

Perigo invisível: Contaminantes emergentes por produtos farmacêuticos

DOI: 10.5281/zenodo.13130079

Bruna Seguius de Paula ^{a*}

Emerging contaminants, especially pharmaceuticals, are becoming an increasing concern in environmental science. These contaminants encompass a wide range of substances, such as human and veterinary medicines, hormones, contraceptives, analgesics, antidepressants, antibiotics, among others. The presence of these drugs in the environment, even at very low concentrations, can have significant adverse effects on ecosystems and human health.

Os contaminantes emergentes, com destaque para os produtos farmacêuticos, têm se tornado uma preocupação crescente na ciência ambiental. Esses elementos englobam uma ampla gama de substâncias, como medicamentos de uso humano e veterinário, hormônios, anticoncepcionais, analgésicos, antidepressivos, antibióticos, entre outros. Mesmo em concentrações ínfimas, a presença desses compostos no meio ambiente pode gerar efeitos adversos significativos nos ecossistemas e na saúde humana.

Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

**E-mail: brunaseguins01@gmail.com*

Palavras-chave: Poluição ambiental; contaminantes orgânicos; indústria farmacêutica.

Aceito em 10 de junho de 2024,
Aprovado em 31 julho de 2024,
Publicado em 31 de julho de 2024.

Introdução

Os contaminantes emergentes por fármacos, incluindo produtos farmacêuticos e seus metabólitos, têm impactos ambientais significativos, mesmo em concentrações mínimas.² Esses compostos podem ser altamente tóxicos para a vida aquática, levando à diminuição da diversidade e abundância de organismos aquáticos.⁵ Além disso, podem bioacumular e biomagnificar ao longo da cadeia alimentar, aumentando os riscos para a vida selvagem e potencialmente para os seres humanos. A presença de hormônios e produtos disruptores endócrinos pode interferir nos sistemas hormonais dos organismos, afetando seu desenvolvimento e reprodução. Produtos disruptores endócrinos são substâncias químicas que podem alterar o funcionamento do sistema endócrino, mimetizando, bloqueando ou modificando a ação dos hormônios naturais. Além disso, a resistência antimicrobiana causada pela presença de bactérias no ambiente representa uma ameaça séria à saúde humana e animal.⁸

A presença de contaminantes farmacêuticos nas cadeias alimentares pode ter diversos impactos adversos. Nos ecossistemas aquáticos, por exemplo, a exposição a antibióticos pode levar ao desenvolvimento de bactérias resistentes, perturbando a saúde e o equilíbrio ecológico.

Os hormônios sintéticos podem afetar o desenvolvimento e a reprodução de peixes e outros organismos

aquáticos. Em mamíferos, incluindo humanos, a exposição crônica a baixas concentrações de certos medicamentos pode estar associada a efeitos adversos à saúde, como disfunções endócrinas e aumento do risco de certas doenças.

A bioacumulação refere-se ao processo pelo qual os contaminantes são absorvidos pelos organismos a partir do ambiente a uma taxa mais rápida do que são excretados. A biomagnificação, por sua vez, ocorre quando a concentração desses contaminantes aumenta à medida que se sobe na cadeia alimentar. Pequenos organismos, como o plâncton, podem absorver contaminantes da água, que são então consumidos por peixes menores, que por sua vez são predados por peixes maiores e outros animais, incluindo seres humanos.

A presença de hormônios e produtos químicos disruptores endócrinos no ambiente traz sérias consequências para os sistemas hormonais dos organismos, afetando drasticamente seu desenvolvimento e reprodução. Esses compostos podem causar alterações significativas nos processos biológicos naturais. Em mamíferos, incluindo seres humanos, os disruptores endócrinos podem provocar uma série de problemas de saúde.

A exposição a essas substâncias tem sido associada a disfunções hormonais, que podem levar a infertilidade, malformações congênitas, e aumentar o risco de cânceres hormonais, como o de mama e de testículo. Além disso, esses

compostos podem interferir no desenvolvimento neurológico de fetos e crianças, resultando em problemas cognitivos e comportamentais. As consequências ecológicas também são severas, pois a alteração nas populações de espécies-chave pode desestabilizar ecossistemas inteiros, afetando a biodiversidade e a saúde dos ambientes naturais.

Essas repercussões destacam a necessidade urgente de medidas para controlar a emissão e exposição a esses tipos de contaminantes, visando proteger tanto a saúde ambiental quanto a humana.

Metodologia

A obtenção de dados sobre os contaminantes emergentes a partir dos produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal (PPCPs) envolve uma metodologia abrangente que combina revisão da literatura científica, coleta e análise de amostras ambientais e alimentares, e modelagem de dados. Inicialmente, é realizada uma extensa revisão da literatura em bases de dados científicas para identificar estudos relevantes sobre a presença e os impactos dos PPCPs.

Em seguida, são coletadas amostras de água, solo, sedimentos e alimentos em diferentes locais, seguida pela análise laboratorial utilizando técnicas como: espectrometria de massa triplo quadrupolo (TQ-MS); Detector de aerossol carregado com CAD; Cromatografia gasosa com detector de captura de elétrons (GC-ECD); cromatografia líquida-espectrometria de massa em tandem (LC/MS/MS); cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC); cromatografia líquida de ultra eficiência (UPLC); ionização por eletrospray (ESI) para quantificar os PPCPs.

Os dados obtidos são então modelados matematicamente e estatisticamente para compreender a distribuição e o comportamento dos PPCPs no ambiente e nos alimentos. Essa metodologia integrada permite uma avaliação completa dos PPCPs, desde a sua origem até os potenciais riscos para a saúde e o ambiente.

Resultados e discussão

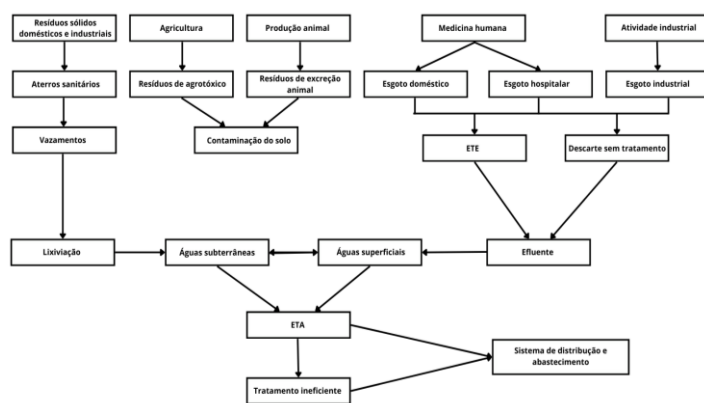
Após o uso, a maioria dos produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal (PPCPs) é liberada no meio ambiente por várias vias (Figura 1). De acordo com Daughton e Ternes, a lixiviação de aterros, estações de tratamento de águas residuais e estações de tratamento de esgoto são responsáveis pela maioria dos PPCPs no meio ambiente. Devido à limitada eficácia das estações de tratamento de águas residuais, os

PPCPs frequentemente não são completamente removidos e, portanto, são comumente detectados em águas residuais tratadas, embora em concentrações reduzidas.¹

Produtos cosméticos e de higiene pessoal permanecem na pele por períodos prolongados e são removidos durante o banho, lavagem ou banho. Esses produtos, por meio das águas residuais, chegam às estações de tratamento de esgoto, onde não são completamente eliminados.

Consequentemente, esses produtos acabam nas lamas de depuração, que são posteriormente utilizadas como fertilizantes na agricultura, introduzindo assim os PPCPs na cadeia alimentar. Essa situação torna os contaminantes de PPCPs uma preocupação para a saúde ambiental. A Figura 1 ilustra as fontes e caminhos dos PPCPs no ciclo urbano da água.^{1,12}

Figura 1. Esquema mostra possíveis rotas dos contaminantes emergentes no meio ambiente. Figura: Bruna Seguin, adaptado de Thomas Heberer.



O consumo de produtos vegetais e animais contaminados por PPCPs pode expor os seres humanos a riscos significativos para a saúde. A presença desses compostos nos alimentos pode resultar em efeitos adversos, como alergias, distúrbios hormonais e até mesmo resistência a medicamentos. Além disso, a exposição a antibióticos e antimicrobianos presentes nos alimentos contaminados pode contribuir para o desenvolvimento de resistência bacteriana em humanos, tornando os tratamentos com antibióticos menos eficazes e aumentando o risco de infecções graves e difíceis de tratar. Essa resistência pode se espalhar rapidamente pela comunidade microbiana, representando um desafio significativo na gestão de infecções e doenças microbianas.¹¹

Tabela 1. Estudos mostram a concentração, o destino e o comportamento de alguns PPCPs. Retirado da referência 2.

Destino e Comportamento	PPCPs	Concentração $\mu\text{g L}^{-1}$	Deteção	Ocorrência
Biomagnificação via cadeias alimentares	Paracetamol, Amoxicilina	0,0058-1,23	HPLC	Águas superficiais, água do mar
Criação de cepas resistentes a antibióticos em populações bacterianas naturais	Oxitetraciclina	0,003-0,0048	HPLC	Águas superficiais
Persistência e bioacumulação na cadeia alimentar	Sulfadoxina, Amodiaquina, Cloroquina	58-451,6	HPLC	Lençóis freáticos
Bioconcentração; biomagnificação via cadeias alimentares terrestres e aquáticas;	Dieldrin	1,51	GC-ECD	Águas superficiais/ subterrâneas
Reduz a motilidade e fertilização dos espermatozoides, influencia a taxa de eclosão, movimento, locomoção e expressão genética em organismos aquáticos	Ibuprofeno	19,2	HPLC-CAD	Água de superfície
Separações de fases incompletas, resistentes à biodegradação	Carbamazepina, naproxeno, ibuprofeno	8,02-132	HPLC-UV	Água de superfície
Representa um risco ambiental adverso para organismos não-alvo através da biomagnificação na cadeia alimentar	Diclofenaco, sulfametoxazol, fenitoína, carbamazepina, lamivudina, cafeína, paracetamol	0,010-0,034	UPLC TQ-MS	Água do Mar
Torna as abordagens tradicionais de amostragem insuficientes	Naproxeno, ibuprofeno e triclosan	10,7-127,7	HPLC-UV	Águas residuais

Espectrometria de massa triplo quadrupolo (TQ-MS); Detector de aerossol carregado com CAD; Cromatografia gasosa com detector de captura de elétrons (GC-ECD) ; cromatografia líquida-espectrometria de massa em tandem (LC/MS/MS); cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) ; cromatografia líquida de ultra eficiência (UPLC); ionização por eletrospray (ESI) para quantificar os PPCPs.

Quantificar a contaminação por fármacos no dia a dia envolve o uso de diversas técnicas analíticas e metodologias para garantir a precisão e a abrangência dos resultados. Métodos como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS) e a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) são amplamente utilizados devido à sua capacidade de identificar e quantificar compostos específicos em amostras de água e solo. Bioensaios e testes imunológicos, como o ELISA,

também são empregados para detectar a presença e os efeitos biológicos dos fármacos em organismos vivos. Sensores e biossensores oferecem uma forma inovadora de monitoramento em tempo real, enquanto a análise de sedimentos e a amostragem passiva fornecem dados sobre a acumulação histórica de contaminantes. A integração dessas técnicas permite um monitoramento eficaz da contaminação por fármacos, essencial para proteger a saúde ambiental e humana.

O monitoramento da contaminação por fármacos no meio ambiente enfrenta desafios significativos, como a diversidade de fármacos e metabólitos, suas baixas concentrações e a presença de interferências. Além disso, os altos custos das técnicas analíticas, o tempo de resposta necessário e a falta de padronização nos métodos são obstáculos adicionais. A falta de conhecimento sobre os efeitos ambientais dos fármacos e a ausência de regulamentação específica também complicam a implementação de medidas eficazes de monitoramento e controle. Superar esses desafios exigirá esforços colaborativos entre governos, indústria farmacêutica, cientistas e comunidades para desenvolver e implementar estratégias de monitoramento mais eficientes e sustentáveis.

A melhoria no tratamento de água é crucial para enfrentar os desafios da contaminação por fármacos, um problema complexo e crescente em todo o mundo. Os avanços tecnológicos, como os processos de oxidação avançada, têm se destacado por sua eficácia na remoção de substâncias farmacêuticas da água, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a proteção da saúde pública. Além disso, a implementação de sistemas descentralizados de tratamento, como os filtros de carvão ativado, não apenas complementa os sistemas convencionais, mas também oferece uma solução flexível e adaptável, especialmente em áreas onde a infraestrutura de tratamento de água é limitada. O contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento é essencial para aprimorar essas tecnologias, tornando-as mais acessíveis e eficientes, e garantindo assim a preservação dos recursos hídricos e a promoção da saúde da população.

Outro meio conhecido são os medicamentos verdes, que são produtos farmacêuticos desenvolvidos e produzidos com foco na sustentabilidade ambiental e na redução do impacto ecológico. Essa abordagem envolve a utilização de práticas que minimizam a pegada ambiental, desde a seleção de matérias-primas até os processos de fabricação e descarte dos medicamentos. A síntese verde, por exemplo, emprega processos químicos mais ecológicos que reduzem o uso de substâncias perigosas e a geração de resíduos. Além disso, a utilização de matérias-primas renováveis e a aplicação de biotecnologia para produzir medicamentos de maneira mais limpa e eficiente são componentes essenciais desta abordagem.

Outro aspecto importante dos medicamentos verdes é o design de moléculas que se degradam rapidamente no ambiente

e são menos prejudiciais a organismos não-alvo. Embalagens sustentáveis, uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis, e a redução de resíduos durante a fabricação são práticas cruciais nesse contexto. Esses esforços resultam em benefícios significativos, como a redução do impacto ambiental, maior sustentabilidade, segurança aprimorada para trabalhadores e consumidores, e promoção de inovação tecnológica. Contudo, a transição para métodos verdes pode apresentar desafios, incluindo custos iniciais elevados, necessidade de conformidade com regulamentações de segurança e eficácia, e demanda por contínua pesquisa e desenvolvimento. À medida que a indústria farmacêutica avança, a adoção de práticas de medicamentos verdes se torna crucial para equilibrar a eficácia dos tratamentos com a responsabilidade ambiental.

Conclusões

A crescente presença de contaminantes farmacêuticos representa um desafio complexo para a gestão ambiental. Para lidar eficazmente com esses impactos, é necessário adotar uma abordagem abrangente, que inclua avanços tecnológicos, regulamentações mais rigorosas, conscientização pública e pesquisa contínua.

Para mitigar esses impactos, é crucial melhorar os sistemas de tratamento de água e esgoto, promover o descarte adequado de medicamentos e práticas agrícolas sustentáveis, além de desenvolver métodos avançados de degradação de contaminantes, como processos de oxidação e tecnologias de filtração. Somente através de um esforço conjunto e multifacetado será possível reduzir os riscos associados a esses poluentes e proteger tanto os ecossistemas quanto a saúde humana.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Bruna Seguins de Paula.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? - PMC *National Library of Medicine*
- 2 Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy - *ScienceDirect*
- 3 Pharmaceuticals and personal care product (PPCP) contamination—a global discharge inventory - *ScienceDirect*
- 4 Contaminantes-emergentes-e-indicadores-de-contaminacao-em-ambientes-costeiros-brasileiros-ocorrencia-distribuicao-geografica-e-procedimentos-analiticos-utilizados.pdf
- 5 Montagner, C.C.; Vidal, C.; Vizioli, B.C. & Gomes, L.E.T. **2021**. Aspectos analíticos para a determinação de contaminantes ambientais no contexto da ecotoxicologia. In: *Cubo (Ed.)*, Recurso Água - Tecnologias e pesquisas para o uso e a conservação de ecossistemas aquáticos, p. **381-414**.
- 6 Montagner, C.C.; Vidal, C. & Acayaba, R. **2017**. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*, **40(9)**: 1094-1110. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>
- 7 Martins, C.C.; Gomes, F.B.A.; Ferreira, J.A. & Montone, R.C. **2008**. Marcadores orgânicos de contaminação por esgotos sanitários em sedimentos superficiais da Baía de Santos, São Paulo. *Química Nova*, **31(5)**: 1008-1014. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000500012>
- 8 Lima, D.R.S.; Tonucci, M.C.; Libânio, M. & Aquino, S.F. 2017. Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **22(6)**: 1043-1054. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017165207>
- 9 Lima, M.F.B.; Fernandes, G.M.; Oliveira, A.H.B.; Morais, P.C.V.; Marques, E.V.; Santos, F.R.; Nascimento, R.F.; Swarthout, R.F.; Nelson, R.K.; Reddy, C.M. & Cavalcante, R.M. **2019**. Emerging and traditional organic markers: baseline study

showing the influence of untraditional anthropogenic activities on coastal zones with multiple activities (Ceará Coast, Northeast Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, **139**: 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.006>

- 10 Silva, C.G.A. & Collins, C.H. **2011**. Aplicações de cromatografia líquida de alta eficiência para o estudo de poluentes orgânicos emergentes. *Química Nova*, **34(4)**: 665-676. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000400020>
- 11 Antibióticos: resistência de microrganismos é grave ameaça à saúde global
- 12 (PDF) Alternative Strategies for Managing Pharmaceutical and Personal Care Products in Water Resources
- 13 Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura <https://doi.org/10.1590/1413-81232023284.05752022>