CAPÍTULO DO LIVRO – CONEXÕES CIENTÍFICAS - AMBIENTE, SAÚDE, EDUCAÇÃO E INOVAÇÃO - PUBLICADO POR: EDITORA MANUAL
ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

CAPÍTULO 5

CONTAMINANTES FARMACÊUTICOS NO AMBIENTE: OCORRÊNCIA, IMPACTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS E RISCOS À SAÚDE

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-5

Paulo de Tárcio da Silva Júnior, e-mail: tarcio.jr@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/0793107269497381

RESUMO
Os contaminantes farmacêuticos constituem uma preocupação ambiental emergente em razão de sua ocorrência em diferentes matrizes aquáticas, persistência e potencial de causar efeitos sobre organismos e, indiretamente, sobre a saúde humana. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas acerca da ocorrência, distribuição, comportamento ambiental, impactos químicos e biológicos e riscos à saúde humana associados à presença de contaminantes farmacêuticos no ambiente. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, conduzida conforme as recomendações do protocolo PRISMA 2020. As buscas foram realizadas nas bases Google Scholar, SciELO, Portal de Periódicos CAPES, Scopus, Web of Science, ScienceDirect e PubMed, considerando estudos publicados entre 2021 e 2026. Após as etapas de identificação, triagem e avaliação de elegibilidade, foram selecionados 19 estudos para compor a análise. Os resultados evidenciaram a ocorrência de diferentes classes de contaminantes farmacêuticos, com destaque para analgésicos, anti-inflamatórios, antibióticos, anticonvulsivantes, antidepressivos e estimulantes, apresentando concentrações variáveis entre as diferentes matrizes e regiões avaliadas. Observou-se que as propriedades físico-químicas dos compostos e as características ambientais influenciam sua distribuição, mobilidade, persistência e transformação, podendo ocorrer processos como sorção, fotodegradação, biodegradação e hidrólise, além da formação de produtos de transformação. Os estudos também demonstraram efeitos sobre organismos aquáticos, incluindo alterações fisiológicas, metabólicas, comportamentais e reprodutivas. Quanto à saúde humana, a presença de resíduos farmacêuticos em recursos hídricos destinados ao consumo representa uma preocupação relacionada à exposição contínua a baixas concentrações e à ocorrência de misturas, destacando-se ainda a possível contribuição dos antibióticos para a resistência antimicrobiana. Conclui-se que os contaminantes farmacêuticos apresentam distribuição ambiental ampla e comportamento complexo, sendo necessários o fortalecimento do monitoramento, o aprimoramento dos sistemas de tratamento e a ampliação de estudos sobre exposição crônica, efeitos de misturas e produtos de transformação.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminantes farmacêuticos; Ecotoxicologia; Risco ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de medicamentos e sua ampla distribuição na sociedade têm contribuído para a introdução contínua de resíduos farmacêuticos nos ambientes naturais. Após o uso, princípios ativos e metabólitos podem ser eliminados pelo organismo e alcançar sistemas de esgotamento sanitário, além de serem provenientes de atividades hospitalares, industriais e agropecuárias. Como os processos convencionais de tratamento de águas residuárias não são projetados especificamente para a remoção desses compostos, parte deles pode alcançar corpos d'água receptores, contribuindo para a ocorrência de contaminantes farmacêuticos em diferentes compartimentos ambientais (Guettai *et al.*, 2024).

A presença desses contaminantes tem sido registrada em águas residuárias, águas superficiais, ambientes estuarinos, sedimentos e outros compartimentos aquáticos. Em uma

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

análise global, Adedipe *et al.* (2024) identificaram 239 produtos farmacêuticos em 91 estuários de 26 países, demonstrando a ampla distribuição desses compostos e a variabilidade de suas concentrações entre diferentes regiões. Além disso, estudos recentes têm identificado resíduos farmacêuticos em água destinada ao consumo humano, reforçando a necessidade de compreender as possíveis vias de exposição e os fatores que determinam sua permanência no ambiente (Coderre *et al.*, 2025).

A problemática torna-se ainda mais complexa em razão da diversidade química dos fármacos e de seu comportamento após a entrada no ambiente. Dependendo de suas propriedades físico-químicas e das características da matriz, esses compostos podem permanecer dissolvidos, associar-se a partículas e sedimentos ou sofrer processos de transformação, como fotodegradação, biodegradação, hidrólise e adsorção. Além disso, a degradação dos compostos originais pode resultar na formação de produtos de transformação, os quais podem apresentar propriedades e comportamentos ambientais distintos das moléculas precursoras (Guettai *et al.*, 2024).

Do ponto de vista ecológico, a presença contínua de contaminantes farmacêuticos representa uma preocupação devido à atividade biológica desses compostos. Estudos têm relatado efeitos sobre organismos aquáticos, incluindo alterações fisiológicas, metabólicas, comportamentais e reprodutivas, além de diferentes níveis de risco ecológico para algas, macroinvertebrados e peixes (Singh; Ranjan, 2024). A exposição ambiental também pode envolver misturas de diferentes substâncias, tornando a avaliação dos efeitos ecotoxicológicos mais complexa.

Em relação à saúde humana, a detecção de resíduos farmacêuticos em recursos hídricos destinados ao abastecimento levanta questionamentos sobre a exposição contínua a baixas concentrações e à combinação de diferentes compostos. Embora a ocorrência de um fármaco na água não represente, isoladamente, evidência de risco elevado, a avaliação deve considerar concentração, frequência de exposição, toxicidade e características específicas de cada substância. Nesse contexto, destaca-se ainda a preocupação relacionada aos antibióticos e à possível contribuição da presença ambiental desses compostos para a seleção e disseminação da resistência antimicrobiana (Wada; Olawade, 2025).

Diante desse cenário, estabelece-se a seguinte questão norteadora: quais são as principais evidências científicas sobre a ocorrência, o comportamento ambiental, os impactos químicos e biológicos e os riscos à saúde humana associados aos contaminantes farmacêuticos presentes no ambiente? A partir dessa questão, torna-se relevante sistematizar os

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

conhecimentos produzidos nos últimos anos, considerando a diversidade de compostos, matrizes ambientais e efeitos descritos na literatura.

Assim, o presente estudo teve como objetivo analisar sistematicamente as evidências científicas acerca dos contaminantes farmacêuticos no ambiente, com ênfase em sua ocorrência e distribuição, principais classes e concentrações detectadas, comportamento ambiental, efeitos sobre os organismos e ecossistemas e possíveis riscos à saúde humana. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, conduzida de acordo com as recomendações do protocolo PRISMA 2020 (Page *et al*., 2021), visando proporcionar maior transparência e sistematização às etapas de identificação, seleção, avaliação e síntese dos estudos incluídos.

2. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, conduzida de acordo com as recomendações do protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), proposto por Page *et al.* (2021). A revisão teve como objetivo reunir e sintetizar evidências científicas relacionadas à ocorrência, distribuição, comportamento ambiental, impactos químicos e biológicos e riscos à saúde humana associados aos contaminantes farmacêuticos presentes no ambiente.

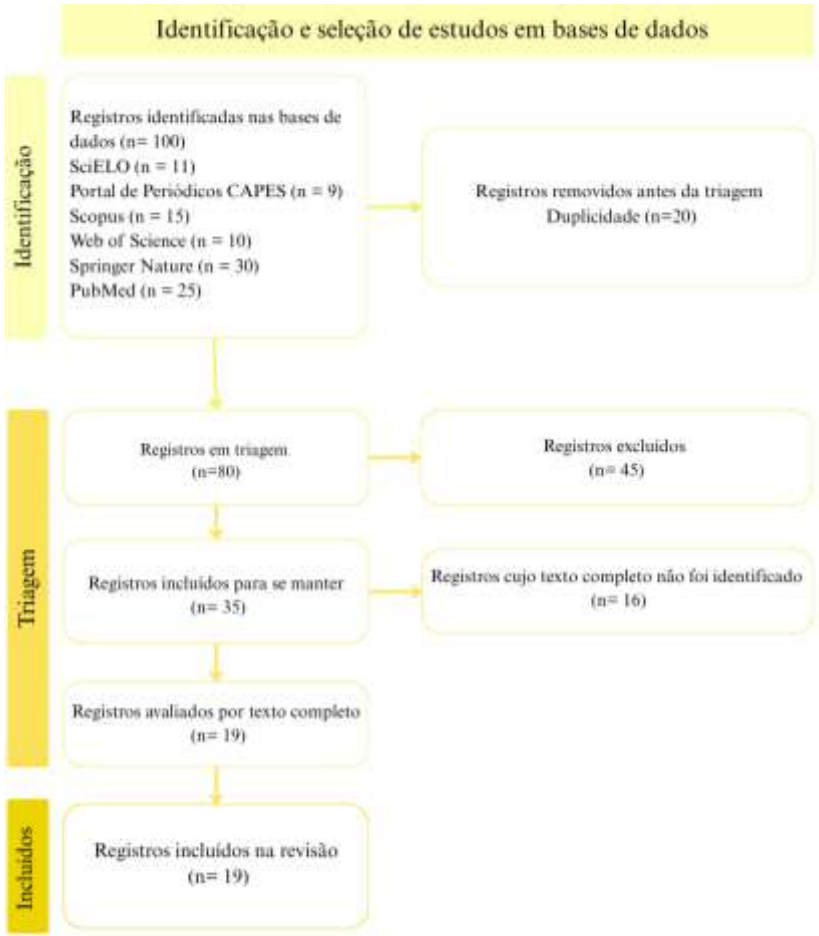
A pesquisa foi orientada pela seguinte questão norteadora: quais são as principais evidências científicas sobre a ocorrência, o comportamento ambiental, os impactos químicos e biológicos e os riscos à saúde humana associados aos contaminantes farmacêuticos presentes no ambiente? Para responder à questão proposta, foi realizada uma busca sistemática nas bases de dados SciELO, Portal de Periódicos CAPES, Scopus, Web of Science, ScienceDirect e PubMed, considerando sua relevância para a identificação de estudos relacionados à temática.

A estratégia de busca foi realizada mediante a utilização de descritores relacionados aos contaminantes farmacêuticos e à sua ocorrência e aos efeitos ambientais e à saúde humana. Foram empregados os operadores booleanos AND e OR, combinando termos como *pharmaceutical contaminants, pharmaceutical residues, pharmaceutical pollutants, pharmaceuticals in aquatic environment, emerging contaminants, environmental occurrence, ecotoxicological effects, human health risk* e *antimicrobial resistance*. Foram selecionados estudos publicados no período de 2021 a 2026, priorizando evidências científicas recentes relacionadas à temática investigada.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

Após a realização das buscas, os estudos identificados foram organizados para análise e seleção. Inicialmente, foram removidos os registros duplicados. Em seguida, realizou-se a triagem dos estudos a partir da leitura dos títulos e resumos, considerando sua relação com a questão norteadora e os objetivos da pesquisa. Os estudos considerados potencialmente relevantes foram avaliados mediante a leitura do texto completo, sendo selecionados aqueles que apresentavam informações pertinentes à ocorrência, concentração, distribuição, comportamento ambiental, transformação, efeitos biológicos, impactos ecotoxicológicos ou riscos à saúde humana associados aos contaminantes farmacêuticos. O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi sistematizado conforme as recomendações do PRISMA 2020, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1. Processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos conforme o protocolo PRISMA 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os dados dos estudos selecionados foram extraídos e organizados considerando informações como autor, ano de publicação, local do estudo, matriz ambiental investigada,

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

classe de contaminante farmacêutico, composto identificado, concentração detectada, comportamento ambiental, efeitos biológicos e principais resultados. Posteriormente, os dados foram analisados de forma qualitativa e descritiva, permitindo a identificação de padrões, tendências e diferenças entre os estudos.

A síntese dos resultados foi organizada em cinco eixos temáticos: ocorrência e distribuição ambiental dos contaminantes farmacêuticos; principais classes de contaminantes farmacêuticos e concentrações detectadas; comportamento ambiental e impactos químicos dos contaminantes; efeitos biológicos e impactos sobre os ecossistemas; e riscos à saúde humana associados à exposição a contaminantes farmacêuticos. Essa organização permitiu integrar as evidências encontradas na literatura e estabelecer uma análise comparativa dos principais aspectos relacionados à presença e aos efeitos desses contaminantes no ambiente.

O processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos foi apresentado em um fluxograma elaborado conforme as recomendações do PRISMA 2020, contemplando as etapas de identificação dos registros, remoção de duplicatas, triagem, avaliação de elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão. Dessa forma, buscou-se garantir maior transparência e sistematização ao processo de seleção das evidências utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ocorrência e distribuição de contaminantes farmacêuticos no ambiente

A presença de resíduos farmacêuticos em diferentes compartimentos ambientais tem sido amplamente documentada na literatura científica recente, configurando uma problemática associada à crescente introdução de substâncias biologicamente ativas nos ecossistemas. Entre as matrizes ambientais investigadas, os compartimentos aquáticos concentram parcela significativa das pesquisas, especialmente águas superficiais, águas residuárias, efluentes domésticos e hospitalares, além de águas subterrâneas e destinadas ao consumo humano. A ocorrência desses compostos está associada, principalmente, à utilização e excreção de medicamentos, ao descarte inadequado de produtos farmacêuticos e à limitada eficiência dos sistemas convencionais de tratamento de águas residuárias na remoção de determinados micropoluentes (Anand *et al.*, 2022; Ashfield *et al.*, 2025).

A ocorrência simultânea de diferentes substâncias farmacêuticas constitui uma característica recorrente nos ambientes contaminados, refletindo a diversidade de medicamentos utilizados pela população e a complexidade das fontes de emissão. Anand *et al*.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

(2022) destacam a ampla detecção de produtos farmacêuticos em águas residuárias e ambientes aquáticos, demonstrando que diferentes classes terapêuticas podem coexistir em uma mesma matriz. As concentrações relatadas na literatura apresentam ampla variação, frequentemente situando-se entre ng L^{-1} e µg L^{-1}, dependendo do composto avaliado, da matriz ambiental, das características da área investigada e da sensibilidade dos métodos analíticos empregados.

A distribuição espacial desses contaminantes não ocorre de maneira homogênea, sendo influenciada por fatores demográficos, padrões de consumo de medicamentos, condições climáticas, características hidrológicas e, sobretudo, pela infraestrutura de saneamento. Nesse sentido, Wada e Olawade (2025), em levantamento abrangendo estudos realizados entre 2019 e 2024, identificaram a ocorrência de produtos farmacêuticos em sistemas de água doce nos seis continentes. Os resultados evidenciam diferenças entre as regiões avaliadas, particularmente quanto à diversidade dos compostos identificados e às concentrações registradas. Efluentes provenientes de estações de tratamento de águas residuárias, sistemas sépticos, processos de recarga de águas subterrâneas e áreas com infraestrutura sanitária insuficiente figuram entre as principais vias relacionadas à introdução desses contaminantes nos sistemas aquáticos.

Quanto ao perfil dos compostos detectados, diferentes estudos relatam a ocorrência de substâncias pertencentes a classes terapêuticas distintas, incluindo analgésicos, anti-inflamatórios, antibióticos, antidepressivos e anticonvulsivantes. Entre os compostos frequentemente investigados encontram-se cafeína, paracetamol, ibuprofeno, carbamazepina, sulfametoxazol e diclofenaco. Entretanto, a frequência de detecção e os níveis de concentração apresentam variações consideráveis entre os estudos, o que pode estar relacionado tanto às diferenças nos padrões de consumo farmacêutico quanto às características dos sistemas de tratamento e às condições ambientais locais (Wada; Olawade, 2025).

A permanência de determinados fármacos após o tratamento de águas residuárias constitui outro aspecto relevante identificado na literatura. A eficiência dos processos convencionais pode variar substancialmente entre os compostos, uma vez que propriedades como solubilidade, polaridade, estabilidade química e capacidade de adsorção influenciam seu comportamento durante as etapas de tratamento. Consequentemente, uma parcela desses contaminantes pode permanecer na fase aquosa e alcançar os corpos receptores, contribuindo para sua distribuição nos ambientes aquáticos (Anand *et al*., 2022; Ashfield *et al*., 2025).

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

A detecção de resíduos farmacêuticos em água destinada ao consumo humano amplia a relevância ambiental dessa problemática. Zanni *et al*. (2025), em revisão sistemática sobre a ocorrência de resíduos farmacêuticos em água potável, reuniram evidências de detecção de diferentes compostos em sistemas de abastecimento de distintas regiões. Embora os níveis encontrados sejam, em geral, inferiores aos observados em águas residuárias, a identificação recorrente dessas substâncias demonstra a capacidade de determinados compostos de atravessar diferentes etapas do ciclo de tratamento e abastecimento. Tal cenário reforça a importância do monitoramento sistemático, sobretudo considerando a exposição contínua a baixas concentrações e a ocorrência simultânea de múltiplos contaminantes.

As águas subterrâneas também constituem um compartimento ambiental relevante, particularmente em regiões nas quais esse recurso é empregado para abastecimento. A transferência de produtos farmacêuticos para os aquíferos pode ocorrer por processos de infiltração de águas residuárias, sistemas sépticos, lixiviados e recarga contaminada. Wada e Olawade (2025) ressaltam que a presença desses compostos em águas subterrâneas representa uma preocupação adicional em razão da possibilidade de transporte e permanência em ambientes com reduzida taxa de renovação. Dessa maneira, a contaminação pode ultrapassar os compartimentos superficiais e alcançar recursos hídricos cuja recuperação pode ser mais complexa.

A distribuição dos contaminantes entre os diferentes compartimentos ambientais também é condicionada pelas propriedades físico-químicas dos compostos e pelas características do meio receptor. Processos de sorção, dessorção, fotodegradação, hidrólise e biodegradação podem modificar a concentração e a mobilidade dos fármacos, determinando sua permanência na coluna d'água ou sua transferência para sedimentos e organismos. Dessa forma, a detecção de um determinado contaminante em uma matriz ambiental não depende exclusivamente de sua taxa de emissão, mas também de sua estabilidade e das transformações a que é submetido após a entrada no ambiente (Anand *et al*., 2022).

A dimensão espacial da ocorrência desses contaminantes tem sido reforçada por estudos recentes, que apontam sua presença em diferentes regiões e matrizes ambientais. Ashfield *et al.* (2025) destacam que os produtos farmacêuticos constituem contaminantes ambientais de relevância crescente devido à ampla utilização, à diversidade estrutural e à introdução contínua nos sistemas ambientais. Em escala regional, Madikizela, Mofokeng e Chimuka (2026) também evidenciaram a ocorrência de produtos farmacêuticos em recursos hídricos e

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

organismos associados, ressaltando a necessidade de ampliar o monitoramento em regiões ainda pouco representadas na literatura científica.

3.2 Principais classes de contaminantes farmacêuticos e seus níveis de concentração

A literatura demonstra a ocorrência de diferentes classes de contaminantes farmacêuticos nos ambientes aquáticos, com destaque para analgésicos e anti-inflamatórios, antibióticos, anticonvulsivantes e estimulantes. Entre os compostos mais frequentemente identificados estão diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol, carbamazepina, cafeína, ciprofloxacino e sulfametoxazol. Chaves *et al.* (2022), ao analisarem 185 estudos, verificaram elevada recorrência desses compostos em diferentes matrizes ambientais. De forma semelhante, Adedipe *et al.* (2024) reuniram 3.229 registros de ocorrência referentes a 239 fármacos em 91 estuários distribuídos por 26 países, destacando analgésicos, antibióticos e estimulantes entre os grupos mais frequentemente relatados (Quadro 1).

A magnitude das concentrações apresenta ampla variabilidade entre os estudos e entre as matrizes ambientais. Em ambientes estuarinos, Adedipe *et al.* (2024) verificaram concentrações médias ponderadas cumulativas de todos os produtos farmacêuticos detectados de 145.461,86 ng L^{-1} na África, 24.316,39 ng L^{-1} na América do Norte e 20.784,13 ng L^{-1} na América do Sul, enquanto valores inferiores foram observados na Ásia, Europa e Oceania. Carbamazepina, diclofenaco e paracetamol apresentaram distribuição particularmente ampla, sendo detectados nos diferentes continentes avaliados. Em águas destinadas ao consumo humano, por outro lado, as concentrações tendem a ser menores, embora a ocorrência de resíduos farmacêuticos permaneça documentada. Zanni *et al.* (2025), em revisão sistemática, identificaram estudos que relataram a presença de resíduos farmacêuticos em amostras reais de água potável, demonstrando que a distribuição desses compostos pode alcançar etapas posteriores ao tratamento convencional.

A variação das concentrações entre os compartimentos ambientais está relacionada à carga de contaminantes lançada, ao grau de diluição, às características físico-químicas dos compostos e à eficiência dos processos de tratamento. Em águas residuárias e efluentes, por exemplo, a proximidade das fontes de emissão pode favorecer concentrações superiores às observadas em corpos hídricos receptores, nos quais processos de diluição, degradação e sorção podem modificar a concentração dos contaminantes. Wada e Olawade (2025) ressaltam que a ocorrência de produtos farmacêuticos em sistemas de água doce apresenta diferenças expressivas entre regiões, associadas às condições de saneamento, aos padrões de consumo e

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

às características dos sistemas de tratamento. Essa heterogeneidade demonstra que a frequência de detecção, isoladamente, não é suficiente para caracterizar a relevância ambiental de um contaminante, sendo necessário considerar conjuntamente sua concentração, persistência e distribuição.

Outro aspecto relevante refere-se à ocorrência de metabólitos e produtos de transformação, os quais ampliam o número de contaminantes potencialmente presentes nos ambientes aquáticos. Rodrigues *et al.* (2022) identificaram dados de concentração para 98 produtos de transformação de origem farmacêutica em corpos d'água e efluentes, evidenciando que a avaliação baseada exclusivamente nos compostos originais pode subestimar a dimensão da contaminação. Esses produtos podem apresentar comportamento ambiental e toxicidade distintos daqueles observados para os compostos parentais, sendo alguns capazes de permanecer no ambiente ou apresentar efeitos biológicos relevantes. Dessa forma, a caracterização da contaminação farmacêutica requer a consideração tanto dos princípios ativos quanto de seus produtos de transformação, especialmente em estudos destinados à avaliação da exposição ambiental e dos riscos associados.

Quadro 1. Principais classes de contaminantes farmacêuticos identificadas em ambientes aquáticos

Classe farmacêutica	**Exemplos de compostos**	**Principais matrizes relatadas**	**Característica observada**
Analgésicos e anti-inflamatórios	Diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol	Efluentes, águas superficiais e estuários	Elevada frequência de ocorrência
Antibióticos	Ciprofloxacina, sulfametoxazol	Efluentes e águas superficiais	Ampla distribuição ambiental
Anticonvulsivantes	Carbamazepina	Águas residuárias e superficiais	Elevada recorrência e persistência
Estimulantes	Cafeína	Efluentes e águas superficiais	Frequência elevada, associada ao consumo humano

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

Antidepressivos	Diferentes fármacos da classe	Efluentes e águas superficiais	Ocorrência variável entre regiões
Produtos de transformação	Metabólitos e produtos de degradação	Efluentes e águas superficiais	Podem permanecer no ambiente e apresentar efeitos próprios

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3 Comportamento ambiental e impactos químicos dos contaminantes farmacêuticos

Os contaminantes farmacêuticos apresentam diferentes comportamentos no ambiente em função de suas propriedades físico-químicas e das características das matrizes ambientais. Após o lançamento de efluentes, esses compostos podem permanecer dissolvidos na água, associar-se a partículas em suspensão ou acumular-se nos sedimentos. Dessa forma, sua distribuição ambiental não ocorre de maneira uniforme, sendo influenciada por fatores como solubilidade, polaridade, pH, matéria orgânica e coeficiente de partição (Bavumiragira; Ge; Yin, 2022).

A persistência dos fármacos nos ambientes aquáticos está relacionada à resistência de determinadas estruturas químicas aos processos naturais de transformação. Compostos mais persistentes podem permanecer por períodos prolongados na água e nos sedimentos, favorecendo sua dispersão para diferentes compartimentos ambientais. Além disso, a entrada contínua desses contaminantes por meio de efluentes pode contribuir para sua permanência nos sistemas aquáticos, mesmo quando ocorrem processos naturais de degradação (Bavumiragira; Ge; Yin, 2022).

Entre os principais processos responsáveis pela transformação dos contaminantes farmacêuticos destacam-se a fotodegradação, a biodegradação, a hidrólise e a sorção. A importância relativa desses mecanismos depende da estrutura molecular do composto e das condições ambientais. A disponibilidade de luz, a atividade microbiana, o pH e a composição da matriz podem favorecer ou limitar a transformação dos fármacos, fazendo com que diferentes compostos apresentem comportamentos distintos no mesmo ambiente (BavumiragirA; Ge; Yin, 2022; Guettai *et al.*, 2024).

A degradação microbiana também exerce papel relevante na transformação de contaminantes farmacêuticos, principalmente em ambientes que apresentam elevada atividade

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

biológica. Entretanto, a eficiência desse processo varia entre os compostos e depende das características das comunidades microbianas e das condições ambientais. Dessa forma, determinados fármacos podem ser parcialmente degradados, enquanto outros apresentam maior resistência à biodegradação e permanecem no ambiente por períodos mais prolongados (Narayanan *et al.*, 2023).

Outro aspecto importante está relacionado à formação de produtos de transformação. A degradação dos compostos farmacêuticos não resulta necessariamente em sua completa mineralização, podendo gerar metabólitos e outros produtos com propriedades físico-químicas diferentes das moléculas originais. Rodrigues *et al.* (2022) identificaram 98 produtos de transformação de origem farmacêutica em corpos d'água e efluentes, demonstrando que esses compostos constituem uma parcela relevante da contaminação ambiental e que seu monitoramento ainda é limitado.

No caso dos antimicrobianos, os produtos de transformação merecem atenção adicional devido à possibilidade de apresentarem atividade biológica e contribuírem para riscos ecotoxicológicos. Löffler *et al.* (2023) identificaram 56 produtos de transformação de antimicrobianos em ambientes aquáticos e destacaram a necessidade de ampliar o conhecimento sobre sua ocorrência, persistência e potencial de favorecer mecanismos relacionados à resistência antimicrobiana.

Assim, o comportamento ambiental dos contaminantes farmacêuticos resulta da interação entre suas propriedades químicas, as características da matriz e os processos de transformação aos quais são submetidos. A avaliação da contaminação, portanto, não deve considerar apenas a concentração dos compostos originais, mas também sua persistência, mobilidade e possível transformação em produtos secundários. Essa abordagem é fundamental para compreender de forma mais abrangente os impactos químicos associados à presença desses contaminantes nos ambientes aquáticos.

3.4 Efeitos biológicos e impactos sobre os ecossistemas

A presença contínua de contaminantes farmacêuticos nos ambientes aquáticos pode produzir efeitos biológicos em organismos não alvo, mesmo quando presentes em concentrações relativamente baixas. A relevância desses efeitos está relacionada à própria atividade biológica dos fármacos, desenvolvidos para atuar sobre processos fisiológicos específicos nos organismos humanos e animais. Quando alcançam os ambientes naturais, essas

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

mesmas propriedades podem interferir em organismos aquáticos que não constituem seus alvos terapêuticos (Hejna; Kapuścińska; Aksmann, 2022).

Entre os principais efeitos observados estão alterações no crescimento, comportamento, reprodução, desenvolvimento, metabolismo e respostas fisiológicas. Também são relatados estresse oxidativo, alterações endócrinas e danos celulares, que podem ocorrer após exposições prolongadas. Esses efeitos são particularmente relevantes em razão da exposição crônica dos organismos aquáticos a concentrações ambientalmente recorrentes, condição que pode produzir alterações subletais mesmo quando não ocorre mortalidade imediata (Hejna; Kapuścińska; Aksmann, 2022).

Os efeitos também variam conforme a classe farmacêutica e o grupo biológico exposto. Antibióticos, por exemplo, podem interferir nas comunidades microbianas presentes na água e nos sedimentos, alterando sua composição e funcionamento. Anti-inflamatórios e outros fármacos biologicamente ativos, por sua vez, podem provocar alterações fisiológicas em peixes e invertebrados. Em ambientes marinhos, diferentes classes, incluindo anti-inflamatórios não esteroides, hormônios, medicamentos psiquiátricos e antibióticos, podem atuar sobre diferentes vias celulares e metabólicas dos organismos não alvo (Mezzelani; Regoli, 2022).

Os organismos de diferentes níveis tróficos também podem responder de maneira distinta à exposição. Algas e diatomáceas, por exemplo, podem apresentar alterações relacionadas ao crescimento e ao metabolismo, além de constituírem organismos importantes para a avaliação dos efeitos dos contaminantes sobre os níveis inferiores das cadeias alimentares. A exposição desses produtores primários é relevante porque alterações em sua fisiologia podem repercutir sobre organismos que dependem deles para alimentação e manutenção do fluxo de energia nos ecossistemas (Mezzelani; Regoli, 2022).

Em peixes e macroinvertebrados, os efeitos podem envolver alterações comportamentais, fisiológicas, reprodutivas e bioquímicas. A ocorrência simultânea de diferentes contaminantes também amplia a complexidade da avaliação, uma vez que os organismos estão normalmente expostos a misturas e não a substâncias isoladas. Estudos sobre ecossistemas fluviais indicam que determinados cursos d'água apresentam concentrações ambientais superiores às concentrações previstas sem efeito para algas, macroinvertebrados e peixes, indicando situações de risco ecológico elevado (Singh; Ranjan *et al*., 2024). Os principais efeitos biológicos associados às diferentes classes de contaminantes farmacêuticos e aos grupos de organismos aquáticos são sintetizados na Tabela 1.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

Tabela 1. Principais efeitos biológicos associados aos contaminantes farmacêuticos.

Grupo biológico	Principais efeitos observados	Possíveis implicações ecológicas
Algas e diatomáceas	Alterações no crescimento, metabolismo e atividade fotossintética	Modificação da produtividade primária
Microrganismos	Alterações na composição e atividade microbiana	Perturbação dos ciclos biogeoquímicos
Invertebrados aquáticos	Alterações fisiológicas, comportamentais e reprodutivas	Mudanças na estrutura das comunidades
Peixes	Estresse oxidativo, alterações endócrinas, comportamentais e reprodutivas	Possíveis efeitos sobre populações
Organismos marinhos	Alterações celulares, metabólicas e fisiológicas	Comprometimento de funções ecológicas
Comunidades aquáticas	Alterações na composição e nas interações entre espécies	Perturbação das relações tróficas

Fonte:Elaborado pelo autor (2026).

Além dos efeitos individuais, a exposição contínua aos contaminantes farmacêuticos pode provocar alterações em processos ecológicos mais amplos. Modificações na reprodução, no comportamento, no crescimento ou na sobrevivência de organismos podem interferir nas relações tróficas e na estrutura das comunidades. A presença simultânea de diferentes fármacos torna essa avaliação ainda mais complexa, pois seus efeitos podem ocorrer de forma aditiva, sinérgica ou antagônica, dificultando a previsão das consequências em escala ecossistêmica (Mezzelani; Regoli, 2022).

Diante desse cenário, os impactos dos contaminantes farmacêuticos não devem ser avaliados exclusivamente a partir da mortalidade dos organismos. Alterações subletais e crônicas podem comprometer funções fisiológicas e ecológicas antes que sejam observados

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

efeitos populacionais evidentes. Assim, a avaliação dos riscos ambientais deve considerar diferentes níveis de organização biológica, desde respostas celulares e bioquímicas até possíveis alterações na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas.

3.5 Riscos dos contaminantes farmacêuticos à saúde humana

A presença de contaminantes farmacêuticos em recursos hídricos destinados ao abastecimento tem despertado preocupação em relação à exposição humana, especialmente diante da detecção desses compostos em águas superficiais, subterrâneas e, em menor frequência, em água tratada para consumo. Embora as concentrações geralmente estejam na faixa de ng L^{-1}, a ocorrência contínua de diferentes fármacos pode representar uma exposição de caráter crônico, cuja relevância depende da concentração, frequência de exposição, propriedades do composto e vulnerabilidade da população exposta (Zanni *et al*., 2025).

A água para consumo humano constitui uma das possíveis vias de exposição, principalmente quando os sistemas convencionais de tratamento apresentam remoção incompleta de determinados compostos. Zanni *et al*. (2025), em uma revisão sistemática de 124 estudos, verificaram a presença de resíduos farmacêuticos em amostras reais de água potável em diferentes regiões. Entretanto, a detecção dos compostos não implica, isoladamente, a existência de risco elevado à saúde, sendo necessária a avaliação da concentração ambiental em relação aos níveis de exposição e aos parâmetros toxicológicos disponíveis.

Os riscos potenciais também estão relacionados às características farmacológicas dos contaminantes. Substâncias com atividade hormonal podem interferir em processos endócrinos, enquanto determinados antibióticos podem contribuir para a seleção e disseminação de microrganismos resistentes. Além disso, a exposição simultânea a diferentes compostos pode dificultar a avaliação dos efeitos individuais, uma vez que os contaminantes podem apresentar interações e efeitos combinados (Mazhandu; Mashifana, 2024).

A resistência aos antimicrobianos constitui uma das principais preocupações associadas à presença ambiental de antibióticos. A exposição de comunidades microbianas a concentrações subinibitórias desses compostos pode favorecer processos de seleção e disseminação de genes de resistência, criando condições para a manutenção de bactérias resistentes em ambientes aquáticos. Dessa forma, a contaminação farmacêutica pode representar uma questão de saúde pública que ultrapassa os efeitos toxicológicos diretos dos resíduos sobre o organismo humano (Wada; Olawade, 2025).

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

Outro aspecto relevante está relacionado à exposição indireta por meio da cadeia alimentar e do reúso de água. A presença de contaminantes farmacêuticos em ambientes aquáticos pode possibilitar sua transferência para organismos utilizados na alimentação humana ou para sistemas agrícolas irrigados com água contaminada. Entretanto, a magnitude dessa exposição e suas consequências para a saúde humana ainda apresentam incertezas, sendo necessários estudos que considerem bioacumulação, exposição crônica e interação entre diferentes contaminantes.

Estudos de avaliação de risco realizados em água destinada ao abastecimento indicam que, para a maioria dos compostos analisados, os riscos estimados à saúde humana podem ser baixos nas concentrações atualmente detectadas. Muambo *et al.* (2024), por exemplo, identificaram risco humano predominantemente negligível a moderado para os fármacos presentes em águas tratadas, embora alguns compostos tenham apresentado maior relevância e necessidade de monitoramento. Esses resultados demonstram que a ocorrência de resíduos farmacêuticos deve ser interpretada conjuntamente com dados de exposição e toxicidade, evitando tanto a subestimação quanto a superestimação dos riscos.

Assim, os riscos à saúde humana associados aos contaminantes farmacêuticos ainda devem ser compreendidos como uma questão de preocupação emergente, sobretudo em razão da exposição contínua a misturas de compostos e das lacunas existentes sobre seus efeitos em longo prazo. A avaliação integrada deve considerar as concentrações ambientais, as vias de exposição, a toxicidade individual e combinada, além da possibilidade de seleção de resistência antimicrobiana. O monitoramento sistemático da qualidade da água, associado ao aprimoramento dos processos de tratamento, constitui, portanto, uma estratégia importante para reduzir a exposição humana e ampliar a segurança dos recursos hídricos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu reunir e analisar evidências recentes acerca da ocorrência, distribuição, comportamento ambiental, efeitos biológicos e riscos associados à presença de contaminantes farmacêuticos no ambiente. Os estudos analisados demonstram que esses compostos estão amplamente distribuídos em diferentes matrizes aquáticas, incluindo efluentes, águas superficiais, águas subterrâneas, ambientes estuarinos e, em menor frequência, água destinada ao consumo humano. Essa ampla ocorrência está relacionada principalmente ao consumo contínuo de medicamentos, à excreção de seus princípios ativos e metabólitos e à remoção incompleta durante os processos convencionais de tratamento de águas residuárias.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

Quanto às classes identificadas, destacaram-se analgésicos e anti-inflamatórios, antibióticos, anticonvulsivantes, estimulantes, antidepressivos e outros fármacos de uso terapêutico recorrente. Compostos como diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol, carbamazepina, cafeína, ciprofloxacino e sulfametoxazol foram frequentemente relatados, embora suas concentrações tenham apresentado ampla variação entre regiões e matrizes ambientais. Esses resultados evidenciam que a contaminação farmacêutica não apresenta um padrão único, sendo influenciada por fatores relacionados ao consumo, às condições de saneamento, às características ambientais e à eficiência dos sistemas de tratamento.

A análise do comportamento ambiental demonstrou que a permanência e a distribuição dos contaminantes são determinadas por suas propriedades físico-químicas e pela interação com as características do meio. Processos como sorção, fotodegradação, biodegradação e hidrólise podem contribuir para a transformação ou remoção dos compostos, mas apresentam eficiências distintas entre os diferentes fármacos. Além disso, a transformação das moléculas originais pode gerar produtos de transformação com propriedades e comportamentos ambientais diferentes, indicando que a redução da concentração do composto precursor não representa necessariamente a eliminação completa da contaminação.

Do ponto de vista ecológico, os contaminantes farmacêuticos apresentam potencial para provocar alterações em organismos não alvo, incluindo algas, microrganismos, invertebrados e peixes. Entre os efeitos relatados encontram-se alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas, além de estresse oxidativo e alterações relacionadas aos sistemas endócrino e metabólico. A exposição contínua a concentrações ambientalmente relevantes e a ocorrência simultânea de diferentes compostos tornam a avaliação ecotoxicológica particularmente complexa, uma vez que efeitos subletais e interações entre contaminantes podem comprometer processos ecológicos mesmo na ausência de mortalidade imediata.

Em relação à saúde humana, a presença de resíduos farmacêuticos em recursos hídricos destinados ao abastecimento representa uma preocupação emergente, principalmente diante da possibilidade de exposição crônica e à ocorrência de misturas de diferentes compostos. Entretanto, a literatura indica que a detecção de resíduos farmacêuticos não significa, por si só, a existência de risco elevado à população. A avaliação deve considerar as concentrações encontradas, as vias de exposição, a toxicidade dos compostos e o tempo de exposição. Entre as principais preocupações destacam-se os possíveis efeitos decorrentes da exposição

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

prolongada e, especialmente no caso dos antibióticos, a contribuição ambiental para processos relacionados à resistência antimicrobiana.

De maneira integrada, os resultados evidenciam que os contaminantes farmacêuticos constituem uma classe relevante de contaminantes emergentes devido à combinação entre ocorrência contínua, diversidade química, capacidade de transformação, persistência de determinados compostos e potencial de produzir efeitos em diferentes níveis de organização biológica. A problemática ultrapassa, portanto, a simples presença desses resíduos na água, envolvendo sua dinâmica entre os compartimentos ambientais, a formação de produtos de transformação, os efeitos sobre os ecossistemas e as possíveis vias de exposição humana.

Apesar dos avanços observados na literatura, permanecem lacunas relacionadas principalmente ao monitoramento de produtos de transformação, aos efeitos decorrentes da exposição crônica a baixas concentrações e aos impactos associados à exposição simultânea a múltiplos fármacos. Também são necessários estudos que ampliem a cobertura geográfica das investigações, especialmente em regiões com limitações de saneamento e monitoramento ambiental. Nesse sentido, pesquisas futuras devem priorizar abordagens integradas que associem análise química, avaliação ecotoxicológica e estimativa de risco à saúde humana.

Conclui-se, portanto, que o enfrentamento da contaminação farmacêutica requer ações articuladas de monitoramento ambiental, aprimoramento dos sistemas de tratamento de águas residuárias, avaliação contínua dos riscos e desenvolvimento de estratégias capazes de reduzir a entrada desses compostos nos ambientes naturais. A ampliação do conhecimento sobre a ocorrência e o destino dos contaminantes farmacêuticos constitui uma etapa fundamental para subsidiar políticas de gestão da qualidade da água e contribuir para a proteção dos ecossistemas e da saúde humana.

REFERÊNCIAS

ADEDipe, D. T. *et al.* Occurrence and potential risks of pharmaceutical contamination in global estuaries: a critical review and analysis. Environment International, v. 192, 109031, 2024. DOI: 10.1016/j.envint.2024.109031.

ANAND, U.; ADELODUN, B.; CABREROS, C. *et al.* Occurrence, transformation, bioaccumulation, risk and analysis of pharmaceutical and personal care products from wastewater: a review. Environmental Chemistry Letters, v. 20, p. 3883–3904, 2022. DOI: 10.1007/s10311-022-01498-7.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

ASHFIELD, N.; LI, J.; BOUZAS-MONROY, A.; BOXALL, A. B. A. Silent side effects: pharmaceuticals as contaminants of emerging concern. Annual Review of Environment and Resources, v. 50, p. 273–301, 2025. DOI: 10.1146/annurev-environ-111523-101837.

BAVUMIRAGIRA, J. P.; GE, J.; YIN, H. Fate and transport of pharmaceuticals in water systems: a processes review. Science of the Total Environment, v. 823, p. 153635, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153635.

CHAVES, M. D. J. S. *et al.* Updated knowledge, partitioning and ecological risk of pharmaceuticals and personal care products in global aquatic environments. Environmental Science: Processes & Impacts, v. 24, p. 1982–2008, 2022. DOI: 10.1039/D2EM00132B.

CODERRE, M. *et al.* Pharmaceuticals in drinking water: a scoping review to raise pharmacists' public health and environmental awareness on contamination in groundwater, surface water, and other sources. International Journal of Pharmacy Practice, v. 33, n. 4, p. 360–368, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/ijpp/riaf038.

GUETTAI, N. *et al.* Occurrence, analysis and removal processes of emerging pharmaceuticals from waters for the protection and preservation of a sustainable environment: a review. Journal of Cleaner Production, v. 466, 142654, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142654.

HEJNA, M.; KAPUŚCIŃSKA, D.; AKSMANN, A. Pharmaceuticals in the aquatic environment: a review on eco-toxicology and the remediation potential of algae. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 19, n. 13, 7717, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19137717.

LÖFFLER, P.; ESCHER, B. I.; BADUEL, C. *et al.* Antimicrobial transformation products in the aquatic environment: global occurrence, ecotoxicological risks, and potential of antibiotic resistance. Environmental Science & Technology, v. 57, n. 26, p. 9474–9494, 2023. DOI: 10.1021/acs.est.2c09854.

MADIKIZELA, L. M.; MOFOKENG, N. N.; CHIMUKA, L. What we know now: a comprehensive 5-year review (2020–2024) on the analysis, occurrence, and propagation of pharmaceuticals in African water resources and related biota. Chemistry Africa, v. 9, art. 17, 2026. DOI: 10.1007/s42250-025-01524-5.

MAZHANDU, Z.; MASHIFANA, T. Active pharmaceutical contaminants in drinking water: myth or fact? DARU Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 32, p. 925–945, 2024. DOI: 10.1007/s40199-024-00536-9.

MEZZELANI, M.; REGOLI, F. The biological effects of pharmaceuticals in the marine environment. Annual Review of Marine Science, v. 14, p. 105–128, 2022. DOI: 10.1146/annurev-marine-040821-075606.

MUAMBO, K. E. *et al.* Pharmaceuticals in raw and treated water from drinking water treatment plants nationwide: Insights into their sources and exposure risk assessment. Water Research X, v. 24, 100256, 2024. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100256.

ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

NARAYANAN, M.; KANDASAMY, S.; LEE, J.; BARATHI, S. Microbial degradation and transformation of PPCPs in aquatic environment: a review. Heliyon, v. 9, n. 8, e18426, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18426.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. Systematic Reviews, v. 10, n. 1, p. 89, 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4.

RODRIGUES, P. *et al.* Occurrence of pharmaceutical and pesticide transformation products in freshwater: update on environmental levels, toxicological information and future challenges. Environmental Sciences Europe, v. 34, n. 1, p. 14, 2022. DOI: 10.1007/s44169-022-00014-w.

SINGH, P. K.; RANJAN, N. Ecological impact of pharmaceutical pollutants and options of river health improvements – a risk analysis-based approach. Science of the Total Environment, v. 928, 172358, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172358.

WADA, O. Z.; OLAWADE, D. B. Recent occurrence of pharmaceuticals in freshwater, emerging treatment technologies, and future considerations: a review. Chemosphere, v. 374, 144153, 2025. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144153.

ZANNI, S. *et al.*Occurrence of pharmaceutical residues in drinking water: a systematic review. Environmental Science and Pollution Research, v. 32, p. 10436–10463, 2025. DOI: 10.1007/s11356-024-34544-8.