

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

PRESENÇA, IMPACTOS AMBIENTAIS E TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM
AMBIENTES AQUÁTICOS

Vitor Aurichio Mollica

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro - SP

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Vitor Aurichio Mollica

PRESENÇA, IMPACTOS AMBIENTAIS E TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro – SP
2026

M726p

Mollica, Vitor Aurichio

Presença, impactos ambientais e técnicas de remoção de fármacos em ambientes aquáticos / Vitor Aurichio Mollica. -- Rio Claro, 2026
55 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

1. Fármacos. 2. Ambientes aquáticos. 3. Técnicas de remoção. 4. Ecotoxicologia. 5. Poluentes emergentes. I. Título.

Vitor Aurichio Mollica

PRESENÇA, IMPACTOS AMBIENTAIS E TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

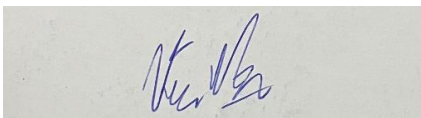
Comissão Examinadora

Marcelo Loureiro Garcia

Gabrielle Claudia de Moraes

Leonardo dos Santos Segantin

Rio Claro, 25 de junho de 2026



Assinatura do(a) Aluno(a)



Assinatura do(a) Orientador(a)

RESUMO

A presença de fármacos em ambientes aquáticos tem se consolidado como uma preocupação ambiental emergente devido à ampla ocorrência desses compostos em diferentes compartimentos ambientais e aos potenciais impactos associados à sua persistência no meio. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de revisão bibliográfica, a ocorrência de fármacos em ambientes aquáticos, seus impactos aos ecossistemas e à saúde humana, as principais técnicas de remoção empregadas em sistemas de tratamento de água e esgoto, bem como o panorama regulatório relacionado a esses compostos. A revisão evidenciou que a introdução de resíduos farmacêuticos no ambiente está associada principalmente ao lançamento de efluentes domésticos, hospitalares e industriais, ao descarte inadequado de medicamentos e às atividades agropecuárias. Entre os compostos mais frequentemente detectados destacam-se anti-inflamatórios, antibióticos e hormônios, cujos efeitos podem incluir alterações comportamentais, reprodutivas e fisiológicas. Em relação à saúde humana, as concentrações normalmente encontradas na água destinada ao consumo permanecem muito inferiores às doses terapêuticas, não havendo evidências de riscos imediatos, embora persistam incertezas quanto à exposição crônica. Quanto às tecnologias de remoção, verificou-se que sistemas convencionais apresentam eficiência variável, enquanto processos avançados como adsorção em carvão ativado, ozonização e processos de membranas, alcançam resultados superiores, porém com limitações econômicas para aplicação em larga escala. No âmbito regulatório, constatou-se a ausência de normativas e instrumentos de gestão diretos voltados aos fármacos e demais contaminantes emergentes na legislação brasileira. Em âmbito internacional, embora persistam lacunas regulatórias, observa-se iniciativas voltadas à priorização, monitoramento e avaliação desses compostos. Dessa forma, o enfrentamento dessa problemática depende da ampliação da coleta e tratamento de esgoto, bem como a modernização e adequação das estações já existentes. Quanto às políticas públicas, é necessário o fortalecimento de programas de monitoramento e consolidação de estratégias capazes de subsidiar a priorização de substâncias de maior preocupação ambiental, orientando futuras ações regulatórias e de controle.

Palavras-chave: Fármacos, Contaminantes emergentes, Ambientes aquáticos, Ecotoxicologia, Tratamento de água e esgoto, Legislação ambiental.

ABSTRACT

The presence of pharmaceuticals in aquatic environments has emerged as a growing environmental concern due to the widespread occurrence of these compounds in various environmental compartments and the potential impacts associated with their persistence in the environment. In this context, the objective of this study was to evaluate, through a literature review, the occurrence of pharmaceuticals in aquatic environments, their impacts on ecosystems and human health, the main removal techniques employed in water and wastewater treatment systems, as well as the regulatory landscape related to these compounds. The review showed that the introduction of pharmaceutical residues into the environment is mainly associated with the discharge of domestic, hospital, and industrial effluents, the improper disposal of medications, and agricultural activities. Among the most frequently detected compounds are anti-inflammatory drugs, antibiotics, and hormones, whose effects may include behavioral, reproductive, and physiological changes. Regarding human health, the concentrations typically found in drinking water remain well below therapeutic doses, with no evidence of immediate risks, although uncertainties regarding chronic exposure persist. With regard to removal technologies, it was found that conventional systems exhibit variable efficiency, while advanced processes such as activated carbon adsorption, ozonation, and membrane processes achieve superior results, albeit with economic limitations for large-scale application. In the regulatory sphere, it was found that Brazilian legislation lacks direct regulations and management tools specifically targeting pharmaceuticals and other emerging contaminants. Internationally, although regulatory gaps persist, initiatives aimed at prioritizing, monitoring, and evaluating these compounds are underway. Thus, addressing this issue depends on expanding sewage collection and treatment, as well as modernizing and upgrading existing treatment plants. With regard to public policy, it is necessary to strengthen monitoring programs and consolidate strategies capable of supporting the prioritization of substances of greatest environmental concern, thereby guiding future regulatory and control measures.

Keywords: Pharmaceuticals, Emerging contaminants, Aquatic environments, Ecotoxicology, Water and wastewater treatment, Environmental legislation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Possíveis rotas de fármacos no meio ambiente.....	13
Figura 2 - Estados brasileiros que possuem regulamentações para a avaliação ecotoxicológica de efluentes.....	29
Figura 3 - Número de publicações envolvendo o composto 17 β -estradiol ao longo dos anos.....	31
Figura 4 - Organograma da pesquisa ao referencial teórico.....	34
Figura 5 – Distribuição temática dos estudos selecionados para a revisão bibliográfica.....	35
Figura 6 - Síntese das relações entre fontes de contaminação, ocorrência, impactos e estratégias de controle associados aos fármacos em ambientes aquáticos.....	36
Figura 7 - Fármacos incluídos nas Watch Lists da União Europeia (2015-2025).....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 GERAL	11
2.2 ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Ocorrência de Fármacos em Ambientes Aquáticos	12
3.2 Classes de Fármacos	14
3.3 Impactos Ambientais e à Saúde Humana	16
3.3.1 Efeitos Ecotoxicológicos.....	17
3.3.2 Resistência Microbiana	20
3.3.3 Desregulação Endócrina.....	22
3.3.4 Riscos à Saúde Humana	23
3.4 Técnicas de Remoção de Fármacos	25
3.5 Legislação e Políticas Públicas	28
4.0 METODOLOGIA.....	33
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

Após a Segunda Guerra Mundial, novos compostos xenobióticos como produtos químicos industriais, agrotóxicos, conservantes e aditivos foram introduzidos em uma sociedade com crescimento desenfreado (TUNDISI, 2003). Nesse contexto, novas preocupações surgiram com relação aos impactos causados na saúde humana a longo prazo, ao mesmo tempo, na década de 70, tivemos nos Estados Unidos a primeira ocorrência de fármacos registrada no meio ambiente por (Keith et al., 1976). A partir de então, passou-se a compreender a real proporção dos impactos negativos causados pelos compostos xenobióticos.

Fent et al. (2006) alertam que a relação entre os chamados poluentes emergentes com seus respectivos impactos ambientais só foi possível com o desenvolvimento de técnicas analíticas que possibilitaram determinar a presença destes compostos polares. Esse progresso científico revelou-se essencial justamente em um período de forte expansão da indústria farmacêutica, que em 2023 alcançou um faturamento de R\$142 bilhões no Brasil, segundo a CMED. Nesse cenário, a preocupação ambiental não recai apenas sobre o volume de produção, mas principalmente sobre a persistência dos fármacos no ambiente, sua atividade biológica, toxicidade, bioacumulação e potencial de biodegradação (CAMINADA et al., 2021).

De acordo com Golet et al. (2002), estima-se que cerca de 100 mil substâncias químicas diferentes tenham sido registradas na União Europeia, das quais aproximadamente 30 mil são comercializadas em quantidades superiores a uma tonelada, incluindo compostos farmacêuticos de uso humano, como analgésicos, anti-inflamatórios, preservativos, antibióticos e reguladores de lipídios. Nesse mesmo contexto, Abreu (2014) destaca que a maior parte dos medicamentos é excretada pela urina, sendo este efluente parcialmente tratado pelas redes de esgoto municipais ou lançado integralmente em corpos d'água.

Além disso, Halling-Sorensen et al. (1998) relatam que uma parcela expressiva, entre 70% e 80%, dos fármacos de uso veterinário administrados em propriedades rurais acabam sendo liberados no ambiente. Esse quadro de contaminação é observado em diferentes ecossistemas, e, segundo Bila e Dezotti (2003), pode ocorrer por meio da lixiviação de resíduos de origem farmacêutica em aterros sanitários, da aplicação de esterco e lodo de esgoto na agricultura ou, de forma mais significativa, pela presença desses compostos em águas superficiais e residuárias.

Entre os grupos de fármacos, alguns merecem maior atenção em razão de seus impactos ambientais. Kummerer et al. (1997) ressalta a relevância dos antibióticos e hormônios,

destacando que os primeiros, embora essenciais no combate a infecções, favorecem o surgimento de cepas bacterianas resistentes, como observado por McKeon et al. (1995), que identificaram resistência da espécie *Escherichia coli* isolada de águas subterrâneas em relação a 16 antibióticos diferentes. Já os hormônios podem provocar alterações fisiológicas em organismos expostos, resultando em características sexuais atípicas, como intersexo e hermafroditismo em determinadas espécies.

Segundo a USEPA (2009), a chegada de fármacos e desreguladores endócrinos às redes de coleta de esgoto pode ocorrer pelo despejo de águas cinzas, provenientes de atividades domésticas como banhos, lavagem de roupas e uso de lavatórios, bem como pelas águas negras, resultantes da excreção de indivíduos que ingeriram medicamentos ou hormônios naturais. Além disso, o descarte inadequado de medicamentos vencidos ou não utilizados em instalações sanitárias constitui outra via relevante de contaminação. Adicionalmente, temos o agravamento da ineficiência das estações de tratamento de esgoto. Segundo Jordão (2002), o tratamento de efluentes é essencial para eliminar os agentes patogênicos, tornando a água segura para consumo humano e evitando surtos de doenças infecciosas, entretanto, a realidade converge desse papel, a despadronização presente nos processos de tratamentos das Estações de Tratamento torna a remoção dos fármacos um grande desafio.

Além dos desafios técnicos, no âmbito regulatório, observa-se que a legislação brasileira apresenta limitações quanto ao estabelecimento de critérios de qualidade para contaminantes emergentes. Nesse sentido, Montagner et al. (2017) destacam que, mesmo para compostos amplamente discutidos, como os pesticidas, cerca de 93% das substâncias autorizadas para uso no Brasil não são contempladas por legislação federal específica de restrição e controle. Diante desse cenário, a ausência de limites estabelecidos para a presença de compostos farmacológicos em águas superficiais e subterrâneas dificulta o monitoramento e avaliação dos impactos.

Na falta destas informações surgem questionamentos como: Quais os reais efeitos dos compostos farmacêuticos sob a saúde humana, e sob os ecossistemas aquáticos? Quais as principais técnicas de remoção de fármacos? Qual a viabilidade econômica dessas técnicas no contexto nacional? Quais políticas públicas podem ser implementadas para conter essa problemática?

Diante da repercussão recente gerada pelo tema, novos estudos vêm sendo conduzidos anualmente. Frente a necessidade de entender os impactos causados pelos fármacos no meio, esta pesquisa buscou, por meio de uma revisão bibliográfica, unir e sistematizar informações sobre o real impacto dos resíduos farmacológicos em ambientes aquáticos, contribuindo nas discussões sobre as alternativas e perspectivas futuras.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar, por meio da revisão da literatura, a ocorrência de fármacos em ambientes aquáticos e seus impactos à saúde humana e aos ecossistemas, bem como contribuir para o debate científico acerca das estratégias mais adequadas de remoção e prevenção dessas substâncias nos ecossistemas aquáticos e na água destinada ao consumo humano.

2.2 ESPECÍFICOS

- Encontrar métodos de remoção de fármacos que apresentem eficiência para ambos os grupos de compostos, e que possam ser viáveis no contexto socioeconômico brasileiro.
- Identificar os principais desafios e lacunas de pesquisa na área, com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento de estudos futuros.
- Concretização de dados a respeito das concentrações tóxicas destas substâncias, de forma a fornecer dados técnicos para a formulação de políticas públicas
- Analisar as políticas públicas e a legislação vigente no Brasil e em âmbito internacional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OCORRÊNCIA DE FÁRMACOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

A presença de fármacos em ambientes aquáticos tem sido amplamente reportada nas últimas décadas, sendo frequentemente detectados em concentrações traço (inferiores a $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ em águas ou menores que $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ em solos, sedimentos e material biológico), que os caracteriza como microcontaminantes. A literatura geralmente inclui esses compostos na categoria de poluentes emergentes, devido à falta de regulamentação específica e potencial risco ambiental associado. Além disso, um subconjunto dos fármacos atua como disruptores endócrinos, sendo capazes de interferir no sistema hormonal de organismos expostos, tais como hormônios sintéticos. Estes conceitos são amplamente aplicados a diferentes classes terapêuticas como anti-inflamatórios, antidepressivos, antipsicóticos, antibióticos e anticoncepcionais, o que reflete a complexidade conceitual envolvida na classificação desses compostos na literatura científica (AQUINO et al., 2013; FENT et al., 2006; TORRES et al., 2012).

Após sua administração, os fármacos são parcialmente metabolizados no organismo para a finalidade pretendida e posteriormente excretados, entretanto, uma fração significativa pode ser excretada na forma inalterada (BILA e DEZOTTI, 2003). Esses compostos podem atingir o meio ambiente por diversas maneiras, destacando-se o esgoto doméstico, como principal fonte de contaminação, que ocorre tanto pela permanência destes compostos durante a eliminação urinária ou fecal, como pelo descarte inadequado de medicamentos diretamente na rede coletora. Fontes adicionais de contaminação estão presentes em efluentes hospitalares e industriais, nas atividades agropecuárias, através do uso de fármacos veterinários, e aplicação de esterco e de lodo como fertilizantes (UEDA et al., 2009).

A introdução, permanência e bioacumulação dos fármacos no meio ambiente pode ser observada através da Figura 1.

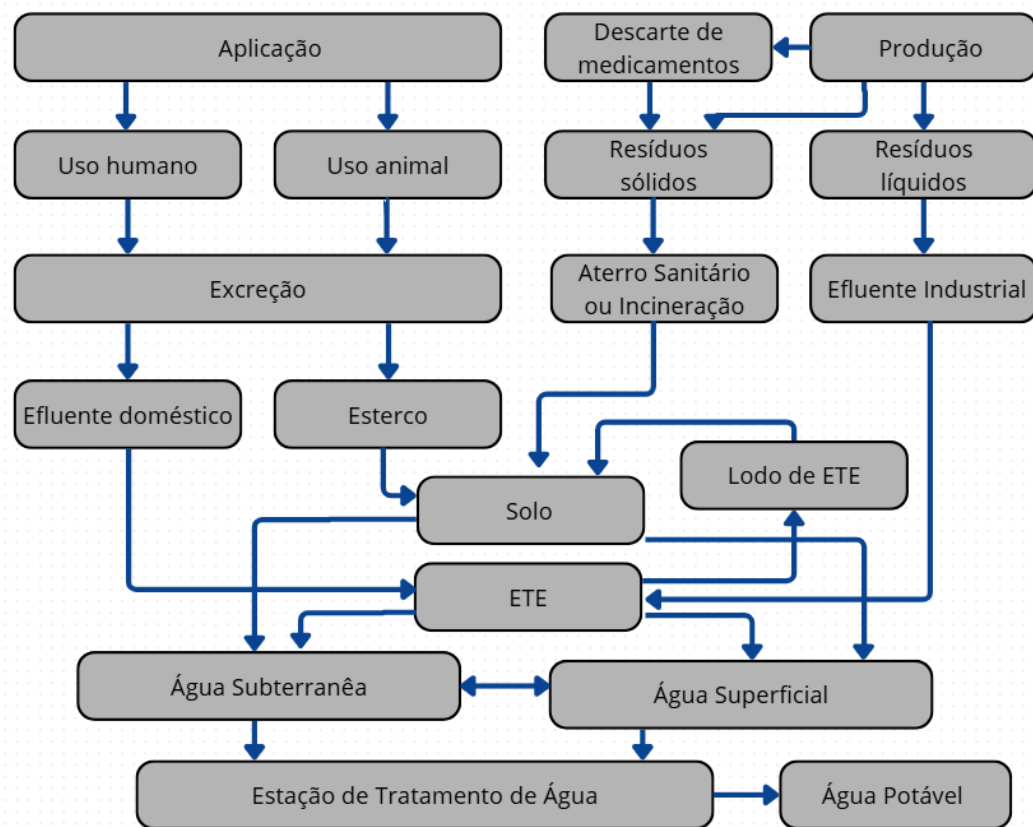


Figura 1 - Possíveis rotas de fármacos no meio ambiente

Fonte: Autor, 2026

A dinâmica apresentada no organograma evidencia que a ocorrência desses compostos no ambiente decorre de processos contínuos de transporte, transformação e redistribuição no meio. Nesse contexto, os fármacos podem ser encontrados em diferentes matrizes ambientais, e a identificação dessa distribuição possibilita uma aplicação mais direcionada de esforços para a delimitação dos reais impactos associados à sua presença. Segundo Sims e Kasprzyk-Hordern (2020) as águas superficiais têm se configurado como a principal fonte de micropoluentes no ambiente aquático, principalmente em regiões próximas a centros urbanos, que possuem contaminação proveniente de águas residuárias municipais.

Adicionalmente, as águas superficiais recebem aportes de microcontaminantes provenientes do solo, resultantes de práticas como a aplicação de esterco como fertilizante, o uso de lodo como adubo orgânico na agricultura e atividades agropecuárias, incluindo hormônios em rações e utilização rural de antibióticos. Sob condições de recarga, os resíduos de compostos farmacológicos podem ser lixiviados, contaminando corpos d'água superficiais e, potencialmente, de aquíferos subterrâneos (AMÉRICO et al., 2013; BILA e DEZOTTI, 2003).

Nesse contexto, a ocorrência dessas substâncias no ambiente está diretamente relacionada às concentrações de entrada no meio e às propriedades físico-químicas dos compostos. FENT et al. (2006) apontam que compostos farmacológicos, devido a sua persistência e natureza bioativa, apresentam potencial de bioacumulação em organismos aquáticos, contribuindo para efeitos crônicos ao longo do tempo, mesmo que em baixas concentrações. Esse cenário se torna ainda mais preocupante no Brasil, apesar do menor volume de dados, autores como Ghiselli e Jardim, (2007) e Souza (2011) identificaram concentrações de fármacos e disruptores endócrinos nas águas superficiais, em sua maioria, superiores aos países com estruturas sanitárias mais consolidadas, como EUA, Canadá, Alemanha e Espanha.

Em contrapartida, Zhang, Geissen e Gal (2008) indicam que países desenvolvidos, como os anteriormente citados, apresentam níveis de consumo de fármacos entre três e dez vezes superiores aos observados em países em desenvolvimento. Sob essa perspectiva, seria esperado que maiores concentrações desses compostos fossem observadas nos esgotos brutos dessas regiões. No entanto, a variabilidade das concentrações ambientais não está associada exclusivamente ao padrão de consumo, sendo influenciada por outros fatores determinantes. Dentre eles, destacam-se a eficiência das Estações de Tratamento de Esgoto (TERNES, 1998), que pode limitar a remoção desses contaminantes, as propriedades físico-químicas dos compostos, responsáveis por condicionar sua persistência e distribuição ambiental (FENT et al., 2006), e fatores sazonais, como variações no regime de chuvas, que influenciam processos de lixiviação e a vazão dos corpos hídricos, afetando a diluição dos contaminantes (AMÉRICO et al., 2013).

Dessa forma, a ocorrência de fármacos no ambiente aquático resulta da interação entre múltiplos fatores, o que explica as diferenças observadas entre distintas regiões e contextos sanitários. Nesse contexto, a diversidade de compostos presente no ambiente implica em diferentes potenciais de impacto, sendo necessário uma abordagem específica para diferentes classes de fármacos, das quais, serão analisadas em maior profundidade nos capítulos subsequentes.

3.2 CLASSES DE FÁRMACOS

De acordo com a Resolução RDC nº 222 de 2018 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde (RSS), os resíduos farmacêuticos se enquadram como grupo B (resíduos com risco químico) (BRASIL, 2018), sendo em geral, classificados como resíduos Classe I – Perigosos, de acordo com a norma ABNT NBR 10004/2004. Entretanto, nem todo

fármaco no ambiente é proveniente dos RSS corretamente classificados. Em estudo realizado por Ueda (2009), 88,6% dos entrevistados descartam resíduos farmacêuticos no lixo comum, enquanto 9,2% realizam o descarte diretamente na rede de esgoto, contribuindo significativamente para a introdução desses compostos no ambiente aquático, conforme discutido anteriormente.

Diante da elevada diversidade de compostos farmacológicos continuamente introduzidos no ambiente, torna-se necessária a adoção de critérios de classificação que considerem tanto o uso terapêutico quanto a relevância ambiental dessas substâncias. Essa abordagem permite identificá-los em função de sua frequência de ocorrência e dos potenciais impactos associados. Estudos como o de Martin et al. (2021) indicam que os compostos mais investigados, pertencem majoritariamente, aos grupos terapêuticos do sistema nervoso, (analgésicos, ansiolíticos, antidepressivos), seguidos pelo sistema cardiovascular (anti-hipertensivos, diuréticos, cardiotônicos,) e aqueles associados ao metabolismo (hipoglicemiantes, insulina, hormônios tireoidianos).

Contudo, para fins de análise ambiental, determinados grupos apresentam maior destaque na literatura devido a seus impactos ambientais e efeitos ecotoxicológicos específicos, como é o caso dos anti-inflamatórios, antibióticos e dos compostos com atividade desreguladora endócrina. Dentre esses grupos, destacam-se inicialmente os anti-inflamatórios, que constituem uma das classes farmacológicas mais frequentemente detectadas em ambientes aquáticos. Esses compostos, em especial os anti-inflamatórios não esteroidais (AINEs), definidos como medicamentos utilizados na redução da inflamação, dor e febre (NCBI, 2024), como diclofenaco, ibuprofeno e naproxeno, são frequentemente encontrados em concentrações às de outros compostos analisados, como observado no estudo de Américo, (2010) realizado no estado do Mato Grosso do Sul. Em menores concentrações, a autora também destaca a presença recorrente do paracetamol, frequentemente identificado na literatura.

Podemos relacionar a ocorrência desses compostos às suas propriedades físico-químicas. Em geral, essas substâncias apresentam coeficientes de partição octanol-água (Log Kow) elevados, caracterizando-as como substâncias lipofílicas, o que reduz sua solubilidade em água e favorece a associação com fases sólidas. Desse modo, são observadas concentrações mais elevadas em sedimentos, considerados compartimentos ambientais mais favoráveis à sua acumulação (SILVA, 2017; SOUZA, 2014). Adicionalmente, essa afinidade por fases orgânicas pode favorecer a acumulação dessas substâncias em tecidos biológicos ricos em lipídeos, contribuindo para a bioacumulação ao longo da cadeia alimentar, resultando na ocorrência de efeitos ecotoxicológicos (GONÇALVES, 2012).

Assim como os anti-inflamatórios, os antibióticos e muitos hormônios são caracterizados como substâncias lipofílicas, sendo encontrados em sedimentos, em concentrações da ordem de $\mu\text{g/kg}$, superiores às concentrações na faixa de ng/kg , comumente observadas em ecossistemas aquáticos (BEAUSSE, 2004). Dentre os principais subgrupos de antibióticos investigados, a literatura aponta maior ocorrência para as sulfonamidas, macrolídeos e fluoroquinolonas. Compostos clássicos e amplamente utilizados como a amoxicilina, penicilina e cefalexina constituem o subgrupo dos beta-lactâmicos, que, apesar de constituírem de 50 a 70% do consumo de antibióticos em humanos para alguns países, apresentam baixa estabilidade devido à presença do anel β -lactâmico, consequentemente, tendem a ser menos persistentes e, em muitos casos, menos tóxicos quando comparados a outras subclasses (KÜMMERER, 2009).

Para além dos efeitos ecotoxicológicos diretos, a presença contínua desses compostos em ambientes aquáticos pode favorecer a seleção de bactérias resistentes, conforme identificada por MCKEON et al. (1995), que observaram a ocorrência de bactérias resistentes a antibióticos em águas subterrâneas. De maneira análoga, outras substâncias que geram impactos e vão além da toxicidade convencional são os compostos com atividade desreguladora endócrina. Embora não sejam classificados estritamente como um subgrupo de fármacos, destacam-se os hormônios naturais e sintéticos, como o 17β -estradiol, a estrona e o 17α -etinilestradiol, amplamente utilizados em anticoncepcionais e terapias de reposição hormonal (CUNHA et al., 2016). A principal preocupação associada a esses compostos reside em sua elevada atividade biológica, sendo capazes de causar alterações hormonais em espécies aquáticas mesmo que em doses extremamente baixas (FILHO, 2007).

De forma complementar, existem outros compostos que não se enquadram diretamente nos subgrupos abordados, entretanto, sua ocorrência e impactos são amplamente reconhecidos como indicadores de contaminação antrópica, a exemplo da cafeína, carbamazepina e metabólitos de drogas ilícitas como a cocaína (CAMILO, et al., 2016, FELIPPE, 2018., FERRARI, et al., 2003). Nesse contexto, os potenciais efeitos adversos sobre organismos aquáticos e, potencialmente sobre a saúde humana, justifica uma análise mais aprofundada a respeito de seus impactos.

3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS E À SAÚDE HUMANA

Um dos principais desafios associados à presença de fármacos em ambientes aquáticos reside na dificuldade de estabelecer relações causais diretas entre substâncias específicas e os impactos ambientais observados. Embora a detecção desses compostos em matrizes ambientais

tenha avançado significativamente nas últimas décadas, com o emprego de técnicas analíticas sensíveis, como a extração em fase sólida associada à cromatografia líquida (TORRES et al., 2012), a interpretação de seus efeitos apresenta limitações. Diferentemente de estudos conduzidos em laboratório, sob condições controladas, no ambiente natural os organismos estão expostos simultaneamente a múltiplos contaminantes, dificultando a identificação de impactos crônicos e o estabelecimento de relações dose-resposta consistentes (FENT et al., 2006; HALLING-SØRENSEN et al., 1998). Diante disso, os subtópicos a seguir aprofundam os principais efeitos associados à presença de fármacos em espécies aquáticas, e os potenciais riscos à saúde humana.

3.3.1 Efeitos Ecotoxicológicos

Uma vez inseridos nos ecossistemas aquáticos, esses compostos podem desencadear respostas biológicas decorrentes de seus mecanismos de ação farmacológica. Com exceção dos antibióticos, os fármacos são desenvolvidos para modificar funções fisiológicas e comportamentais específicas, o que lhes confere elevada capacidade de interferência em processos celulares, metabólicos e enzimáticos de organismos não-alvo, mesmo que em baixas concentrações. Considerando que esses processos moleculares ocorrem nos mais diversos organismos ao longo das diferentes cadeias tróficas, a chance de serem expostos involuntariamente por esses compostos, aumenta proporcionalmente conforme o uso intensivo e contínuo de fármacos (ARNOLD et al., 2014; FABBRI e FRANZELLITTI, 2015).

Dessa forma, os efeitos ecotoxicológicos estão associados à exposição ambiental aos fármacos, seja na sua forma individual, em mistura com outras substâncias, ou pela geração de metabólitos decorrentes de processos de transformação no meio (KOCK et al., 2023). Além disso, cada composto apresenta um determinado grau de toxicidade, de modo que, a relação entre concentração e efeito não é necessariamente linear, sendo a magnitude da resposta dependente das propriedades e do modo de ação de cada substância. (VILLAIN et al., 2016). Essa variabilidade também se reflete na sensibilidade entre diferentes grupos de organismos aquáticos, sendo observado, por exemplo, que algas marinhas apresentam maior suscetibilidade à exposição a antibióticos sulfonamídicos, seguidas por crustáceos e peixes (DUAN et al., 2022).

Autores como Feijão et al., (2020) ressaltam que essa maior sensibilidade de organismos pertencentes a base da cadeia trófica pode ocasionar maior impacto na saúde do ecossistema aquático, uma vez que a redução na biomassa de produtores primários pode resultar na diminuição da fonte de alimento e na redução do oxigênio primário. Em estudo realizado com

diatomáceas, microalgas responsáveis por cerca de 20 a 50% do oxigênio produzido no planeta, foi constatado aumento da mortalidade e diminuição de diversidade quando expostas a altas concentrações de fármacos (KOCK et al., 2023). A partir desses resultados, evidencia-se uma ampla gama de respostas biológicas desencadeadas pela exposição a fármacos, podendo afetar organismos de diferentes níveis tróficos, alterando processos comportamentais e reprodutivos, podendo comprometer o equilíbrio do ecossistema (SARDAR et al., 2025).

Nesse cenário, diversos estudos experimentais têm demonstrado alterações fisiológicas e comportamentais em diferentes organismos aquáticos quando expostos a fármacos. Brand et al., (2024), por exemplo, observaram que concentrações ambientalmente realistas da substância termozepam, utilizado para insônia, podem alterar a dinâmica de movimento, comprometendo o sucesso migratório da truta marrom. Jacob et al., (2021) ressalta que em resposta a estímulos químicos no meio, muitas espécies se dispersam como mecanismo de resposta natural à contaminação, o que, do ponto de vista ecológico, pode contribuir para o declínio populacional. Além de alterações comportamentais, também foram reportados efeitos sobre o desenvolvimento de organismos. Nowakowska et al., (2020) observaram o aumento da taxa de desenvolvimento anormal de embriões e larvas de peixe zebra, espécie amplamente utilizada como modelo experimental em testes ecotoxicológicos.

Além dos estudos discutidos, a Tabela 1 reúne pesquisas ecotoxicológicas representativas da literatura, sintetizando organismos-testes, concentrações de exposição e os principais efeitos observados em diferentes níveis tróficos:

Fármaco	Organismo	Concentração	Efeito ecotoxicológico	Referência
Fluoxetina	Medaka japonês (<i>Oryzias latipes</i>)	5 µg/L	Alteração reprodutiva	Foran et al., 2004
Ibuprofeno	Ouriço-do-mar (<i>Paracentrotus lividus</i>)	1 – 15000 ng/L	Toxicidade embrio-larval	Martinez et al., 2015
Carbamazepina	Ameijoia japonesa (<i>Ruditapes philippinarum</i>)	0,03 – 9,00 µg/L	Estresse oxidativo	Almeida et al., 2014
Eritromicina	Microalga	3,1 µg/L	Inibição do crescimento	Yamashita et al., 2006

	<i>(Pseudokirchneriella subcapitata)</i>			
Propanolol	Pulga d'água (<i>Ceriodaphnia dubia</i>)	9 µg/L	Alteração reprodutiva	Ferrari et al., 2004
Diclofenaco	Mexilhão azul (<i>Mytilus edulis trossulus</i>)	100 µg/L	Redução do escopo do crescimento	Ericson et al., 2010
17α-etinilestradiol	Rã-de-unhas-africanas (<i>Xenopus laevis</i>)	0,296 ng/L	Alteração no comportamento reprodutivo	Hoffman e Kloas., 2015
Amoxicilina	Cianobactéria (<i>Microcystis aeruginosa</i>)	100 – 300 ng/L	Estímulo a atividade fotossintética e produção de microcistina	Liu et al., 2016

Tabela 1 - Síntese de estudos ecotoxicológicos envolvendo a exposição de organismos

Fonte: Autor, 2026

De maneira geral, os dados apresentados evidenciam que a exposição a resíduos farmacológicos pode ocasionar respostas biológicas distintas entre organismos de diferentes táxons e níveis tróficos, expostos a diferentes concentrações e substâncias. Entre os efeitos observados, destacam-se alterações comportamentais, reprodutivas, fisiológicas e no desenvolvimento embrionário, evidenciando que diferentes faixas de concentrações, incluindo níveis ambientalmente relevantes, podem desencadear alterações biológicas. Diante dessa diversidade de respostas observadas entre os organismos aquáticos, torna-se necessária a utilização de metodologias capazes de quantificar os efeitos tóxicos associados à exposição a esses compostos.

Portanto, para o estabelecimento de valores tóxicos para cada espécie utilizam-se os ensaios ecotoxicológicos, destacando-se os ensaios de toxicidade aguda (alta exposição a curto prazo) e crônica (baixa exposição a longo prazo). No Brasil, esses testes são padronizados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e utilizados por órgãos ambientais como a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo) em

programas de controle ecotoxicológico (POMPÈO et al., 2015; BERTOLETTI, 2013). Entretanto, observou-se uma predominância de estudos voltados à toxicidade aguda, em detrimento de investigações envolvendo doses terapêuticas com exposição a longo prazo, o que acarreta numa dificuldade em compreender os riscos ecológicos associados à presença contínua desses compostos no meio (KOCK et al., 2023).

Apesar dos avanços obtidos nas últimas duas décadas, seja na universalização dos métodos de quantificação desses compostos, quanto nas diversas ocorrências em organismos testados e naturalmente afetados, ainda há uma falta de conhecimento sobre as consequências ambientais que essas substâncias podem causar ao ecossistema. Há um esforço enorme para caracterizar o comportamento químico e toxicidade de cada composto para diferentes compartimentos ambientais (MARTINEZ-HARO et al., 2015). A princípio, o ambiente natural e as interações sociais de muitas espécies podem ser complexas, apresentando multifatores não aplicáveis para testes em laboratório (MARTIN et al., 2025). Além da complexidade dos comportamentos sociais, o autor ressalta relatos inadequados de metodologia e uso de métodos não padronizados, a diferença de resposta entre animais capturados na natureza e criados em laboratório, bem como, o fato de muitas pesquisas relacionadas ao tema terem como objetivo questões médicas e não ambientais.

Por fim, apesar dos avanços analíticos e ecotoxicológicos que possibilitaram uma melhor compreensão acerca dos efeitos desses compostos no ambiente aquático, grande parte dos estudos reforça as dificuldades para o estabelecimento de diretrizes regulatórias específicas, em decorrência das lacunas científicas relacionadas, principalmente, aos efeitos da exposição contínua e da interação de múltiplas substâncias no meio. Todavia, algumas problemáticas como a resistência bacteriana e a disrupção endócrina vêm sendo amplamente discutidas, tanto no meio acadêmico, quanto no âmbito regulatório. Isso implica em uma análise mais específica acerca de suas particularidades e implicações ambientais.

3.3.2 Resistência Microbiana

Com o avanço dos estudos associados a presença de antibióticos no ambiente aquático, a problemática deixou de ser um problema clínico para assumir uma dimensão ambiental. Nessa problemática, temos o conceito de resistoma, que é o conjunto de genes de resistência antimicrobiana existentes em determinado local, fator que possibilita a competição e comunicação de micro-organismos em um determinado ambiente e permite uma maior flexibilidade para explorar diversos ambientes promovendo sua patogenicidade (D’COSTA et al., 2006; PIDDOCK, 2006). A preocupação em torno desse fenômeno deve-se à presença de

concentrações subletais nos ecossistemas aquáticos, fator que condiciona uma pressão seletiva sobre comunidades microbianas, favorecendo a sobrevivência, proliferação e disseminação de bactérias resistentes e genes de resistência antimicrobiana no ambiente. (KÜMMERER, 2009; DANTAS, 2025).

Segundo Kümmerer (2009), a contaminação por bactérias resistentes tem sido frequentemente associada ao lançamento de efluentes domésticos, hospitalares e agropecuários. Na União Europeia estima-se que 50% dos antibióticos sejam destinados à medicina veterinária, ao mesmo tempo que, 70% dos antibióticos consumidos são excretados na sua forma inalterada (EUROPEAN FEDERATION OF ANIMAL HEALTH, 2001). Esses dados evidenciam como as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) atuam como importantes reservatórios e pontos de disseminação de genes de resistência antimicrobiana, sobretudo devido à alta contribuição de matéria orgânica, tornando esses sistemas ambientais propícios para a adaptação bacteriana (PAULSHUS et al., 2019). Adicionalmente, a remoção parcial desses compostos durante o tratamento favorece a permanência nos efluentes lançados no meio, contribuindo para a exposição contínua de comunidades bacterianas.

Os riscos associados, para além da disseminação de bactérias patogênicas resistentes, estão voltados às alterações ecológicas em comunidades microbianas fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas. Isso ocorre devido ao papel desempenhado por essas comunidades na manutenção da qualidade do solo e da água, estando diretamente envolvidas no ciclo biogeoquímico e na degradação de contaminantes orgânicos (GRENNI et al., 2018). Sendo assim, os antibióticos podem atuar como um fator ecológico no meio, estando relacionados à redução da biodiversidade microbiana e à alteração no crescimento e das atividades enzimáticas de comunidades bacterianas (PALLECCHI et al., 2008). Organismos anteriormente discutidos, como as diatomáceas e microalgas, além de biofilmes aquáticos, bactérias nitrificantes e espécies como *Vibrio fischeri* e *Escherichia coli* são diretamente afetados (GRENNI et al., 2018).

Essas comunidades microbianas estão diretamente envolvidas em processos naturais de autodepuração no corpo hídrico, de forma que sua desestabilização no ambiente pode não apenas comprometer a degradação de poluentes, mas também impactar processos como transformação do nitrogênio, desnitrificação, metanogênese e degradação da matéria orgânica. Como exemplo, Hou et al., (2014), De maneira semelhante, Proia et al. (2016), ao analisarem a ocorrência ambiental de sulfametazina em mistura com outras três classes de antibióticos, observaram que biofilmes coletados a jusante de Estações de Tratamento de Esgoto

apresentaram aumento significativo de genes de resistência antimicrobiana, evidenciando o potencial desses compartimentos como reservatórios ambientais do resistoma.

A relevância dos biofilmes nesse contexto está relacionada ao fato de essas estruturas constituírem comunidades microbianas altamente organizadas, responsáveis pela ciclagem de nutrientes, degradação de matéria orgânica e manutenção da qualidade da água (FLEMMING e WINGENDER, 2010). Em ambientes aquáticos, a *Escherichia coli*, principal indicador de contaminação fecal, é um exemplo frequente de bactéria associada a biofilmes contaminados por esgoto, no qual o estudo de Skof et al., (2024) identificou essa particularidade em leitos de rios, que obtiveram perfis de resistência mais elevados do que populações isoladas diretamente da coluna d'água, evidenciando o potencial desses compartimentos como importantes hotspots do resistoma.

Por fim, a resistência microbiana não se limita à seleção de bactérias patogênicas, mas está relacionada a alterações ecológicas complexas e a persistência ambiental do resistoma. Indiretamente há riscos à saúde humana através da transferência dos genes de resistência para bactérias patogênicas em diversos compartimentos ambientais. Diante dessas problemáticas, medidas regulatórias adotadas em alguns países europeus, especialmente relacionadas ao uso veterinário restrito de antibióticos, evidenciam a crescente preocupação internacional com a disseminação ambiental da resistência antimicrobiana (KÜMMERER, 2009; EUROPEAN FEDERATION OF ANIMAL HEALTH, 2001).

3.3.3 Desregulação Endócrina

Outros compostos que vão além da toxicidade convencional são os chamados disruptores endócrinos. Sua principal preocupação reside em sua elevada atividade biológica, sendo capazes de causar alterações hormonais em espécies aquáticas mesmo que em baixas concentrações (BILA e DEZOTTI, 2007). Diferentemente dos efeitos tóxicos associados à mortalidade ou redução do crescimento, esses compostos atuam diretamente sobre receptores hormonais relacionados ao sistema endócrino e podem ser agonistas, antagonistas ou modulares seletivos de receptores hormonais, influenciando o metabolismo de hormônios naturais (VANDENBERG et al., 2012).

Dentre o subconjunto de fármacos que atuam como disruptores endócrinos, tanto os hormônios naturais como os sintéticos alteram significativamente a síntese e a metabolização dos hormônios naturais do corpo. De maneira geral, essa alteração sobre os receptores hormonais pode alterar processos de síntese, transporte, biodisponibilidade e metabolização hormonal, modificando o equilíbrio endócrino de organismos expostos. Como consequência,

diversos estudos apontam alterações reprodutivas e no desenvolvimento de organismos aquáticos, incluindo feminilização, intersexo e comprometimento da fertilidade, impactando diretamente a dinâmica populacional de espécies aquáticas (BILA e DEZOTTI., 2007).

Adicionalmente, a ocorrência de efeitos em concentrações em ng/L, abaixo das concentrações tradicionalmente consideradas seguras, eleva o grau de preocupação quanto a ocorrência no meio. Estudos como o de Irwin et al (2001) identificaram indução da síntese de vitelogenina (VTG), proteína precursora do vitelo utilizada como biomarcador de exposição estrogênica, em tartarugas da espécie tartaruga-pintada (*Chrysemys picta*) expostas a concentrações ambientalmente relevantes de estradiol. De maneira semelhante, Chen et al. (2018) observaram incidência de hermafroditismo em peixes machos expostos ao 17 β -estradiol também em concentrações de ocorrência ambiental. Esses efeitos reforçam a sensibilidade do sistema endócrino de espécies aquáticas, podendo comprometer a dinâmica ecológica dos ecossistemas.

Outra divergência comparada à ecotoxicologia tradicional é a presença de relações dose-resposta não monotônicas, nas quais baixas doses podem causar efeitos mais intensos do que doses mais altas (VANDENBERG et al., 2012). Portanto, além das dificuldades convencionais de mensurar os impactos causados no ambiente por fármacos, a não relação com modelos lineares entre dose e resposta dificulta ainda mais a avaliação dos efeitos associados à exposição crônica desses compostos. Mesmo em concentrações ambientalmente relevantes, diversos estudos registram alterações hormonais, reprodutivas e no desenvolvimento de organismos aquáticos, evidenciando limitações dos modelos toxicológicos convencionais utilizados para determinação de concentrações seguras. Nesse contexto, a Organização Mundial da Saúde ressalta que para o avanço das regulamentações, são necessários esforços interdisciplinares envolvendo estudos de animais selvagens, animais experimentais e seres humanos (UNEP; WHO, 2012).

3.3.4 Riscos à Saúde Humana

A respeito dos potenciais riscos associados à presença de fármacos na água destinada ao consumo humano, a literatura científica aponta um cenário marcado por incertezas, limitações metodológicas e escassez de estudos conclusivos. Apesar da vasta ocorrência de diferentes fármacos em águas superficiais, as concentrações identificadas em água potável tratada geralmente permanecem inferiores a 0,05 $\mu\text{g/l}$ (50 ng/l) (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). Mesmo nos maiores valores já reportados na literatura, como concentrações de até 400 ng/l de fenazona detectadas em águas de abastecimento em Berlim,

os níveis observados permaneceram muito inferiores às concentrações capazes de produzir efeitos farmacológicos em humanos (REDDERSEN, HEBERER e DÜNNBIER, 2002).

Nesse contexto, conforme o relatório World Health Organization publicado em 2012, a principal discussão voltada à saúde humana não está relacionada a efeitos agudos imediatos, mas às incertezas decorrentes da exposição crônica e contínua a misturas complexas de contaminantes emergentes. Além disso, ainda existe uma escassez de dados acerca dos potenciais riscos à saúde humana associados a diversos grupos farmacêuticos de uso humano e veterinário atualmente em uso. O relatório também ressalta que grande parte dos países não possui programas rotineiros de monitoramento de produtos farmacêuticos em água potável em razão do alto custo e limitações de infraestrutura, de modo que, a maior parte dos dados disponíveis é decorrente de projetos de pesquisa específicos.

Mesmo com essas limitações científicas, a literatura e os órgãos regulatórios avançaram significativamente na última década. Um exemplo disso foi a reformulação da Diretiva Europeia de Água Potável em 2020/2021, que passou a incorporar contaminantes emergentes, como disruptores endócrinos, PFAS e microplásticos como substâncias prioritárias para o monitoramento e avaliação de risco (EUROPEAN COMMISSION, 2020). De maneira semelhante, os Estados Unidos ampliaram recentemente a atenção regulatória voltada aos contaminantes emergentes, culminando na criação dos primeiros padrões nacionais de potabilidade para PFAS (USEPA, 2024). Em contrapartida, no Brasil, ainda não existem programas governamentais específicos para tal monitoramento, de modo que a produção de dados permanece concentrada predominantemente em pesquisas acadêmicas. (MONTAGNER et al., 2017).

Diante das atuais circunstâncias, a baixa probabilidade de risco à saúde humana torna questionável a implementação de programas de monitoramento que demandem de altos recursos financeiros, especialmente considerando outras problemáticas prioritárias relacionadas à potabilidade da água, como a presença de patógenos de veiculação hídrica. Adicionalmente, estudos indicam que a exposição humana por meio da água potável representa apenas uma fração da exposição total a essas substâncias, uma vez que alimentos, ar, e o próprio consumo terapêutico podem contribuir de maneira mais significativa para a ingestão desses compostos (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012). Dessa forma, embora não existam evidências concretas que indiquem riscos imediatos à saúde humana, a literatura reforça a necessidade de aprofundamento científico acerca dos efeitos crônicos e cumulativos da exposição a múltiplos contaminantes emergentes.

3.4 TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE FÁRMACOS

Pesquisadores têm obtido resultados consistentes a respeito dos métodos mais eficientes para a remoção de fármacos em Estações de Tratamento de Efluentes. Contudo, a literatura apresenta dificuldades em estabelecer taxas fixas de remoção para tais substâncias. Estudos pioneiros, como o de Ternes (1998), evidenciam que as eficiências de remoção variam entre diferentes compostos e entre diferentes Estações de Tratamento de Esgoto.

Stumpf et al. (1999) obtiveram as seguintes taxas de remoção em uma ETE no estado do Rio de Janeiro com tratamento biológico composto por processos de lodos ativados e filtro biológico: 78% para naproxeno, 75% para diclofenaco e ibuprofeno, 69% para cetoprofeno, 50% para benzaifibrato, 45% para ácido fenofibrico e 34% para ácido clofibrico. Utilizando o ibuprofeno como referência, Erba, et al. (2012) obteve uma remoção de 85,03% empregando filtro ecológico seguido por filtro de carvão granular biologicamente ativado, ao mesmo tempo que Rigobello et. al (2012) obteve 99,7% de eficiência utilizando tratamento convencional seguido da adsorção em carvão ativado, resultados que reforçam a elevada variabilidade dos processos de remoção.

Na prática, essa variabilidade está associada aos diferentes processos de remoção empregados, destacando-se, como exemplo, as ETEs convencionais, nas quais a eficiência do tratamento biológico depende da atividade microbiana e das condições operacionais, como tempo de retenção hidráulica, idade do lodo e disponibilidade de oxigênio (GROS; PETROVIĆ; BARCELÓ, 2007). Entretanto, observa-se que muitos fármacos possuem baixa biodegradabilidade, resultando em reduções parciais ou até mesmo insignificantes. De Aquino (2013) observou faixas médias de eficiência de remoção para reatores UASB, filtros biológicos percoladores, e lagoas de estabilização, e de maneira geral, há uma ampla variação, porém com predominância de baixas eficiências na remoção de fármacos e desreguladores endócrinos com menor afinidade por adsorção.

A biodegradabilidade da molécula e sua afinidade por processos de adsorção evidenciam que a variabilidade na eficiência de remoção não está relacionada apenas ao tipo de tecnologia empregada, mas também às características físico-químicas dos fármacos. Vona (2015) ressalta a influência da solubilidade dos compostos na eficiência de um método. Enquanto substâncias mais hidrofóbicas (alto Log KOW), tendem a ser mais bem removidas por processos físico-químicos, compostos hidrofílicos e de baixa massa molecular apresentam baixa afinidade por processos de sorção, estando a eficiência de remoção diretamente associada à biodegradabilidade da molécula. Por sua vez, Kümmerer (1997) destaca a biodegradação e a

adsorção como os principais processos responsáveis pela remoção de fármacos durante o tratamento de esgoto.

De Aquino (2013) refere-se à adsorção como o fenômeno de transferência de massa na interface entre as fases, ao passo que a absorção ocorre quando moléculas penetram na fase sólida ou líquida além da interface. Dessa forma, esse processo está relacionado à capacidade de uma substância se encontrar ionizada ou dissociada na fase aquosa, que por sua vez depende do pH do meio. Em condições de pH que favorecem a forma não ionizada, observa-se maior tendência de adsorção, enquanto a forma ionizada apresenta maior solubilidade na fase aquosa, reduzindo a eficiência do processo.

Todavia, vale ressaltar que esse processo não promove a biodegradação do micropoluinte. Li et al. (2023) alerta para os perigos referentes à transferência do fármaco da fase líquida para a sólida, na forma de lodo ou biomassa excedente, que pode ser reintroduzido no meio, no caso de disposição inadequada do resíduo. Nesse contexto, estudos como o de Caminada et al. (2023) avaliam a aplicação agrícola deste lodo, indicando que, apesar da redução significativa na concentração de fármacos durante o processo de compostagem, essa diminuição não está necessariamente associada à completa biodegradação, podendo ocorrer por mecanismos de imobilização ou redistribuição dos compostos na matriz sólida. Dessa forma, a disposição final do lodo deve ser cuidadosamente avaliada.

Diante desse cenário, a transferência e a possível reintrodução desses compostos no ambiente evidenciam que o monitoramento deve ser conduzido de forma integrada ao ciclo urbano da água. Além das ETEs, torna-se necessário avaliar o desempenho das Estações de Tratamento de Água (ETAs), responsáveis pela produção de água potável, sendo a eficiência dessas estruturas fundamental para garantir a segurança da água destinada ao consumo humano.

Em revisão realizada por Lima et. al (2017), foi constatado que as operações unitárias de separação sólido-líquido, características do tratamento convencional em ETAs, apresentam eficiência inferior a 50% na remoção de fármacos. Ao mesmo tempo, o uso de cloro na desinfecção apresentou eficiência variável, com a possibilidade da formação de subprodutos tóxicos. Souza et al. (2021) constatou que o tempo de contato com o cloro foi diretamente proporcional ao acúmulo de subprodutos de sulfametoxazol e estradiol, evidenciando que a cloração em águas contaminadas por fármacos pode levar à formação de compostos intermediários no sistema de abastecimento ou na rede de distribuição.

De maneira geral, o tratamento convencional de águas em ETAs é composto por etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, sendo projetado, principalmente para a remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica particulada e microrganismos

patogênicos (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2017). Entretanto, esse processo apresenta limitações significativas para a remoção de fármacos, uma vez que esses compostos são encontrados, em grande parte, dissolvidos na fase aquosa, em baixas concentrações e com elevada estabilidade química (TERNES, 1998). Dessa forma, a eficiência é baixa, o que evidencia que os sistemas convencionais não foram originalmente concebidos para a remoção de micropoluentes (GROS; PETROVIC; BARCELÓ, 2007)

Diante das limitações observadas nos processos convencionais de tratamento de água e esgoto, pesquisas vêm sendo conduzidas para se analisar a eficiência da remoção de fármacos por meio de processos de tratamento avançados, também citados na literatura como, tratamento terciário. Dentre os principais métodos empregados, destacam-se a adsorção em carvão ativado (CAP e CAG), os processos oxidativos (ozonização, radiação UV associada ao peróxido de hidrogênio e fotocatalise) e as tecnologias de separação por membrana (nanofiltração, ultrafiltração e osmose reversa) (LIMA et al., 2017; LOGANATHAN et al., 2023).

Para Estações de Tratamento de Água, Lima et al. (2017) avaliaram a eficiência de remoção de diferentes processos de tratamento avançado, relacionando-os à viabilidade econômica de implantação. Como resultado, o Carvão Ativado em Pó foi o método estudado com melhor custo-benefício, quando utilizado posteriormente a clarificação, obtendo 99% de eficiência, com pequenas doses de adsorvente e tempo de contato reduzido (2 h). Resultados semelhantes são reportados por Borges et al. (2016), que obtiveram elevados valores de eficiência (>80%) ao analisar a metabolização dos fármacos em filtros biológicos de carvão ativado. A ativação de leitos de filtros de carvão é considerada uma alternativa economicamente viável para o aumento da eficiência, quando comparado com outras técnicas avançadas, especialmente em sistemas já existentes, nos quais sua aplicação pode ser incorporada sem grandes modificações estruturais.

Já para Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), onde o efluente bruto costuma ter concentrações de microcontaminantes de 10 a 1000 vezes maiores que a água bruta (CAMINADA et al., 2023), observam-se maiores desafios associados à obtenção de eficiências elevadas, devido a maior carga de contaminantes e à complexidade da matriz. Loganathan et al. (2023) ressaltam que as maiores taxas de remoção são obtidas quando há integração de processos físico-químicos e biológicos, ou de múltiplos processos físico-químico. Após testar diferentes combinações, os autores destacam os seguintes processos: nanofiltração + osmose reversa + carvão ativado; ozonização + carvão ativado; osmose reversa + oxidação avançada.

Observa-se que a tecnologia disponível contempla elevadas eficiências de remoção de fármacos em meio aquoso. Entretanto, os métodos de tratamento avançados citados possuem

alto custo de implantação e operação, fato que inviabiliza sua aplicação em larga escala, especialmente em um contexto nacional, onde apenas 52% do esgoto é tratado (BRASIL, 2023). Como discutido anteriormente, o efluente bruto representa a principal via de introdução de fármacos no meio ambiente. Portanto, antes da adoção dessas tecnologias, torna-se fundamental a ampliação e equiparação das infraestruturas de saneamento entre os municípios e os estados brasileiros.

3.5 LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS

A crescente ocorrência de contaminantes emergentes em ambientes aquáticos ampliou o debate acerca dos instrumentos regulatórios voltados ao monitoramento, concentrações limite e controle dessas substâncias. Apesar de avanços significativos, principalmente na última década, a regulamentação apresenta lacunas significativas, como a ocorrência em baixas concentrações, diversidades de compostos e sinergismo de efeitos, tanto no contexto nacional como internacional (PAIXÃO et al., 2023).

No Brasil, a regulamentação de fármacos ocorre de forma indireta e bastante fragmentada, com a exceção de alguns medicamentos proibidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) por riscos graves à saúde ou ausência de eficácia comprovada, não existem, até o momento, regulamentações consolidadas voltadas especificamente aos danos ambientais de fármacos para uso humano (RIGUETO et al., 2021). Em ambientes aquáticos, as diretrizes estabelecidas para a qualidade hídrica, lançamento de efluentes, e potabilidade da água respectivamente, são a Resolução CONAMA nº 357/2005, a Resolução CONAMA nº 430/2011 e a Portaria GM/MS nº 888/2021. Entretanto, nenhuma delas foi originalmente elaborada considerando a problemática dos contaminantes emergentes, o que reforça a ausência regulatória desses compostos no meio (BRASIL, 2005; BRASIL 2011; BRASIL 2021).

Diante das limitações das legislações federais voltadas aos parâmetros físico-químicos, torna-se competência de os estados implementarem leis mais restritivas que preencham lacunas regulatórias, de caráter suplementar à Resolução CONAMA nº 357/2005. A partir disso, alguns estados passaram a incorporar resoluções para monitorar a toxicidade de efluentes, por meio de ensaios ecotoxicológicos (SILVA, 2024). Essa incorporação ocorreu por meio de normas técnicas da ABNT como a ABNT NBR 12713, voltada à toxicidade aguda com *Daphnia* spp., e a ABNT NBR 12648, direcionada à avaliação de toxicidade crônica em algas, utilizadas como ferramentas auxiliares na determinação de concentrações letais medianas (CL50) e concentrações efetivas medianas (CE50) (CETESB, 2016). Além das normas técnicas, as diretrizes adotadas por órgãos ambientais estaduais foram essenciais para a incorporação dos

ensaios como instrumentos complementares de monitoramento ambiental. A figura 2 mostra os estados brasileiros que possuem regulamentações complementares voltadas à avaliação ecotoxicológica de efluentes.

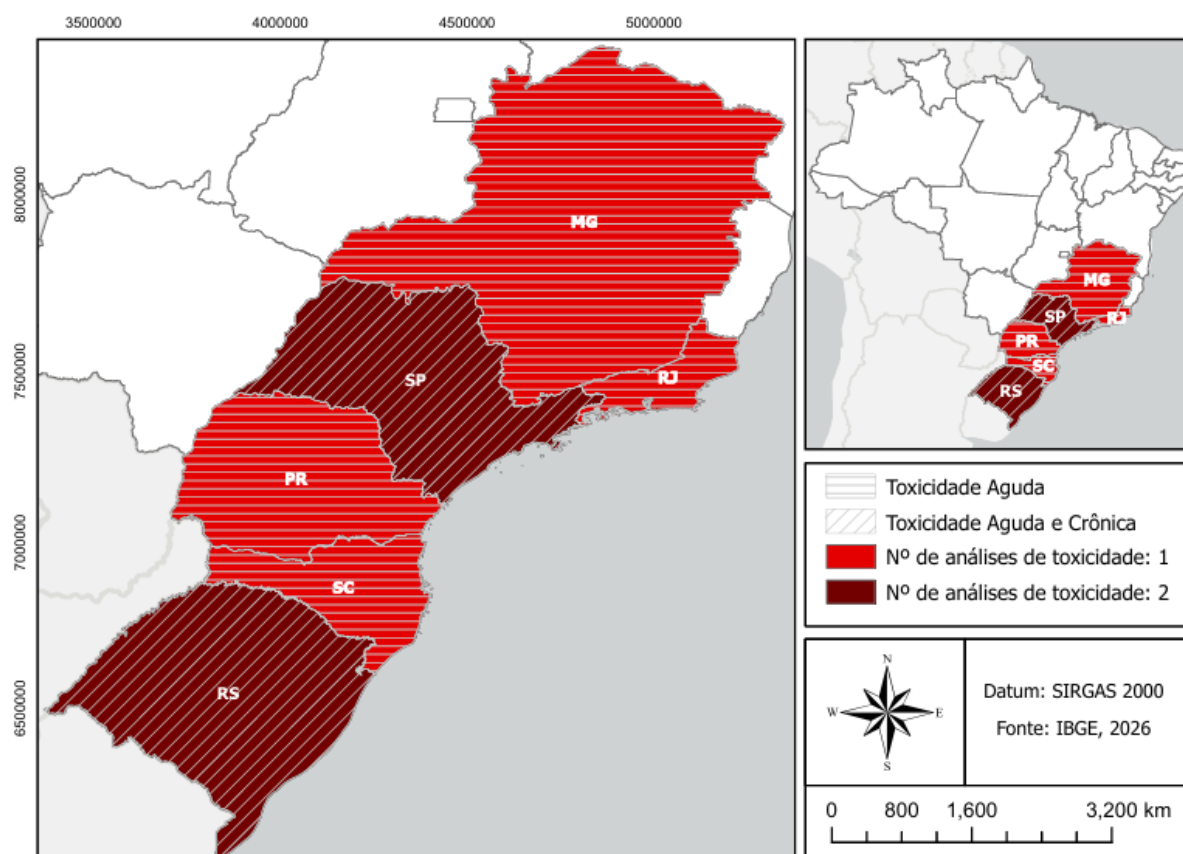


Figura 2 - Estados brasileiros que possuem regulamentações para a avaliação ecotoxicológica de efluentes.

Fonte: Autor, 2026.

Dentre os estados brasileiros, São Paulo se destaca pela maior maturidade técnica e institucional relacionada ao monitoramento ecotoxicológico, principalmente por meio da atuação da CETESB. Entre os anos de 2024 e 2025 foram investidos R\$ 34 milhões, por meio de recursos próprios e fundos de investimento, para o monitoramento de contaminantes emergentes no estado de São Paulo. Entre 2013 e 2024 a companhia identificou 509 contaminantes emergentes espalhados pelo estado, dos quais aproximadamente 27% correspondiam a fármacos e 29% a agrotóxicos (CETESB, 2025). Além de São Paulo, estados como Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina, Minas Gerais e Rio de Janeiro também desenvolveram regulamentações complementares voltadas ao monitoramento ecotoxicológico,

embora apresentem diferentes níveis de abrangência, critérios técnicos e exigências regulatórias (SILVA, 2024).

Apesar dos avanços relacionados ao monitoramento ecotoxicológico, o qual possibilita a identificação e a posterior avaliação dos impactos causados por contaminantes emergentes no ambiente, a maioria dos estados brasileiros ainda não possui padrões estaduais voltados à identificação desses compostos em ambientes aquáticos, de modo que os dados de ocorrência permanecem concentrados predominantemente em estudos acadêmicos. Nesse contexto, iniciativas como as “Watch Lists” adotadas pela União Europeia, bem como as regulamentações recentes da USEPA voltadas ao controle de contaminantes emergentes em água destinada ao consumo humano, demonstram uma crescente preocupação ambiental acerca da ausência de limites legais consolidados. Ambas as abordagens buscam integrar a produção científica, os órgãos ambientais e os instrumentos regulatórios, contribuindo para o avanço do monitoramento e da priorização dessas substâncias (EUROPEAN COMMISSION, 2015; USEPA, 2024).

Sendo assim, em âmbito internacional, estratégias como as “Watch Lists” vêm sendo implementadas pela União Europeia, nas quais são estabelecidas relações de substâncias prioritárias para monitoramento em águas superficiais. Apesar de não funcionarem como instrumentos legislativo, essas listas fornecem valores orientadores e subsidiam aprofundamento de estudos relacionados aos compostos monitorados. Até o presente momento, já foram publicadas cinco listas desde a primeira, em 2015, incluindo substâncias como fluoxetina, carbamazepina, diclofenaco, estrona e diferentes classes de antibióticos e hormônios sintéticos (RAFAEL, 2025).

O gráfico a seguir apresenta a tendência de crescimento das publicações relacionadas ao 17 β -estradiol ao longo dos últimos anos. Esse composto destacou-se por estar entre os primeiros desreguladores endócrinos incorporados às estratégias regulatórias europeias voltadas ao monitoramento da qualidade da água, inicialmente por meio da Diretiva 2013/39/EU e, posteriormente, incluído nas discussões regulatórias ampliadas pela Diretiva (UE) 2020/2184. Dessa forma, a inclusão do composto na primeira Watch List europeia (Decision 2015/495/EU) coincidiu com um aumento do interesse científico e regulatório acerca dos desreguladores endócrinos e demais contaminantes emergentes (EUROPEAN PARLIAMENT, 2013; EUROPEAN COMMISSION, 2015; EUROPEAN UNION, 2020).

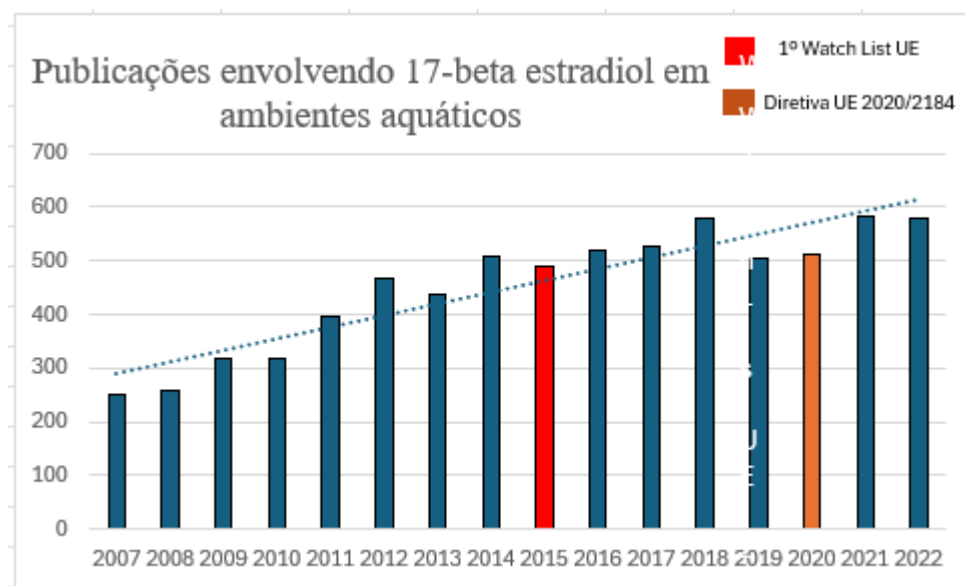


Figura 3 - Número de publicações envolvendo o composto 17 β -estradiol ao longo dos anos.

Fonte: Autor, 2026.

Além das estratégias adotadas pela União Europeia, que contribuíram diretamente para o avanço das discussões regulatórias sobre contaminantes emergentes, alguns países passaram a incorporar essas substâncias em diretrizes relacionadas ao reúso potável da água, processo no qual águas residuárias são submetidas a tratamento avançados para a produção de água segura para o consumo humano. Nos Estados Unidos, estados como Texas, Flórida e Califórnia desenvolveram programas específicos de monitoramento de micropoluentes em sistemas de reúso. Da mesma forma, a Austrália tornou-se um dos primeiros países a estabelecer diretrizes nacionais para reúso potável indireto, incorporando valores orientadores para diferentes compostos farmacológicos em água reutilizada. Essas iniciativas evidenciam uma preocupação internacional, principalmente em relação aos disruptores endócrinos em sistemas de abastecimento. (PAIXÃO et al., 2023).

Uma das iniciativas regulatórias internacionais mais relevantes dos últimos anos para o controle de contaminantes de preocupação ambiental foi a Convenção de Estocolmo, adotada em 2001 (STOCKHOLM CONVENTION, 2001) e promulgada nacionalmente através do Decreto Nº 5472, de 20 de junho de 2005 (BRASIL, 2005), voltada para o controle de poluentes orgânicos persistentes (POPs). Ao longo dos anos, houve uma ampliação gradual da Convenção de Estocolmo para diferentes grupos de compostos, incluindo substâncias perfluoroalquiladas e polifluoroalquiladas (PFAS). Apesar de os fármacos, em sua maioria, não se enquadrarem como poluentes orgânicos persistentes (POPs), diversos compostos apresentam características de persistência ambiental e ocorrência recorrente que desafiam os modelos regulatórios

tradicionalmente utilizados para substâncias persistentes, bioacumulativas e tóxicas (BU et al., 2016).

Observa-se que os contaminantes emergentes ainda são pouco contemplados pelas legislações ambientais tradicionais, havendo um avanço lento e gradual das estratégias de monitoramento e priorização de substâncias. Iniciativas como as Watch Lists europeias, programas de monitoramento desenvolvidos pela USEPA, diretrizes para o reúso potável da água e a ampliação da Convenção de Estocolmo para novos grupos de contaminantes demonstram uma tendência internacional de discussão regulatória que vem se fortalecendo à medida que novas evidências científicas são produzidas (EUROPEAN COMMISSION, 2015; PAIXÃO et al., 2023; STOCKHOLM CONVENTION, 2001). Ressalta-se que ações como incentivos governamentais para o desenvolvimento de programas de monitoramento, bem como a integração entre universidades e agências ambientais são fundamentais para reduzir as lacunas de conhecimento quanto aos impactos associados a esses compostos, contribuindo para o fortalecimento da gestão dos recursos hídricos e promoção da segurança hídrica.

4.0 METODOLOGIA

Diante das problemáticas ambientais acerca da presença de fármacos em ambientes aquáticos, e seus impactos na saúde humana e aos ecossistemas, utilizou-se como metodologia aplicada para alcançar os objetivos desta pesquisa, o levantamento bibliográfico, com ênfase na análise de fontes secundárias. A revisão bibliográfica, de acordo com Gil (2008), é aquela desenvolvida a partir de material já elaborado, como livros, teses, dissertações e artigos científicos. Busca-se, com este método, reunir as principais contribuições teóricas acerca de um tema e, a partir de sua análise, construir argumentos capazes de conduzir a conclusões ainda pouco exploradas na literatura.

A pesquisa foi desenvolvida com base na metodologia proposta por Lakatos e Marconi (2003), que delimita a pesquisa bibliográfica em oito fases distintas: escolha do tema; elaboração do plano de trabalho; identificação; localização; compilação; fichamento; análise e interpretação; e redação. A delimitação do objeto de estudo foi realizada por meio da seleção de artigos nas línguas inglesa e portuguesa, sem restrições temporais pré-estabelecidas. Entretanto, devido a atualidade da temática, os estudos selecionados concentram-se a partir da década de 1990.

A busca bibliográfica foi conduzida em bases de dados científicos, como Scielo e RePUSP, complementada por buscas em plataformas como o Google Acadêmico. Foram utilizados como descritores, de forma isolada ou combinada, tanto na língua portuguesa quanto na inglesa, os seguintes termos: “fármacos”, “resíduos farmacológicos”, “poluentes emergentes”, “métodos de remoção”, “estação de tratamento de efluentes”, “disruptores endócrinos”, “ecotoxicologia”, “bioacumulação”, “biomagnificação”, “ocorrência”, “contaminação”, “saúde humana”, “água tratada”, “águas superficiais”, “águas subterrâneas”, “espécies aquáticas”, “toxicologia ambiental”, “legislação”, “monitoramento”, “políticas públicas”, “quantificação”, “antibióticos”, “hormônios”, “anti-inflamatórios”, “antidepressivos” e “drogas ilícitas”.

Buscas complementares foram realizadas a partir do uso do Painel de Vigilância Eco Farmacológica da AstraZeneca, bem como das bases de dados da USEPA (Drinking Water Treatability Database - TDB e EPA’S Ecotoxicology Knowledgebase – ECOTOX), disponibilizadas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Por fim, utilizaram-se como descritores compostos farmacológicos isolados, adotando-se como critério de seleção, a inclusão de substâncias vinculadas a alguma legislação e/ou restrição vigente, ou ainda, inseridos na Watch List under the Water Framework Directive publicada pela União Europeia.

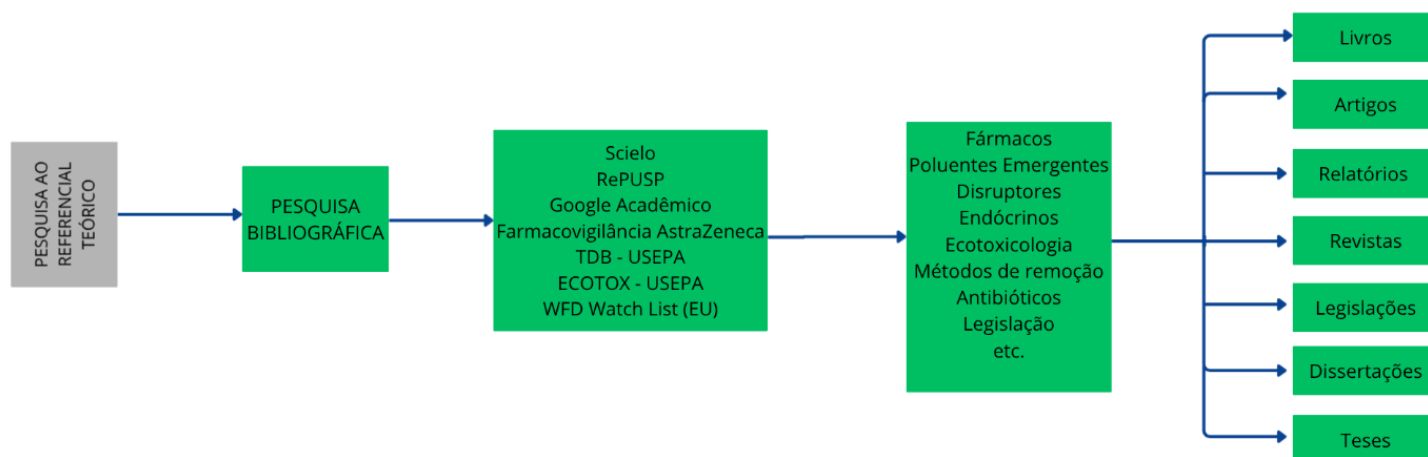


Figura 4 - Organograma da pesquisa ao referencial teórico

Fonte: Autor, 2026

Essa etapa da pesquisa forneceu dados relevantes para a avaliação de impactos causados pelos fármacos em ambientes aquáticos, conforme apresentado na Figura 1.

A partir da seleção das referências, o gerenciamento das bibliografias ocorreu por meio do Software Mendeley, no qual foram extraídos os seguintes dados do material coletado: (I) ano de publicação; (II) periódico; (III) título; e (IV) resumo. O objetivo dessa primeira etapa foi classificar os artigos de acordo com o ano de publicação e o grau de pertinência ao trabalho. O processo de delimitação de artigos foi fundamental para reunir fichamentos com discussões complementares, e dessa forma, otimizar a revisão bibliográfica para cada capítulo.

Foram incluídos na pesquisa os artigos que apresentaram identificação e quantificação de fármacos em meio aquoso, discussão e comparação de técnicas de remoção, avaliação de alterações físicas e comportamentais de espécies aquáticas, bem como estudos regionais e nacionais que abordassem a problemática. Em contrapartida, foram excluídos os estudos de caráter estritamente farmacológico, aqueles voltados apenas à descrição físico-química dos fármacos, bem como artigos que abordassem exclusivamente alterações genéticas ou fisiológicas em espécies, por não contribuírem diretamente para a discussão do resíduo farmacológico.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura consultada permitiu identificar padrões consistentes relacionados à ocorrência, aos impactos ambientais, às técnicas de remoção e aos desafios regulatórios. De modo geral, os estudos revisados convergem ao apontar que esses compostos estão amplamente documentados em diferentes compartimentos ambientais. A presença dessas substâncias está diretamente relacionada ao grau de interferência antrópica e urbanização das regiões, seja pelo descarte inadequado de medicamentos, lixiviação decorrente de atividades agropecuárias ou pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais. Nesse contexto, as águas superficiais atuam como as principais receptoras dessas cargas contaminantes, configurando-se como a matriz ambiental mais frequentemente reportada para a detecção. Entre os contaminantes mais recorrentes, destacam-se os anti-inflamatórios, antibióticos e hormônios, cuja presença e impactos encontram-se bem documentados na literatura.

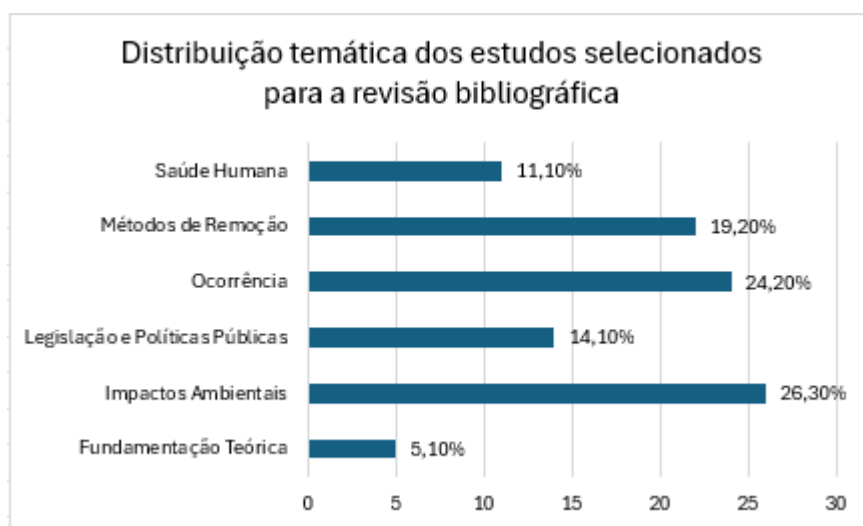


Figura 5 – Distribuição temática dos estudos selecionados para a revisão bibliográfica.

Fonte: Autor, 2026.

Considerando a ampla abrangência dos temas abordados pela literatura, classificou-se os estudos selecionados de acordo com sua temática predominante, permitindo identificar os eixos de pesquisa mais contemplados nesta revisão. Evidencia-se uma predominância de estudos voltados aos impactos ambientais (26,3%) e à ocorrência de fármacos em ambientes aquáticos (24,2%), enquanto os riscos à saúde humana representam menor proporção dentre os estudos analisados (11,1%). Esse resultado reflete o foco predominante da literatura revisada, de forma que as discussões relacionadas à saúde humana permanecem mais restritas e marcadas por incertezas.

Entre as diferentes formas de introdução desses compostos no ambiente, a excreção urinária e fecal após o consumo terapêutico configura os efluentes domésticos como a principal via de entrada nos ecossistemas aquáticos. Entretanto, a ocorrência ambiental não está relacionada exclusivamente ao consumo de medicamentos. Essa interpretação é reforçada quando estudos conduzidos no Brasil frequentemente relatam concentrações superiores às observadas em países com infraestrutura sanitária mais consolidada, indicando que fatores como a cobertura e eficiência dos sistemas de tratamento exercem influência direta sobre os níveis observados. Adicionalmente, as características físico-químicas das moléculas influenciam a dinâmica de distribuição dos contaminantes, enquanto compostos hidrofóbicos tendem a se acumular em sedimentos e biota, compostos hidrofílicos permanecem predominantemente na fase aquosa, fatores que explicam os distintos padrões de ocorrência entre as diferentes classes farmacêuticas. A integração desses processos e suas inter-relações no ambiente aquático é apresentada na forma esquemática na Figura 6.

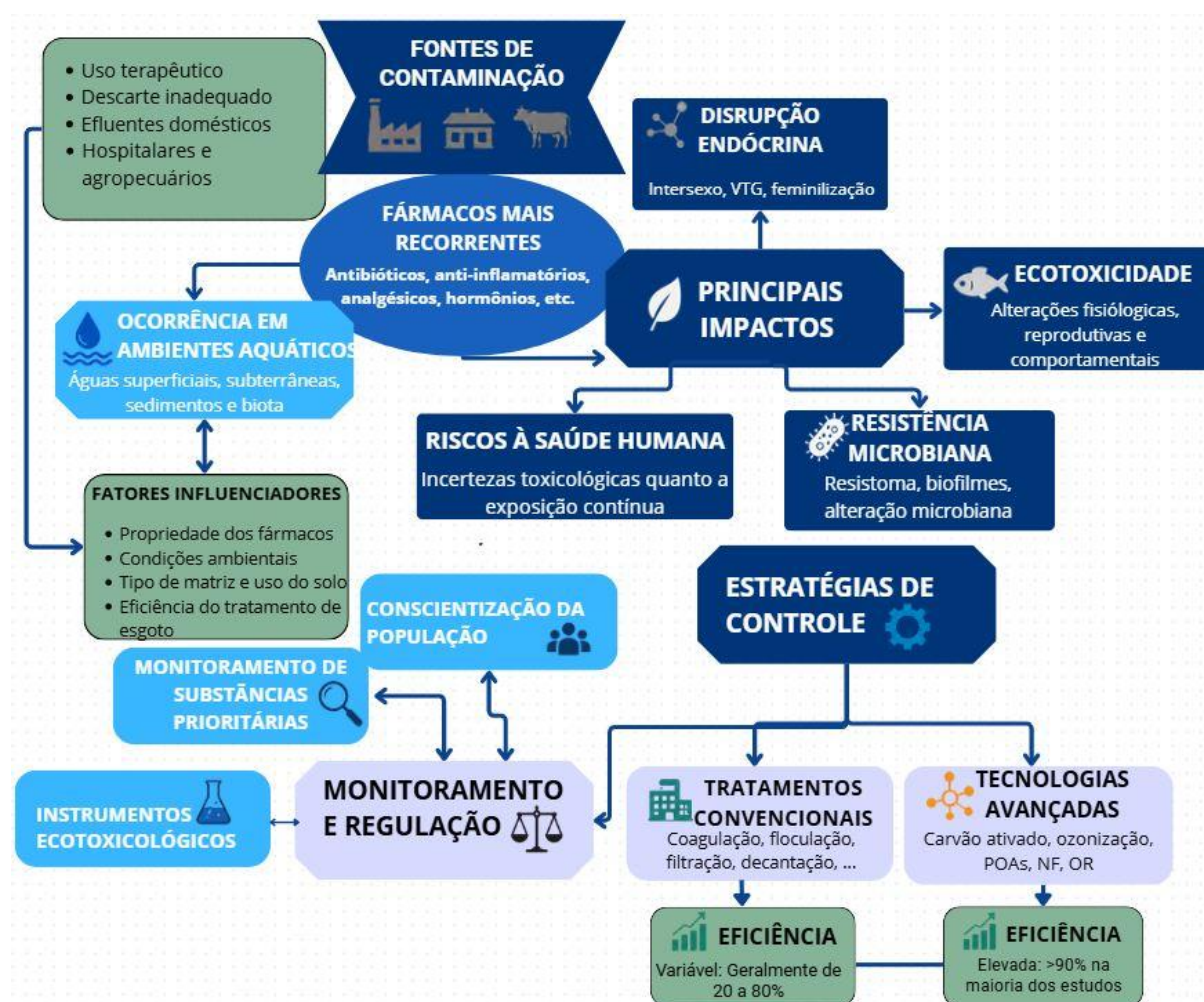


Figura 6 - Síntese das relações entre fontes de contaminação, ocorrência, impactos e estratégias de controle associados aos fármacos em ambientes aquáticos.

Fonte: Autor, 2026.

A partir da detecção dos fármacos, surge a principal problemática para a literatura, a caracterização da relevância ambiental de cada substância, bem como de seus efeitos biológicos nas concentrações identificadas em ambientes aquáticos. Os microcontaminantes evidenciaram padrões que contrariam pressupostos da toxicologia tradicional, na qual maiores concentrações estariam associadas a efeitos mais intensos. Estudos já demonstram que resíduos farmacológicos podem desencadear alterações fisiológicas e comportamentais mesmo em concentrações na ordem de ng/L e µg/L, consideradas ambientalmente relevantes.

Esses impactos, não estão necessariamente associados a organismos de maior porte ou aos níveis tróficos mais elevados, mas a organismos que compõem a base da cadeia alimentar, como diatomáceas, microalgas, cianobactérias e comunidades microbianas, indicando potencial comprometimento do funcionamento ecossistêmico. Dentre os impactos identificados, destacam-se a resistência microbiana e a disrupção endócrina, que apresentam elevado potencial de alteração ecológica e são amplamente discutidas na literatura científica. Embora as pesquisas relacionadas a essas problemáticas apresentem relativo grau de maturidade, observa-se que o avanço das discussões regulatórias ainda permanece condicionado às lacunas científicas existentes. A predominância de estudos laboratoriais, bem como a dificuldade de avaliar exposições crônicas associadas a misturas de múltiplos contaminantes no ambiente, representam limitações significativas para o avanço regulatório e para a compreensão dos reais impactos causados.

Diferentemente dos impactos ecológicos observados em organismos aquáticos, as evidências atuais não indicam preocupações imediatas quanto aos riscos à saúde humana decorrentes da exposição a fármacos por meio da água potável. Embora esse tema receba menor atenção na literatura, as concentrações identificadas na água potável são significativamente inferiores às doses terapêuticas aplicadas em humanos. Sendo assim, não há evidências concretas que indiquem riscos imediatos à saúde humana, de modo que os fármacos, diferentemente da poluição industrial e agrícola, não são atualmente considerados uma ameaça prioritária à segurança hídrica. Entretanto, permanece a necessidade de aprofundamento científico acerca dos possíveis efeitos crônicos e cumulativos na saúde humana a longo prazo.

Considerando que os efluentes domésticos foram identificados como a principal via de entrada de fármacos no ambiente, a eficiência dos sistemas de tratamento torna-se o principal fator de mitigação para a redução das concentrações em meio aquoso. Os resultados demonstraram elevada variabilidade nas taxas de remoção, em decorrência das condições

operacionais empregadas e das características físico-químicas dos compostos. Dentre todas as tecnologias de remoção analisadas, tanto ETEs quanto ETAs, observa-se que a maior parte das substâncias apresenta remoção parcial, com casos de baixíssima remoção e formação de subprodutos. Esse comportamento está diretamente relacionado ao fato de que grande parte dos sistemas convencionais de tratamento foi desenvolvida para remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e microrganismos patogênicos. Essa variabilidade pode ser observada na Tabela 2, que reúne intervalos de eficiência reportados para diferentes tecnologias de tratamento e compostos comumente reportados na literatura.

Intervalos de eficiência de remoção de fármacos reportados para diferentes tecnologias de tratamento.					
	Sistemas convencionais	Sistemas biológicos alternativos (UASB/lagoas)	Carvão ativado (CAP/CAG)	Ozonização/ POAs	Membranas (NF/OR)
Diclofenaco	25-80%	25-66%	68-99%	90-100%	60-99%
Ibuprofeno	75-90%	90-95%	43-99%	80-99%	60-99%
Carbamazepina	0-10%	0-30%	90-99%	40-87%	>90%
Sulfametoxazol	20-60%	20-60%	54-94%	83-99%	60-95%
Naproxeno	70-85%	70-90%	90-99%	90-100%	>95%

Tabela 2 - Intervalos de eficiência de remoção de fármacos reportados para diferentes tecnologias de tratamento.

Fonte: Autor, 2026.

De maneira geral, há uma taxa de remoção significativamente maior quando as substâncias são submetidas a processos de tratamento avançados. Dentre os principais métodos destacam-se os processos de adsorção por carvão ativado (CAP/CAG), os processos oxidativos avançados, como a ozonização e os sistemas de separação de membrana. As maiores taxas de remoção envolvendo diferentes classes de fármacos foram obtidas com a integração de processos físico-químicos e biológicos ou de múltiplos processos físico-químicos. Apesar da alta eficiência observada, essas tecnologias apresentam elevado custo de instalação e operação. Em um contexto nacional, no qual apenas 52% do esgoto gerado recebe tratamento, a implementação em larga escala dessas tecnologias ainda pode ser considerada precipitada.

Entende-se que a viabilidade econômica dos métodos avançados deverá ser estudada e, caso sua aplicação seja considerada viável, deverá vir acompanhada de políticas voltadas à universalização do saneamento básico, capazes de produzir benefícios ambientais potencialmente mais expressivos do que a implantação pontual de tecnologias avançadas. Sob essa perspectiva e considerando a ampla diversidade de compostos farmacêuticos presentes no ambiente, estratégias de monitoramento e controle, a exemplo das Watch Lists e dos programas de monitoramento da USEPA vêm contribuindo para a priorização de substâncias mais preocupantes, ação que pode representar uma alternativa mais viável do que a busca pela remoção indiscriminada de todos os contaminantes emergentes presentes no sistema de tratamento. A evolução dessa estratégia de priorização pode ser observada na Figura 7, que apresenta os compostos farmacêuticos incorporados às diferentes Watch Lists da União Europeia desde a sua primeira edição, em 2015.

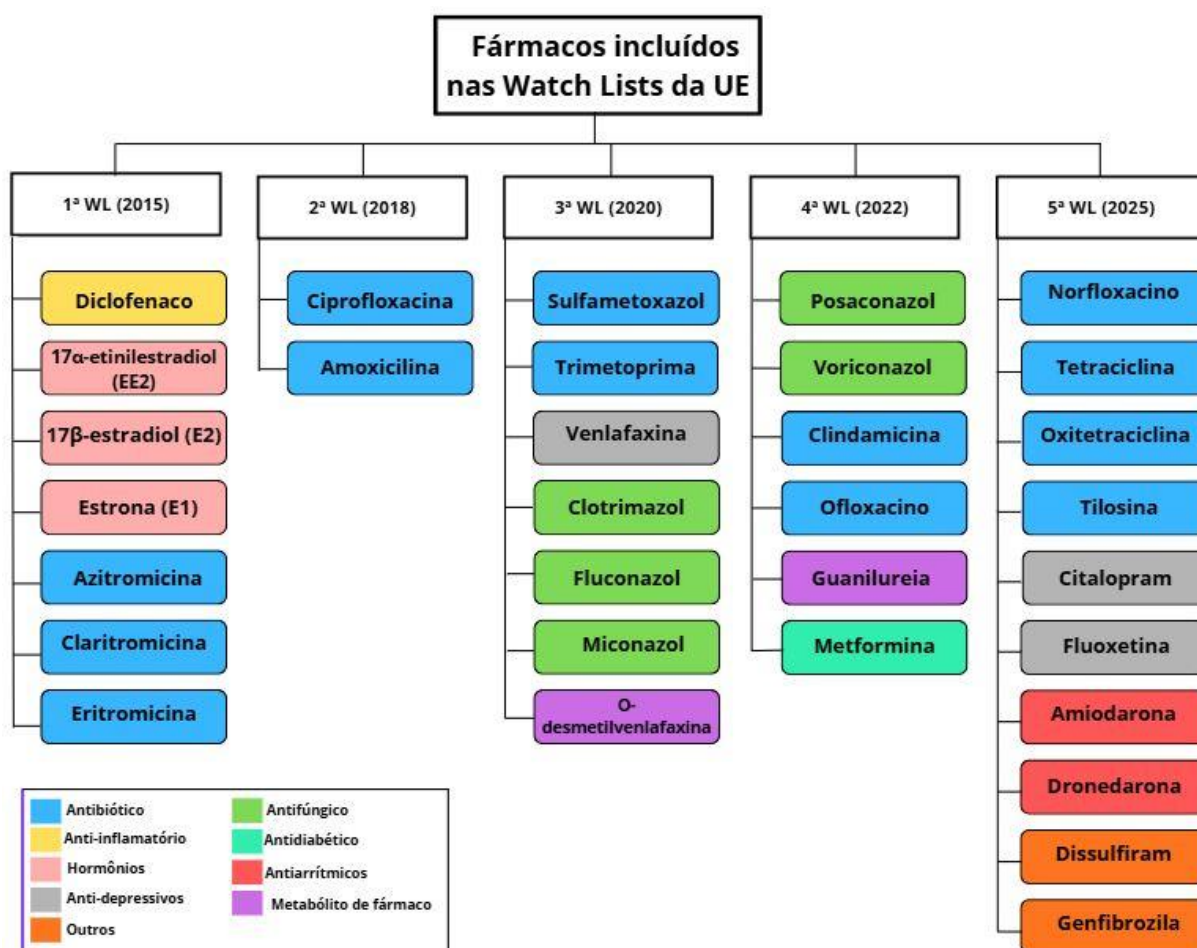


Figura 7 - Fármacos incluídos nas Watch Lists da União Europeia (2015-2025).

Fonte: Autor, 2026.

Em linhas gerais, observa-se que a dificuldade regulatória não provém da ausência de registros de ocorrência, mas sim da dificuldade em identificar concentrações que representem risco ambiental. No Brasil não existem instrumentos específicos para microcontaminantes, nem programas nacionais voltados ao monitoramento dessas substâncias, existindo apenas abordagens pontuais em alguns estados do país baseadas na incorporação de ferramentas ecotoxicológicas de aspecto complementar ao controle da qualidade ambiental. Sendo assim, os contaminantes emergentes são tratados de forma indireta pelos instrumentos de gestão da qualidade da água atualmente vigentes. Em comparação com o cenário internacional, as principais diferenças estão relacionadas à adoção de mecanismos contínuos de priorização e monitoramento, os quais se configuram como uma primeira etapa para o estudo e avaliação dos reais impactos ambientais de cada substância ao longo do tempo.

6.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do levantamento bibliográfico realizado, conclui-se que os fármacos, embora desenvolvidos para promover a saúde e melhoria na qualidade de vida da população, tornaram-se uma preocupação ambiental cujos impactos ainda apresentam importantes lacunas de conhecimento na comunidade científica. A literatura evidencia a ampla difusão desses compostos em águas naturais, principalmente, em decorrência dos efluentes domésticos. Nessa circunstância, a crescente acessibilidade aos métodos cromatográficos de identificação e quantificação tem contribuído para a ampliação do monitoramento e avanço das discussões regulatórias relacionadas a essas substâncias.

Apesar desse cenário, observa-se que a avaliação de impactos ambientais no meio através de dados ecotoxicológicos ainda enfrenta desafios significativos, especialmente em relação à compreensão dos efeitos decorrentes da exposição crônica em concentrações ambientalmente relevantes tanto para organismos aquáticos, quanto para a saúde humana. Soma-se a isso a ausência de instrumentos regulatórios específicos e programas nacionais de monitoramento voltados aos microcontaminantes emergentes.

A redução das concentrações desses compostos no ambiente está diretamente relacionada à universalização do saneamento básico e à adoção de métodos complementares que contemplem uma maior eficiência de remoção. Dessa forma, tornam-se necessárias medidas voltadas ao monitoramento de substâncias tidas como prioritárias pela literatura, bem como ações de conscientização da população e de gestores públicos, tratando questões sobre automedicação e descarte adequado de medicamentos.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE-MARTÍNEZ, G. V.; OWUOR, M. A.; GARRIDO-PEREZ, C.; SALAMANCA, M. J.; DEL VALLS, T. A.; MARTÍN-DÍAZ, M. L. Are standard tests sensitive enough to evaluate effects of human pharmaceuticals in aquatic biota? Facing changes in research approaches when performing risk assessment of drugs. *Chemosphere*, v. 120, p. 75–85, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Anuário estatístico do mercado farmacêutico 2023. Brasília, DF: Anvisa, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/medicamentos/cmed/anuario-estatistico-do-mercado-farmaceutico-2023.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

AMÉRICO, J. H. P.; TORRES, N. H.; AMÉRICO, G. H. P.; CARVALHO, S. L. Ocorrência, destino e potenciais impactos dos fármacos no ambiente. *SaBios – Revista de Saúde e Biologia*, [S. l.], v. 8, n. 2, 2013. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/1298>. Acesso em: 24 abr. 2026.

AMÉRICO, Juliana Heloisa Pinê. Ocorrência de compostos farmacológicos no Córrego da Onça, município de Três Lagoas - MS. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2010.

ALMEIDA, Ângela; CALISTO, Vânia; ESTEVES, Valdemar I.; SCHNEIDER, Rudolf J.; SOARES, Amadeu M. V. M.; FIGUEIRA, Etelvina; FREITAS, Rosa. Presence of the pharmaceutical drug carbamazepine in coastal systems: effects on bivalves. *Aquatic Toxicology*, v. 156, p. 74–87, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.08.002>.

ARNOLD, K. E.; BROWN, A. R.; ANKLEY, G. T.; SUMPTER, J. P. Medicating the environment: assessing risks of pharmaceuticals to wildlife and ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 369, n. 1656, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0569>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BEAUSSE, Johanne. Selected drugs in solid matrices: a review of environmental determination, occurrence and properties of principal substances. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 23, n. 10–11, p. 753–761, 2004.

BERTOLETTI, Eduardo. Controle ecotoxicológico de efluentes líquidos no estado de São Paulo. 2. ed. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2222>. Acesso em: 6 maio 2026.

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Fármacos no meio ambiente. *Química Nova*, v. 26, n. 4, p. 523–530, 2003.

BORGES, R. M.; MINILLO, A.; LEMOS, E. G. M.; PRADO, H. F. A. D.; TANGERINO, E. P. Uso de filtros de carvão ativado granular associado a microrganismos para remoção de fármacos no tratamento de água de abastecimento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 709–720, 2016.

BRAND, J. A.; BERTRAM, M. G.; CERVENY, D.; MCCALLUM, E. S.; HELLSTRÖM, G.; MICHELANGELI, M.; PALM, D.; BRODIN, T. Psychoactive pollutant alters movement dynamics of fish in a natural lake system. *Proceedings of the Royal Society B*, v. 291, n. 2036, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.1760>.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 222, de 28 de março de 2018. Dispõe sobre o regulamento técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 29 mar. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/9143550. Acesso em: 27 abr. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRASIL. Decreto nº 5.472, de 20 de junho de 2005. Promulga o texto da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, adotada, naquela cidade, em 22 de maio de 2001. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 jun. 2005.

BU, Q. et al. Assessing the persistence of pharmaceuticals in the aquatic environment: Challenges and needs. **Emerging Contaminants**, v. 2, n. 3, p. 145–147, set. 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2023. Brasília, DF: SNS/MDR, 2023. Disponível em: <https://www.snis.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 7 maio 2021.

CAMINADA, S. M. L. et al. Avaliação da presença de fármacos em lodo de estação de tratamento de esgotos, antes e após processo de biorremediação por compostagem. *Saúde e Sociedade*, v. 32, n. 2, p. e220535pt, 2023.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Controle ecotoxicológico de efluentes líquidos no estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2016.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Workshop de contaminantes emergentes: monitoramento e perspectivas regulatórias. São Paulo: CETESB, 2025. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=87EoZbyOGzM>>. Acesso em: 10 janeiro 2026.

CHEN, L. et al. Simultaneous exposure to estrogen and androgen resulted in feminization and endocrine disruption. **Journal of Endocrinology**, v. 228, n. 3, p. 205–218, 12 jan. 2016.

CUNHA, Danieli Lima; SILVA, Samuel Muylaert Camargo; BILA, Daniele Maia; OLIVEIRA, Jaime Lopes da Mota; SARCINELLI, Paula de Novaes; LARENTIS, Ariane Leites. Regulamentação do estrogênio sintético 17 α -etinilestradiol em matrizes aquáticas na Europa, Estados Unidos e Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 32, n. 3, 2016.

D’COSTA, V. M. et al. Sampling the Antibiotic Resistome. **Science**, v. 311, n. 5759, p. 374–377, 20 jan. 2006.

DAI, C. et al. Comparative study of the degradation of carbamazepine in water by advanced oxidation processes. *Environmental Technology*, v. 33, n. 10, p. 1101–1109, 10 nov. 2011.

DANTAS, G. T. et al. Resistência antimicrobiana em ambientes naturais e antrópicos. *Journal of Health & Biological Sciences*, v. 13, n. 1, p. e6036, 13 nov. 2025.

DE AQUINO, S. F.; BRANDT, E. M. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: revisão da literatura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 3, p. 187–204, 2013.

DÉCIMA, M. A. et al. A Review on the Removal of Carbamazepine from Aqueous Solution by Using Activated Carbon and Biochar. *Sustainability*, v. 13, n. 21, p. 11760, 25 out. 2021.

DUAN, Weiyan; CUI, Hongwu; JIA, Xinyu; HUANG, Xiao. Occurrence and ecotoxicity of sulfonamides in the aquatic environment: a review. *Science of the Total Environment*, v. 820, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153178>.

EDUARDO, F. et al. Intoxicação com aditivos alimentares. *RevInter*, v. 14, n. 1, p. 5–10, 2 fev. 2021.

ERBA, C. M.; TANGERINO, E. P.; CARVALHO, S. L.; ISIQUE, W. D. Remoção de diclofenaco, ibuprofeno, naproxeno e paracetamol em filtro ecológico seguido por filtro de

carvão granular biologicamente ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 137–142, 2012.

ERICSON, Hanna; THORSÉN, Gunnar; KUMBLAD, Linda. Physiological effects of diclofenac, ibuprofen and propranolol on Baltic Sea blue mussels. *Aquatic Toxicology*, v. 99, n. 2, p. 223–231, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.04.017>.

EUROPEAN FEDERATION OF ANIMAL HEALTH (FEDESA), 2001. Antibiotic Use in Farm Animals does not threaten Human Health. FEDESA/FEFANA Press release, Brussels

EUROPEAN COMMISSION. Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy. Official Journal of the European Union, Brussels, 2015.

EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Official Journal of the European Union, Luxembourg, L 226, p. 1–17, 24 Aug. 2013.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). Official Journal of the European Union, Luxembourg, L 435, p. 1–62, 23 Dec. 2020.

FABBRI, E.; FRANZELLITTI, S. Human pharmaceuticals in the marine environment: focus on exposure and biological effects in animal species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 35, n. 4, p. 799–812, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3131>.

FENT, K.; WESTON, A. A.; CAMINADA, D. Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, v. 76, n. 2, p. 122–159, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.09.009>.

FERRARI, B.; PAUXEUS, N.; GIUDICE, R.; POLLIO, A.; GARRIC, J. Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: study of carbamazepine, clofibric acid and diclofenac. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 55, n. 3, p. 359–370, 2003.

FERRARI, B.; MONS, R.; VOLLAT, B.; FRAYSSE, B.; PAXÉAUS, N.; GIUDICE, R. L.; POLLIO, A.; GARRIC, J. Environmental risk assessment of six human pharmaceuticals: are the current environmental risk assessment procedures sufficient for the protection of the aquatic environment? *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 23, n. 5, p. 1344–1354, 2004.

FILHO, R. W. R. et al. Poluentes emergentes como desreguladores endócrinos. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, v. 2, n. 3, p. 283–288, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5132/jbse.2007.03.012>.

FILIPPE, T. C. Cafeína, fármacos, hormônios e produtos de cuidados pessoais no rio Palmital – PR. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3146/1/CT_PPGCTA_M_Filippe%2c%20Tais%20Cristina_2018.pdf. Acesso em: 25 de outubro de 2025.

FLEMMING, H.-C.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. **Nature reviews. Microbiology**, v. 8, n. 9, p. 623–33, 2010.

FORAN, C. M.; WESTON, J.; SLATTERY, M.; BROOKS, B. W.; HUGGETT, D. B. Reproductive assessment of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) following a four-week fluoxetine (SSRI) exposure. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 46, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-003-3042-5>.

GALVÁN RAFAEL, Marín. Watch lists derived from the Water European Rules. In: SENTIATECH CONGRESS, 1., 2025, Valencia, Spain. Book of Abstracts. Valencia, 2025.

GHISELLI, G.; JARDIM, W. F. Interferentes endócrinos no ambiente. *Química Nova*, v. 30, n. 3, p. 695–706, 2007.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 2008. p. 75–88.

GOLET, E. M.; ALDER, A. C.; GIGER, W. Environmental exposure and risk assessment of fluoroquinolone antibacterial agents in wastewater and river water of the Glatt Valley Watershed, Switzerland. *Environmental Science and Technology*, v. 36, n. 17, p. 3645–3651, 2002.

GONÇALVES, Eliane Simões. Ocorrência e distribuição de fármacos, cafeína e bisfenol-A em alguns corpos hídricos no estado do Rio de Janeiro. 2012. 197 f. Tese (Doutorado em Geociências – Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

GRENNI, P.; ANCONA, V.; BARRA CARACCIOLO, A. Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. **Microchemical Journal**, v. 136, p. 25–39, jan. 2018.

GROS, Meritxell; PETROVIĆ, Mira; BARCELÓ, Damià. Wastewater treatment plants as a pathway for aquatic contamination by pharmaceuticals in the Ebro River Basin (Northeast Spain). *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 26, n. 8, p. 1553–1562, 2007.

HALLING-SØRENSEN, B.; NIELSEN, S. N.; LANZKY, P. F.; INGERSLEV, F.; LUTZHØFT, H. C. H.; JØRGENSEN, S. E. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment: a review. *Chemosphere*, v. 36, n. 2, p. 357–393, 1998.

HOFFMANN, F.; KLOAS, W. Estrogens can disrupt amphibian mating behavior. *PLOS ONE*, v. 7, n. 2, e32097, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032097>.

HOU, L. et al. Effects of Sulfamethazine on Denitrification and the Associated N₂O Release in Estuarine and Coastal Sediments. v. 49, n. 1, p. 326–333, 19 dez. 2014.

IRWIN, L. K.; GRAY, S.; OBERDÖRSTER, E. Vitellogenin induction in painted turtle, *Chrysemys picta*, as a biomarker of exposure to environmental levels of estradiol. **Aquatic Toxicology**, v. 55, n. 1-2, p. 49–60, nov. 2001.

KEITH, L. H. Recent advances in the identification and analysis of organic pollutants in water, *Life Sciences*, Volume 19, Issue 11, 1976, p. 1631-1635. DOI: [https://doi.org/10.1016/0024-3205\(76\)90067-9](https://doi.org/10.1016/0024-3205(76)90067-9).

KOCK, H. C.; GLANVILLE, A. C.; LAW, T.; STANTON, L. J.; CARTER, J. C.; TAYLOR, J. Emerging challenges of the impacts of pharmaceuticals on aquatic ecosystems: a diatom perspective. *Science of the Total Environment*, v. 878, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162939>.

KÜMMERER, K.; STEGER-HARTMANN, T.; MEYER, M. Biodegradability of the anti-tumour agent ifosfamide and its occurrence in hospital effluents and communal sewage. *Water Research*, v. 31, n. 11, p. 2705–2710, 1997.

KÜMMERER, Klaus. Antibiotics in the aquatic environment – a review – part I. *Chemosphere*, v. 75, n. 4, p. 417–434, 2009.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LI, Shuo; WU, Yanan; ZHENG, Heshan; LI, Hongbin; ZHENG, Yongjie; NAN, Jun; MA, Jun; NAGARAJAN, Dillirani; CHANG, Jo-Shu. Antibiotics degradation by advanced oxidation process (AOPs): recent advances in ecotoxicity and antibiotic-resistance genes induction of degradation products. *Chemosphere*, v. 311, pt. 2, 2023.

LIMA, D. R. S. et al. Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1043–1054, 2017.

LOGANATHAN, P.; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; CUPRYS, A. K.; MALETSKYI, Z.; RATNAWEERA, H. Treatment trends and combined methods in removing pharmaceuticals and personal care products from wastewater: a review. *Membranes*, v. 13, n. 2, p. 158, 2023.

LIU, Ying; CHEN, Shi; ZHANG, Jian; GAO, Baoyu. Growth, microcystin-production and proteomic responses of *Microcystis aeruginosa* under long-term exposure to amoxicillin. *Water Research*, v. 93, p. 141–152, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.060>.

MARTIN, J. M.; MICHELANGELI, M.; BERTRAM, M. G.; BLANCHFIELD, P. J.; BRAND, J. A.; BRODIN, T. et al. Evidence of the impacts of pharmaceuticals on aquatic animal behaviour (EIPAAB): a systematic map and open access database. *Environmental Evidence*, v. 14, n. 1, p. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-025-00357-6>.

MARTIN, Jake; BERTRAM, Michael; BLANCHFIELD, Paul; BRAND, Jack; BRODIN, Tomas et al. Evidence of the impacts of pharmaceuticals on aquatic animal behaviour: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, v. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00241-z>.

MARTÍNEZ-HARO, M.; BEIRAS, R.; BELLAS, J.; CAPELA, R.; COELHO, J. P.; LOPES, I. et al. A review on the ecological quality status assessment in aquatic systems using community based indicators and ecotoxicological tools: what might be the added value of their combination? *Ecological Indicators*, v. 48, p. 8–16, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.02>.

MCKEON, D. M.; CALABRESE, J. P.; BISSONNETTE, G. K. Antibiotic resistant gram-negative bacteria in rural groundwater supplies. *Water Research*, v. 29, n. 8, p. 1902–1908, 1995.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION (NCBI). Nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs). In: StatPearls [Internet]. Treasure Island: StatPearls Publishing, 2024. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547742/>. Acesso em: 27 abr. 2026.

NOWAKOWSKA, Karolina; GIEBUŁTOWICZ, Joanna; KAMASZEWSKI, Maciej; ADAMSKI, Antoni et al. Acute exposure of zebrafish (*Danio rerio*) larvae to environmental concentrations of selected antidepressants: bioaccumulation, physiological and histological changes. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, v. 229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.108670>.

PALLECCHI, L. et al. Antibiotic resistance in the absence of antimicrobial use: mechanisms and implications. **Expert Review of Anti-infective Therapy**, v. 6, n. 5, p. 725–732, out. 2008.

PAULSHUS, E. et al. Diversity and antibiotic resistance among *Escherichia coli* populations in hospital and community wastewater compared to wastewater at the receiving urban treatment plant. **Water Research**, v. 161, p. 232–241, set. 2019.

PEREIRA, Camilo D. Seabra; MARANHO, Luciane A.; CORTEZ, Fernando S.; PUSCEDDU, Fabio H.; SANTOS, Aldo R.; RIBEIRO, Daniel A.; CESAR, Augusto; GUIMARÃES, Luciana L. Occurrence of pharmaceuticals and cocaine in a Brazilian coastal zone. *Science of the Total Environment*, v. 548–549, p. 148–154, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.051>.

PESSOA, G. P.; SOUZA, N. C.; ALVES, J. A. C.; NASCIMENTO, R. F.; SANTOS, A. B. Análise de remoção de interferentes endócrinos em estações de tratamento de esgotos sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 2011, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABES, 2011.

PIDDOCK, L. J. V. 2006. Clinically Relevant Chromosomally Encoded Multidrug Resistance Efflux Pumps in Bacteria. *Clin Microbiol Rev* 19: <https://doi.org/10.1128/cmr.19.2.382-402.2006>.

PROIA, L. et al. Occurrence and persistence of antibiotic resistance genes in river biofilms after wastewater inputs in small rivers. *Environmental Pollution*, v. 210, p. 121–128, mar. 2016.

POMPEO, Marcelo et al. *Ecologia de reservatórios e interfaces*. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/9788585658526>. Disponível em: <https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/35>. Acesso em: 6 maio 2026.

REDDERSEN, K.; HEBERER, T.; DÜNNBIER, U. Identification and significance of phenazone drugs and their metabolites in ground- and drinking water. **Chemosphere**, v. 49, n. 6, p. 539–544, nov. 2002.

RIGOBELLO, Eliane Sloboda. Avaliação da remoção de diclofenaco e formação de subprodutos em tratamento de água. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São

Carlos, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-24072012-165052/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

RIGUETO, C; ALESSANDRETTI, I; DETTMER, A. Remoção de contaminantes emergentes de águas residuais por adsorção: um review. In: Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química. Anais. Diamantina (MG) online, 2021.

ROSALES, E. et al. Comprehensive strategy for the degradation of anti-inflammatory drug diclofenac by different advanced oxidation processes. Separation and Purification Technology, v. 208, p. 130–141, jan. 2019.

SILVA, Marina Góis Pereira Leite. Contaminação de águas por diclofenaco e ibuprofeno: impacto ambiental e implicações ecotoxicológicas. 2017. 47 f. Monografia (Graduação em Farmácia) – Escola de Farmácia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, Thamiris Rocha Guerra da. Poluentes emergentes, abordagem ecotoxicológica na legislação e estudo de caso sobre a identificação de microplásticos em um corpo hídrico no município de Macaé/RJ. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2024.

SIMS, Natalie; KASPRZYK-HORDERN, Barbara. Future perspectives of wastewater-based epidemiology: monitoring infectious disease spread and resistance to the community level. Environment International, v. 139, 2020.

SOUZA, B. P. Avaliação da remoção de sulfametoxazol, diclofenaco e 17 β -estradiol em água por meio de processo oxidativo com cloro. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

SOUZA, Brígida; QUARESMA, Amanda; LIMA, Diego; ALMEIDA, Marys; AFONSO, Robson; AQUINO, Sérgio; LIBÂNIO, Marcelo. Oxidação de fármacos por cloro e formação de subprodutos em águas naturais. Revista DAE, v. 70, p. 129–141, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.009>.

STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Stockholm: United Nations Environment Programme (UNEP), 2001.

STUMPF, Marcus; TERNES, Thomas A.; WILKEN, Rolf-Dieter; RODRIGUES, Silvana Vianna; BAUMANN, Wolfram. Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 225, n. 1–2, p. 135–141, 1999.

TERNES, Thomas A. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research*, v. 32, n. 11, p. 3245–3260, 1998.

TORRES, Nádia Hortense; PINÊ AMÉRICO, Juliana Heloísa; FERREIRA, Luiz Fernando Romanholo; NAZATO, Carina; MARANHO, Lucineide Aparecida; VILCA, Franz Zirena; TORNISIELO, Valdemar Luiz. Fármacos no ambiente: revisão. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 14, n. 4, p. 67–75, 2013.

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: Rima, 2003.

UEDA, J. et al. Impacto ambiental do descarte de fármacos e estudo da conscientização da população a respeito do problema. *Revista Ciências do Ambiente On-line*, v. 5, n. 1, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). How pharmaceuticals enter the environment. Disponível em: <https://www.epa.gov/household-medication-disposal/how-pharmaceuticals-enter-environment>. Acesso em: 1 out. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). National Primary Drinking Water Regulation for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Washington, DC: USEPA, 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Regulatory determinations support document for selected contaminants from the second drinking water contaminant candidate list (CCL 2). Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-09/documents/report_ccl2-reg2_supportdocument_full.pdf. Acesso em: 1 out. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). PFAS national primary drinking water regulation. Disponível em: <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>. Acesso em: 21 maio 2026.

VANDENBERG, L. N. et al. Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses. **Endocrine Reviews**, v. 33, n. 3, p. 378–455, jun. 2012.

VILLAIN, J.; MINGUEZ, L.; HALM-LEMEILLE, M. P.; DURRIEU, G.; BUREAU, R. Acute toxicities of pharmaceuticals toward green algae: mode of action, biopharmaceutical drug disposition classification system and quantile regression models. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 124, p. 337–343, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.009>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals - 2012.: WHO, 2012. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/state-of-the-science-of-endocrine-disrupting-chemicals>. Acesso em: 20 mai. 2026

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition. Geneva: WHO, 2017. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 10 abr. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Pharmaceuticals in drinking-water*. Geneva: World Health Organization, 2012. Disponível em: WHO – Pharmaceuticals in drinking-water. Acesso em: 21 maio 2026. EUROPEAN COMMISSION. Drinking water directive. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/drinking-water_en. Acesso em: 21 maio 2026.

YAMASHITA, N.; YASOJIMA, M.; NAKADA, N.; MIYAJIMA, K.; KOMORI, K.; SUZUKI, Y.; TANAKA, H. Effects of antibacterial agents, levofloxacin and clarithromycin, on aquatic organisms. *Water Science and Technology*, v. 53, n. 11-12, p. 65–70, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2006.338>.

ZHANG, Y.; GEISSEN, S. U.; GAL, C. Carbamazepine and diclofenac: removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere*, v. 73, n. 8, p. 1151–1161, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.086>.