testes de toxicidade aguda e crônica. Os resultados indicaram ausência de toxicidade aguda para nano-Fe₃O₄ durante o período de exposição de 48 horas, uma vez que o valor de EC(I)50-48h foi superior a 100,00 mg/L. Entretanto, nos testes de toxicidade crônica, na concentração de 50,00 mg/L, observou-se inibição significativa tanto no crescimento quanto na reprodução. O comprimento máximo dos organismos foi reduzido em 12,71%, e o número acumulado de ovos diminuiu 51,99%. Além disso, houve uma redução expressiva de 61,37% no número de neonatos produzidos por fêmea. Destaca-se que esses efeitos somente foram observados após exposição crônica ao nano-Fe₃O₄, a partir do 14º dia do experimento, evidenciando a importância de se considerar períodos prolongados de exposição em avaliações ecotoxicológicas.

Efeitos de nanoplásticos de poliestireno

No estudo realizado por Sanz Lanzas⁶⁰, *Artemia parthenogenetica* foi utilizada como organismo modelo para investigar a toxicidade crônica de nanoplásticos de poliestireno funcionalizados com grupos carboxílicos aniônicos (NP(PS-COOH)). Os pesquisadores analisaram os efeitos sobre crescimento, sobrevivência e comportamento alimentar, bem como respostas enzimáticas subcelulares relacionadas à biotransformação de xenobióticos (carboxilesterase – CbE e glutatona – S-transferase – GST), atividade nervosa (colinesterase – ChE), defesa antioxidante (catalase – CAT) e proteção contra estresse geral (proteínas de estresse HSP70). Os resultados indicaram que a exposição crônica de *A. parthenogenetica* ao NP(PS-COOH) não alterou a sobrevivência, a atividade da CAT ou a expressão da HSP70. Contudo, houve redução no crescimento e na taxa de filtração. Adicionalmente, foram observadas alterações nas atividades enzimáticas, com diminuição da atividade de CbE e ChE e aumento da atividade de GST⁶⁰. Esses resultados destacam os potenciais impactos do NP(PS-COOH) sobre o crescimento e as respostas fisiológicas do organismo modelo, com possíveis implicações para o ecossistema aquático em escala mais ampla.

Tabela 1 - Efeitos das nanopartículas sobre o zooplâncton, São Paulo, Brasil (2024).

Tipo de Nanopartícula	Organismos Afetados	Principais Achados	Referências
Nanopartículas de Prata (Ag)	Diversos organismos aquáticos, incluindo bactérias, algas, plantas, crustáceos e peixes	- A toxicidade varia entre as espécies. - Causa danos fisiológicos, disfunção celular e desestabilização das membranas celulares. - Liberação de íons Ag⁺ tóxicos.	Ottoni et al., 2019¹¹; Wu et al., 2020¹²; Souza et al., 2019¹³; Tayemeh et al., 2020¹⁴; Barbieri et al., 2018¹⁵; Tortella et al., 2020¹⁶; Lekamge et al., 2018¹⁷; Turner et al., 2012¹⁹; Croteau et al., 2011²⁰; Alves et al., 2022²¹; Posgai et al., 2011²²; Radniecki et al., 2011²³; Braydich-Stolle, 2005²⁴; AshaRani et al., 2009²⁵; Medeiros et al., 2019²⁶; Keller et al., 2010²⁷; Miao et al., 2009²⁸; Shanthi et al., 2016²⁹; Yan et al., 2018³¹; Álvarez-Manzaneda et al., 2017³⁴; Yoo-iam et al., 2014³⁷
Nanopartículas de Titânio (TiO ₂)	<i>Daphnia magna</i> , <i>Artemia salina</i>	- Reduz o crescimento e a reprodução de <i>Daphnia magna</i>. - Induz efeitos adversos significativos no crescimento, produção de ovos e produção de neonatos em <i>Ceriodaphnia silvestrii</i>.	Fouqueray et al., 2012⁷; Lacave et al., 2017⁸; An et al., 2019⁹; Lucca, 2016¹⁰; Rezende et al., 2018³⁹
Nanopartículas de Zinco (ZnO)	<i>Ceriodaphnia cornuta</i> , <i>Tigriopus fulvus</i> , <i>Tigriopus japonicus</i> , <i>Elasmopus rapax</i> , <i>Daphnia magna</i> , <i>Caenorhabditis elegans</i>	- Causa mortalidade, inibição do crescimento e problemas reprodutivos. - Efeitos adversos sobre a prole, comportamento alimentar e atividades enzimáticas. - A dissolução de íons Zn²⁺ leva a efeitos citotóxicos.	Souza, 2018¹³; Park et al., 2014³⁶; Wong et al., 2010³⁸; Vijayakumar et al., 2017⁴³; Prato et al., 2020⁴⁴; Schurs and Lison, 2012⁴⁵; Huang et al., 2017⁴⁷; Garbutt and Little, 2014⁴⁸; Franklin et al., 2007⁵⁰; Xia et al., 2008⁵¹; Baun et al., 2008⁵²
Diversos Nanocompostos	<i>Artemia salina</i> , <i>Cypridopsis vidua</i>	- Apresenta efeitos tóxicos variados. - Alta toxicidade em <i>Cypridopsis vidua</i>. - Afeta o metabolismo lipídico e a cadeia alimentar.	Eiras et al., 2026⁶; Shokry et al., 2021⁵³; Cedervall et al., 2012⁵⁴
Micropartículas Magnéticas (MPs)	<i>Daphnia magna</i> , <i>Ceriodaphnia silvestrii</i>	- Inibe o crescimento e a reprodução. - Reduções significativas no tamanho corporal, produção de ovos e produção de neonatos.	Álvarez-Manzaneda et al., 2017³⁴; Gebara, 2017⁵⁹
Nanoplásticos de Poliestireno (NPs)	<i>Artemia parthenogenetica</i>	- Reduz o crescimento e a taxa de filtração. - Altera as atividades enzimáticas e induz respostas fisiológicas ao estresse.	Sanz Lanzas, 2017⁶⁰

Lacunas potenciais de pesquisa na compreensão das implicações ambientais da síntese e aplicação de nanopartículas em ambientes aquáticos

Exploração de alternativas ambientalmente sustentáveis para a síntese de nanopartículas: Investigar métodos alternativos para a síntese de nanopartículas que sejam ambientalmente amigáveis e economicamente viáveis, com o objetivo de reduzir a produção de resíduos tóxicos e minimizar os riscos ambientais associados à síntese de NPs.

Avaliação dos impactos ecológicos de NPs sintéticas em sistemas aquáticos: Conduzir estudos abrangentes para avaliar os impactos ecológicos de nanopartículas sintéticas sobre diversos organismos em ecossistemas aquáticos, incluindo bactérias, algas, crustáceos e peixes, considerando fatores como toxicidade, bioacumulação e interações tróficas.

Compreensão dos mecanismos de toxicidade das NPs em organismos aquáticos: Aprofundar a investigação dos mecanismos celulares e moleculares subjacentes à toxicidade das nanopartículas em or-

ganismos aquáticos, visando elucidar como as NPs desregulam funções celulares, induzem estresse oxidativo e interferem em processos fisiológicos.

Investigação do destino e do comportamento das NPs em ambientes aquáticos: Explorar o destino e o comportamento das nanopartículas de prata em ambientes aquáticos naturais, incluindo suas interações com as superfícies celulares do fitoplâncton, organelas internas e a liberação de íons tóxicos Ag⁺, de modo a compreender melhor as interações AgNP fitoplâncton e suas consequências ecológicas.

Estudos ecotoxicológicos dos efeitos das NPs ao longo dos níveis tróficos: Realizar estudos ecotoxicológicos para avaliar os impactos das nanopartículas de prata em diferentes níveis tróficos dos ecossistemas aquáticos, com foco em organismos-chave como o zooplâncton e os peixes, a fim de avaliar os efeitos em cascata das alterações induzidas pelas NPs sobre a estabilidade dos ecossistemas.

Compreensão das interações entre NPs e sistemas biológicos: Investigar as interações entre nanopartículas e sistemas biológicos, incluindo a formação de coronas proteicas, para compreender seus potenciais riscos biológicos e implicações para a saúde dos organismos e o funcionamento dos ecossistemas.

Avaliação dos efeitos de longo prazo da exposição às NPs em organismos aquáticos: Explorar os efeitos crônicos da exposição às nanopartículas sobre organismos aquáticos, incluindo crescimento, reprodução e comportamento alimentar, visando compreender de forma mais aprofundada os impactos ecológicos de longo prazo das NPs nos ecossistemas de água doce.

Estudos de toxicidade de misturas envolvendo NPs e poluentes ambientais: Investigar a toxicidade de misturas formadas por nanopartículas e poluentes ambientais em ecossistemas aquáticos, empregando abordagens de ciência de dados e nanoinformática para prever os riscos ecológicos associados a misturas complexas envolvendo NPs.

Análise dos efeitos das NPs sobre organismos planctônicos: Estudar os efeitos das nanopartículas sobre organismos planctônicos, incluindo copépodes, protozoários e ostrácodes, para avaliar possíveis alte-

rações na estrutura das comunidades e na dinâmica dos ecossistemas em resposta à contaminação por NPs.

Desenvolvimento de estratégias para mitigação dos riscos associados às NPs em ambientes aquáticos: Desenvolver estratégias para mitigar os riscos ambientais associados às nanopartículas em ecossistemas aquáticos, com foco em práticas e políticas sustentáveis voltadas à proteção da saúde dos ecossistemas e da biodiversidade.

Efeitos das nanopartículas sobre o fitoplâncton

As nanopartículas (NPs) têm atraído atenção significativa devido aos seus potenciais impactos sobre os ecossistemas aquáticos, particularmente sobre as populações de fitoplâncton (Figura 1). Diversos estudos têm investigado os efeitos das nanopartículas, como as nanopartículas de prata (AgNPs), sobre as comunidades fitoplanctônicas. Miller *et al.*⁶¹ e Bielmyer-Fraser *et al.*⁶² demonstraram efeitos supressivos das NPs sobre o crescimento e a abundância populacional do fitoplâncton. No entanto, as complexas interações das NPs com os fatores ambientais e os sistemas biológicos ainda demandam investigações mais aprofundadas.

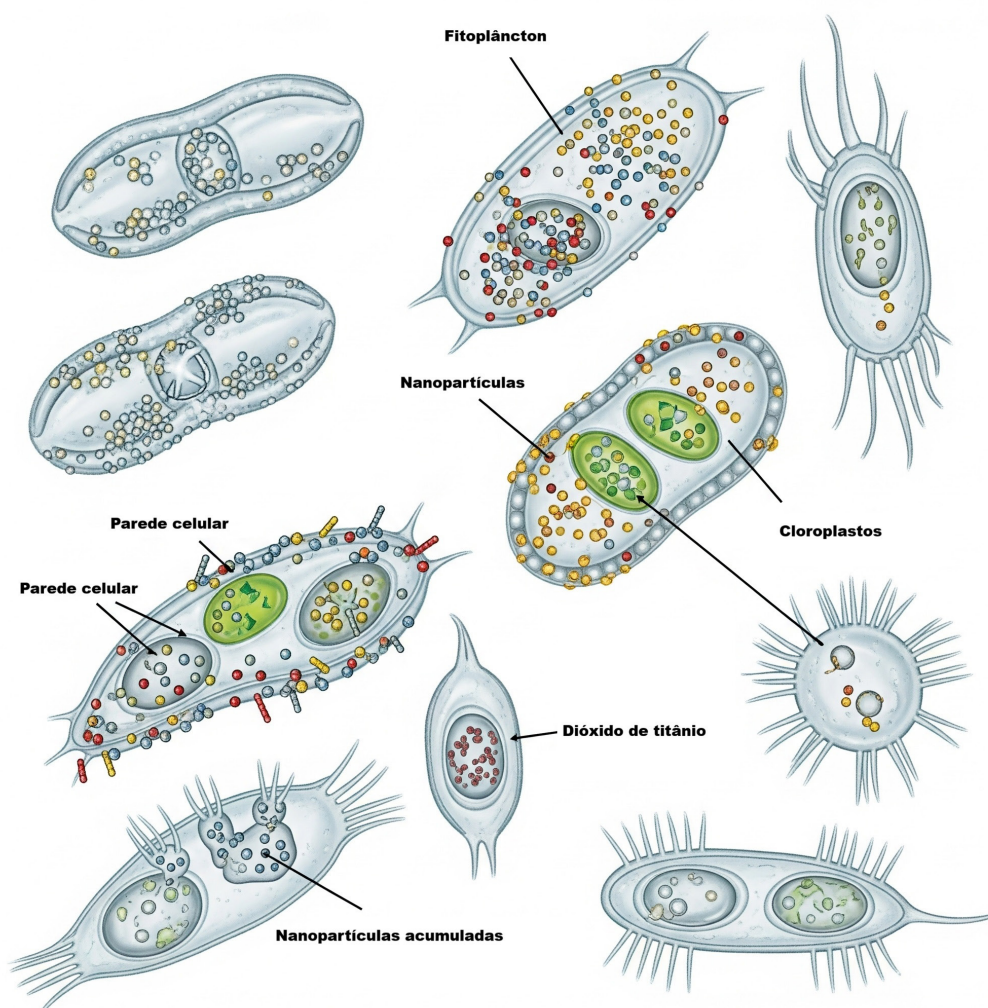


Figura 1 - Potenciais efeitos sobre populações de fitoplâncton.

Efeitos das nanopartículas de prata

Conine *et al.*⁶³ examinaram o impacto das AgNPs sobre as comunidades fitoplanctônicas em lagos e, de forma surpreendente, não encontraram efeitos significativos sobre a taxonomia, a concentração de pigmentos ou a biomassa. Os autores atribuíram essa ausência de toxicidade a processos ambientais naturais, sugerindo que fatores como temperatura e nutrientes dissolvidos podem exercer influência mais substancial sobre a dinâmica das comunidades do que a exposição isolada às NPs.

Em contraste, outros estudos, como os de Baptista *et al.*⁶⁴ e Romero *et al.*⁶⁵, relataram efeitos tóxicos significativos das AgNPs sobre o fitoplâncton, indicando uma potencial relevância ecológica. Além disso, investigações conduzidas por Navarro *et al.*⁶⁶ e Oukarroum *et al.*⁶⁷ esclareceram os mecanismos subjacentes à toxicidade das NPs, revelando a complexa interação entre as nanopartículas e os sistemas biológicos.

Esses achados ressaltam a importância de se considerar a variabilidade dos fatores ambientais naturais ao se avaliar os efeitos de contaminantes sobre os ecossistemas aquáticos. Ademais, as potenciais implicações ecológicas da toxicidade das NPs sobre o fitoplâncton evidenciam a necessidade de avaliações abrangentes da segurança ambiental e dos riscos dos nanomateriais em ambientes aquáticos. Compreender as interações entre as nanopartículas e componentes-chave da teia alimentar aquática, como o fitoplâncton, é fundamental para a salvaguarda da saúde e da estabilidade dos ecossistemas aquáticos.

As nanopartículas (NPs) demonstraram exercer efeitos supressivos sobre a população e a taxa de crescimento de diversas populações de fitoplâncton^{61,68}. Um estudo conduzido por Conine *et al.*⁶³ investigou o impacto da adição de AgNPs em lagos com o objetivo de avaliar seus efeitos sobre o fitoplâncton. Surpreendentemente, foi observada a ausência de efeitos significativos da exposição a concentrações ambientalmente relevantes de AgNPs sobre as comunidades fitoplanctônicas em termos de taxonomia, concentração de pigmentos e biomassa. A ausência de resultados toxicológicos negativos foi atribuída a processos ambientais naturais, como temperatura e nutrientes dissolvidos, que aparentemente exerceram influência mais significativa sobre a comunidade. Conine *et al.*⁶³ concluíram que a exposição por dois anos a concentrações ambientalmente relevantes de AgNPs não alterou substancialmente as comunidades fitoplanctônicas em lagos boreais. Esses resultados enfatizam a importância de se considerar a variabilidade dos fatores ambientais naturais, como temperatura, pH e salinidade, em análises que buscam determinar os efeitos de contaminantes em ecossistemas aquáticos.

As nanopartículas de prata (AgNPs) demonstraram impactos substanciais sobre as comunidades de fito-

plâncton e bacterioplâncton, principalmente por meio de sua influência sobre o comportamento de pastejo do zooplâncton⁶⁴. A exposição às AgNPs em concentrações $\geq 500 \mu\text{g/L}$ provocou uma redução acentuada nas taxas de crescimento tanto de populações fitoplanctônicas quanto bacterioplanctônicas⁴⁴. Ademais, as taxas de pastejo nessas populações apresentaram tendência de diminuição após a exposição às AgNPs, perturbando um determinado estrato trófico. Adicionalmente, a eficiência fotossintética do fitoplâncton apresentou queda significativa em concentrações de AgNPs $\geq 500 \mu\text{g/L}$ ⁶⁴.

Curiosamente, esses efeitos não se manifestaram em concentrações relativamente mais baixas de Ag conhecidas por serem tóxicas para determinadas espécies bacterianas e outros organismos. Essa observação sugere que, em concentrações ambientalmente relevantes, mecanismos compensatórios em nível de comunidade podem atenuar os impactos da exposição às AgNPs, conforme elucidado por Baptista *et al.*⁶⁴.

Com base nessas observações, Romero *et al.*⁶⁵ também documentaram efeitos tóxicos significativos das AgNPs sobre *Chlorella vulgaris*. Por meio de um conjunto de análises morfológicas, fisiológicas e metabólicas, os autores evidenciaram um comprometimento acentuado do estado de saúde das microalgas, destacando a natureza aguda do estresse induzido pelas nanopartículas. Esses resultados enfatizam as potenciais ramificações ecológicas das AgNPs em ecossistemas aquáticos e reforçam a necessidade de avaliações abrangentes das respostas em nível de comunidade à exposição a nanopartículas.

Em uma investigação complementar com foco em *Chlamydomonas reinhardtii*, Navarro *et al.*⁶⁶ analisaram a toxicidade das nanopartículas de prata (AgNPs) e da prata iônica (Ag^+), utilizando a fotossíntese como principal desfecho, avaliada por fluorometria. O estudo revelou que, considerando a concentração total de prata, a toxicidade do AgNO_3 (prata iônica) foi 18 vezes superior à das AgNPs, conforme indicado pelos valores de EC_{50} . Contudo, quando a toxicidade foi avaliada em função da concentração de Ag^+ , as AgNPs apresentaram efeitos adversos significativamente maiores do que o AgNO_3 . Curiosamente, os níveis medidos de Ag^+ iônico nas suspensões de AgNPs não foram suficientes para explicar completamente a toxicidade observada, sugerindo a participação de mecanismos adicionais ou interações que contribuem para os efeitos deletérios.

Para compreender esse fenômeno, os pesquisadores investigaram o papel da cisteína, um forte ligante de Ag^+ . Verificaram que a cisteína aboliu os efeitos inibitórios tanto das AgNPs quanto do Ag^+ sobre a fotossíntese. Isso indicou que a toxicidade das AgNPs é mediada por íons Ag^+ , e que a interação das AgNPs com as algas desempenha papel crucial na modulação

de sua toxicidade⁶⁷.

Esse estudo revelou que as AgNPs atuam como fonte de íons Ag⁺, formados na presença de algas, contribuindo para a toxicidade observada em *Chlamydomonas reinhardtii*^{68,69}. Os achados destacam a natureza complexa da toxicidade das AgNPs e enfatizam a importância de se considerar as interações entre nanopartículas e sistemas biológicos para a compreensão de seus impactos ambientais⁶².

No estudo de Oukarroum et al.⁶⁷, os efeitos tóxicos de nanopartículas de prata de 50 nm (AgNPs) foram investigados em duas microalgas fitoplanctônicas: *Chlorella vulgaris* e *Dunaliella tertiolecta*. As algas foram expostas a concentrações de 0 a 10 mg/L de AgNPs durante 24 horas. Os resultados demonstraram que as AgNPs interagiram diretamente com a superfície das células de *Chlorella vulgaris*, levando à formação de grandes agregados. A exposição às AgNPs exerceu impacto negativo sobre ambas as espécies, evidenciado por acentuada redução no teor de clorofila e no número de células viáveis, juntamente com aumento na formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) e peroxidação lipídica.

Nikokherad et al.⁷⁰ avaliaram o impacto da exposição a AgNPs comerciais (30 nm), em concentrações a partir de 0,5 mg/L, sobre o crescimento de *C. vulgaris* e *Spirulina platensis*. Seus resultados indicaram que, após 96 horas de exposição a concentrações iguais ou superiores a 0,05 mg/L, ambos os organismos apresentaram inibição de crescimento próxima à totalidade.

Uma investigação recente conduzida por Abo-Elmagd et al.⁷¹ analisou a exposição das microalgas *Chlorella vulgaris* e *Chlorella minutissima* a nanopartículas de prata (AgNPs) biossintetizadas a partir da cianobactéria *Oscillatoria limnetica* e revestidas com gelatina. As AgNPs, com tamanhos médios de 8,47 nm e 17,66 nm para *C. vulgaris* e *C. minutissima*, respectivamente, exibiram cargas positivas e negativas. Após quatro dias de exposição, a concentração de 100 µg/L de AgNPs resultou em pronunciada inibição do crescimento celular, com reduções de 91,2% e 88,85% em *C. vulgaris* e *C. minutissima*, respectivamente.

Entretanto, investigações anteriores conduzidas por Romero et al.⁶⁵ e Zhang et al.⁷² destacam a natureza multifacetada da toxicidade das AgNPs, influenciada por diversos fatores, tais como método de preparação, estado de agregação, tamanho, morfologia, composição do meio, tempo de exposição e carga elétrica. Zhang et al.⁷² enfatizaram, em particular, o impacto substancial da carga superficial das AgNPs sobre a cinética de acumulação nas células algais. Aguiar et al.⁴ observaram diferenças notáveis nas taxas de absorção entre AgNPs carregadas positiva e negativamente, sendo as primeiras aproximadamente 20 vezes mais absorvidas. Por outro lado, Silva et al.⁷³ relataram redu-

ção de 40% na densidade celular da microalga *Chlorella vulgaris* após 96 horas de exposição às AgNPs, especialmente na maior concentração avaliada (100 µg/L). Esses achados destacam a complexa interação de múltiplos fatores que modulam a resposta toxicológica das microalgas às AgNPs e evidenciam a necessidade de investigações abrangentes para elucidar seus impactos sobre os ecossistemas aquáticos.

De modo interessante, a sensibilidade às AgNPs variou entre as duas espécies de algas, indicando diferenças nas respostas à exposição às nanopartículas. Esses efeitos adversos sobre algas fitoplanctônicas podem acarretar consequências significativas para a estrutura e o funcionamento das comunidades fitoplanctônicas⁷⁴.

Os resultados evidenciam as potenciais implicações ecológicas da toxicidade das AgNPs sobre importantes produtores primários, como o fitoplâncton, que desempenha papel vital nos ecossistemas aquáticos. Compreender os impactos das nanopartículas sobre esses organismos-chave é essencial para a avaliação da saúde e da estabilidade dos ambientes aquáticos.

Os efeitos tóxicos das nanopartículas sobre o fitoplâncton podem levar a alterações significativas na estrutura da comunidade. Álvarez-Manzaneda et al.³⁴ conduziram um estudo para investigar os impactos de concentrações ambientalmente relevantes de AgNPs sobre comunidades planctônicas em ambientes naturais, utilizando concentrações nominais de 4, 16 e 64 µg/L. Os autores observaram que as AgNPs se acumularam no fitoplâncton, resultando em alterações na biomassa da comunidade fitoplanctônica³⁴.

Pithophora oedongia e *Chara vulgaris*, dois membros relevantes das algas eucarióticas fotossintetizantes da comunidade fitoplanctônica, desempenham papéis essenciais no ecossistema aquático global. Dash et al.⁷⁵ avaliaram o impacto das nanopartículas de prata (AgNPs) sobre o crescimento e a morfologia dessas algas. Os resultados revelaram que o aumento das concentrações de AgNPs promoveu redução progressiva no teor de clorofila, instabilidade cromossômica e distúrbios mitóticos nos talos algais expostos, culminando em malformações morfológicas nos filamentos de *Chara vulgaris*. Imagens microscópicas evidenciaram alterações significativas nas paredes celulares, como ruptura e degradação, nas algas tratadas com nanopartículas. Embora esses resultados indiquem efeitos severamente deletérios das nanopartículas de prata sobre organismos aquáticos, também apontam para a possibilidade de aplicação em abordagens de bioengenharia para o manejo do crescimento de algas nocivas que obstruem sistemas de abastecimento de água, canais e causam incrustações em corpos hídricos. A compreensão dos efeitos das nanopartículas sobre algas pode abrir caminho para estratégias inovadoras de controle algal, contribuindo para a mitigação de seus impactos ambientais adversos.

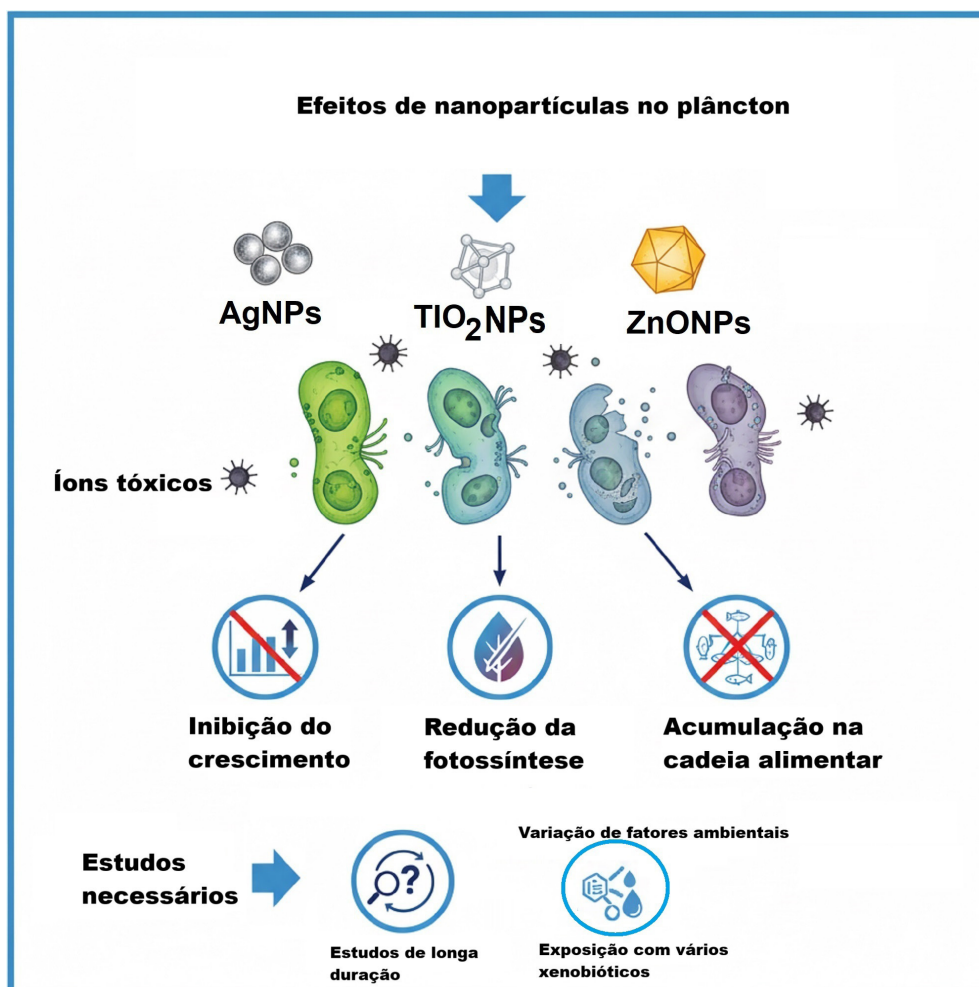


Figura 2 - Efeitos das NP sobre o fitoplâncton.

Yoo-iam *et al.*³⁷ realizaram uma investigação abrangente para avaliar a toxicidade e o potencial de bioacumulação de materiais contendo nanopartículas de prata ao longo da cadeia alimentar. O estudo analisou duas formas distintas de prata, a saber, partículas de Ag^+ e nano Ag^0 (AgNPs), e seu impacto sobre *Chlorella* sp. Os resultados demonstraram que o Ag^+ apresentou maior toxicidade em comparação às AgNPs em todos os quatro organismos avaliados. Especificamente, o valor de EC_{50} para a toxicidade do Ag^+ em *Chlorella* sp. foi determinado como $0,39 \pm 0,32$ mg/L.

Esses achados enfatizam o potencial de desestabilização que as nanopartículas podem exercer sobre o delicado equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Como o fitoplâncton desempenha papel essencial na teia alimentar e é fundamental para a manutenção da vida aquática, quaisquer perturbações em suas populações podem gerar consequências de grande escala para todo o ecossistema. Dessa forma, compreender as interações entre nanopartículas e fitoplâncton é crucial para a avaliação das implicações ecológicas dos nanomateriais em ambientes aquáticos.

Efeitos das nanopartículas de titânio

Em testes de toxicidade crônica destinados a avaliar o impacto das nanopartículas de titânio sobre a microalga clorofícea *Pseudokirchneriella subcapitata*, foi observada uma inibição expressiva do crescimento algal na concentração de 64 mg/L de nano- TiO_2 . Adicionalmente, a exposição ao na-

no- TiO_2 por 96 horas resultou em uma concentração de inibição de 50% das células algais (LC_{50} – 96 h) de 201,22 mg/L⁴².

Esses resultados reforçam os potenciais efeitos adversos das nanopartículas de titânio sobre microrganismos aquáticos. Considerando que as microalgas exercem papel fundamental nos ecossistemas de água doce, por contribuírem para a produtividade primária e servirem como fonte alimentar para níveis tróficos superiores, sua perturbação pode provocar impactos em cascata em todo o equilíbrio ecológico. Torna-se, portanto, essencial avaliar de forma abrangente a toxicidade das nanopartículas sobre diferentes organismos aquáticos, a fim de melhor compreender seus riscos potenciais e desenvolver estratégias eficazes de proteção ambiental.

Efeitos das nanopartículas de titânio e zinco

Em sua pesquisa, Takasu *et al.*⁷⁴ investigaram os efeitos das nanopartículas de TiO_2 e ZnO sobre comunidades naturais de fitoplâncton em águas costeiras. Foi observado um declínio significativo nas taxas de crescimento dessas comunidades após a exposição a 10 mg/L de nanopartículas de TiO_2 e ZnO . Além disso, a introdução das nanopartículas promoveu alterações na distribuição do tamanho das comunidades fitoplanctônicas, com as cianobactérias apresentando maior suscetibilidade. Considerando que as preferências alimentares dos herbívoros dependem fortemente do tamanho das células algais, a poluição por nanopartículas pode afetar níveis

tróficos superiores. Destaca-se ainda que as cianobactérias desempenham papel central no “loop microbiano”, tornando esse mecanismo de transferência de energia potencialmente mais vulnerável à contaminação por nanopartículas (Figura 2).

Efeitos das nanopartículas magnéticas

Na investigação dos efeitos das nanopartículas magnéticas de ferro (Fe_3O_4 , $\text{Cu-Fe}_2\text{O}_4$ e CoFe_2O_4) sobre a espécie fitoplanctônica de água doce *Raphidocelis subcapitata*, Melo⁷⁶ observou que alterações significativas nas respostas fisiológicas das microalgas ocorreram apenas em concentrações elevadas de nanopartículas, superiores a 50 mg/L. Nessas concentrações, as nanopartículas magnéticas induziram aumento nos teores de lipídios e proteínas nas microalgas. Ademais, o estudo demonstrou que os parâmetros de fluorescência da clorofila e o estresse oxidativo, induzido pela geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), foram particularmente sensíveis à presença das nanopartículas, especialmente em concentrações elevadas. Esses resultados evidenciam o potencial impacto das nanopartículas magnéticas sobre as microalgas e seus processos fisiológicos, o que demanda investigações adicionais para a adequada avaliação de suas implicações nos ecossistemas aquáticos. Compreender os efeitos das nanopartículas sobre componentes-chave da teia alimentar aquática, como o fitoplâncton, é essencial para uma avaliação abrangente de sua segurança ambiental e de seus riscos potenciais.

Efeitos das nanopartículas de silício

Em uma investigação abrangente, Wang *et al.*⁷⁷ examinaram minuciosamente o mecanismo de toxicidade das nanopartículas de nSiO_2 sobre a microalga *Nitzschia closterium f. minutissima* por meio de uma série de experimentos de inibição do crescimento. Ao longo de um período de 96 horas, o estudo acompanhou detalhadamente os padrões de crescimento e as respostas biológicas das algas sob exposição a diferentes concentrações de nSiO_2 , variando de 0,5 a 30 mg/L, em meio f/2. Os resultados revelaram uma inibição clara do crescimento de *N. closterium f. minutissima*, apresentando um comportamento dependente da concentração e do tempo de exposição às nanopartículas.

Efeitos das nanopartículas de cobre

Vignardi *et al.*⁷⁸ realizaram uma investigação detalhada sobre os efeitos do nano-Cu rapidamente aglomerado na água do mar, elucidando reduções subsequentes no tamanho das partículas em função da dinâmica de dissolução do Cu. O estudo acompanhou por várias semanas as taxas de dissolução, que inicialmente diminuíram entre as semanas 1 e 4, mantiveram-se em níveis reduzidos até a 15ª semana, quando grandes aglomerados voltaram a se dissolver rapidamente. Comunidades fitoplanctônicas foram submetidas a exposições sequenciais de 5 dias ao nano-Cu, ao longo de períodos de envelhecimento das partículas de 1 a 15 semanas, em concentrações variando de 0,01 a 20 ppm. Observou-se que a toxicidade ao fitoplâncton, expressa por alterações nas taxas de crescimento populacional, diminuiu nas fases iniciais de

envelhecimento das partículas (0 a 4 semanas). Entretanto, uma elevação acentuada da toxicidade emergiu ao final de 15 semanas de tratamento, provavelmente em função do aumento da dissolução do Cu a partir das partículas reaglomeradas. Esses achados ressaltam a complexa interação entre os processos físico-químicos de envelhecimento das nanopartículas, que moldam de forma decisiva o destino, a transformação e os perfis de toxicidade do nano-Cu em ecossistemas marinhos.

Efeitos das nanopartículas à base de ferro

A pesquisa liderada por D’ors *et al.*⁷⁹ realizou uma análise abrangente para avaliar o impacto das nanopartículas de ferro zero-valente em escala nanométrica (nZVI) sobre a taxa de crescimento, a atividade fotossintética e a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) na alga verde de água doce *Scenedesmus armatus* e na cianobactéria *Microcystis aeruginosa*. Além disso, o estudo avaliou a produção de microcistinas nesses organismos. Essa investigação extensa envolveu a exposição individual das duas espécies algais ao nZVI em concentrações efetivas por 72 horas, visando um efeito máximo de 10% ao longo de 28 dias. Os resultados evidenciaram alterações significativas iniciais na taxa de crescimento celular de *S. armatus*, com posterior normalização aos níveis do controle após 28 dias de exposição, enquanto *M. aeruginosa* apresentou respostas consistentes, semelhantes ao controle durante todo o período experimental. Ademais, foi observado aumento da respiração no escuro (R) em ambas as cepas algais, em contraste com a fotossíntese líquida (Pn), que permaneceu relativamente estável. Curiosamente, a fotossíntese bruta (Pg) apresentou aumento discreto no 7º dia, alinhando-se novamente aos valores do controle no 28º dia de exposição. Destaca-se, ainda, que a geração progressiva de ROS pelas nanopartículas de nZVI ao longo dos 28 dias foi mais pronunciada nas algas verdes do que nas cianobactérias. Esses resultados fornecem subsídios relevantes para a compreensão dos riscos potenciais associados à exposição ao nZVI, auxiliando processos de tomada de decisão quanto ao seu uso em estratégias de remediação ambiental⁷⁹.

Esta tabela reúne evidências experimentais sobre os impactos ecotoxicológicos de distintos tipos de nanopartículas — incluindo nanopartículas de prata (AgNPs), dióxido de titânio (TiO_2NPs), óxido de zinco (ZnONPs), nanopartículas magnéticas à base de ferro (Fe_3O_4 , CuFe_2O_4 , CoFe_2O_4), dióxido de silício (nSiO_2), cobre (CuNPs) e ferro zero-valente em escala nanométrica (nZVI) — sobre diversos táxons fitoplanctônicos, como *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Raphidocelis subcapitata* e *Nitzschia closterium f. minutissima*. Os resultados demonstram respostas variáveis, desde ausência de efeitos ecológicos detectáveis em concentrações ambientalmente relevantes até acentuada inibição do crescimento, prejuízos à fotossíntese e estresse oxidativo em níveis mais elevados de exposição. Diversos estudos enfatizam mecanismos de toxicidade associados à liberação de íons metálicos (ex.: Ag^+ e Zn^{2+}), à geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) e à interação direta das nanopartículas com a superfície celular das algas, resultando em desorganização de membranas e degradação de pigmentos.

Tabela 2 - Efeitos das nanopartículas sobre o fitoplâncton.

Estudo	Nanopartículas	Organismo	Efeitos/Resultados
Conine <i>et al.</i> (2018) ⁶³	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Phytoplankton communities</i>	Nenhum efeito significativo na taxonomia, concentração de pigmentos ou biomassa foi observado em lagos após 2 anos de exposição a concentrações ambientalmente relevantes de nanopartículas de prata (AgNPs).
Baptista <i>et al.</i> (2015) ⁶⁴	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Phytoplankton populations</i>	Redução significativa nas taxas de crescimento das populações de fitoplâncton e bacterioplâncton observada em concentrações $\geq 500 \mu\text{g/L}$ de AgNPs
Romero <i>et al.</i> (2020) ⁶⁵	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Chlorella vulgaris</i>	Comprometimento acentuado do estado de saúde de <i>Chlorella vulgaris</i> , indicando estresse agudo induzido por nanopartículas.
Navarro <i>et al.</i> (2008) ⁶⁶	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Toxicidade das AgNPs mediada por íons Ag^+ , indicando o papel da interação AgNP-alga na influência da toxicidade.
Oukarroum <i>et al.</i> (2012) ⁶⁷	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Dunaliella tertiolecta</i>	Interação direta das AgNPs com a superfície celular das algas, levando à redução do teor de clorofila, diminuição de células algais viáveis e aumento de ROS e da peroxidação lipídica.
Nikokherad <i>et al.</i> (2022) ⁶⁸	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Spirulina platensis</i>	Inibição do crescimento observada em ambos os organismos após 96 horas de exposição a concentrações $\geq 0,05 \text{ mg/L}$ de AgNPs comerciais.
Abo-Elmagd <i>et al.</i> (2022) ⁷¹	Silver nanoparticles (AgNPs)	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella minutissima</i>	Inibição acentuada do crescimento celular em ambos os organismos após exposição a $100 \mu\text{g/L}$ de AgNPs biossintetizadas.
Takasu <i>et al.</i> (2023) ⁷⁴	Titanium dioxide (TiO_2), Zinc oxide (ZnO)	<i>Phytoplankton communities</i>	Redução nas taxas de crescimento das comunidades de fitoplâncton após exposição a 10 mg/L de nanopartículas de TiO_2 e ZnO , induzindo uma alteração na distribuição de tamanho, com maior suscetibilidade das cianobactérias.
Melo (2016) ⁷⁶	Iron magnetic nanoparticles (Fe_3O_4 , $\text{Cu-Fe}_2\text{O}_4$, CoFe_2O_4)	<i>Raphidocelis subcapitata</i>	Alterações significativas na resposta fisiológica das microalgas, aumento das concentrações de lipídios e proteínas, mudanças nos parâmetros de fluorescência da clorofila e estresse oxidativo.
Wang <i>et al.</i> (2024) ⁷⁷	Silicon dioxide (nSiO_2) nanoparticles	<i>Nitzschia Closterium f. minutissima</i>	Inibição dos padrões de crescimento em <i>N. closterium f. minutissima</i> de forma dependente da concentração e do tempo, influenciada por nanopartículas de nSiO_2 .
Vignardi <i>et al.</i> (2023) ⁷⁸	Copper nanoparticles (Cu)	<i>Phytoplankton communities</i>	Exposições sequenciais a nano-Cu durante períodos de envelhecimento induziram toxicidade em comunidades de fitoplâncton, com a toxicidade aumentando em tempos mais longos de envelhecimento das partículas.
D'ors <i>et al.</i> (2023) ⁷⁹	Nanoscale zero-valent iron (nZVI)	<i>Scenedesmus armatus</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>	Alterações significativas na taxa de crescimento celular, atividade fotossintética, produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e produção de microcistina observadas em algas após exposição a nZVI.

Avanço na compreensão da toxicidade de nanopartículas sobre fitoplâncton e ecossistemas aquáticos: direções futuras e oportunidades de pesquisa

Estudos futuros poderão explorar as ramificações ecológicas das nanopartículas (NPs) sobre as populações de fitoplâncton, aprofundando-se nas complexas interações entre as NPs e os fatores ambientais. Por exemplo, as

investigações poderão concentrar-se na elucidação dos mecanismos subjacentes aos efeitos supressivos das NPs sobre o crescimento e a dinâmica populacional do fitoplâncton. Além disso, os estudos poderão examinar com maior detalhe a variabilidade das respostas do fitoplâncton às NPs, considerando fatores como tamanho das partículas, concentração e tempo de exposição.

Adicionalmente, as pesquisas poderão se dedicar a desvendar as complexidades da toxicidade das NPs sobre as comunidades fitoplanctônicas em ambientes naturais. Por meio de avaliações abrangentes, será possível compreender melhor como a exposição às NPs influencia a taxonomia, a concentração de pigmentos, a biomassa e outros parâmetros ecológicos dentro das comunidades fitoplanctônicas. Tais estudos poderão lançar luz sobre os mecanismos adaptativos do fitoplâncton frente à exposição às NPs e suas implicações para o funcionamento dos ecossistemas.

Explorar o potencial significado ecológico da toxicidade das NPs sobre o fitoplâncton, particularmente no contexto das interações tróficas e da dinâmica das comunidades, mostra-se de grande relevância. Investigações futuras poderão avaliar os efeitos em cascata das alterações induzidas pelas NPs nas populações fitoplanctônicas sobre os níveis tróficos superiores e sobre a estabilidade geral dos ecossistemas. Ademais, estudos voltados para as interações entre as NPs e componentes-chave da teia alimentar aquática, como o zooplâncton e os peixes, poderão fornecer subsídios importantes acerca das implicações ecológicas mais amplas da exposição às NPs em ecossistemas aquáticos.

CONCLUSÃO

Em conclusão, o enfoque ecológico sobre os efeitos das nanopartículas no zooplâncton, fitoplâncton e outros organismos aquáticos é de importância fundamental para compreender e mitigar potenciais riscos ambientais. A síntese de nanopartículas por meio de abordagens ambientalmente amigáveis está sendo explorada como alternativa aos métodos químicos convencionais, que podem gerar resíduos tóxicos. No entanto, antes de sua adoção em larga escala, são necessárias investigações aprofundadas sobre o impacto ecológico das nanopartículas sintetizadas biologicamente.

Estudos demonstraram que as nanopartículas podem ser tóxicas para diversos organismos aquáticos, incluindo zooplâncton, algas, plantas, crustáceos e peixes. A toxicidade das nanopartículas é influenciada por fatores como tamanho das partículas, concentração e duração da exposição. Por exemplo, a liberação de íons de prata tóxicos (Ag^+) a partir das AgNPs pode agravar ainda mais seus efeitos adversos sobre a biota aquática. Devido ao pequeno tamanho das nanopartículas, elas podem facilmente penetrar nos sistemas biológicos e interromper funções celulares, levando a danos fisiológicos e alterações comportamentais.

Diversas espécies aquáticas, como *Daphnia*, copépodes e cladóceros, têm sido utilizadas como organismos-modelo em estudos ecotoxicológicos para avaliar os impactos das nanopartículas. A exposição crônica a nanopartículas demonstrou afetar negativamente o crescimento, a reprodução e o comportamento alimentar desses organismos, indicando potenciais perturbações

Além disso, pesquisas futuras poderão aprofundar-se nos mecanismos subjacentes da toxicidade das NPs sobre o fitoplâncton nos níveis celular e molecular. Ao elucidar como as NPs desorganizam funções celulares, induzem estresse oxidativo e interferem em processos fisiológicos do fitoplâncton, os pesquisadores poderão alcançar uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos que regem a toxicidade induzida por NPs. Paralelamente, investigações acerca do destino e do comportamento das NPs em ambientes aquáticos, incluindo suas interações com as superfícies celulares do fitoplâncton e com organelas internas, contribuirão significativamente para o entendimento das interações NP–fitoplâncton e de suas consequências ecológicas.

De modo geral, os estudos futuros devem buscar avançar o entendimento das implicações ecológicas da exposição às NPs sobre as populações fitoplanctônicas e os ecossistemas aquáticos. Ao abordar lacunas fundamentais de conhecimento e explorar novas frentes de pesquisa, os pesquisadores poderão contribuir para o desenvolvimento de políticas e estratégias de manejo mais bem fundamentadas, voltadas à proteção dos ambientes aquáticos frente aos riscos potenciais associados à contaminação por NPs.

na cadeia alimentar aquática e no funcionamento geral do ecossistema.

Compreender a dinâmica da dissolução das nanopartículas e a formação de “coronas” proteicas ao redor delas é crucial para entender seu comportamento nos organismos vivos e no ambiente. Além disso, estudos sobre toxicidade combinada envolvendo nanopartículas e poluentes ambientais requerem maior atenção, pois cenários de exposição real podem diferir das condições controladas de laboratório.

É evidente, a partir das pesquisas, que as nanopartículas podem ter efeitos diversos e complexos sobre os organismos aquáticos, dependendo de suas propriedades e interações com o ambiente. Portanto, metodologias padronizadas e abordagens interdisciplinares, incluindo ciência de dados e nanoinformática, são essenciais para avaliar e prever as implicações ecológicas das nanopartículas nos ecossistemas aquáticos.

De modo geral, os achados desses estudos ressaltam a importância das considerações ecológicas na síntese de nanopartículas, bem como a necessidade de avaliações ecotoxicológicas abrangentes para proteger a saúde e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Implementar práticas sustentáveis e responsáveis em nanotecnologia requer uma compreensão mais profunda do comportamento das nanopartículas e seus potenciais impactos sobre a biota aquática, o que auxiliará no desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar efeitos adversos e preservar a integridade ecológica dos ambientes aquáticos.

Declaração do autor CRediT

Conceituação: Barbieri, E.; Metodologia: Barbieri, E.; Hanamulamba, P.L.; Validação: Barbieri, E.; Análise formal: Barbieri, E.; Barbosa, P.L.; Giaccone, T.; Investigação: Barbieri, E.; Giaccone, T.; Recursos: Barbieri, E.; Redação – versão original: Barbieri, E.; Barbosa, P.L.; Hanamulamba, P.L.; Redação – revisão e edição: Barbieri, E.; Giaccone, T.; Visualização: Barbieri, E.; Giaccone, T.; Supervisão: Barbieri, E.; Administração do projeto: Barbieri, E.

Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Declaração de conflito de interesse

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao CNPq pela concessão da bolsa de produtividade (processo 304073/2023-7).

Financiamento

T.G. agradece o apoio do projeto financiado pelo Plano Nacional de Recuperação e Resiliência (PNRR), Missão 4, Componente 2, Investimento 1.4 – Edital nº 3138 de 16 de dezembro de 2021, retificado pelo Decreto nº 3175 de 18 de dezembro de 2021 do Ministério Italiano da Universidade e Pesquisa, financiado pela União Europeia – NextGenerationEU. Código do projeto CN_00000033, Decreto de Concessão nº 1034 de 17 de junho de 2022, adotado pelo Ministério Italiano da Universidade e Pesquisa, CUP C63C22000520001, título do projeto “National Biodiversity Future Center - NBFC”.

REFERÊNCIAS

1. Sun TY, Mitrano DM, Bornhöft NA, Scherlinger M, Hungerbühler K, Nowack B. Envisioning nano release dynamics in a changing world: using dynamic probabilistic modeling to assess future environmental emissions of engineered nanomaterials. *Environ Sci Technol*. 2017;51:2854-63. doi:10.1021/acs.est.5b05828
2. Mohanraj V, Chen Y. Nanoparticles – a review. *Trop J Pharm Res*. 2006;5:561-73. doi:10.4314/tjpr.v5i1.14634
3. Barbieri E, Campos-Garcia J, Martinez DST, Da Silva JRM, Alves OL, Rezende KFO. Histopathological effects on gills of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1758) exposed to Pb and carbon nanotubes. *Microsc Microanal*. 2016;22:1162-9. doi:10.1017/S1431927616012009
4. Aguiar AT, Ottoni CA, Simões MF, Araújo ALS, Barbieri E. Mycogenic silver nanoparticles (from *Penicillium citrinum* IB-CLP11) – their antimicrobial activity and potential toxicity effects on freshwater organisms. *Environ Sci Nano*. 2024;11:1-10. doi:10.1039/D4EN00002A
5. Ribeiro LG, Rezende KFO, Barbieri E, De Souza AO. Study of routine metabolism and acute toxicity of mycogenic silver nanoparticles on shrimp. *Environ Sci Nano*. 2023;10:1-20. doi:10.1039/D2EN00726F
6. Eiras MIO, Da Costa LS, Barbieri E. Copper II oxide nanoparticles (CuONPs) alter metabolic markers and swimming activity in zebrafish (*Danio rerio*). *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 2022;258:109343. doi:10.1016/j.cbpc.2022.109343
7. Fouqueray M, Dufils B, Vollat B, Chaurand P, Botta C, Abacci K, et al. Effects of aged TiO₂ nanomaterial from sunscreen on *Daphnia magna* exposed by dietary route. *Environ Pollut*. 2012;163:55-61. doi:10.1016/j.envpol.2011.11.035
8. Lacave JM, Fanjul A, Bilbao E, Gutierrez N, Barrio I, Arostegui I, et al. Acute toxicity, bioaccumulation and effects of dietary transfer of silver from brine shrimp exposed to PVP/PEI-coated silver nanoparticles to zebrafish. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 2017;199:69-80. doi:10.1016/j.cbpc.2017.03.008
9. An HJ, Sarkheil M, Park HS, Yu IJ, Johari SA. Comparative toxicity of silver nanoparticles (AgNPs) and silver nanowires (AgNWs) on saltwater microcrustacean *Artemia salina*. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 2019;218:62-9. doi:10.1016/j.cbpc.2019.01.002
10. Lucca GM. Efeitos ecotoxicológicos das nanopartículas de dióxido de titânio sobre a alga *Pseudokirchneriella subcapitata* e sobre o cladóceo *Ceriodaphnia silvestrii* por diferentes vias de exposição [dissertação]. São Carlos (SP): Universidade Federal de São Carlos; 2016. 132 p. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/8084/DissGML.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. Ottoni CA, Lima Neto MC, Léo P, Ortolan BD, Barbieri E, De Souza AO. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms. *Chemosphere*. 2019;54:124698. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124698
12. Wu Q, Miao WS, Gao HJ, Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: a review. *Nanotechnol Rev*. 2020;9:259-73. doi:10.1515/ntrev-2020-0021
13. Souza TAJ, Souza LRR, Franchi LP. Silver nanoparticles: an integrated view of green synthesis methods, transformation in the environment, and toxicity. *Ecotox Environ Saf*. 2019;171:691-700. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.12.095
14. Tayemeh MB, Esmailbeigi M, Shirdel I, Joo HS, Johari S, Banan A, et al. Perturbation of fatty acid composition, pigments, and growth indices of *Chlorella vulgaris* in response to silver ions and nanoparticles. *Chemosphere*. 2020;238:124576. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124576
15. Barbieri E, Ferrarini AMT, Rezende KFO, Martinez DST, Alves OL. Effects of multiwalled carbon nanotubes and carbofuran on metabolism in *Astyanax ribeirae*, a native species. *Fish Physiol Biochem*. 2018;44:1-10. doi:10.1007/s10695-018-0573-2
16. Tortella GR, Rubilar O, Durán N, Diez MC, Martínez M, Parada J, et al. Silver nanoparticles: toxicity in model organisms as an overview of its hazard for human health and the environment. *J Hazard Mater*. 2020;390:121974. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.121974
17. Lekamge S, Miranda AF, Abraham A, Li V, Shukla R, Bansal V, et al. The toxicity of silver nanoparticles (AgNPs) to three freshwater invertebrates with different life strategies: *Hydra vulgaris*, *Daphnia carinata*, and *Paratya australiensis*. *Front Environ Sci*. 2018;6:152-62. doi:10.3389/fenvs.2018.00152
18. McGillicuddy E, Murray I, Kavanagh S, Morrison L, Fogarty A, Cormican M, et al. Silver nanoparticles in the environment: sources, detection and ecotoxicology. *Sci Total Environ*. 2017;575:231-46. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.041
19. Turner A, Brice D, Brown MT. Interactions of silver nanoparticles with the marine macroalga *Ulva lactuca*. *Ecotoxicology*. 2012;21:148-54. doi:10.1007/s10646-011-0774-2
20. Croteau MN, Misra SK, Luoma SN, Valsami-Jones E. Silver bioaccumulation dynamics in a freshwater invertebrate after aqueous and dietary exposures to nanosized and ionic Ag. *Environ Sci Technol*. 2022;45:6600-7. doi:10.1021/es200880c
21. Alves KVB, Martinez DST, Alves OL, Barbieri E. Co-exposure of carbon nanotubes with carbofuran pesticide affects metabolic rate in *Palaemon pandaliformis* (shrimp). *Chemosphere*. 2022;288:132359. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132359
22. Posgai R, Cipolla-McCulloch CB, Murphy KR, Hussain SM, Rowe JJ, Nielsen MG. Differential toxicity of silver and titanium dioxide nanoparticles on *Drosophila melanogaster* development, reproductive effort, and viability: Size, coatings and antioxidants matter. *Chemosphere*. 2011;85:34-42. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.06.040
23. Radniecki TS, Stankus DP, Neigh A, Nason JA, Semprini L. Influence of liberated silver from silver nanoparticles on nitrification inhibition of *Nitrosomonas*

europaea. Chemosphere. 2011;85:43–49. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.06.039

24. Braydich-Stolle L, Hussain S, Schlager JJ, Hofmann MC. In vitro cytotoxicity of nanoparticles in mammalian germline stem cells. Toxicol Sci. 2005;88:412–419. doi:10.1093/toxsci/kfi256
25. AshaRani PV, Mun GLK, Hande MP, Valiyaveetil S. Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles in human cells. ACS Nano. 2009;3:279–290. doi:10.1021/nn800596w
26. Medeiros AMZ, C6a F, Alves OL, Martinez DST, Barbieri E. Metabolic effects in the freshwater fish *Geophagus iporangensis* in response to single and combined exposure to graphene oxide and trace elements. Chemosphere. 2019;243:125316. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125316
27. Keller A, Wang X, Zhou D, Lenihan H, Cherr G, Cardinale B, et al. Stability and aggregation of metal oxide nanoparticles in natural aqueous matrices. Environ Sci Technol. 2010;44:1962–1967. doi:10.1021/es902987d
28. Miao AJ, Schwehr KA, Xu C, Zhang SJ, Luo Z, Quigg A, et al. The algal toxicity of silver engineered nanoparticles and detoxification by exopolymeric substances. Environ Pollut. 2009;157:3034–3041. doi:10.1016/j.envpol.2009.05.047
29. Shanthi S, Jayaseelan BD, Velusamy P, Vijayakumar S, Chih CT, Vaseeharan B. Biosynthesis of silver nanoparticles using a probiotic *Bacillus licheniformis* Dabhb1 and their antibiofilm activity and toxicity effects in *Ceriodaphnia cornuta*. Microb Pathog. 2016;93:70–77. doi:10.1016/j.micpath.2016.01.014
30. Dur6n N, Martinez DST, Justo GZ, De Lima R, De Castro VL, Umbuzeiro GA, et al. Interlab study on nanotoxicology of representative graphene oxide. J Phys Conf Ser. 2015;617:012019. doi:10.1088/1742-6596/617/1/012019
31. Yan N, Tang BZ, Wang WX. In vivo bioimaging of silver nanoparticle dissolution in the gut environment of zooplankton. ACS Nano. 2018;12:12212–12223. doi:10.1021/acs.nano.8b06003
32. Jarvis TA, Miller RJ, Lenihan HS, Bielmyer GK. Toxicity of ZnO nanoparticles to the copepod *Acartia tonsa*, exposed through a phytoplankton diet. Environ Toxicol Chem. 2013;32:1264–1269. doi:10.1002/etc.2180
33. Werlin R, Priester JH, Mielke RE, Kramer S, Jackson S, Stoimenov PK, et al. Biomagnification of cadmium selenide quantum dots in a simple experimental microbial food chain. Nat Nanotechnol. 2011;6:65–71. doi:10.1038/nnano.2010.251
34. 6lvarez-Manzaneda I, Ramos-Rodr6guez E, L6pez-Rodr6guez MJ, Parra G, Funes A, Vicente I. Acute and chronic effects of magnetic microparticles potentially used in lake restoration on *Daphnia magna* and *Chironomus* sp. J Hazard Mater B. 2017;322:437–444. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.10.035
35. Ahn YJ, Gil YG, Lee YJ, Jang H, Lee GJ. A dual-mode colorimetric and SERS detection of hydrogen sulfide in live prostate cancer cells using a silver nanoplate-coated paper assay. Microchem J. 2020;155:104724. doi:10.1016/j.microc.2020.104724
36. Park J, Kim S, Yoo J, Lee JS, Park JW, Jung J. Effect of salinity on acute copper and zinc toxicity to *Tigriopus japonicus*: the difference between metal ions and nanoparticles. Mar Pollut Bull. 2014;85:526–531. doi:10.1016/j.marpollbul.2014.04.038
37. Yoo-iam M, Chaichana R, Satapanajaru T. Toxicity, bioaccumulation and biomagnification of silver nanoparticles in green algae (*Chlorella* sp.), water flea (*Moina macrocopa*), blood worm (*Chironomus* spp.) and silver barb (*Barbonymus gonionotus*). Chem Speciat Bioavailab. 2014;26:257–265. doi:10.3184/095422914X14144332205573
38. Wong SWY, Leung PTY, Djuri6i6 AB, Leung KMY. Toxicities of nano zinc oxide to five marine organisms: influences of aggregate size and ion solubility. Anal Bioanal Chem. 2010;396:609–618. doi:10.1007/s00216-009-3249-z
39. Rezende KFO, Bergami E, Alves KVB, Corsi I, Barbieri E. Titanium dioxide nanoparticles alters routine metabolism and causes histopathological alterations in *Oreochromis niloticus*. Bol Inst Pesca. 2018;44:343–343. doi:10.20950/1678-2305.2018.343
40. Campos-Garcia J, Martinez DST, Rezende KFO, Da Silva JPMC, Alves OL, Barbieri E. Histopathological alterations in the gills of Nile tilapia exposed to carbofuran and multiwalled carbon nanotubes. Ecotoxicol Environ Saf. 2016;133:481–488. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.07.041
41. Melo CB, C6a F, Alves OL, Martinez DST, Barbieri E. Co-exposure of graphene oxide with trace elements: Effects on acute ecotoxicity and routine metabolism in *Palaemon pandaliformis* (shrimp). Chemosphere. 2019;223:157–164. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.02.017
42. Garcia JC, Martinez DST, Alves OL, Barbieri E. Ecotoxicological effects of carbofuran and oxidised multiwalled carbon nanotubes on the freshwater fish Nile tilapia: Nanotubes enhance pesticide ecotoxicity. Ecotoxicol Environ Saf. 2015;111:131–137. doi:10.1016/j.ecoenv.2014.10.005
43. Vijayakumar S, Vaseeharan B, Malaikozhundan B, Divya M, Abhinaya M, Gobi N, et al. Ecotoxicity of *Musa paradisica* leaf extract-coated ZnO nanoparticles to the freshwater microcrustacean *Ceriodaphnia cornuta*. Limnologia. 2017;67:1–6. doi:10.1016/j.jphotobiol.2019.111558
44. Prato E, Parlapiano I, Biandolino F, Rotini A, Manfra L, Berducci MT, et al. Chronic sublethal effects of ZnO nanoparticles on *Tigriopus fulvus* (Copepoda, Harpacticoida). Environ Sci Pollut Res. 2020;27:30957–30968. doi:10.1007/s11356-019-07006-9
45. Schrrs F, Lison D. Focusing the research efforts. Nat Nanotechnol. 2012;7:546–548. doi:10.1038/nnano.2012.148
46. De Souza HSV. Efeito de nanop6rculas de 6xido de zinco e do sulfato de zinco no clad6cero tropical *Ceriodaphnia silvestrii* [disserta66o de mestrado]. S6o Carlos: Universidade Federal de S6o Carlos; 2018. p.142. Dispon6vel em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/10219/SOUZA_Helena_2018.pdf?sequence=6&isAllowed=y
47. Huang CW, Li SW, Liao VHC. Chronic ZnO NPs exposure at environmentally relevant concentrations results in metabolic and locomotive toxicities in *Caenorhabditis elegans*. Environ Pollut. 2017;220:1456–1464. doi:10.1016/j.envpol.2016.10.086
48. Garbutt JS, Little TJ. Maternal food quantity affects offspring feeding rate in *Daphnia magna*. Biol Lett. 2014;10:20140356. doi:10.1098/rsbl.2014.0356
49. Ma H, Williams PL, Diamond SA. Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles: A review. Environ Pollut. 2013;172:76–85. doi:10.1016/j.envpol.2012.08.011
50. Franklin NM, Rogers NJ, Apte SC, Batley GE, Gadd GE, Casey PS. Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and ZnCl2 to a freshwater microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): The importance of particle solubility. Environ Sci Technol. 2007;41:8484–8490. doi:10.1021/es071445r
51. Xia T, Kovochich M, Liong M, M6dler L, Gilbert B, Shi H, et al. Comparison of the mechanism of toxicity of zinc oxide and cerium oxide nanoparticles based on dissolution and oxidative stress properties. ACS Nano. 2008;2:2121–2134. doi:10.1021/nn800511k
52. Baun A, Hartmann NB, Grieger K, Kusk KO. Ecotoxicity of engineered nanoparticles to aquatic invertebrates: A brief review and recommendations for future toxicity testing. Ecotoxicology. 2008;17:387–395. doi:10.1007/s10646-008-0208-y
53. Shokry A, Khalil M, Ibrahim H, Soliman M, Ebrahim S. Acute toxicity assessment of polyaniline/Ag nanoparticles/graphene oxide quantum dots on *Cypridopsis vidua* and *Artemia salina*. Sci Rep. 2021;11:5336. doi:10.1038/s41598-021-84903-5
54. Cedervall T, Hansson LA, Lard M, Frohm B, Linse S. Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish. PLoS One. 2012;7:e32254. doi:10.1371/journal.pone.0032254
55. Martinez DST, Alves OL, Barbieri E. Carbon nanotubes enhanced the lead toxicity on the freshwater fish. J Phys Conf Ser. 2013;429:012043. doi:10.1088/1742-6596/429/1/012043
56. Martinez DST, Faria AF, Berni E, Souza Filho AG, Almeida G, Caloto-Oliveira A, et al. Exploring the use of biosurfactants from *Bacillus subtilis* in bionanotechnology: A potential dispersing agent for carbon nanotube ecotoxicological studies. Process Biochem. 2014;49:1162–1168. Dispon6vel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135951131400230X>
57. Martinez DST, Silva GH, Medeiros AMZ, Khan LU, Papadiamantis AG, Lynch I. Effect of the albumin corona on the toxicity of combined graphene oxide and cadmium to *Daphnia magna* and integration of the datasets into the NanoCommons Knowledge Base. Nanomaterials. 2020;10:1936. Dispon6vel em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/10/1936>
58. Martins CHZM, Ellis LJA, Da Silva GH, Petry R, Medeiros AMZ, Davoudi HH, et al. *Daphnia magna* and mixture toxicity with nanomaterials: Current status and perspectives in data-driven risk prediction. Nano Today. 2022;43:101430. Dispon6vel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748013222000573>
59. Gebara RC. Toxicidade de nanop6rculas de 6xido de ferro (Fe3O4) para o clad6cero tropical *Ceriodaphnia silvestrii* [disserta66o de mestrado]. S6o Carlos: Universidade Federal de S6o Carlos; 2017. p.123. Dispon6vel em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9045/DissRCG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

60. Sanz Lanzas C. Efecto de nanoplasticos de poliestireno carboxilicos sobre algunos aspectos fisiológicos y bioquímicos en *Artemia parthenogenetica*. Instituto de Acuicultura de Torre de la Sal (IATS), Universidad de Valencia; 2017. p.132. Disponível em: <https://digital.csic.es/handle/10261/191836>
61. Miller RJ, Bennett S, Keller AA, Pease S, Lenihan HS. TiO₂ nanoparticles are phototoxic to marine phytoplankton. *PLoS One*. 2012;7:e30321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030321>
62. Bielmyer-Fraser GK, Jarvis TA, Lenihan HS, Miller RJ. Cellular partitioning of nanoparticulate versus dissolved metals in marine phytoplankton. *Environ Sci Technol*. 2014;48:13443–13450. <https://doi.org/10.1021/es501187g>
63. Conine AL, Rearick DC, Paterson MJ, Xenopoulos MA, Frost PC. Addition of silver nanoparticles has no long-term effects on natural phytoplankton community dynamics in a boreal lake. *Limnol Oceanogr Lett*. 2018;1–12. <https://doi.org/10.1002/lol2.10071>
64. Baptista MS, Miller RJ, Halewood ER, Hanna SK, Almeida CMR, Vasconcelos VM, Keller AA, Lenihan HS. Impacts of silver nanoparticles on a natural estuarine plankton community. *Environ Sci Technol*. 2015;49:12968–12974. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03285>
65. Romero N, Visentini FF, Márquez VE, Santiago LG, Castro GR, Gagneten AM. Physiological and morphological responses of green microalgae *Chlorella vulgaris* to silver nanoparticles. *Environ Res*. 2020;189:109857. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109857>
66. Navarro E, Piccapietra F, Wagner B, Marconi F, Kaegi R, Odzak N, Sigg L, Behra R. Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environ Sci Technol*. 2008;42:8959–8964. <https://doi.org/10.1021/es801785m>
67. Oukarroum A, Bras S, Perreault F, Popovic R. Inhibitory effect of silver nanoparticles in two green algae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta*. *Ecotox Environ Saf*. 2012;78:80–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.012>
68. Nikokherad H, Esmaili-Sari A, Moradi AM, Bahramifar N, Mostafavi PG. Bioaccumulation capacity of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* exposed to silver nanoparticles and silver nitrate: Bio- and health risk assessment approach. *Algal Res*. 2022;64:102671.
69. Andrea L, Conine DC, Rearick MJ, Paterson MA, Xenopoulos PC, Frost C. Addition of silver nanoparticles has no long-term effects on natural phytoplankton community dynamics in a boreal lake. *Limnol Oceanogr Lett*. 2018;3:311–319. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5687356.v2>
70. Vincent JL, Paterson MJ, Norman BC, Gray EP, Ranville JF, Scott AB, Frost PC, Xenopoulos MA. Chronic and pulse exposure effects of silver nanoparticles on natural lake phytoplankton and zooplankton. *Ecotoxicology*. 2017;26:502–515. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1781-8>
71. Abo-Elmagd RA, Hamouda RA, Hussein MH. Phycotoxicity and catalytic reduction activity of green synthesized *Oscillatoria* gelatin-capped silver nanoparticles. *Sci Rep*. 2022;12:20378.
72. Zhang C, Li Y, Wang P, Zhang H. Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2020;19:479–502. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12536>
73. Silva CS, da Silva BM, Ribeiro CV, Trotta FC, Perina R, Martins A, Abessa DMS, Barbieri E, Simões MF, Ottoni CA. Effects of mycogenic silver nanoparticles on organisms of different trophic levels. *Chemosphere*. 2022;308:136540. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136540>
74. Takasu H, Nakata K, Ito M, Yasui M, Yamaguchi M. Effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on the growth of phytoplankton assemblages in seawater. *Mar Environ Res*. 2023;183:105826. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105826>
75. Dash A, Singh AP, Chaudhary BR, Singh SK, Dash D. Effect of silver nanoparticles on growth and eukaryotic green algae. *Nano-Micro Lett*. 2012;4:158–165. <https://doi.org/10.1007/BF03353707>
76. Melo DC. Efeitos de nanopartículas magnéticas sobre a microalga *Raphidocelis subcapitata* [dissertação de mestrado]. Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais; 2016. p.132. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/10904/DissDCM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
77. Wang J, Tan L, Li Q, Wang J. Toxic effects of nSiO₂ and mPS on diatoms *Nitzschia closterium* f. *minutissima*. *Mar Environ Res*. 2024;193:106298. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106298>
78. Vignardi CP, Adeleye AS, Kayal M, Oranu E, Miller RJ, Keller AA, Holden PA, Lenihan HS. Aging of copper nanoparticles in the marine environment regulates toxicity for a coastal phytoplankton species. *Environ Sci Technol*. 2023;57:6989–6998. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07953>
79. D'Ors A, Sánchez-Fortún A, Cortés-Téllez AA, Fajardo C, Mengs G, Nande M, Martín C, Cost G, Martín M, Bartolomé MC, Sánchez-Fortún S. Adverse effects of iron-based nanoparticles on freshwater phytoplankton *Scenedesmus armatus* and *Microcystis aeruginosa* strains. *Chemosphere*. 2023;339:139710. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139710>

Como citar este artigo: Barbieri, E., Barbosa, P.L., Hanamulamba, P.L., Giaccone, T. (2025). Efeitos toxicológicos de nanopartículas no Plâncton: implicações para a Saúde Ambiental. *O Mundo Da Saúde*, 49. <https://doi.org/10.15343/0104-7809.202549e18092025P>. *Mundo Saúde*. 2025;49:e18092025.

Material Suplementar

Tabela - Número de estudos por tipo de nanopartícula e grupo de organismos.

Grupo de organismos / Tipo de nanopartículas	AgNPs	TiO ₂	ZnO	CNTs	Fe ₃ O ₄ , CuO, Polymers	Total per Group
Peixe <i>D. rerio</i> , <i>O. niloticus</i>	Fe ₃ O ₄ , CuO, Poi- meros	Total por grupo	6	3, 15, 21, 40, 42, 55	6 (CuO), 26 (GO + Ele- ments), 41 (GO)	18
Crustáceos <i>Daphnia</i> , <i>Ceriodaphnia</i> , Shrimp	4, 5, 8, 9, 17, 29, 31, 37, 53, 73	7, 10, 39, 61	10, 32, 36, 38, 43, 44, 46, 48, 49	21, 41, 57, 58	34 (Mag- netic), 46 (ZnSO ₄), 59 (Fe ₃ O ₄), 60 (Nanopla	39
Algas <i>Chlorella</i> , <i>Pseudokirchneriella</i>	14, 28, 37, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 75	10, 50, 61, 74	36, 49, 50, 51, 74		74 (CuO), 76 (Magnetic), 77 (nSiO ₂ , mPS), 78 (CuO), 79 (Fe) 22 (TiO ₂ on <i>Drosophi- la</i>), 23 (Ni- trosomonas), 33 (CdSe), 34 (Magnetic), 37 (<i>Chiro- nomus</i>), 47 (ZnO)	29
Outros Invertebrados <i>Caenorhabditis</i> , <i>Hy- dra</i> , <i>Chironomus</i>	17, 20, 23, 33, 37, 47		47			13

continua...

Grupo de organismos / Tipo de nanopartículas	AgNPs	TiO ₂	ZnO	CNTs	Fe ₃ O ₄ , CuO, Polymers	Total per Group
Comunidades/Ensaaios com múltiplos organismos	Fe ₃ O ₄ , CuO, Poimeros	Total por grupo	74	30 (GO), 58	74 (CuO), 78 (CuO)	12
Células humanas / Ensaio <i>in vitro</i>	24, 25, 35				24 (Fe ₃ O ₄ , MoO ₃), 25 (Ag, TiO ₂), 35 (Ag)	6
Revisão/Modelos/ Outros	1, 2, 13, 16, 18, 45, 52	1, 45, 52	12, 45, 49, 52	1, 2, 45, 52, 56	1, 2, 12, 45, 52, 72	19
Total por Nanopartículas	30	13	15	12	22	92

Legenda e Notas Explicativas:

AgNPs: Nanopartículas de prata.

TiO₂: Dióxido de titânio.

ZnO: Óxido de zinco.

CNTs: Nanotubos de carbono (incluindo nanotubos de carbono de paredes múltiplas).

Other: Inclui uma variedade de nanopartículas, como óxido de cobre (CuO), óxido de ferro (Fe₃O₄, Fe), óxido de cério, pontos quânticos (CdSe), nanoplásticos, óxido de grafeno (GO), entre outros.

Contagem: Os números nas células referem-se aos IDs das referências listadas em sua consulta. O total (92) é superior ao número total de referências (79), pois muitos estudos investigaram mais de um tipo de nanopartícula ou organismo.

Agrupamento:

Crustáceos: Inclui cladóceros (*Daphnia*, *Ceriodaphnia*), copépodes, camarões e *Artemia*.

Algas: Inclui microalgas e cianobactérias.

Revisões: Esta categoria agrupa artigos de revisão, estudos de modelagem, trabalhos de síntese e de caracterização que não realizaram ensaios ecotoxicológicos específicos com organismos.