COLETÂNEA · QUÍMICA, AMBIENTE E ENSINO

Conexões *Científicas*

AMBIENTE, SAÚDE, EDUCAÇÃO E INOVAÇÃO



ORGANIZADORES

Jozadake Petry Fausto
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Josilene Pereira Silva
Giselle Silva de Souza
José Vitor da Silva Nunes

EDITORA MANUAL

CONEXÕES CIENTÍFICAS

AMBIENTE, SAÚDE, EDUCAÇÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
JOZADAKE PETRY FAUSTO
MARIANA CABRAL DO NASCIMENTO SANTOS
JOSILENE PEREIRA SILVA
GISELLE SILVA DE SOUZA
JOSÉ VITOR DA SILVA NUNES

CONEXÕES CIENTÍFICAS

AMBIENTE, SAÚDE, EDUCAÇÃO E INOVAÇÃO

1ª Edição

Editora Manual
2026

Copyright © dos autores e autoras. Todos os direitos reservados.

Esta obra é publicada em acesso aberto. O conteúdo dos capítulos, os dados apresentados, bem como a revisão ortográfica e gramatical são de responsabilidade de seus autores, detentores de todos os Direitos Autorais, que permitem o download e o compartilhamento, com a devida atribuição de crédito, mas sem que seja possível alterar a obra, de nenhuma forma, ou utilizá-la para fins comerciais.

Catalogação na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

C747

Conexões científicas: ambiente, saúde, educação e inovação / Organização de Jozadake Petry Fausto, Mariana Cabral do Nascimento Santos, Josilene Pereira Silva, et al. – Cariacica/ES: Manual, 2026.

Outros organizadores: Giselle Silva de Souza, José Vitor da Silva Nunes.

Livro em PDF

ISBN 978-65-83121-31-8

1. Pesquisa interdisciplinar. 2. Meio ambiente. 3. Saúde. 4. Educação. 5. Inovação. I. Fausto, Jozadake Petry (Organizador). II. Santos, Mariana Cabral do Nascimento (Organizadora). III. Silva, Josilene Pereira (Organizadora). IV. Título.

CDD 001.4

Índice para catálogo sistemático

I. Pesquisa interdisciplinar

Obra publicada em Setembro de 2026.

© 2026. Todos os direitos reservados.
Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, armazenada ou transmitida por qualquer meio sem observância da legislação aplicável e dos direitos autorais, ressalvadas as hipóteses legalmente permitidas.

EXPEDIENTE EDITORIAL

TÍTULO
CONEXÕES CIENTÍFICAS - AMBIENTE, SAÚDE, EDUCAÇÃO E INOVAÇÃO

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

EDITORA
EDITORA MANUAL CNPJ: 12.072.139/0001-20
(27) 99750-4756 www.editoramanual.com.br editoramanualoficial@gmail.com
Rua Costa Brandão,785, Loja A, São Benedito, Cariacica, Espírito Santo – ES, CEP: 29145-340

EDIÇÃO
1ª edição, 2026

ORGANIZAÇÃO
JOZADAKE PETRY FAUSTO
MARIANA CABRAL DO NASCIMENTO SANTOS
JOSILENE PEREIRA SILVA
GISELLE SILVA DE SOUZA
JOSÉ VITOR DA SILVA NUNES

EDITOR-CHEFE
Afonso Henrique Souza de Assis

PRODUTOR EDITORIAL
Matheus Sales

REVISÃO
Organizador

CAPA
Claude

REVISÃO DE TEXTO E CAPA
Organizador

DIAGRAMAÇÃO
Cintia Campos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1
MICROPLÁSTICOS COMO VETORES DE CONTAMINANTES AMBIENTAIS: OCORRÊNCIA, TRANSPORTE E IMPACTOS NOS ECOSSISTEMAS 07

Juciele da Silva Monteiro
Jozadake Petry Fausto
Giselle Silva de Souza
Mariana Cabral do Nascimento Santos
João Pedro Silva Oliveira
Maria Thalia Paulino de Farias
Albani Correia de Vasconcelos
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LEITE E SUA INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS FERMENTATIVOS DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS 25

Paulo de Tárcio da Silva Júnior
Jozadake Petry Fausto
Giselle Silva de Souza
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Juciele da Silva Monteiro
Pedro Almeida do Nascimento Júnior
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 3

RESÍDUOS PLÁSTICOS NA AGRICULTURA: IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO 42

Dário Santos Fontes
Jozadake Petry Fausto
Giselle Silva de Souza
Amanda da Silva Santos
Monique Maria de Souza Costa
Albani Correia de Vasconcelos
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 4

CONTAMINANTES EMERGENTE EM MATRIZES AMBIENTAIS: OCORRÊNCIA, DISPERSÃO, RISCOS ECOTOXICOLÓGICOS E ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO 59

Giselle Silva de Souza

Jozadake Petry Fausto
Maria Thalia Paulino de Farias
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Maria Edwirges Vital Silva Diniz
Pedro Almeida do Nascimento Júnior
Albani Correia de Vasconcelos
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 5

CONTAMINANTES FARMACÊUTICOS NO AMBIENTE: OCORRÊNCIA, IMPACTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS E RISCOS À SAÚDE 77

Paulo de Tárcio da Silva Júnior

CAPÍTULO 6

TRATAMENTO DE EFLUENTES NO ENSINO DE QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA 96

Allysson Paulino da Silva
Jozadake Petry Fausto
Paulo de Tárcio da Silva Júnior
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Erijane da Silva Macedo
Maria Thalia Paulino de Farias
Giselle Silva de Souza
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 7

TRATAMENTO DE EFLUENTES COMO TEMA GERADOR NO ENSINO DE QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO DE UMA PROPOSTA DIDÁTICA 111

Rosália Cristina da Silva Nunes Andrade
Jozadake Petry Fausto
Mariana Cabral do Nascimento Santos
Giselle Silva de Souza
Josilene Pereira Silva

CAPÍTULO 1

MICROPLÁSTICOS COMO VETORES DE CONTAMINANTES AMBIENTAIS: OCORRÊNCIA, TRANSPORTE E IMPACTOS NOS ECOSSISTEMAS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-1

Juciele da Silva Monteiro, e-mail: jucielle.santus@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9402141032729211
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Mariana Cabral do Nascimento Santos, e-mail: marianacabralsantos2@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7558622538353505
João Pedro Silva Oliveira, e-mail: jpoliveira875@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/1145217569751642
Maria Thalia Paulino de Farias, e-mail: maria.thalia@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/4370186459099148
Albani Correia de Vasconcelos, e-mail: mailto:albanivasconcelos@hotmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9413008499837926
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

Os microplásticos constituem contaminantes amplamente distribuídos nos ecossistemas e, além dos efeitos relacionados à presença das próprias partículas, podem interagir com diferentes substâncias químicas, despertando preocupação quanto à sua atuação como potenciais vetores de contaminantes ambientais. Este estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas sobre a ocorrência e distribuição dos microplásticos, suas interações com contaminantes e seu papel no transporte, biodisponibilidade e efeitos ecotoxicológicos dessas substâncias. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, orientada pelas recomendações do PRISMA 2020. As buscas foram realizadas nas bases PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO, Springer Nature e Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações entre 2021 e 2026. Dos 150 registros inicialmente identificados, 24 estudos atenderam aos critérios de elegibilidade e integraram a síntese qualitativa. Os resultados demonstraram ampla ocorrência de microplásticos em ambientes aquáticos e terrestres e evidenciaram sua capacidade de interagir com metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos, fármacos e outros contaminantes emergentes. Os processos de adsorção e dessorção mostraram-se dependentes das características do polímero e do contaminante, bem como de fatores como tamanho das partículas, envelhecimento, pH, salinidade e matéria orgânica. Embora as evidências confirmem a capacidade dos microplásticos de transportar substâncias adsorvidas, a relevância do efeito vetor depende das condições ambientais, da biodisponibilidade e da possibilidade de liberação dos contaminantes. Persistem lacunas relacionadas à padronização metodológica, representatividade dos experimentos laboratoriais, exposições crônicas, misturas de contaminantes, partículas envelhecidas e nanoplásticos. Conclui-se que a avaliação dos riscos associados aos microplásticos requer uma abordagem integrada entre química ambiental, transporte de contaminantes e ecotoxicologia.

PALAVRAS-CHAVE: microplásticos; contaminantes ambientais; adsorção; transporte ambiental; ecotoxicologia.

1. INTRODUÇÃO

A produção e o consumo crescente de materiais plásticos, associados à elevada persistência desses materiais e às limitações relacionadas ao seu gerenciamento após o uso, têm contribuído para a disseminação de resíduos plásticos nos diferentes compartimentos ambientais. Ao longo do tempo, processos físicos, químicos e biológicos promovem a fragmentação desses materiais, originando partículas de menores dimensões capazes de permanecer e se deslocar no ambiente. Entre elas, os microplásticos têm recebido atenção crescente devido à sua ampla ocorrência e às possíveis implicações para a qualidade ambiental e o funcionamento dos ecossistemas (Andrady, 2011; Rafa *et al.*, 2024).

Os microplásticos podem ter origem primária, quando são produzidos originalmente em pequenas dimensões, ou secundária, quando resultam da fragmentação de materiais plásticos maiores. Sua presença tem sido registrada em ambientes aquáticos e terrestres, incluindo águas continentais e marinhas, solos e sedimentos, demonstrando que sua dispersão ultrapassa os locais onde ocorre a emissão inicial. Nos solos, particularmente em áreas agrícolas, diferentes fontes podem contribuir para sua introdução e permanência, enquanto nos sistemas aquáticos o escoamento superficial, os efluentes e o transporte fluvial favorecem sua redistribuição entre diferentes compartimentos ambientais (Tumwesigye *et al.*, 2023; En-Nejmy *et al.*, 2024; Hoang *et al.*, 2024).

Além da contaminação decorrente da própria presença das partículas, uma questão que tem ampliado a preocupação científica é a capacidade dos microplásticos de interagir com outras substâncias presentes no ambiente. Suas superfícies podem estabelecer interações com metais potencialmente tóxicos, pesticidas, hidrocarbonetos, poluentes orgânicos persistentes, fármacos, antibióticos e outros contaminantes emergentes. Dessa maneira, os microplásticos podem atuar como superfícies de sorção, modificando potencialmente o comportamento, a mobilidade e o destino ambiental de determinados compostos (Prajapati; Vaidya; Kumar, 2022; Xia; Niu; Yu, 2023; Xiong *et al.*, 2024).

A capacidade de sorção, entretanto, não é uniforme e depende de uma combinação de fatores. Características como composição do polímero, tamanho da partícula, área superficial e grau de envelhecimento podem interferir na afinidade pelos contaminantes. Da mesma forma, condições ambientais como pH, salinidade, força iônica e presença de matéria orgânica influenciam os processos de adsorção e dessorção. Particularmente, o envelhecimento pode provocar alterações físico-químicas na superfície das partículas e modificar sua interação com diferentes substâncias, tornando necessário considerar as características reais dos microplásticos encontrados no ambiente (Bhagat *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2024; Muthuraja *et al.*, 2024).

Nesse contexto, surgiu a discussão sobre a atuação dos microplásticos como vetores de contaminantes ambientais. A associação de substâncias químicas às partículas pode favorecer seu transporte entre compartimentos e possibilitar sua posterior liberação em condições ambientais distintas. Contudo, a simples constatação de um contaminante adsorvido ao microplástico não é suficiente para demonstrar que a partícula representa uma via adicional e ecologicamente relevante de exposição. Para isso, devem ser considerados aspectos como estabilidade da interação, capacidade de dessorção, biodisponibilidade e contribuição dessa via em comparação com outras formas de transporte presentes no ambiente (Tumwesigye *et al.*, 2023; Xia; Niu; Yu, 2023).

Essa questão adquire maior relevância quando considerada a possibilidade de ingestão das partículas por organismos e de exposição simultânea aos microplásticos e aos contaminantes associados. Alterações nas condições físico-químicas durante a passagem das partículas entre compartimentos ambientais ou após sua ingestão podem modificar o equilíbrio de sorção e influenciar a disponibilidade das substâncias transportadas. Consequentemente, investigações sobre biodisponibilidade, transferência trófica e efeitos ecotoxicológicos são necessárias para compreender se a interação entre microplásticos e contaminantes efetivamente modifica os riscos aos organismos e aos ecossistemas (Rafa *et al.*, 2024; Xiong *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços recentes, permanecem desafios relacionados à diversidade metodológica dos estudos, à utilização frequente de partículas virgens e concentrações experimentais pouco representativas das condições naturais e à dificuldade de investigar misturas complexas de contaminantes. Soma-se a isso a crescente preocupação com partículas envelhecidas e nanoplásticos, que apresentam características distintas e maiores dificuldades de identificação e quantificação em matrizes ambientais complexas (Silva; Barceló; Rocha-Santos, 2024; Gao *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, esta revisão teve como objetivo analisar as evidências científicas sobre a ocorrência e distribuição dos microplásticos nos ecossistemas, suas interações com contaminantes ambientais e seu papel no transporte, biodisponibilidade e efeitos ecotoxicológicos dessas substâncias. Buscou-se ainda compreender os fatores que condicionam essas interações e identificar as principais lacunas e perspectivas para o avanço das pesquisas sobre o papel dos microplásticos como potenciais vetores de contaminantes ambientais.

2. METODOLOGIA

2.1 Tipo de estudo e protocolo da revisão

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, com o objetivo de analisar as evidências científicas sobre a ocorrência e distribuição de microplásticos nos diferentes compartimentos ambientais, suas interações com contaminantes químicos, os processos envolvidos no transporte e destino ambiental dessas partículas e substâncias associadas, bem como suas implicações para a biodisponibilidade, transferência trófica e efeitos ecotoxicológicos nos ecossistemas. A condução e o relato da revisão foram orientados pelas recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020), visando assegurar maior transparência e sistematização nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora estabelecida para a revisão foi: Quais são as principais evidências científicas sobre a ocorrência e distribuição dos microplásticos nos ecossistemas, suas interações com contaminantes ambientais e seu papel no transporte, biodisponibilidade e efeitos ecotoxicológicos dessas substâncias? De forma complementar, buscou-se identificar os principais fatores físico-químicos e ambientais que condicionam essas interações, bem como as limitações metodológicas e as lacunas ainda existentes na compreensão do papel dos microplásticos como vetores de contaminantes.

2.2 Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO, Springer Nature e Portal de Periódicos CAPES, considerando artigos publicados entre 2021 e 2026, nos idiomas português, inglês e espanhol. A estratégia de busca foi estruturada a partir de descritores relacionados aos microplásticos, contaminantes associados, transporte ambiental e efeitos ecotoxicológicos. Entre os termos empregados estiveram: *"microplastics", "microplastic pollution", "environmental contaminants", "emerging contaminants", "heavy metals", "potentially toxic elements", "pesticides", "pharmaceuticals", "antibiotics", "persistent organic pollutants", "adsorption", "desorption", "sorption", "environmental fate", "transport", "bioavailability", "bioaccumulation", "trophic transfer", "ecotoxicity", "aquatic ecosystems", "terrestrial ecosystems", "soil", "water"* e *"sediment"*.

Os descritores foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, com adaptações de acordo com os mecanismos de busca de cada base. Como estratégia geral, foram utilizadas combinações entre o termo central *"microplastics"* e os diferentes grupos temáticos, como: *"microplastics AND environmental contaminants"*, *"microplastics AND adsorption AND heavy metals"*, *"microplastics AND pharmaceuticals"*, *"microplastics AND environmental fate"*, *"microplastics AND trophic transfer"* e *"microplastics AND ecotoxicity"*. Ao final das buscas nas bases selecionadas, foram identificados 150 registros potencialmente relevantes para a revisão.

2.3 Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos científicos publicados entre 2021 e 2026, nos idiomas português, inglês ou espanhol, que apresentassem relação direta com os microplásticos em ambientes naturais ou sistemas ambientalmente relevantes. Foram considerados elegíveis

estudos que abordassem pelo menos um dos seguintes aspectos: ocorrência, fontes e distribuição de microplásticos; interação com contaminantes ambientais; mecanismos de adsorção e dessorção; transporte e destino ambiental; influência das propriedades dos polímeros e das condições ambientais sobre a sorção de contaminantes; biodisponibilidade; transferência trófica; bioacumulação; e efeitos ecotoxicológicos sobre organismos e ecossistemas aquáticos ou terrestres.

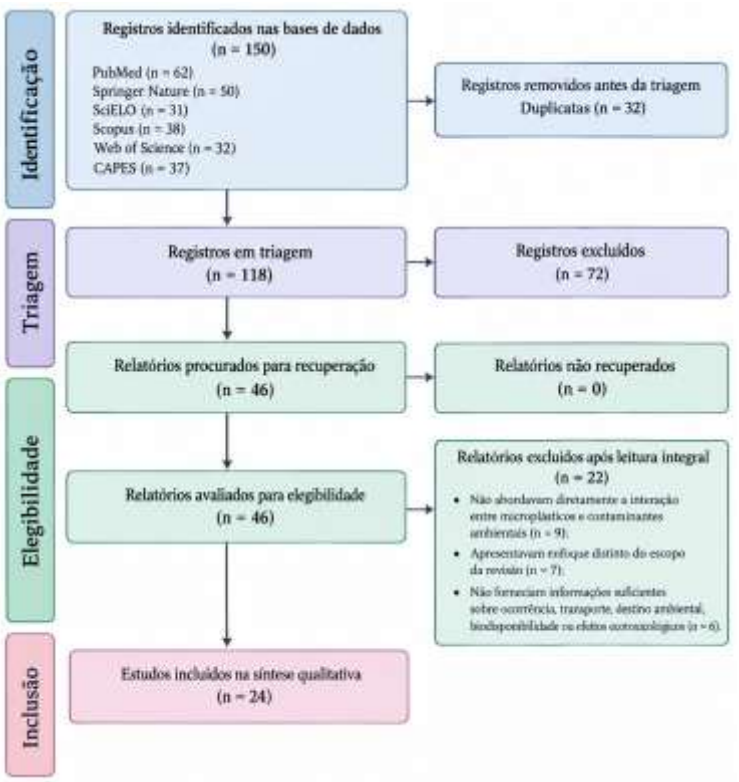
Também foram considerados estudos envolvendo diferentes classes de contaminantes associados aos microplásticos, incluindo metais potencialmente tóxicos, pesticidas, hidrocarbonetos, poluentes orgânicos persistentes, fármacos, antibióticos e outros contaminantes emergentes.Foram excluídos registros duplicados, publicações fora do período estabelecido, estudos sem relação direta com microplásticos ou com sua interação com contaminantes ambientais, trabalhos exclusivamente clínicos ou relacionados à saúde humana sem abordagem ambiental ou ecotoxicológica, além de editoriais, cartas, resumos de eventos e publicações que não apresentassem informações suficientes para responder à questão norteadora. Trabalhos anteriores ao período estabelecido foram utilizados, quando necessário, exclusivamente para fundamentação conceitual e contextualização histórica da temática, não integrando o conjunto de estudos submetidos à síntese sistemática.

2.4 Seleção dos estudos

A seleção dos estudos foi realizada em etapas sucessivas, seguindo o fluxo recomendado pelo PRISMA 2020: identificação, triagem, avaliação de elegibilidade e inclusão (Page *et al.*, 2021). Inicialmente, foram identificados 150 registros nas bases de dados selecionadas. Após a remoção de 32 registros duplicados, permaneceram 118 estudos para a etapa de triagem por título e resumo.

Durante a triagem, 72 estudos foram excluídos por não apresentarem relação direta com o objetivo da revisão ou por não atenderem aos critérios de inclusão previamente estabelecidos. Dessa forma, 46 artigos foram selecionados para avaliação em texto completo. Após a leitura integral, 22 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade, principalmente por não abordarem diretamente a interação entre microplásticos e contaminantes ambientais, apresentarem enfoque distinto do escopo da revisão ou não fornecerem informações suficientes sobre ocorrência, transporte, destino ambiental, biodisponibilidade ou efeitos ecotoxicológicos. Ao final do processo de seleção, 24 estudos atenderam aos critérios estabelecidos e foram incluídos na síntese qualitativa.

Figura 1 - Fluxograma do processo de identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme as recomendações do PRISMA 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.5 Extração e análise dos dados

Os dados dos estudos incluídos foram extraídos e organizados de forma sistemática, considerando as seguintes informações: autoria e ano de publicação; ambiente ou matriz investigada; fonte e características dos microplásticos; tipo de polímero; tamanho e formato das partículas; classe de contaminante associada; mecanismos de adsorção e dessorção; influência do envelhecimento das partículas e das condições ambientais; processos de transporte e destino ambiental; biodisponibilidade; transferência trófica; bioacumulação; organismos avaliados; efeitos ecotoxicológicos; principais resultados e limitações apontadas pelos estudos.

Também foram consideradas variáveis ambientais capazes de interferir na interação entre microplásticos e contaminantes, incluindo pH, salinidade, matéria orgânica e características físico-químicas da matriz, além das propriedades superficiais e do grau de envelhecimento dos polímeros.

A síntese dos resultados foi realizada de forma qualitativa e temática, mediante comparação e integração das evidências encontradas. Os estudos foram organizados em cinco eixos de análise, correspondentes às categorias centrais desta revisão: (1) ocorrência, fontes e

distribuição de microplásticos nos ecossistemas; (2) interação dos microplásticos com contaminantes ambientais; (3) transporte, destino ambiental e papel dos microplásticos como vetores; (4) biodisponibilidade, transferência trófica e impactos ecotoxicológicos; e (5) desafios, lacunas do conhecimento e perspectivas futuras.

Essa organização permitiu analisar não apenas a capacidade dos microplásticos de adsorver diferentes contaminantes, mas também avaliar criticamente em quais condições essa associação pode favorecer seu transporte e modificar sua biodisponibilidade e seus efeitos ambientais, evitando assumir o papel dos microplásticos como vetores independentemente das condições experimentais ou ambientais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ocorrência, fontes e distribuição de microplásticos nos ecossistemas

A presença de microplásticos têm sido documentada em diferentes compartimentos ambientais, demonstrando que a contaminação por essas partículas não se restringe aos ambientes marinhos, onde inicialmente recebeu maior atenção científica. Atualmente, sua ocorrência é reconhecida em águas continentais, solos, sedimentos e sistemas agrícolas, evidenciando a ampla dispersão desses materiais e a existência de múltiplas rotas de entrada no ambiente. Essa distribuição está diretamente relacionada à produção, ao consumo e ao descarte de materiais plásticos, bem como à fragmentação progressiva de resíduos de maiores dimensões após sua exposição às condições ambientais (Andrady, 2011; En-Nejmy *et al.*, 2024; Hoang *et al*., 2024).

Quanto à origem, os microplásticos podem ser classificados em primários e secundários. Os primários são produzidos originalmente em dimensões microscópicas para determinadas aplicações, enquanto os secundários resultam da degradação e fragmentação de materiais plásticos maiores. Radiação ultravioleta, variações de temperatura, abrasão mecânica e processos químicos e biológicos contribuem para essa fragmentação, favorecendo a formação de partículas com diferentes tamanhos, formas e características superficiais. Dessa maneira, o comportamento ambiental dos microplásticos não depende somente da quantidade presente no meio, mas também de propriedades como composição polimérica, densidade, tamanho, formato e grau de envelhecimento (Andrady, 2011; Gao *et al.*, 2024).

Nos ambientes terrestres, diferentes atividades constituem fontes potenciais de microplásticos. Em áreas agrícolas, destacam-se o uso de filmes plásticos, sistemas de irrigação, aplicação de lodos e compostos orgânicos contaminados, além da deposição de partículas transportadas de outras áreas. Uma vez incorporados ao solo, os microplásticos podem permanecer por períodos prolongados e sofrer alterações físicas e químicas capazes de

interferir em sua mobilidade e interação com os componentes do ambiente. As evidências disponíveis demonstram, portanto, que os solos não constituem apenas locais de deposição, mas compartimentos relevantes na dinâmica ambiental dessas partículas (Shi *et al.,* 2024; Hoang *et al.*, 2024; Zeb *et al.*, 2024).

Em sistemas aquáticos, as partículas podem chegar por meio do lançamento de efluentes, drenagem urbana, escoamento superficial e transporte fluvial, entre outras vias. Os rios assumem particular importância nessa dinâmica por receberem materiais provenientes de diferentes fontes e promoverem sua redistribuição ao longo da bacia hidrográfica. A ocorrência em ecossistemas de água doce amplia a preocupação ambiental, uma vez que esses sistemas estabelecem conexões entre ambientes terrestres, estuarinos e marinhos e podem favorecer a transferência de partículas e substâncias associadas entre diferentes compartimentos (Tumwesigye *et al*., 2023; Rafa *et al.*, 2024).

A diversidade de polímeros encontrada no ambiente acrescenta complexidade a esse cenário. Polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poli(tereftalato de etileno) (PET), entre outros materiais, apresentam propriedades distintas e, consequentemente, comportamentos diferentes quanto à flutuação, sedimentação, transporte e interação com substâncias químicas. Além disso, materiais considerados biodegradáveis também podem originar partículas durante seu processo de degradação, indicando que a substituição dos plásticos convencionais não elimina necessariamente a problemática dos microplásticos (Ainali *et al.*, 2022; Chen *et al*., 2024).

Assim, a distribuição ambiental dos microplásticos deve ser compreendida como resultado da interação entre fontes de emissão, propriedades das partículas e características do compartimento ambiental. Essa perspectiva é particularmente relevante porque a ampla dispersão dessas partículas aumenta a possibilidade de contato com outros contaminantes, estabelecendo as condições necessárias para que os microplásticos atuem como superfícies de sorção e, potencialmente, como vetores de substâncias químicas.

3.2 Interação dos microplásticos com contaminantes ambientais

Além dos efeitos associados à presença física das partículas, uma das questões mais relevantes envolvendo microplásticos é sua capacidade de interagir com substâncias químicas presentes no ambiente. A superfície desses materiais pode adsorver diferentes classes de contaminantes, incluindo metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos hidrofóbicos, hidrocarbonetos, poluentes orgânicos persistentes, pesticidas, fármacos e outros contaminantes emergentes. Por essa razão, os microplásticos passaram a ser investigados não apenas como

contaminantes isolados, mas como componentes capazes de modificar o comportamento ambiental de outras substâncias (Prajapati; Vaidya; Kumar, 2022; Xia; Niu; Yu, 2023; Biswas *et al.,* 2024).

A intensidade dessas interações é condicionada pelas características tanto do contaminante quanto da partícula. Tipo de polímero, tamanho, porosidade, área superficial, carga da superfície e grau de envelhecimento podem modificar a capacidade de sorção. Paralelamente, propriedades do meio, como pH, força iônica, salinidade e presença de matéria orgânica, interferem no equilíbrio entre contaminantes dissolvidos e aqueles associados às partículas. Portanto, não existe uma capacidade de adsorção uniforme que possa ser atribuída a todos os microplásticos, sendo necessário considerar conjuntamente polímero, contaminante e matriz ambiental (Xia; Niu; Yu, 2023; Xiong *et al.*, 2024).

Essa dependência torna-se evidente nos estudos envolvendo metais. Evidências experimentais mostram que microplásticos podem acumular metais em sua superfície, mas a magnitude dessa interação varia consideravelmente de acordo com o material e as condições ambientais. Chen *et al.* (2024), ao investigarem microplásticos derivados de produtos plásticos convencionais e biodegradáveis, demonstraram a relevância das características do material para a adsorção de metais. De forma complementar, Muthuraja *et al.* (2024) mostraram que tamanho da partícula e envelhecimento interferem nesse processo em microplásticos de polipropileno e poliestireno. Esses resultados atualizam evidências anteriores sobre o potencial dos microplásticos para transportar metais em ambientes marinhos e outros sistemas ambientais (Brennecke *et al.*, 2016; Godoy *et al.*, 2019).

O envelhecimento merece atenção especial porque as partículas encontradas no ambiente raramente apresentam as mesmas características dos materiais recém-produzidos. Durante sua permanência no meio, processos fotoquímicos, mecânicos e oxidativos alteram a superfície do polímero, podendo aumentar sua rugosidade, modificar grupos funcionais e alterar sua afinidade por determinadas substâncias. A revisão realizada por Gao *et al.* (2024) demonstra que essas transformações físico-químicas possuem implicações diretas sobre os mecanismos de adsorção. Em condições ambientais de maricultura, Du *et al.* (2024) também observaram a associação de metais com microplásticos envelhecidos, reforçando a necessidade de considerar partículas ambientalmente modificadas na avaliação de risco.

Comportamento semelhante tem sido observado para contaminantes orgânicos. Bhagat *et al.* (2022) verificaram aumento da afinidade de adsorção por contaminantes orgânicos após o envelhecimento dos microplásticos, indicando que o tempo de permanência da partícula no ambiente pode modificar sua função como superfície de sorção. Essa constatação é importante

porque grande parte das partículas presentes em ambientes naturais já passou por algum grau de transformação antes de entrar em contato com organismos.

Os fármacos representam outro grupo relevante de contaminantes emergentes. McDougall *et al*. (2022) demonstraram a adsorção de diferentes compostos farmacêuticos em microplásticos de polietileno em águas residuárias e avaliaram posteriormente sua dessorção em diferentes matrizes. Kalaronis *et al.* (2024), por sua vez, investigaram a adsorção de diversos fármacos em PET virgem e envelhecido, enquanto Moura *et al.* (2024) demonstraram que o envelhecimento pode favorecer a adsorção de fármacos em condições de água doce. Em conjunto, esses resultados mostram que a interação microplástico–fármaco é dinâmica e depende tanto das propriedades do composto quanto das transformações sofridas pelo polímero (Silva; Barceló; Rocha-Santos, 2024).

A dessorção é igualmente importante para compreender o risco ambiental. Uma partícula capaz de acumular um contaminante não necessariamente o manterá permanentemente retido. Mudanças nas condições químicas do meio ou a transferência da partícula para outro compartimento podem alterar o equilíbrio e favorecer a liberação da substância anteriormente adsorvida. Consequentemente, a relevância ambiental dos microplásticos como carreadores depende não apenas de sua capacidade de acumular contaminantes, mas também da possibilidade de transportá-los e posteriormente disponibilizá-los em outro ambiente ou para organismos expostos (McDougall *et al.*, 2022; Xia; Niu; Yu, 2023; Xiong *et al.*, 2024).

3.3 Transporte, destino ambiental e papel dos microplásticos como vetores

A mobilidade dos microplásticos entre diferentes compartimentos ambientais constitui um dos elementos centrais da hipótese de que essas partículas possam funcionar como vetores de contaminantes. Após sua liberação, elas podem ser transportadas pelo escoamento superficial, cursos d'água e outros processos ambientais, além de sofrer deposição, sedimentação e ressuspensão. Em solos agrícolas, sua dinâmica está relacionada às propriedades das partículas e às características do próprio solo, enquanto nos ambientes aquáticos fatores hidrodinâmicos e características dos polímeros influenciam sua permanência na coluna d'água ou deposição nos sedimentos (Hoang *et al.*, 2024; Rafa *et al*., 2024).

Nesse processo, os microplásticos não permanecem quimicamente inalterados. Fragmentação, oxidação, abrasão e outros mecanismos de envelhecimento modificam progressivamente as partículas durante o transporte. Essas transformações podem afetar simultaneamente sua mobilidade e sua capacidade de interação com substâncias presentes no

meio. Dessa forma, envelhecimento e transporte constituem processos interdependentes: enquanto o deslocamento expõe os microplásticos a diferentes condições ambientais, as modificações superficiais decorrentes dessa exposição podem alterar sua interação posterior com contaminantes (Bhagat *et al.,* 2022; Gao *et al.,* 2024).

A possibilidade de transportar substâncias adsorvidas levou ao desenvolvimento do conceito de microplásticos como vetores ambientais. Estudos iniciais envolvendo metais em ambientes marinhos demonstraram que partículas plásticas poderiam acumular elementos presentes no meio e atuar como superfícies móveis de transporte (Brennecke *et al*., 2016; Godoy *et al.*, 2019). Evidências posteriores ampliaram essa discussão para diversas classes de substâncias, incluindo contaminantes orgânicos e fármacos (Prajapati; Vaidya; Kumar, 2022; Xia; Niu; Yu, 2023; Silva; Barceló; Rocha-Santos, 2024).

No entanto, interpretar a presença de um contaminante adsorvido como prova de um efeito vetor ecologicamente relevante exige cautela. Para que o microplástico altere efetivamente a exposição ambiental, é necessário considerar a quantidade de contaminante transportada, a estabilidade da associação durante o deslocamento e sua eventual dessorção no compartimento receptor ou após contato com organismos. Além disso, contaminantes podem estar simultaneamente disponíveis na água, no solo, nos sedimentos, na matéria orgânica e em outras partículas naturais. Assim, a contribuição relativa dos microplásticos precisa ser comparada às demais vias de transporte existentes no ambiente (Tumwesigye *et al.*, 2023; Xia; Niu; Yu, 2023; Xiong *et al*., 2024).

Essa abordagem ajuda a evitar uma interpretação excessivamente generalizada do termo "vetor". Os resultados disponíveis demonstram claramente que microplásticos podem adsorver e transportar diferentes substâncias, mas a importância desse mecanismo depende do contexto ambiental. Tipo e concentração do contaminante, composição e tamanho da partícula, tempo de exposição, envelhecimento, salinidade, pH e matéria orgânica podem alterar substancialmente o processo (Xia; Niu; Yu, 2023; Rafa *et al.,* 2024).

Consequentemente, o efeito vetor deve ser entendido como um fenômeno condicional e dinâmico, e não como uma propriedade universal de qualquer partícula plástica. Essa interpretação torna-se particularmente importante quando se passa da avaliação físico-química para a avaliação ecotoxicológica, pois a presença de contaminantes na superfície dos microplásticos somente terá implicações biológicas adicionais quando modificar sua biodisponibilidade ou a exposição dos organismos.

3.4 Biodisponibilidade, transferência trófica e impactos ecotoxicológicos

A ampla distribuição ambiental dos microplásticos aumenta a possibilidade de contato e ingestão dessas partículas por diferentes organismos. Entretanto, do ponto de vista ecotoxicológico, a preocupação não se limita à presença física do polímero. A associação com contaminantes químicos pode gerar exposições combinadas, nas quais os organismos entram em contato simultaneamente com a partícula e com substâncias adsorvidas em sua superfície (Rafa *et al.,* 2024; Xiong *et al*., 2024).

Nesse contexto, a biodisponibilidade constitui um aspecto fundamental. Um contaminante adsorvido ao microplástico não está necessariamente disponível para absorção biológica na mesma proporção em que está presente na partícula. Para que ocorra transferência efetiva, processos de dessorção e liberação precisam ser considerados, sobretudo diante das condições encontradas no organismo ou no compartimento ambiental receptor. Por isso, estudos de sorção isoladamente são importantes para compreender o mecanismo, mas não são suficientes para determinar a magnitude do risco ecotoxicológico (Tumwesigye *et al.,* 2023; Xiong *et al.*, 2024).

A ingestão de partículas contaminadas constitui uma das rotas potenciais para esse processo. Após a ingestão, diferenças físico-químicas entre o ambiente externo e o trato digestório podem alterar o equilíbrio de sorção e favorecer ou limitar a liberação de determinadas substâncias. Caso o contaminante seja liberado e absorvido, existe a possibilidade de efeitos adicionais aos produzidos pela própria partícula. Essa dinâmica sustenta a preocupação com a transferência de contaminantes associados aos microplásticos ao longo das relações tróficas, embora a intensidade e a relevância desse mecanismo ainda variem entre contaminantes, espécies e condições de exposição (Tumwesigye *et al.,* 2023; Rafa *et al.*, 2024).

Os potenciais efeitos não se restringem aos organismos aquáticos. A crescente identificação de microplásticos em solos ampliou a investigação para plantas, microrganismos e fauna edáfica, além dos efeitos sobre propriedades e processos do ecossistema terrestre. Revisões recentes indicam que a presença dessas partículas pode estar relacionada a alterações nas interações solo–planta–microrganismo e que o risco pode ser influenciado pelas características do polímero, concentração e tempo de exposição (Shi *et al.*, 2024; Zeb *et al.*, 2024; En-Nejmy *et al.,* 2024).

Em ambientes aquáticos, a exposição combinada ganha relevância devido à coexistência de microplásticos e diversos contaminantes na coluna d'água e nos sedimentos. O estudo de Du *et al.* (2024), realizado no contexto de áreas de maricultura intensiva, relaciona a adsorção de metais por microplásticos envelhecidos ao aumento potencial dos riscos ecológicos para organismos marinhos. Esse tipo de evidência reforça a importância de utilizar partículas

ambientalmente representativas, uma vez que microplásticos envelhecidos podem apresentar propriedades diferentes daquelas observadas em materiais virgens.

Os efeitos associados aos microplásticos e às exposições combinadas descritos na literatura incluem alterações fisiológicas e metabólicas e respostas relacionadas ao estresse oxidativo, além de possíveis repercussões sobre crescimento, reprodução e sobrevivência, dependendo do organismo e das condições experimentais. No entanto, a comparação direta entre estudos permanece difícil devido à diversidade de polímeros, tamanhos, formatos, concentrações e tempos de exposição empregados (Ainali *et al.,* 2022; Rafa *et al.*, 2024; Zeb *et al.,* 2024).

É igualmente necessário distinguir transferência trófica, bioacumulação e biomagnificação, uma vez que esses processos apresentam significados distintos. A detecção de partículas ou contaminantes em organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos não demonstra, isoladamente, que ocorreu aumento progressivo de sua concentração ao longo da cadeia alimentar. Essa distinção conceitual é importante para evitar conclusões que extrapolem as evidências disponíveis. Portanto, embora existam evidências que sustentem a preocupação com a transferência de microplásticos e contaminantes associados entre organismos, ainda são necessários estudos que integrem condições de exposição ambientalmente realistas, biodisponibilidade e efeitos em diferentes níveis de organização biológica (Tumwesigye *et al.*, 2023; Rafa *et al.*, 2024).

3.5 Desafios, lacunas do conhecimento e perspectivas futuras

Apesar do rápido avanço das pesquisas sobre microplásticos, persistem limitações que dificultam a comparação dos resultados e a avaliação precisa de seus riscos ambientais. Uma das principais questões é a falta de padronização dos procedimentos utilizados para coleta, separação, identificação e quantificação das partículas. Diferenças nos limites de tamanho considerados, nas técnicas analíticas e nos procedimentos de preparo das amostras podem produzir resultados pouco comparáveis, especialmente quando se pretende avaliar tendências de ocorrência entre diferentes ambientes (En-Nejmy *et al.,* 2024; Silva; Barceló; Rocha-Santos, 2024).

Outro desafio está na representatividade dos experimentos laboratoriais. Muitos estudos utilizam partículas comerciais, com dimensões e formas uniformes, enquanto os microplásticos ambientais apresentam diferentes graus de fragmentação, oxidação, bioincrustação e envelhecimento. Essa diferença é particularmente relevante para os estudos de sorção, pois as transformações superficiais podem modificar significativamente a afinidade pelos

contaminantes. Os resultados de Bhagat *et al.* (2022), Moura *et al.* (2024), Kalaronis *et al.* (2024) e Muthuraja *et al*. (2024), juntamente com a síntese de Gao *et al.* (2024), reforçam que partículas envelhecidas podem apresentar comportamento distinto dos materiais virgens.

Também permanece necessário aproximar as concentrações e condições utilizadas experimentalmente daquelas encontradas nos ambientes naturais. Estudos realizados em concentrações elevadas são úteis para identificar mecanismos, mas seus resultados não podem ser automaticamente extrapolados para cenários de exposição ambiental. Avançar nessa área requer experimentos com concentrações ambientalmente relevantes, exposições prolongadas e matrizes complexas, nas quais matéria orgânica, sais, minerais, microrganismos e diferentes contaminantes interagem simultaneamente (Tumwesigye *et al.*, 2023; Xia; Niu; Yu, 2023).

As misturas de contaminantes constituem outra lacuna importante. No ambiente, microplásticos dificilmente entram em contato com apenas uma substância. Metais, pesticidas, hidrocarbonetos, fármacos e outros contaminantes emergentes podem coexistir e competir por sítios de sorção ou modificar reciprocamente sua disponibilidade. A revisão sistemática de Biswas *et al.* (2024) evidencia a diversidade de contaminantes emergentes capazes de interagir com microplásticos, enquanto Silva, Barceló e Rocha-Santos (2024) destacam os desafios analíticos envolvidos na investigação simultânea de micro/nanoplásticos e compostos farmacêuticos.

A transição dos microplásticos para partículas ainda menores representa um desafio adicional. Os nanoplásticos apresentam características de superfície, mobilidade e interação biológica distintas, além de maiores dificuldades de isolamento, identificação e quantificação em matrizes ambientais complexas. Dessa forma, avanços metodológicos serão essenciais para estabelecer a ocorrência real dessas partículas e compreender sua contribuição para o transporte e a biodisponibilidade de contaminantes (Silva; Barceló; Rocha-Santos, 2024).

Além disso, as pesquisas futuras precisam integrar de maneira mais consistente química ambiental, ecotoxicologia e dinâmica dos ecossistemas. Demonstrar que determinado contaminante adsorve em uma partícula é apenas uma etapa da avaliação. É necessário determinar se essa associação modifica efetivamente seu transporte, se o contaminante é liberado após a mudança de compartimento, se ocorre aumento de biodisponibilidade e se essa alteração resulta em efeitos biológicos mensuráveis. Essa abordagem integrada permitirá estabelecer em quais situações o efeito vetor representa uma contribuição relevante para o risco ambiental (Xiong *et al.*, 2024; Rafa *et al*., 2024).

Por fim, o avanço do conhecimento deve ser acompanhado por estratégias de prevenção e monitoramento. A ampla distribuição dos microplásticos demonstra que medidas

concentradas exclusivamente na remoção das partículas após sua entrada no ambiente são insuficientes. A redução da geração de resíduos, o aprimoramento do tratamento de efluentes, o controle das fontes de emissão e o desenvolvimento de métodos analíticos comparáveis constituem elementos importantes para limitar sua dispersão. Ao mesmo tempo, materiais alternativos precisam ser avaliados considerando todo o seu ciclo de vida, uma vez que a capacidade de degradação não significa necessariamente ausência de partículas intermediárias ou de efeitos ambientais (Ainali *et al*., 2022; Hoang *et al.,* 2024; Zeb *et al.,* 2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão evidenciou que os microplásticos estão amplamente distribuídos nos ecossistemas aquáticos e terrestres, apresentando diferentes fontes, características e comportamentos ambientais. Além de constituírem contaminantes persistentes, essas partículas podem interagir com diversas substâncias químicas presentes no ambiente, incluindo metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos, fármacos e outros contaminantes emergentes. Essa capacidade amplia a complexidade da contaminação ambiental, uma vez que os microplásticos podem participar da mobilidade e do destino dessas substâncias.

As evidências analisadas demonstram que os processos de adsorção e dessorção são influenciados pelas características do polímero e do contaminante, bem como por fatores ambientais, como pH, salinidade, matéria orgânica e condições de exposição. O tamanho e, especialmente, o envelhecimento das partículas também exercem papel importante, pois as alterações físico-químicas sofridas pelos microplásticos no ambiente podem modificar sua afinidade pelos contaminantes. Dessa forma, seu comportamento como potencial vetor não pode ser generalizado, devendo ser interpretado de acordo com as condições específicas de cada sistema ambiental.

Quanto às implicações ecotoxicológicas, a associação entre microplásticos e contaminantes pode favorecer exposições combinadas e, em determinadas condições, modificar a biodisponibilidade das substâncias para os organismos. Entretanto, a presença de contaminantes adsorvidos ou sua detecção em diferentes níveis tróficos não comprova, isoladamente, aumento do risco ecológico, bioacumulação ou biomagnificação. A relevância do efeito vetor depende da quantidade transportada, da estabilidade da associação, da ocorrência de dessorção e da efetiva disponibilidade do contaminante após o contato ou a ingestão das partículas.

Por fim, persistem lacunas relacionadas à padronização dos métodos analíticos, à representatividade das condições experimentais, às exposições crônicas e às misturas de contaminantes, além da necessidade de ampliar as pesquisas envolvendo microplásticos envelhecidos e nanoplásticos. Estudos futuros devem integrar ocorrência ambiental, sorção e dessorção, transporte, biodisponibilidade e respostas ecotoxicológicas em condições mais próximas das encontradas nos ecossistemas. Essa abordagem poderá contribuir para uma avaliação mais consistente dos riscos e subsidiar estratégias de monitoramento, prevenção e redução da contaminação por microplásticos.

REFERÊNCIAS

AINALI, Nina Maria *et al*. Do poly(lactic acid) microplastics instigate a threat? A perception for their dynamic towards environmental pollution and toxicity. Science of the Total Environment, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155014.

ANDRADY, Anthony L. Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.

BHAGAT, Kartik *et al.* Aging of microplastics increases their adsorption affinity towards organic contaminants. Chemosphere, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134238.

BISWAS, Bishwatma; JOSEPH, Anuja; RANJAN, Ved Prakash; GOEL, Sudha. Adsorption of emerging contaminants on microplastics in the environment: a systematic review. ACS ES&T Water, v. 4, n. 12, p. 5207–5224, 2024. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00666.

BRENNECKE, Dennis; DUARTE, Bernardo; PAIVA, Filipa; CAÇADOR, Isabel; CANNING-CLODE, João. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.12.003.

CHEN, Po-Wen; HSIAO, Man-Ni; XIAO, Li-Wei; LIU, Zhen-Shu. Adsorption behavior of heavy metals onto microplastics derived from conventional and biodegradable commercial plastic products. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175537.

CHEN, X.; YU, X.; ZHANG, L.; ZHAO, W.; SUI, Q. Organic pollutants adsorbed on microplastics: potential indicators for source appointment of microplastics. Journal of Hazardous Materials, v. 465, art. 133225, 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133225.

DU, Huihong; CHEN, Pengyu; LIN, Xiaoping; ZHENG, Jingyi; LIU, Huatai; WANG, Xinhong. Adsorption of metals on aged microplastics in intensive mariculture areas: aggravating the potential ecological risks to marine organisms. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173964.

EN-NEJMY, K. *et al.* Microplastics in soil: a comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 288, art. 117332, 2024. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.117332.

GAO, Yu *et al.* A comprehensive review of microplastic aging: laboratory simulations, physicochemical properties, adsorption mechanisms, and environmental impacts. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177427.

GODOY, V.; BLÁZQUEZ, G.; CALERO, M.; QUESADA, L.; MARTÍN-LARA, M. A. The potential of microplastics as carriers of metals. Environmental Pollution, 2019. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113363.

HOANG, Van-Hiep *et al.* Sources, environmental fate, and impacts of microplastic contamination in agricultural soils: a comprehensive review. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175276.

KALARONIS, D. *et al.* Assessing the adsorption of a diverse range of pharmaceuticals to virgin and aged poly(ethylene terephthalate) microplastics in different environmental matrices. Environmental Science and Pollution Research, v. 31, n. 38, p. 50804–50819, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-34551-9.

MCDOUGALL, L.; THOMSON, L.; BRAND, S.; WAGSTAFF, T. A.; LAWTON, L. A.; PETRIE, B. Adsorption of a diverse range of pharmaceuticals to polyethylene microplastics in wastewater and their desorption in environmental matrices. Science of the Total Environment, v. 808, art. 152071, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152071.

MOURA, Diana S. *et al.* Aging microplastics enhances the adsorption of pharmaceuticals in freshwater. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169467.

MUTHURAJA, Raji; OU, Bunlong; THANGAVELU, Muthukumar; NARHAYANAN, Thaiyal Nayahi; CHITTAMART, Natthapol; JANJAROEN, Dao. Effects of particle size and aging on heavy metal adsorption by polypropylene and polystyrene microplastics under varying environmental conditions. Chemosphere, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143843.

PRAJAPATI, A.; VAIDYA, A. N.; KUMAR, A. R. Microplastic properties and their interaction with hydrophobic organic contaminants: a review. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, n. 33, p. 49490–49512, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-20723-y.

RAFA, Nazifa *et al.* Microplastics as carriers of toxic pollutants: source, transport, and toxicological effects. Environmental Pollution, v. 343, art. 123190, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123190.

SHI, Wenshan *et al*. A global review on the abundance and threats of microplastics in soils to terrestrial ecosystem and human health. Science of the Total Environment, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169469.

SILVA, A. L. Patrício; BARCELÓ, D.; ROCHA-SANTOS, T. Pharmaceuticals and micro(nano)plastics in the environment: sorption and analytical challenges. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2024. DOI: 10.1016/j.teac.2024.e00243.

TUMWESIGYE, E.; NNADOZIE, C. F.; AKAMAGWUNA, F. C.; NOUNDOU, X. S.; NYAKAIRU, G. W.; ODUME, O. N. Microplastics as vectors of chemical contaminants and biological agents in freshwater ecosystems: current knowledge status and future perspectives. Environmental Pollution, v. 330, art. 121829, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121829.

XIA, Y.; NIU, S.; YU, J. Microplastics as vectors of organic pollutants in aquatic environment: a review on mechanisms, numerical models, and influencing factors. Science of the Total Environment, v. 887, art. 164008, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164008.

XIONG, X.; WANG, J.; LIU, J.; XIAO, T. Microplastics and potentially toxic elements: a review of interactions, fate and bioavailability in the environment. Environmental Pollution, v. 340, pt. 2, art. 122754, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122754.

ZEB, Aurang *et al*. Microplastic pollution in terrestrial ecosystems: global implications and sustainable solutions. Journal of Hazardous Materials, 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132636.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LEITE E SUA INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS FERMENTATIVOS DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-2

Paulo de Tárcio da Silva Júnior, e-mail: tarcio.jr@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/0793107269497381
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Mariana Cabral do Nascimento Santos, e-mail: marianacabralsantos2@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7558622538353505
Juciele da Silva Monteiro, e-mail: jucielle.santus@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9402141032729211
Pedro Almeida do Nascimento Júnior, e-mail: mailto:E-mail:pedroalmeidajr20@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/8833011108651984
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

O leite apresenta composição físico-química complexa, cujas características exercem influência direta sobre o comportamento das culturas microbianas e sobre o desempenho dos processos fermentativos empregados na indústria de alimentos. Este capítulo teve como objetivo analisar a relação entre as propriedades físico-químicas do leite e a eficiência da fermentação, considerando suas repercussões na qualidade tecnológica dos derivados lácteos. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, conduzida de acordo com as recomendações do protocolo PRISMA. Após as etapas de identificação, triagem e elegibilidade, 34 estudos compuseram a síntese qualitativa. As evidências demonstraram que pH, acidez titulável, lactose, proteínas, lipídios, minerais e sólidos totais exercem influência sobre a atividade das bactérias ácido-láticas, a velocidade de acidificação, a estabilidade das micelas de caseína e a formação da matriz proteica. Verificou-se ainda que a eficiência fermentativa resulta da interação entre a composição da matéria-prima, as características metabólicas das culturas iniciadoras e as condições de processamento, com repercussões sobre viscosidade, sinérese, textura, aroma, estabilidade e qualidade sensorial dos produtos. Conclui-se que o controle integrado das propriedades físico-químicas do leite, associado à seleção adequada das culturas e à padronização das condições de fermentação, constitui elemento essencial para melhorar a eficiência tecnológica e assegurar maior uniformidade e qualidade aos derivados lácteos fermentados.

PALAVRAS-CHAVE: leite; propriedades físico-químicas; fermentação; bactérias ácido-láticas; derivados lácteos.

1. INTRODUÇÃO

O leite constitui uma das principais matérias-primas da indústria de alimentos, sendo amplamente empregado na elaboração de produtos fermentados devido ao seu elevado valor nutricional e às suas propriedades tecnológicas. Caracteriza-se como um sistema biológico

complexo, constituído principalmente por água, proteínas, lipídios, lactose, minerais e enzimas, cujas interações determinam suas características físico-químicas, estabilidade e comportamento durante o processamento (Sharma *et al*., 2023; Cruz *et al*., 2026). Sua composição, entretanto, não é constante e pode ser influenciada por fatores fisiológicos, nutricionais, sanitários e tecnológicos, com reflexos diretos na qualidade da matéria-prima.
Entre os principais parâmetros relacionados à qualidade tecnológica do leite destacam-se pH, acidez titulável, densidade, sólidos totais, proteínas, lipídios, lactose e minerais. Alterações nesses componentes podem interferir na estabilidade coloidal, na coagulação das proteínas e no comportamento do leite durante diferentes etapas de processamento (Ribeiro, 2021; Sharma *et al.*, 2023). Além disso, as características físico-químicas da matéria-prima estão diretamente relacionadas às condições disponíveis para o desenvolvimento microbiano e, consequentemente, ao desempenho dos processos fermentativos (Hassan; Frank, 2019).

Na fermentação láctica, as bactérias ácido-láticas desempenham papel fundamental ao metabolizarem a lactose e produzirem ácido lático, ocasionando redução do pH e modificações na estrutura das proteínas do leite. Essas transformações contribuem para a formação da textura, do aroma, do sabor e de outras características próprias dos derivados fermentados (Coelho *et al.,* 2022; Huang *et al.*, 2023). A fermentação também pode favorecer a conservação dos alimentos, melhorar sua digestibilidade e contribuir para a segurança microbiológica e para o desenvolvimento de características funcionais desejáveis (Sharma *et al.*, 2023).

O desempenho desse processo está estreitamente associado à composição da matéria-prima. A disponibilidade de lactose influencia o metabolismo das culturas fermentadoras, enquanto proteínas, minerais e lipídios participam da formação da estrutura e das características tecnológicas e sensoriais dos produtos. A estabilidade das micelas de caseína e o equilíbrio mineral também são determinantes para fenômenos como acidificação, coagulação e formação da matriz dos derivados fermentados (Hassan; Frank, 2019; Sharma *et al.*, 2023). Nesse contexto, alterações decorrentes da alimentação dos animais, do estágio de lactação, das condições sanitárias ou do manejo podem modificar a composição do leite e repercutir sobre a eficiência fermentativa e o rendimento industrial (Silva *et al.,* 2024; Cruz *et al*., 2026).

Compreender essas relações é particularmente importante para a indústria de alimentos, uma vez que variações aparentemente pequenas nas características da matéria-prima podem resultar em diferenças no tempo de fermentação, na atividade das culturas iniciadoras, no rendimento e na estabilidade dos produtos, além de influenciar atributos sensoriais e microbiológicos. A integração das evidências disponíveis sobre esses fatores pode contribuir

para o estabelecimento de estratégias mais eficientes de controle da matéria-prima e otimização do processamento de derivados lácteos fermentados.

Diante desse contexto, este capítulo analisa a influência das propriedades físico-químicas do leite sobre os processos fermentativos, com ênfase nas relações entre composição da matéria-prima, atividade das bactérias ácido-láticas e qualidade dos produtos obtidos. Busca-se discutir os principais parâmetros físico-químicos envolvidos, seus efeitos sobre o crescimento e o metabolismo das culturas fermentadoras e suas repercussões sobre o rendimento, a estabilidade e as características tecnológicas e sensoriais dos derivados lácteos, reunindo evidências que contribuam para uma compreensão integrada dessa relação na indústria de alimentos.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização do estudo

Este capítulo foi desenvolvido a partir de uma revisão sistemática da literatura, conduzida sob abordagem qualitativa e de caráter descritivo-analítico. A investigação concentrou-se na análise das evidências científicas relacionadas às características físico-químicas do leite e às suas implicações nos processos fermentativos empregados pela indústria de alimentos. Nesse contexto, foram consideradas propriedades como pH, acidez, lactose, proteínas, lipídios e minerais, buscando-se compreender suas relações com a atividade microbiana e com o desempenho tecnológico dos produtos lácteos fermentados.

A adoção da revisão sistemática possibilitou organizar e examinar criticamente estudos relacionados à composição e à qualidade do leite, bem como aos fenômenos microbiológicos e tecnológicos envolvidos na fermentação. Essa abordagem permitiu reunir conhecimentos produzidos em diferentes investigações e identificar convergências, divergências e aspectos ainda pouco explorados acerca da influência das características da matéria-prima sobre o processo fermentativo.

Para assegurar maior rigor e transparência à condução da revisão, foram estabelecidos procedimentos previamente definidos para busca, identificação, seleção e análise dos estudos. O percurso metodológico foi orientado pelas recomendações do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), conforme a atualização apresentada por Page *et al*. (2021), contemplando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão das publicações que compuseram o conjunto final de análise.

2.2 Bases de dados e estratégia de busca

O levantamento bibliográfico foi realizado em fontes nacionais e internacionais com cobertura nas áreas de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Ciência dos Alimentos, Engenharia de Alimentos, Química, Microbiologia e Ciências Agrárias. Para a recuperação das publicações, foram consultados Google Acadêmico, SciELO, Portal de Periódicos CAPES, Scopus, Web of Science, ScienceDirect e PubMed.

A estratégia de busca foi estruturada a partir de descritores em português e inglês, utilizados individualmente ou de forma combinada com os operadores booleanos AND e OR. Em português, foram empregados os termos "leite", "propriedades físico-químicas do leite", "composição química do leite", "qualidade do leite", "fermentação", "processos fermentativos", "fermentação lática", "indústria de alimentos" e "bactérias ácido-láticas". Para as buscas em inglês, foram utilizados *"milk"*, *"physicochemical properties of milk"*, *"milk composition"*, *"milk quality"*, *"fermentation"*, *"lactic fermentation"*, *"food industry"*, *"starter cultures"* e *"lactic acid bacteria"*. As diferentes combinações foram empregadas com o propósito de recuperar estudos relacionados tanto às características da matéria-prima quanto aos fenômenos microbiológicos e tecnológicos envolvidos na fermentação.

Foram consideradas publicações compreendidas entre 2011 e 2026, permitindo reunir evidências produzidas ao longo desse período sobre qualidade e composição do leite, tecnologias de fermentação e suas aplicações na indústria de alimentos. A busca eletrônica foi complementada pela verificação manual das listas de referências dos trabalhos selecionados, com a finalidade de localizar publicações pertinentes que eventualmente não tivessem sido recuperadas pelas estratégias empregadas nas bases consultadas.

2.3 Critérios de elegibilidade

A definição do conjunto de estudos analisados foi orientada por critérios previamente estabelecidos de inclusão e exclusão. Foram elegíveis trabalhos que investigassem a relação entre as propriedades físico-químicas do leite e os processos fermentativos de interesse para a indústria de alimentos. Também foram contempladas pesquisas que apresentassem informações pertinentes sobre composição química da matéria-prima, atividade microbiana, comportamento das culturas iniciadoras e características tecnológicas, sensoriais ou de estabilidade dos produtos fermentados.

Quanto ao tipo de publicação, foram considerados artigos científicos originais, revisões sistemáticas e narrativas, dissertações, teses e capítulos de livros, redigidos em português ou inglês e disponíveis integralmente para consulta. A seleção priorizou documentos com

informações suficientes para a identificação de sua abordagem metodológica e de sua contribuição para a temática investigada.

Foram excluídas publicações sem relação direta com o objeto da revisão, bem como pesquisas direcionadas exclusivamente à produção animal, à sanidade dos rebanhos ou a aspectos veterinários que não estabelecem relação com a composição do leite ou com os processos tecnológicos de fermentação. Também foram retirados registros duplicados, resumos publicados em eventos científicos, artigos de opinião e documentos que não apresentassem informações metodológicas suficientes para permitir sua avaliação. Materiais não submetidos a procedimentos de controle acadêmico ou editorial e que não se enquadrarem nas categorias previamente estabelecidas para inclusão também não integraram o conjunto final da revisão.

2.4 Processo de seleção dos estudos

A seleção das publicações seguiu o fluxo recomendado pelo PRISMA, abrangendo as fases de identificação, triagem, avaliação da elegibilidade e inclusão. Os registros inicialmente recuperados nas fontes de informação foram reunidos e submetidos à verificação de duplicidade antes da análise de sua pertinência em relação à temática investigada. Na etapa de identificação, foram recuperados 200 registros. Após a remoção de 86 duplicatas, 114 publicações permaneceram para a triagem. Nessa fase, títulos, resumos e palavras-chave foram examinados de acordo com os critérios previamente definidos, resultando na exclusão de 20 estudos que não apresentavam relação suficiente com o objeto da revisão.

Em seguida, 94 publicações foram avaliadas mediante leitura do texto completo. Essa análise teve como finalidade verificar a correspondência entre o conteúdo dos trabalhos e os critérios de elegibilidade estabelecidos. Foram excluídos 60 estudos em razão de aspectos como incompatibilidade temática ou metodológica, ausência de informações necessárias à análise ou não atendimento aos demais critérios definidos para a revisão. Ao final desse percurso, 34 estudos atenderam aos requisitos estabelecidos e constituíram o conjunto documental utilizado na síntese qualitativa. A organização das diferentes fases de seleção possibilita documentar o processo de identificação e refinamento das publicações até a definição do material efetivamente empregado na análise.

2.5 Extração, organização e análise dos dados

Após a definição do conjunto final de estudos, as informações de interesse foram extraídas de maneira sistematizada e registradas em uma matriz elaborada para orientar a análise. Foram considerados dados referentes à autoria, ano de publicação, país de realização

do estudo, objetivo, delineamento metodológico, tipo de leite investigado, propriedades físico-químicas avaliadas, microrganismos empregados nos processos fermentativos, procedimentos experimentais e principais achados relacionados à interação entre as características da matéria-prima e a fermentação.

Os dados extraídos foram organizados em planilhas eletrônicas, permitindo a ordenação e a comparação das informações provenientes das diferentes publicações. Posteriormente, foi realizada uma síntese narrativa de natureza qualitativa, direcionada à identificação de padrões, convergências, divergências e aspectos ainda insuficientemente explorados na literatura.

Para orientar a interpretação, os achados foram distribuídos em eixos temáticos relacionados à composição físico-química do leite, à influência de seus constituintes sobre a atividade microbiana, aos efeitos dessas propriedades sobre o desempenho fermentativo e às repercussões na qualidade tecnológica dos produtos obtidos. Também foram considerados os avanços relatados na literatura quanto à otimização dos processos fermentativos empregados pela indústria de alimentos.

A análise integrada das publicações permitiu examinar as relações estabelecidas entre parâmetros como pH, acidez titulável, lactose, proteínas, lipídios, minerais e sólidos totais e o comportamento das culturas iniciadoras durante a fermentação. A partir dessa organização, também foram identificadas limitações metodológicas, tendências de investigação e lacunas que podem orientar novos estudos sobre a qualidade da matéria-prima e o aperfeiçoamento tecnológico da produção de derivados lácteos fermentados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físico-químicas do leite como determinantes da qualidade tecnológica

A síntese dos estudos selecionados evidencia que as propriedades físico-químicas do leite constituem a base da qualidade tecnológica da matéria-prima e condicionam diretamente seu desempenho nos processos fermentativos empregados pela indústria de alimentos. Independentemente da abordagem metodológica adotada pelos diferentes autores, observa-se consenso de que parâmetros como composição centesimal, acidez titulável, densidade, teor de sólidos totais, composição mineral e qualidade microbiológica são indicadores fundamentais da aptidão do leite para o processamento industrial.

Tabela 1 – Principais estudos que relacionam as propriedades físico-químicas do leite à qualidade tecnológica e aos processos fermentativos.

Autor	Objetivo	Parâmetros avaliados	Principais contribuições
Monteiro (2026)	Avaliar a composição de leites A1A1 e A2A2	Proteínas, gordura, sólidos totais e composição centesimal	A composição do leite é mais influenciada por fatores fisiológicos e nutricionais do que pelo polimorfismo da β-caseína.
Terra (2021)	Investigar a qualidade do leite destinado ao processamento	Qualidade físico-química e microbiológica	A qualidade da matéria-prima determina o rendimento industrial e a estabilidade dos derivados lácteos.
Ribeiro (2021)	Caracterizar a composição química do leite	Proteínas, lactose, gordura, minerais e enzimas	Os constituintes químicos regulam os processos de coagulação, fermentação e estabilidade dos produtos.
Silva (2024)	Avaliar a qualidade do leite cru comercializado	Acidez, proteínas, sólidos totais, cinzas e microbiologia	Alterações físico-químicas e microbiológicas reduzem a estabilidade e comprometem a aptidão tecnológica do leite.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os estudos reunidos nesta revisão demonstram que o leite deve ser compreendido como um sistema coloidal complexo, formado por água e por uma fração sólida composta por proteínas, lipídios, lactose, minerais, vitaminas e enzimas. A organização desses constituintes em emulsões, suspensões e soluções verdadeiras confere elevada estabilidade estrutural, mas também torna a matéria-prima sensível às variações fisiológicas, nutricionais e ambientais que ocorrem ao longo da cadeia produtiva (Silva *et al.*, 2011). Dessa forma, a qualidade tecnológica do leite não depende apenas de sua composição, mas da interação dinâmica entre seus componentes.

Entre os parâmetros avaliados, a composição centesimal destaca-se como um dos principais indicadores da aptidão industrial. Monteiro (2026) demonstrou que proteínas, gordura e sólidos totais apresentam maior variação em função da alimentação, do estágio fisiológico e das condições nutricionais dos animais do que do polimorfismo da β-caseína. Além disso, a correlação positiva observada entre gordura, sólidos totais e perfil de ácidos

graxos evidencia que esses componentes atuam de forma integrada na determinação do rendimento e da qualidade dos derivados lácteos.

Essa influência composicional é complementada pelos resultados de Ribeiro (2021), que atribui às proteínas e à lactose papel central na tecnologia dos produtos fermentados. As caseínas, organizadas em micelas estáveis, constituem a estrutura responsável pelos processos de coagulação, enquanto a lactose representa o principal substrato energético das bactérias ácido-láticas. Durante a fermentação, a conversão da lactose em ácido lático promove a redução do pH, desestabiliza as micelas de caseína e favorece a formação do gel característico de produtos como iogurtes e leites fermentados.

Outro aspecto recorrente entre os estudos refere-se à importância da composição mineral e da fração lipídica para a qualidade dos derivados. Cálcio e fósforo participam da estabilidade das micelas de caseína e influenciam diretamente a formação da matriz proteica durante a coagulação, enquanto a gordura contribui para atributos sensoriais como textura, cremosidade e sabor. Esses componentes, portanto, exercem funções complementares, afetando simultaneamente o desempenho tecnológico e a aceitação do produto final (Ribeiro, 2021).

Além da composição química, a qualidade microbiológica emerge como um fator determinante para a estabilidade da matéria-prima. Terra (2021) e Silva (2024) demonstram que alterações nos parâmetros físico-químicos frequentemente estão associadas a deficiências nas condições higiênico-sanitárias de ordenha, armazenamento e refrigeração. A presença elevada de microrganismos indicadores acelera a acidificação espontânea do leite, reduz sua vida útil e compromete o desempenho das culturas iniciadoras utilizadas na fermentação industrial.

Os resultados obtidos por Silva (2024) ilustram essa relação ao registrar acidez titulável entre 0,38 e 0,48 g/100 mL, teor proteico inferior ao padrão mínimo recomendado (2,61%) e elevada ocorrência de coliformes totais e termotolerantes. Paralelamente, as variações observadas nos sólidos totais (10,83% a 16,66%) e no teor de cinzas evidenciam inconsistências na composição da matéria-prima, refletindo falhas ao longo da cadeia produtiva e reduzindo sua estabilidade tecnológica.

Quando analisados de forma integrada, os estudos revelam elevada convergência quanto aos fatores que determinam a qualidade do leite para fins fermentativos. Monteiro (2026) enfatiza a influência das condições fisiológicas e nutricionais sobre a composição centesimal; Ribeiro (2021) demonstra como os constituintes químicos regulam os mecanismos de coagulação e fermentação; Terra (2021) relaciona esses parâmetros ao rendimento industrial

e à qualidade dos derivados; e Silva (2024) evidencia que alterações físico-químicas e microbiológicas decorrentes de manejo inadequado comprometem a estabilidade da matéria-prima. Embora abordem perspectivas distintas, todos os trabalhos reforçam que a eficiência dos processos fermentativos depende da manutenção de uma composição físico-química equilibrada e de elevados padrões de qualidade microbiológica.

Em conjunto, as evidências demonstram que lactose, proteínas, minerais, gordura e estabilidade microbiológica atuam de maneira integrada sobre o desenvolvimento das culturas iniciadoras, a formação do gel, o rendimento industrial e as propriedades sensoriais dos produtos fermentados. Assim, o monitoramento sistemático desses parâmetros ao longo da cadeia produtiva constitui uma estratégia essencial para garantir padronização tecnológica, segurança dos alimentos e maior eficiência na fabricação de derivados lácteos.

3.2 Processos fermentativos na indústria de alimentos: fundamentos e fatores condicionantes

A fermentação representa uma importante ferramenta biotecnológica empregada na transformação e conservação de alimentos, fundamentando-se na atividade metabólica de microrganismos capazes de utilizar diferentes substratos e convertê-los em compostos de interesse tecnológico. Bactérias ácido-láticas, leveduras e fungos participam desses processos mediante a formação de ácidos orgânicos, etanol, dióxido de carbono, enzimas e diferentes compostos voláteis, responsáveis por modificações na textura, no aroma, no sabor, na estabilidade e na conservação dos produtos. Além de sua importância industrial, a fermentação está relacionada à manutenção de práticas tradicionais e à valorização de alimentos regionais, constituindo um processo que integra conservação, transformação sensorial e agregação de valor às matérias-primas (Lima *et al.,* 2022; Sousa *et al.,* 2023).

A condução do processo pode ocorrer pela atuação da microbiota naturalmente associada à matéria-prima e ao ambiente de produção ou mediante inoculação de culturas previamente selecionadas. No processamento industrial, o emprego de culturas iniciadoras possibilita maior controle sobre a fermentação, favorecendo a uniformidade entre os lotes e reduzindo alterações microbiológicas e sensoriais indesejáveis. Nesse sentido, Margalho *et al*. (2021) identificaram em bactérias ácido-láticas provenientes de queijos artesanais brasileiros características de interesse tecnológico, incluindo capacidade de acidificação, tolerância ao sal, atividade proteolítica e potencial de biopreservação. Tais propriedades demonstram que a seleção adequada dos microrganismos pode contribuir simultaneamente para o desempenho

fermentativo, a estabilidade microbiológica e o desenvolvimento das características sensoriais do produto (Kothe *et al.*, 2022).

No processamento de derivados lácteos, as bactérias ácido-láticas assumem papel particularmente relevante, uma vez que metabolizam carboidratos fermentescíveis, principalmente a lactose, promovendo a formação de ácido láctico e a consequente redução do pH. A acidificação modifica as condições do meio, interfere na estrutura das proteínas e restringe o desenvolvimento de diversos microrganismos deteriorantes ou potencialmente patogênicos. Dependendo das cepas empregadas, essas bactérias também podem conferir propriedades funcionais aos produtos fermentados. Entretanto, seu emprego requer avaliação da viabilidade durante o processamento e armazenamento, da interação com a matriz alimentar, da segurança e da manutenção das características funcionais desejadas (Silva *et al.*, 2023; Pineda *et al.*, 2021).

A atividade desses microrganismos não depende exclusivamente da cultura utilizada, mas resulta da interação entre diferentes condições do processo. Temperatura, pH, atividade de água, disponibilidade de nutrientes, concentração de sais, oxigenação, tempo de fermentação e composição da matéria-prima podem modificar a velocidade de crescimento microbiano e o perfil dos metabólitos formados. A influência do substrato foi demonstrada por Lima *et al.* (2024), que observaram alterações no pH, na acidez e nos sólidos solúveis do kefir de água em função das diferentes fontes de sacarose utilizadas. Em outra matriz alimentar, Borém et al. (2024) verificaram que o período de fermentação e a utilização de culturas iniciadoras modificaram a composição química de cafés fermentados. Embora provenientes de matrizes distintas do leite, esses resultados demonstram um princípio comum aos sistemas fermentativos: a composição do substrato e as condições operacionais determinam, em grande medida, o comportamento dos microrganismos e as características do produto resultante (Reyes *et al.*, 2024).

Entre as variáveis de processo, a temperatura exerce influência expressiva sobre a velocidade das reações metabólicas e sobre a predominância dos diferentes grupos microbianos. Em produtos lácteos, seu controle torna-se especialmente relevante durante as etapas de fermentação e maturação, nas quais modificações na comunidade microbiana podem repercutir diretamente na formação de textura, aroma e sabor. Ströher *et al*. (2025), ao investigarem queijo artesanal Serrano, demonstraram que diferentes temperaturas de maturação alteram a dinâmica das populações bacterianas e fúngicas. Paralelamente, a ocorrência de fungos e micotoxinas relatada em queijos artesanais brasileiros evidencia que o controle das condições de processamento deve estar associado ao monitoramento

microbiológico, sobretudo quando são empregados períodos prolongados de maturação (Rodrigues *et al.*, 2025).

A eficiência fermentativa, portanto, resulta da interação entre as características do microrganismo, as condições operacionais e a composição da matriz alimentar. Essa relação assume importância particular no processamento do leite, pois propriedades como disponibilidade de lactose, concentração proteica, teor de gordura, equilíbrio mineral, pH e acidez estabelecem condições específicas para o desenvolvimento das culturas iniciadoras e para as transformações estruturais que ocorrem durante a fermentação. Dessa forma, controlar apenas temperatura e tempo de processo não é suficiente para assegurar resultados uniformes quando a própria matéria-prima apresenta variações significativas em sua composição.

Sob a perspectiva industrial, a padronização dos processos fermentativos deve conciliar a diversidade das matérias-primas e dos microrganismos com requisitos de segurança, estabilidade e qualidade sensorial. Essa necessidade também se aplica aos alimentos tradicionalmente fermentados, cuja valorização econômica depende da incorporação de práticas capazes de preservar suas características particulares sem comprometer o controle microbiológico e tecnológico. Nesse contexto, a fermentação ultrapassa sua função histórica de conservação e passa a constituir uma estratégia de inovação, diversificação de produtos e aproveitamento tecnológico das matérias-primas alimentares (Lima *et al.,* 2022; Sousa *et al.*, 2023).

3.3 Relação entre as propriedades físico-químicas do leite e a eficiência dos processos fermentativos

A composição físico-química do leite estabelece as condições necessárias para o desenvolvimento das culturas fermentadoras e para as transformações estruturais que caracterizam os derivados lácteos. Nesse processo, pH, acidez titulável, disponibilidade de lactose, concentração de proteínas e lipídios, equilíbrio mineral e estabilidade das micelas de caseína atuam de maneira interdependente. Variações nesses parâmetros podem modificar a atividade metabólica das bactérias ácido-láticas, interferindo na velocidade de acidificação, no tempo necessário para a fermentação e nas características estruturais do produto final (Wang *et al.*, 2021; Widyastuti *et al*., 2021).

Entre os componentes envolvidos, a lactose desempenha função central por constituir o principal carboidrato utilizado pelas bactérias ácido-láticas. Sua metabolização resulta predominantemente na formação de ácido lático, promovendo redução progressiva do pH e aumento da acidez do meio. À medida que o pH se aproxima do ponto isoelétrico das caseínas,

ocorre diminuição da estabilidade das micelas, favorecendo sua agregação e a formação de uma matriz protéica tridimensional. Essa reorganização estrutural está diretamente relacionada à consistência, viscosidade, capacidade de retenção de água e estabilidade dos produtos lácteos fermentados (Wang *et al.*, 2021; Widyastuti *et al.,* 2021).

A fermentação, entretanto, não se restringe à acidificação da matriz láctea. A atividade metabólica das culturas também promove a formação de compostos voláteis, peptídeos bioativos e exopolissacarídeos, capazes de modificar propriedades sensoriais, estruturais e funcionais do alimento. A produção desses metabólitos pode contribuir para o desenvolvimento de aroma e sabor, além de favorecer a viscosidade e a estabilidade da matriz, demonstrando que a qualidade final resulta da interação entre composição do leite e metabolismo microbiano (Hoxha; Evstatieva; Nikolova, 2023).

A integridade das proteínas e dos lipídios constitui outro elemento importante para o desempenho fermentativo. Faria *et al.* (2020) verificaram que o aumento da contagem de células somáticas está relacionado à maior atividade de enzimas proteolíticas e lipolíticas, capazes de promover alterações nas frações proteica e lipídica do leite. Essas modificações podem reduzir a estabilidade das caseínas e repercutir negativamente sobre a acidificação, a formação do gel e a textura do iogurte. Nesse sentido, condições da matéria-prima que antecedem o processamento podem produzir efeitos que permanecem perceptíveis mesmo após o início da fermentação.

A influência da composição torna-se igualmente evidente quando são comparados leites provenientes de diferentes espécies. Vianna *et al.* (2019) e Dimitrellou *et al.* (2019) demonstraram que diferenças no conteúdo de sólidos e na composição físico-química da matéria-prima repercutem sobre viscosidade, sinérese, microestrutura e comportamento das culturas fermentadoras. Esses resultados indicam que a padronização das condições de fermentação deve considerar as particularidades da matriz utilizada, uma vez que a aplicação das mesmas condições operacionais a matérias-primas com características distintas não necessariamente produz resultados tecnológicos equivalentes.

Além das características do leite, a resposta fermentativa depende da espécie e da cepa microbiana empregadas. Nguyen *et al*. (2023) observaram diferenças no metabolismo de bactérias ácido-láticas associadas à produção de ácido láctico, compostos voláteis e exopolissacarídeos. De maneira complementar, Zhao *et al.* (2024) demonstraram que modificações na proporção entre *Streptococcus thermophilus* e *Lactobacillus helveticus* interferem no pH final, na acidez titulável, no tempo necessário para completar a fermentação

e no perfil aromático. Assim, a eficiência do processo resulta não apenas da qualidade isolada da matéria-prima ou da cultura iniciadora, mas da compatibilidade entre ambas.

Essa interação também pode ser explorada para melhorar características tecnológicas dos produtos. Cepas probióticas e bactérias ácido-láticas nativas capazes de produzir exopolissacarídeos e substâncias com atividade antimicrobiana têm sido associadas ao aumento da viscosidade, à redução da sinérese e à maior estabilidade dos leites fermentados (Hoxha; Evstatieva; Nikolova, 2023; Valdiviezo-Marcelo *et al*., 2023). Esses efeitos demonstram que a seleção de culturas com propriedades metabólicas específicas pode constituir uma estratégia para modular a estrutura e a funcionalidade do produto final.

A composição da matriz fermentativa pode ainda ser modificada pela incorporação de ingredientes com finalidade nutricional ou funcional. Estudos envolvendo cupuaçu e melaço de alfarroba demonstraram alterações favoráveis em propriedades físico-químicas, nutricionais e antioxidantes dos produtos, sem inviabilizar o desenvolvimento do processo fermentativo (Gutiérrez-Álzate *et al*., 2023; El-Sayed; Aly; El-Deeb, 2024). Entretanto, a utilização desses ingredientes exige considerar suas possíveis interações com proteínas, carboidratos e microrganismos, uma vez que mudanças na disponibilidade de substratos e nas condições físico-químicas do meio podem modificar a dinâmica da fermentação.

Em conjunto, as evidências apontam que a eficiência dos processos fermentativos resulta de uma relação dinâmica entre a composição da matéria-prima, as características das culturas utilizadas e as condições de processamento. Kong *et al*. (2025) reforçam que a interação entre os componentes químicos do leite e os diferentes grupos de bactérias fermentadoras exerce influência determinante sobre o desenvolvimento da fermentação. Dessa forma, o controle do pH e da acidez, associado à adequada disponibilidade de lactose, à integridade das proteínas, ao equilíbrio mineral e à estabilidade das micelas de caseína, constitui elemento fundamental para alcançar acidificação adequada, formação satisfatória da matriz proteica e produtos fermentados com maior estabilidade e qualidade tecnológica e sensorial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências reunidas neste capítulo demonstram que as propriedades físico-químicas do leite exercem papel determinante sobre a eficiência dos processos fermentativos e sobre a qualidade dos derivados lácteos. Parâmetros como pH, acidez titulável, teor de lactose, proteínas, lipídios, minerais e sólidos totais não atuam de maneira isolada, mas estabelecem

condições que interferem no metabolismo das culturas iniciadoras, na velocidade de acidificação e nas transformações estruturais responsáveis pelas características dos produtos fermentados.

Entre esses componentes, destaca-se a interação entre lactose, bactérias ácido-láticas e proteínas do leite. A utilização da lactose pelas culturas fermentadoras promove a produção de ácido láctico e a redução do pH, desencadeando alterações na estabilidade das micelas de caseína e favorecendo a formação da matriz proteica. Paralelamente, a composição mineral, o teor de gordura e a integridade das frações proteicas contribuem para características como viscosidade, retenção de água, sinérese, textura, aroma e estabilidade do produto final.

A análise dos estudos também evidencia que a eficiência fermentativa não depende exclusivamente da composição inicial do leite. As características metabólicas das culturas empregadas e fatores de processamento, como temperatura, tempo de fermentação, disponibilidade de nutrientes e condições microbiológicas da matéria-prima, interagem diretamente com suas propriedades físico-químicas. Dessa forma, matérias-primas com composições distintas podem apresentar respostas diferentes mesmo quando submetidas a condições semelhantes de processamento, reforçando a importância da caracterização e da padronização do leite destinado à fermentação.

Sob a perspectiva industrial, esses achados ressaltam a necessidade de integrar o controle da qualidade da matéria-prima à seleção adequada das culturas iniciadoras e ao monitoramento das condições de processamento. Essa abordagem pode contribuir para maior previsibilidade da fermentação, redução de variações entre lotes e obtenção de derivados com características tecnológicas, microbiológicas e sensoriais mais uniformes.

Por fim, embora os estudos analisados demonstram avanços na compreensão das relações entre composição do leite e desempenho fermentativo, ainda são necessárias investigações que avaliem de forma integrada as interações entre diferentes componentes da matriz láctea, cepas microbianas e condições de processamento. O aprofundamento dessas relações poderá subsidiar estratégias de otimização industrial e o desenvolvimento de produtos fermentados com maior estabilidade, funcionalidade e qualidade.

REFERÊNCIAS

BORÉM, F. M. *et al.,* Influence of fermentation time and inoculation of starter culture on fermented coffees. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 96, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aabc/a/BgCRJgCj5S398YbrqCfHFMQ/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

COELHO, M. C.; SILVA, C. C. G.; RIBEIRO, A. C. Lactic acid bacteria in dairy fermentation: technological and functional roles. Food Bioscience, v. 47, p. 101617, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101617

CRUZ, L. H. O. *et al.,* Fermented milk and dairy alternatives: physicochemical, microbiological and technological aspects. Food Chemistry, 2023. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136340

DIMITRELLOU, D. *et al.,* Effect of milk type on the microbiological, physicochemical and sensory characteristics of probiotic fermented milk. *Microorganisms*, Basel, v. 7, n. 9, p. 274, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms7090274.

EL-SAYED, M. I.; ALY, E.; EL-DEEB, A. M. Improving the physicochemical and antioxidative properties of fermented goat milk using carob molasses and some probiotic strains. *Food Science and Biotechnology*, v. 33, p. 657-666, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10068-023-01382-2.

FARIA, A. P. A. *et al.,* Influência do leite com elevada contagem de células somáticas sobre características físico-químicas e processo de fermentação de iogurte. *Ciência Animal Brasileira*, Goiânia, v. 21, e44773, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-6891v21e-44773.

GUTIÉRREZ-ÁLZATE, K. *et al.,* Physicochemical, rheological and nutritional quality of artisanal fermented milk beverages with cupuaçu pulp and flour (*Theobroma grandiflorum*). *Foods*, Basel, v. 12, n. 11, p. 2217, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12112217.

HASSAN, A. N.; FRANK, J. F. Physicochemical properties of milk and their role in fermentation processes. Journal of Dairy Science, v. 102, n. 10, p. 8755–8770, 2019. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16432

HOXHA, R.; EVSTATIEVA, Y.; NIKOLOVA, D. Physicochemical, rheological, and sensory characteristics of yogurt fermented by lactic acid bacteria with probiotic potential and bioprotective properties. *Foods*, Basel, v. 12, n. 13, p. 2552, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12132552.

HUANG, M. *et al.,* Lactic acid bacteria metabolism and functional properties in fermented dairy products. Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1187654

KONG, F. *et al.,* Comparative study on the physical and chemical properties influenced by variations in fermentation bacteria groups: inoculating different fermented mare's milk into cow's milk. *Foods*, Basel, v. 14, n. 8, p. 1328, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/foods14081328.

KOTHE, C. I.; MOHELLIBI, N.; RENAULT, P. Revealing the microbial heritage of traditional Brazilian cheeses through metagenomics. Food Research International, Amsterdam, v. 157, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111265. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35761577/. Acesso em: 26 jun. 2026.

LIMA, A. L. B. C. *et al.,* Different sources of sucrose in water kefir fermentation. Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 27, 2024. Disponível em:

https://www.scielo.br/j/bjft/a/PkpGcsD7Rnw3N7B6cGcWctk/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

LIMA, T. T. M. *et al.,* Traditional Brazilian fermented foods: cultural and technological aspects. Journal of Ethnic Foods, v. 9, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s42779-022-00153-4. Acesso em: 26 jun. 2026.

MARGALHO, L. P. *et al.,* High throughput screening of technological and biopreservation traits of a large set of wild lactic acid bacteria from Brazilian artisanal cheeses. Food Microbiology, Amsterdam, v. 97, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103872. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103872. Acesso em: 26 jun. 2026.

MONTEIRO, Anna Júlia Sousa. Parâmetros físico-químicos e constituintes do leite de vacas A1A1 e A2A2 como indicadores de qualidade: compostos nitrogenados, não nitrogenados. 2026. Dissertação (Mestrado em Sanidade e Produção Animal nos Trópicos) – Universidade de Uberaba (Uniube), Programa de Pós-Graduação em Sanidade e Produção Animal nos Trópicos, Uberaba, MG, 2026.

NGUYEN, H. T. H. *et al.,* Differences in aroma metabolite profile, microstructure, and rheological properties of fermented milk using different cultures. *Foods*, Basel, v. 12, n. 9, p. 1875, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12091875.

PAGE, M. J.; *et al.,* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, London, v. 372, n. 71, p. 1–9, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71

PINEDA, A. P. A. *et al.,* Brazilian artisanal cheeses: diversity, microbiological safety, and challenges for the sector. Frontiers in Microbiology, Lausanne, v. 12, 2021. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33959118/. Acesso em: 26 jun. 2026.

REYES, E. I. M. *et al.,* Controlled fermentation in artisanal bioreactors to produce specialty coffee. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 48, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cagro/a/xZF3FqNYC8SYBy88W6qmcSD/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

Ribeiro, L. F. (2021). Fatores determinantes para a qualidade do leite e derivados (1ª ed.). Monte Carmelo, MG: FUCAMP.

RODRIGUES, F. Z. *et al.,* Fungi and mycotoxins in Brazilian artisanal cheese. Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 28, 2025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bjft/a/LV8dvbdBn3v5s3Lp5NWRd8Q/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

SHARMA, H. *et al.,* Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on techno-functional properties of fermented dairy products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 63, n. 21, p. 4819–4841, 2023. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2007844

SILVA, Janeanne Nascimento et al. Parâmetros e determinantes da qualidade físico-química do leite caprino. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 6, n. 3, p. 4, 2011.

SILVA, Paulo Henrique. Avaliação físico-química e microbiológica de leite no município de Nova Glória - GO. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) – Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, Ceres, 2024.

SILVA, A. S. *et al.,* Trends and challenges for the application of probiotic lactic acid bacteria in fermented dairy foods. Ciência Rural, Santa Maria, v. 53, 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/pzMcFfzn3fv8MSsP9DSbDmJ/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

SOUSA, N. S. O. *et al.,* Amazonian fermentations: an analysis of industrial and social technology as tools for the development of bioeconomy in the region. Brazilian Journal of Biology, São Carlos, v. 83, 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/bjb/a/Zqf4XrvmZMjb4BkF3SswLYn/?lang=en. Acesso em: 26 jun. 2026.

STRÖHER, J. A. *et al.,* Temperature drives microbial dynamics during the ripening of Serrano artisan cheese. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 97, 2025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aabc/a/YKN9bgtJZCZ4kHs5k9ZkMBL/. Acesso em: 26 jun. 2026.

TERRA, Cristiana Baruel. Do Leite ao Queijo: Qualidade Microbiológica, Físico-Química, Sensorial e Boas Práticas na Fabricação de Queijo Colonial no Vale do Taquari-RS. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

VALDIVIEZO-MARCELO, J. *et al.,* Technological potential of native lactic acid bacteria isolated from Swiss-type artisanal cheese (Ancash, Peru) for their application in food. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Lausanne, v. 7, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1212229.

VIANNA, F. S. *et al.,* Milk from different species on physicochemical and microstructural yoghurt properties. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 49, n. 6, e20180522, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180522.

WANG, Y. *et al.,* Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Lausanne, v. 9, 612285, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285.

WIDYASTUTI, Y.; FEBRISIANTOSA, A.; TIDONA, F. Health-promoting properties of lactobacilli in fermented dairy products. *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 12, 673890, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673890.

ZHAO, X. *et al.,* Fermentation characteristics of fermented milk with *Streptococcus thermophilus* CICC 6063 and *Lactobacillus helveticus* CICC 6064 and volatile compound dynamic profiles during fermentation and storage. *Molecules*, Basel, v. 29, n. 6, p. 1257, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29061257.

CAPÍTULO 3

RESÍDUOS PLÁSTICOS NA AGRICULTURA: IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-3

Dário Santos Fontes, e-mail: daryus.d2@hotmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/2642940750682696
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Amanda da Silva Santos, e-mail: amanda.santos1@arapiraca.ufal.br, URL lattes:https://lattes.cnpq.br/4484218420672837
Monique Maria de Souza Costa, e-mail: moniquemariacosta@gamil.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/0766705468983276
Albani Correia de Vasconcelos, e-mail: mailto:albanivasconcelos@hotmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9413008499837926
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

O uso de materiais plásticos na agricultura tem contribuído para a modernização dos sistemas produtivos, especialmente por favorecer a conservação da água, o controle das condições de cultivo e a eficiência no uso de recursos. Entretanto, a geração e a destinação inadequada desses resíduos podem favorecer sua permanência e fragmentação no ambiente, resultando na formação e no acúmulo de microplásticos no solo. Este capítulo teve como objetivo analisar o uso de materiais plásticos na agricultura e os riscos associados à contaminação do ambiente edáfico, considerando suas principais fontes, processos de formação, impactos e estratégias de mitigação. Foi realizada uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter exploratório-descritivo, com levantamento de publicações entre 2012 e 2025 no Google Acadêmico, SciELO e Portal de Periódicos CAPES. A análise evidenciou que filmes de *mulching*, materiais de irrigação, estruturas de cultivo protegido e outros resíduos poliméricos constituem importantes fontes de partículas plásticas nos sistemas agrícolas. Os microplásticos podem interferir nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, alterando a retenção de água, a agregação, a atividade microbiana e a dinâmica de nutrientes, além de interagir com outros contaminantes e potencializar riscos ambientais. Verificou-se ainda que as dificuldades de coleta, reciclagem e logística reversa representam importantes obstáculos ao gerenciamento desses resíduos. Conclui-se que a redução dos impactos da plasticultura depende da integração entre manejo adequado, logística reversa, economia circular, desenvolvimento de materiais de menor persistência, tecnologias de reciclagem, políticas públicas e capacitação dos produtores, associada à ampliação das pesquisas sobre os efeitos de longo prazo dos microplásticos nos solos agrícolas.

Palavras-chave: plasticultura; microplásticos; contaminação do solo; resíduos agrícolas; sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da produção e do consumo de plásticos acompanha o desenvolvimento tecnológico e a demanda por materiais resistentes, versáteis e duráveis. Na agricultura, esses materiais estão presentes em filmes de cobertura do solo, tubulações, embalagens e diferentes componentes dos sistemas de cultivo. Entretanto, ao longo de seu ciclo de vida, podem contribuir para a introdução de resíduos plásticos no ambiente, desde fragmentos maiores até partículas de pequenas dimensões (Souza, 2020; Li *et al.*, 2022).

A utilização desses materiais nos sistemas agrícolas consolidou a chamada plasticultura, importante para a modernização da produção. Filmes de cobertura, sistemas de irrigação, estufas e outras estruturas favorecem a conservação da umidade, a regulação da temperatura do solo, o controle de plantas daninhas e a eficiência no uso de insumos (Mansoor *et al.,* 2022; Salama; Geyer, 2023). No Brasil, essas tecnologias são particularmente relevantes na horticultura e na fruticultura irrigada, inclusive em regiões semiáridas, onde o uso eficiente da água é fundamental para a produção (Santi *et al*., 2022).

Apesar desses benefícios, a geração e o descarte dos materiais plásticos representam importantes desafios ambientais. A exposição dos resíduos à radiação ultravioleta, às variações de temperatura e à abrasão favorece sua fragmentação e a formação de microplásticos, geralmente definidos como partículas inferiores a 5 mm (Belo *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2024). A ocorrência crescente dessas partículas em áreas cultivadas indica que os solos agrícolas podem atuar como importantes compartimentos de acumulação da poluição plástica terrestre (Kang *et al.*, 2025).

No solo, os microplásticos podem persistir e interferir em atributos como porosidade, agregação, retenção de água e atividade microbiana, com repercussões sobre a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (Qi *et al.*, 2022). Seus efeitos também podem atingir organismos da fauna edáfica, como minhocas e microartrópodes, importantes para a dinâmica biológica e estrutural do solo (Cheng *et al*., 2024; Nath *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante é a capacidade dos microplásticos de interagir com metais pesados, pesticidas e fármacos, podendo modificar sua mobilidade e favorecer seu transporte no ambiente. Essas interações ampliam as preocupações quanto à exposição de organismos, plantas e à possível transferência de contaminantes ao longo das cadeias alimentares (Rani-Borges; Pompêo, 2022; Luo *et al.*, 2025). Em áreas agrícolas submetidas ao uso frequente de defensivos e outros insumos, essa associação pode intensificar os riscos ambientais (Pimentel, 2023; En-Nejmy *et al.*, 2024).

No Brasil, a crescente utilização de filmes para *mulching*, sistemas de irrigação e estruturas de cultivo protegido reforça a necessidade de destinação adequada após o uso.

Dificuldades de coleta, separação e reciclagem podem favorecer abandono, enterramento ou queima dos resíduos, enquanto sua permanência no campo intensifica a fragmentação e a incorporação de partículas plásticas ao solo (Rodrigues *et al.*, 2022; França *et al.*, 2024).

Assim, os benefícios agronômicos da plasticultura contrastam com os impactos associados à permanência de seus resíduos no ambiente, tornando necessárias estratégias de redução, recuperação, reciclagem e substituição por materiais de menor impacto. Avanços na gestão dos resíduos, no desenvolvimento de materiais biodegradáveis e nas medidas de prevenção e controle são fundamentais para compatibilizar os benefícios produtivos com a conservação ambiental (Bandopadhyay *et al.*, 2023; Sintim *et al*., 2023).

Diante disso, este capítulo aborda o uso de materiais plásticos na agricultura e os riscos associados à sua permanência e fragmentação no solo, enfatizando as fontes e a formação de microplásticos, seus efeitos sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do ambiente edáfico e as estratégias destinadas à redução e mitigação dessa forma de contaminação.

2. PERCURSO METODOLÓGICO

Este capítulo foi desenvolvido por meio de uma revisão integrativa da literatura, conduzida sob abordagem qualitativa e de caráter exploratório-descritivo. O percurso metodológico foi estruturado de modo a reunir, organizar e interpretar criticamente a produção científica relacionada ao uso de materiais e resíduos plásticos nos sistemas agrícolas, com especial atenção à sua permanência no ambiente, à formação de microplásticos e aos possíveis efeitos sobre o solo. A escolha dessa abordagem possibilitou examinar diferentes perspectivas da literatura e identificar tendências, convergências, limitações e lacunas existentes nesse campo de investigação.

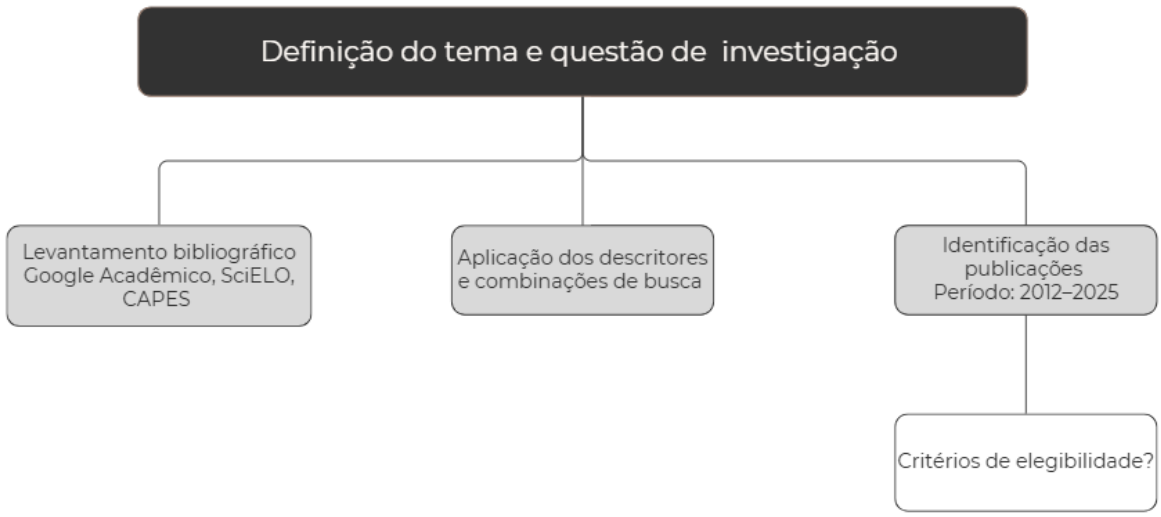
O levantamento bibliográfico foi realizado no Google Acadêmico, na SciELO e no Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações compreendidas entre 2012 e 2025. Para a localização dos estudos, foram utilizados, de maneira isolada e combinada, os descritores “resíduos plásticos”, “agricultura”, “contaminação edáfica”, “microplásticos”, “plasticultura” e “biopolímeros”. A estratégia foi direcionada à recuperação de trabalhos relacionados tanto à utilização dos materiais poliméricos nos sistemas produtivos quanto às consequências ambientais associadas à sua degradação e permanência no solo.

A seleção das publicações foi orientada por critérios previamente definidos. Foram incluídos estudos que apresentassem informações relacionadas à presença ou disposição de polímeros em sistemas agrícolas, à geração de resíduos plásticos e aos processos físicos e

químicos envolvidos em sua degradação. Também foram considerados trabalhos que contribuíssem para a compreensão dos efeitos desses materiais e de suas partículas sobre o ambiente edáfico. Em contrapartida, foram excluídas pesquisas desenvolvidas exclusivamente em ambientes marinhos ou urbanos quando não apresentavam relação direta com atividades, práticas ou processos associados aos sistemas agrícolas.

O processo de levantamento e seleção das publicações foi organizado em etapas sucessivas, compreendendo a identificação dos estudos, aplicação dos critérios de elegibilidade, organização do material selecionado e definição do conjunto documental utilizado na análise. A representação dessas etapas é apresentada na Figura 1, permitindo visualizar o percurso adotado desde o levantamento inicial das publicações até a síntese das evidências consideradas no capítulo.

Figura 1 – Fluxograma do percurso metodológico utilizado para seleção e análise das publicações



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a seleção, as informações extraídas foram organizadas de acordo com as características dos resíduos e com as principais questões ambientais abordadas nos estudos. Entre os materiais considerados, destacaram-se filmes empregados no *mulching*, embalagens de agrotóxicos e outros resíduos poliméricos associados às atividades agrícolas. A organização dos dados permitiu examinar as fontes de contaminação, os processos de degradação e

formação de microplásticos, seus efeitos sobre propriedades do solo e as alternativas propostas para gerenciamento e mitigação dos impactos.

A interpretação das informações foi realizada mediante análise temática de conteúdo, buscando identificar padrões, convergências e divergências entre as publicações selecionadas. A análise também considerou lacunas e limitações apontadas pela literatura, com destaque para diferenças metodológicas entre os estudos, ausência de padronização nas técnicas utilizadas para identificação e quantificação de microplásticos e disponibilidade ainda limitada de investigações que avaliem seus efeitos em longo prazo.

As referências recuperadas durante o levantamento foram organizadas com auxílio do gerenciador bibliográfico Mendeley, empregado para sistematização das fontes utilizadas. A combinação dos procedimentos de busca, seleção, categorização e análise possibilitou estruturar uma síntese crítica das evidências disponíveis, direcionada à compreensão das relações entre plasticultura, geração de resíduos, formação de microplásticos e alterações no ambiente edáfico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Plasticultura e aplicações de materiais poliméricos nos sistemas agrícolas

A incorporação de materiais plásticos aos sistemas agrícolas, denominada plasticultura, abrange filmes de cobertura, tubulações e sistemas de irrigação, estruturas de cultivo protegido, lonas e embalagens. Esses materiais contribuem para o controle das condições de cultivo e para maior eficiência no uso dos recursos produtivos. Entre os principais benefícios estão a conservação da umidade, a redução de plantas daninhas e a regulação da temperatura do solo, aspectos especialmente relevantes em condições de restrição hídrica (Salama; Geyer, 2023). No Brasil, sua utilização também favorece sistemas intensivos de horticultura, auxiliando no controle das condições de produção e na redução da lixiviação de nutrientes (Santi *et al.*, 2022).

Entre as aplicações mais difundidas destaca-se o *mulching* plástico, no qual filmes poliméricos recobrem a superfície do solo, reduzindo a evaporação, a emergência de plantas daninhas e modificando as condições térmicas da zona radicular. Esses efeitos podem favorecer o aproveitamento dos recursos e o desempenho das culturas, justificando sua ampla utilização na horticultura e na fruticultura (Mansoor *et al.*, 2022). Apesar dos benefícios, a permanência desses materiais após o uso constitui um importante problema ambiental. A exposição às condições de campo e o desgaste decorrente das operações agrícolas favorecem sua

fragmentação progressiva, formando partículas menores e contribuindo para a geração contínua de microplásticos no solo.

A presença dessas partículas pode alterar a atividade microbiana, a disponibilidade e absorção de nutrientes e o desenvolvimento vegetal (Qi *et al.*, 2022). Também são relatadas modificações na retenção de água, na estrutura do solo e na dinâmica de nutrientes, comprometendo propriedades relacionadas à capacidade produtiva do ambiente edáfico (Yu *et al.,* 2022; Zhang *et al.,* 2022). Essas alterações podem repercutir sobre processos biogeoquímicos, incluindo a ciclagem de nutrientes, com possíveis efeitos sobre a fertilidade e o funcionamento do solo (De Souza Machado *et al.*, 2022; Rillig *et al.*, 2023).

Entre as principais fontes agrícolas de partículas plásticas estão os filmes de polietileno utilizados no *mulching*, componentes dos sistemas de irrigação e materiais empregados em estufas e cultivos protegidos. Sua degradação e remoção incompleta favorecem o acúmulo no solo e ampliam as preocupações quanto à interação dessas partículas com plantas e organismos e à possível transferência ao longo da cadeia alimentar (Zhang *et al*., 2023; Huang *et al.*, 2024).

No Brasil, a gestão desses resíduos apresenta dificuldades adicionais. Filmes de baixa densidade podem ser retirados do campo contendo solo, restos vegetais e outros materiais aderidos, dificultando a limpeza e a reciclagem e reduzindo seu valor econômico. Essas limitações podem favorecer práticas inadequadas, como abandono, descarte irregular e queima, evidenciando a necessidade de planejar a destinação dos materiais após sua utilização (Rodrigues *et al.*, 2022; França *et al.*, 2024).

Como alternativa, filmes biodegradáveis têm sido investigados para preservar benefícios do *mulching* e reduzir a permanência de resíduos plásticos no ambiente (Sintim et al., 2023). Entretanto, sua degradação depende das características do solo, das condições climáticas e do manejo, tornando necessária a avaliação de seu desempenho em diferentes sistemas produtivos (Bandopadhyay *et al.*, 2023).

Além da substituição dos polímeros convencionais, medidas como recolhimento pós-uso, reutilização, reciclagem e economia circular podem reduzir a quantidade de resíduos deixados nas áreas agrícolas (França *et al.,* 2024). Essas ações devem estar associadas ao desenvolvimento de tecnologias capazes de conciliar eficiência agronômica e redução dos impactos ambientais (Rillig *et al*., 2023).

Assim, embora a plasticultura favoreça a eficiência hídrica, o manejo e a produtividade, sua sustentabilidade depende de estratégias adequadas de recuperação e destinação dos resíduos. A melhoria dos sistemas de coleta e reciclagem e o desenvolvimento de materiais de menor

persistência ambiental são fundamentais para reduzir os impactos sem comprometer os benefícios agronômicos dessa tecnologia (Rillig *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2024).

3.2 Resíduos plásticos agrícolas: geração, destinação e desafios de gerenciamento

A expansão da plasticultura tem aumentado a diversidade e a quantidade de materiais poliméricos utilizados nos sistemas agrícolas. Entre os principais estão o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno de alta densidade (PEAD) e o policloreto de vinila (PVC), empregados em filmes de cobertura, *mulching*, mangueiras de irrigação, túneis e cultivos protegidos. Esses materiais favorecem a conservação da água, o controle microclimático e a eficiência produtiva (Santi *et al*., 2022; Hendges *et al.*, 2019).

O aumento do consumo, entretanto, também amplia a geração de resíduos e os desafios relacionados à sua gestão. No meio rural, a dispersão das propriedades, a diversidade dos materiais e a curta vida útil de determinados produtos dificultam o recolhimento, armazenamento, transporte e destinação adequada (Rodrigues *et al.*, 2022; Hildebrand Júnior; Pereira, 2023). Durante o uso, a exposição à radiação ultravioleta, às variações térmicas e ao contato com solo, fertilizantes e defensivos favorece a degradação dos polímeros. Processos como a foto-oxidação reduzem sua resistência e promovem fissuras e fragmentação, dificultando a recuperação dos materiais e contribuindo para a formação e permanência de partículas plásticas no ambiente agrícola (Ding *et al.*, 2022; Padilha Neto *et al.*, 2024).

A incorporação dessas partículas ao solo pode alterar atributos como porosidade, retenção de água e atividade microbiana. A escassez de estudos de longo prazo no Brasil, entretanto, ainda limita a compreensão da magnitude desses impactos e evidencia a necessidade de ampliar o monitoramento em áreas agrícolas (Padilha Neto *et al.,* 2024; Hendges *et al.*, 2019).

No Brasil, a gestão desses resíduos está inserida na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, que estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Um exemplo de sua aplicação é a logística reversa de embalagens vazias de agrotóxicos, coordenada pelo Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias (inpEV), demonstrando a importância da articulação entre produtores e demais agentes da cadeia para a destinação ambientalmente adequada dos resíduos (Aragão; Veloso, 2014; Rodrigues *et al.*, 2022).

Entretanto, outros materiais agrícolas, como filmes de *mulching*, lonas e componentes de irrigação, ainda enfrentam limitações de coleta e reciclagem. A presença de solo, matéria orgânica e resíduos químicos dificulta o processamento e eleva os custos da reciclagem,

podendo favorecer práticas inadequadas como abandono, enterramento e queima, com riscos de contaminação do solo, da água e da atmosfera (Hendges *et al*., 2019; Hildebrand Júnior; Pereira, 2023).

Nesse contexto, princípios da economia circular, associados ao fortalecimento da logística reversa, à implantação de estruturas de triagem, à recuperação dos materiais e ao uso de alternativas biodegradáveis, podem contribuir para reduzir a incorporação de resíduos ao ambiente. Sua efetividade, contudo, depende de soluções tecnológicas, instrumentos regulatórios, incentivos econômicos e ações de educação ambiental voltadas aos produtores (Hildebrand Júnior; Pereira, 2023; Padilha Neto *et al.*, 2024).

Assim, a gestão dos resíduos plásticos agrícolas envolve aspectos ambientais, produtivos, econômicos e institucionais. A integração entre inovação tecnológica, regulamentação, reciclagem, logística reversa e participação dos diferentes agentes da cadeia produtiva é fundamental para reduzir a permanência desses materiais nas áreas cultivadas e tornar a plasticultura mais sustentável (Rodrigues *et al.,* 2022; Hendges *et al*., 2019).

3.3 Origem e processos de formação de microplásticos no ambiente edáfico

A ocorrência de microplásticos no solo resulta de diferentes fontes e processos de transformação dos materiais poliméricos. Essas partículas podem ser introduzidas diretamente no ambiente ou formadas pela fragmentação de resíduos maiores. Nos sistemas agrícolas, destacam-se filmes de cobertura, estruturas de cultivo protegido e componentes de irrigação expostos continuamente às condições ambientais (Li *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2025).

Outras fontes incluem a aplicação de lodo de esgoto e fertilizantes orgânicos contendo partículas plásticas, que podem introduzir esses contaminantes nas áreas cultivadas (En-Nejmy *et al.,* 2024). A deposição atmosférica também contribui para sua dispersão, permitindo o transporte a longas distâncias. Paralelamente, o descarte inadequado favorece a permanência e a fragmentação dos resíduos, associando fontes locais a processos de dispersão mais amplos (Kang *et al.*, 2025).

Após sua incorporação ao ambiente, os polímeros são submetidos a processos físicos, químicos e biológicos de degradação. Radiação ultravioleta, variações térmicas e abrasão mecânica promovem fissuras e desgaste, enquanto reações de oxidação aumentam sua fragilidade. A colonização por microrganismos e a formação de biofilmes também participam desse processo, embora a degradação completa dos polímeros seja geralmente lenta em condições naturais (Xiang *et al*., 2023; Zhai *et al.*, 2023).

A fragmentação não implica necessariamente a degradação completa do material. Partículas menores podem persistir e continuar se fragmentando, originando inclusive nanoplásticos e ampliando os riscos relacionados à sua mobilidade no ambiente (Nath *et al.*, 2024). Mesmo materiais biodegradáveis podem apresentar decomposição incompleta quando as condições ambientais não são favoráveis, resultando na permanência de fragmentos no solo (Feng *et al.*, 2023).

A movimentação de raízes, minhocas e outros organismos edáficos também pode favorecer a fragmentação e o transporte das partículas entre as camadas do solo (Rillig *et al.,* 2017). Além disso, sua interação com os agregados pode modificar a organização e a estabilidade estrutural do ambiente edáfico (Lehmann *et al.*, 2021). Os microplásticos também podem interferir nas comunidades microbianas, com repercussões sobre a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (De Souza Machado *et al.,* 2019). Alterações na atividade de enzimas do solo reforçam a possibilidade de modificações nas interações entre microrganismos, matéria orgânica e componentes minerais (Cheng *et al.*, 2024).

A identificação e a quantificação dessas partículas constituem outro desafio. A heterogeneidade do solo e a diversidade de tamanhos, formas e tipos de polímeros dificultam sua separação e caracterização. Além disso, diferenças metodológicas e a ausência de padronização limitam a comparação entre estudos e a avaliação da extensão da contaminação (Gündoğdu *et al.*, 2025; Wesołowska *et al.,* 2025). Compreender o transporte e o destino dessas partículas também é fundamental para avaliar sua redistribuição no perfil do solo e sua transferência para outros compartimentos ambientais (Sun *et al.*, 2022).

Assim, a presença de microplásticos no solo resulta da interação entre fontes agrícolas e não agrícolas, transporte atmosférico, descarte inadequado e processos físicos, químicos e biológicos de degradação. Essa complexidade reforça a necessidade de medidas voltadas tanto à redução das fontes quanto ao controle da permanência desses resíduos, além de pesquisas que subsidiem práticas de manejo e políticas de mitigação da poluição plástica em solos agrícolas (Kang *et al.*, 2025; Luo *et al.,* 2025; En-Nejmy *et al.*, 2024; Nath *et al.*, 2024).

3.4 Microplásticos no solo: distribuição e efeitos sobre a qualidade edáfica

A presença de microplásticos nos solos tem adquirido crescente relevância ambiental em razão da persistência dessas partículas e da diversidade de fontes responsáveis por sua incorporação aos ecossistemas terrestres. Em áreas agrícolas, fertilizantes orgânicos contaminados, irrigação com águas contendo partículas plásticas e resíduos provenientes das próprias atividades produtivas constituem importantes vias de entrada desses materiais (En-

Nejmy *et al.*, 2024; Ng *et al.*, 2022). A incorporação contínua, associada à baixa taxa de degradação, favorece o acúmulo ao longo do tempo e pode transformar o solo em importante reservatório ambiental de microplásticos (Kang *et al.*, 2025).

Uma vez incorporadas, essas partículas não permanecem distribuídas uniformemente. Sua movimentação e concentração são condicionadas pelas práticas de manejo, pelas características físicas do solo e por processos ambientais, incluindo vento e escoamento superficial (Chen *et al.*, 2025; Tayyab *et al.*, 2024). Propriedades inerentes aos próprios microplásticos, como tamanho e densidade, também interferem na mobilidade e na possibilidade de redistribuição ao longo do perfil edáfico (Gündoğdu *et al.*, 2025).

O comportamento dessas partículas pode ainda ser modificado durante sua permanência no ambiente. O tempo de exposição, a origem do material e os processos de intemperismo e degradação alteram gradualmente as características dos resíduos plásticos (Wu *et al.,* 2022). Além disso, a interação de sua superfície com substâncias presentes no ambiente pode resultar na formação de uma denominada "eco corona", capaz de modificar propriedades superficiais e influenciar as interações químicas e biológicas dos microplásticos no solo (Gao *et al.,* 2022).

Sob o ponto de vista físico, a incorporação de partículas plásticas pode interferir na organização estrutural do solo. Modificações na porosidade, densidade e retenção de água podem alterar simultaneamente a dinâmica hídrica e a circulação de gases, com possíveis repercussões sobre o desenvolvimento vegetal (Machado *et al.*, 2019). A presença dessas partículas também pode afetar os processos de agregação e a estabilidade dos agregados, demonstrando que seus efeitos dependem não apenas da quantidade acumulada, mas também das características das partículas e do ambiente no qual estão inseridas (Kang *et al.*, 2025).

As alterações não se restringem aos atributos físicos. A superfície dos microplásticos pode estabelecer interações com metais e diferentes compostos orgânicos presentes no solo. A adsorção dessas substâncias pode modificar sua disponibilidade e mobilidade, permitindo que as partículas plásticas atuem como potenciais transportadores de contaminantes no ambiente edáfico (En-Nejmy *et al*., 2024; Ng *et al.*, 2022). Essa característica amplia a complexidade da poluição, pois associa a presença física dos resíduos à possibilidade de interação com outras formas de contaminação química.

No componente biológico, modificações na atividade e na diversidade das comunidades microbianas podem repercutir sobre processos essenciais ao funcionamento do solo, entre eles a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (Li *et al.,* 2023). Os efeitos podem atingir também organismos da fauna edáfica. Minhocas, por exemplo, podem ingerir

partículas plásticas presentes no ambiente, situação associada a alterações fisiológicas e comportamentais que podem comprometer suas funções ecológicas (Zhang *et al.*, 2023).

A ocorrência simultânea dessas alterações evidencia que os impactos dos microplásticos devem ser compreendidos de maneira integrada. Modificações na estrutura e no regime hídrico do solo podem interagir com alterações químicas e biológicas, repercutindo sobre a disponibilidade de nutrientes, a atividade microbiana e o desenvolvimento vegetal. Consequentemente, a exposição contínua pode representar um fator adicional de pressão sobre a fertilidade e a capacidade produtiva dos solos agrícolas (Tayyab *et al.*, 2024; Chen *et al.,* 2025).

3.5 Microplásticos como vetores de contaminantes e riscos à cadeia trófica

A presença simultânea de resíduos plásticos e diferentes substâncias químicas nos sistemas agrícolas amplia a complexidade dos processos de contaminação do solo. A utilização intensiva de agrotóxicos, associada à geração e ao descarte inadequado de materiais poliméricos, estabelece condições favoráveis à coexistência desses contaminantes no ambiente edáfico (Souza, 2020; Pimentel, 2023). Além dos resíduos provenientes de filmes de *mulching*, sistemas de cultivo e embalagens agrícolas, outras fontes, como lodo de esgoto e determinados fertilizantes, podem contribuir para a entrada de partículas plásticas nas áreas cultivadas (Pimentel, 2023).

A dispersão dos microplásticos, entretanto, não está limitada aos ambientes agrícolas. Diferentes atividades humanas contribuem para sua liberação e transporte entre os compartimentos ambientais, incluindo produtos de uso cotidiano que podem liberar partículas posteriormente conduzidas pelos sistemas de esgotamento e alcançar ambientes aquáticos e terrestres. Essa ampla circulação ajuda a explicar o reconhecimento atual dos microplásticos como contaminantes de distribuição global, embora seus efeitos biológicos e químicos, especialmente em ecossistemas terrestres e de água doce, ainda apresentam importantes lacunas de conhecimento (Belo *et al.*, 2021; Rani-Borges *et al.,* 2022).

Uma característica particularmente relevante dessas partículas é sua capacidade de interagir com substâncias presentes no meio. A superfície dos microplásticos pode funcionar como local de sorção para diferentes contaminantes, possibilitando a associação com compostos químicos e sua posterior redistribuição ambiental. Entre as substâncias relatadas encontram-se fármacos, incluindo compostos antimicrobianos e cardiovasculares, demonstrando que as partículas plásticas podem participar do transporte de contaminantes para diferentes compartimentos ambientais e organismos (Parente, 2025; Rani-Borges *et al*., 2022).

As transformações sofridas pelos polímeros durante sua permanência no ambiente também interferem nessas interações. A degradação física e química pode modificar as características superficiais das partículas e favorecer a liberação de componentes originalmente presentes nos materiais, como aditivos e monômeros (Rani-Borges *et al.*, 2022). Paralelamente, a fragmentação progressiva pode originar partículas de dimensões ainda menores, incluindo nanoplásticos. A redução do tamanho aumenta a superfície específica e pode favorecer a interação e a penetração dessas partículas nos organismos, ampliando as preocupações relacionadas aos seus efeitos ambientais (Souza, 2020).

Essa capacidade de associação entre partículas plásticas e substâncias potencialmente tóxicas torna particularmente relevante a investigação de exposições combinadas. Em áreas agrícolas, microplásticos e agrotóxicos podem coexistir por períodos prolongados, mas os efeitos ecológicos resultantes dessa interação ainda não estão completamente esclarecidos, especialmente para grupos da fauna edáfica como os microartrópodes (Pimentel, 2023).

A relevância desses organismos decorre de sua participação em processos fundamentais para o funcionamento do solo, incluindo fragmentação da matéria orgânica, estruturação do ambiente edáfico e ciclagem de nutrientes. Alterações em sua abundância, comportamento ou atividade podem, portanto, repercutir sobre processos ecológicos mais amplos. A persistência dos contaminantes e a possibilidade de sua incorporação pelos organismos reforçam a necessidade de compreender não apenas os efeitos individuais dos microplásticos, mas também sua interação com outros compostos presentes nos sistemas agrícolas (Parente, 2025; Pimentel, 2023).

Nesse contexto, os riscos associados aos microplásticos ultrapassam sua presença física no solo. Sua capacidade de interagir com contaminantes, ser ingeridos por organismos e sofrer fragmentação progressiva estabelece diferentes possibilidades de transferência entre componentes do ecossistema. A compreensão desses mecanismos é essencial para avaliar a exposição ao longo das relações tróficas e suas possíveis implicações para a qualidade ambiental e a segurança dos sistemas de produção de alimentos (Souza, 2020; Rani-Borges *et al*., 2022).

3.6 Mitigação da poluição plástica em sistemas agrícolas: alternativas e desafios

A mitigação dos impactos dos resíduos plásticos na agricultura exige medidas que considerem aspectos ambientais, produtivos, econômicos e institucionais. Embora os materiais poliméricos contribuam para a eficiência dos sistemas agrícolas, sua permanência no ambiente

pode alterar propriedades do solo e processos relacionados à dinâmica da água, à atividade microbiana e à ciclagem de nutrientes (Silva *et al.*, 2021; Ferreira; Cerri, 2019).

Entre as alternativas, destacam-se os materiais biodegradáveis, especialmente filmes para cobertura do solo, que podem reduzir o acúmulo de resíduos em sistemas agrícolas intensivos (Costa *et al.*, 2020). Entretanto, sua degradação depende de fatores como temperatura, umidade e atividade microbiana, podendo apresentar comportamento distinto em condições de campo (Souza *et al.*, 2022). Além disso, a classificação como biodegradável não garante decomposição completa, reforçando a necessidade de critérios técnicos e regulatórios mais claros para esses materiais (Abreu; Martins, 2021).

No âmbito institucional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, mas sua aplicação aos plásticos agrícolas ainda enfrenta limitações, principalmente pela insuficiência de sistemas de logística reversa em áreas rurais (Zanin; Mancini, 2019). A dispersão das propriedades e os custos de coleta e processamento dificultam a recuperação desses resíduos. Nesse contexto, incentivos fiscais, subsídios e outros instrumentos econômicos podem estimular a reciclagem e ampliar a efetividade das políticas de gerenciamento (Oliveira; Leite, 2020).

A economia circular também constitui uma alternativa ao priorizar a redução do consumo, a reutilização e a reinserção dos materiais na cadeia produtiva. Contudo, sua adoção no setor agrícola depende de condições técnicas, econômicas e sociais, além do acesso dos produtores à informação e à assistência especializada (Santos *et al*., 2021). A existência de mercados para os materiais recuperados também é fundamental, pois os custos de coleta, limpeza e transporte podem inviabilizar economicamente a reciclagem (Geyer *et al.,* 2017).

O aprimoramento das tecnologias de reciclagem representa outra estratégia relevante. A reciclagem mecânica enfrenta dificuldades devido à presença de solo, matéria orgânica e agroquímicos nos resíduos agrícolas, além da perda de propriedades dos polímeros ao longo dos ciclos de reprocessamento (Mancini; Zanin, 2020). A reciclagem química pode converter resíduos em matérias-primas para novos processos industriais, embora os custos e a disponibilidade tecnológica ainda limitem sua aplicação em maior escala no Brasil (Almeida *et al*., 2022). Estratégias envolvendo microrganismos capazes de atuar na degradação de polímeros também vêm sendo estudadas, mas permanecem predominantemente em estágio experimental (Fernandes *et al.,* 2023).

Nenhuma dessas alternativas, isoladamente, é suficiente para solucionar o problema. Materiais biodegradáveis apresentam limitações de degradação; instrumentos regulatórios dependem de implementação efetiva; a economia circular requer viabilidade logística e

econômica; e as tecnologias de reciclagem ainda enfrentam obstáculos específicos dos resíduos agrícolas (Sintim *et al.*, 2023; Geyer *et al.*, 2017; Zanin; Mancini, 2019).

Assim, a mitigação da poluição plástica na agricultura requer uma abordagem integrada, envolvendo redução da geração de resíduos, materiais de menor impacto, recolhimento pós-uso, logística reversa, reciclagem, inovação tecnológica e capacitação dos produtores. A articulação dessas medidas com políticas públicas e instrumentos econômicos é essencial para reduzir o acúmulo de plásticos no solo e conciliar os benefícios da plasticultura com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Rillig *et al*., 2023; Rodrigues *et al.*, 2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura evidencia que os materiais plásticos contribuem para a modernização dos sistemas agrícolas, especialmente pela conservação da água, controle das condições de cultivo e eficiência produtiva. Entretanto, a expansão da plasticultura também amplia a geração de resíduos, cuja permanência e fragmentação favorecem o acúmulo de microplásticos no solo.

Essas partículas podem ter origem tanto nos materiais utilizados diretamente na agricultura quanto em outras fontes, como fertilizantes orgânicos, lodo de esgoto, irrigação e deposição atmosférica. Sua persistência e mobilidade no perfil do solo dificultam o controle da contaminação e podem provocar alterações em atributos físicos, químicos e biológicos, incluindo porosidade, retenção de água, atividade microbiana e dinâmica de nutrientes. Além disso, sua capacidade de interagir com outros contaminantes amplia os potenciais riscos ambientais.

No Brasil, a gestão pós-uso ainda constitui um desafio, principalmente para filmes de cobertura, lonas e componentes de irrigação, cuja coleta e reciclagem são dificultadas pela contaminação com solo, matéria orgânica e produtos químicos. Nesse cenário, materiais biodegradáveis, logística reversa, reciclagem e economia circular representam alternativas importantes, embora dependam de condições técnicas, econômicas e institucionais adequadas.

Portanto, a sustentabilidade da plasticultura requer uma abordagem integrada que contemple todo o ciclo de vida dos materiais. O fortalecimento das políticas públicas e da logística reversa, o desenvolvimento de materiais de menor impacto, o avanço das tecnologias de reciclagem e a capacitação dos produtores são fundamentais para reduzir a contaminação dos solos agrícolas. Também são necessárias pesquisas de longo prazo e maior padronização dos métodos de identificação e quantificação de microplásticos, contribuindo para práticas agrícolas que conciliem produtividade e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. C. S.; MARTINS, E. S. Consumo sustentável e rotulagem ambiental de plásticos. Revista de Administração Pública, 2021.

ALMEIDA, F. S. *et al*. Reciclagem química de polímeros: avanços e perspectivas. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2022.

ARAGÃO, C. A.; VELOSO, M. C. C. Resíduos sólidos: impactos ambientais e possibilidades de manejo sustentável. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3803–3812, 2014.

BANDOPADHYAY, S. *et al.* Biodegradable plastic mulch films: impacts on soil and crop production. Soil Use and Management, v. 39, n. 2, p. 456–470, 2023.

BELO, I. C. B. *et al.* Microplásticos, seus impactos no ambiente e maneiras biodegradáveis de substituição. Revista Internacional de Ciências, v. 11, n. 2, p. 214–228, 2021.

CHENG, Y. *et al*. Response of soil biochemical properties to microplastics pollution. Scientific Reports, v. 14, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-80124-8

CHEN, Z. *et al.* Microplastics in soil-plant systems: current knowledge, research gaps and future directions for agricultural sustainability. Agronomy, v. 15, n. 7, p. 1519, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15071519

COSTA, J. P. *et al.* Biodegradable mulch films in agriculture: impacts and challenges. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2020.

COWGER, W. *et al.* Microplastic spectral classification needs an open source community: Open Specy to improve transparency and comparability. Analytical Chemistry, v. 93, n. 21, p. 7543–7548, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c00123

DE SOUZA MACHADO, A. A. *et al*. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. Environmental Science & Technology, v. 56, n. 5, p. 2784–2795, 2022.

DING, J. *et al.* Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. Environmental Pollution, v. 294, 2022.

EN-NEJMY, K. *et al.* Microplastics in soil: a comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 288, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117332

FEI, Y. *et al.* Response of soil enzyme activities and bacterial communities to microplastics accumulation. Science of the Total Environment, v. 707, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135634

FENG, S. *et al.* Occurrence and degradation of biodegradable microplastics in soil environments. Science of the Total Environment, v. 875, 2023.

FERNANDES, G. R. *et al*. Biodegradação de polímeros por microrganismos. Química Nova, 2023.

FERREIRA, A. S.; CERRI, C. E. P. Impactos de resíduos plásticos no solo agrícola. Bragantia, 2019.

FRANÇA, L. S. *et al.* Desafios da gestão de resíduos poliméricos na fruticultura irrigada: uma revisão sistemática. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 2024.

FRANÇA, R. A. *et al.* Development of mulch films from biodegradable polymer and agro-industrial waste. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 34, 2024.

GAO, H.; YAN, C.; LIU, Q. *et al.* Formation and environmental implications of the eco-corona on microplastics. Science of the Total Environment, v. 806, 2022.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 2017.

HENDGES, A. S. *et al.* Logística reversa de embalagens de agrotóxicos. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 58–75, 2019.

HIDALGO-RUZ, V. *et al.* Microplastics in the marine environment: identification and quantification. Environmental Science & Technology, v. 46, 2012.

HILDEBRAND JÚNIOR, F. A.; PEREIRA, R. S. Sustentabilidade e descarte de plásticos na horticultura. Desenvolvimento e Meio Ambiente, 2023.

HUANG, Y. *et al.* Microplastics in agricultural soils: sources, effects and management. Journal of Hazardous Materials, 2024.

HUERTA LWANGA, E. *et al.* Microplastics in terrestrial ecosystem. Environmental Science & Technology, 2016.

KANG, Q. *et al.* Microplastics in soils: a comprehensive review. Science of the Total Environment, 2025.

LEHMANN, A. *et al.* Microplastics effects on soil aggregation. Microplastics and Nanoplastics, 2021.

LI, H. *et al.* Microplastic effects on soil system parameters: a meta-analysis. Environmental Science and Pollution Research, 2022.

LI, S. *et al.* Microplastics in soil–plant system. Journal of Hazardous Materials, 2023.

LI, Y. *et al*. Soil microbial community parameters affected by microplastics. Frontiers in Microbiology, 2023.

LUO, H. *et al.* Degradation of microplastics in the natural environment. Journal of Environmental Management, 2025.

MACHADO, A. A. S. *et al.* Microplastics can change soil properties. Environmental Science & Technology, 2019.

MANCINI, S. D.; ZANIN, M. Reciclagem de materiais plásticos no Brasil. Revista Matéria, 2020.

MANSOOR, S. *et al.* Plastic mulch in agriculture. Agronomy, 2022.

NATH, S. *et al.* Microplastics in soil: impacts and sustainability. Journal of Environmental Quality, 2024.

NG, E. L. *et al.* Microplastic pollution in agroecosystems. Science of the Total Environment, 2022.

OLIVEIRA, L. G.; LEITE, M. S. Políticas públicas ambientais no Brasil. Revista de Gestão Ambiental, 2020.

PADILHA NETO, J. J. *et al.* Microplásticos na agricultura brasileira. Ciência Rural, 2024.

PARENTE, G. S. Deposição de microplásticos. 2025. Dissertação (Mestrado) – UFC.

PIMENTEL, T. F. Avaliação de microplásticos. 2023. Dissertação – UFT.

QI, Y. *et al.* Microplastics in agricultural soils. Science of the Total Environment, 2022.

RANI-BORGES, B.; POMPÊO, M. Microplásticos como transportadores de poluentes. In: Microplásticos nos ecossistemas, 2022.

RENNER, G. *et al.* Analytical methodologies for microplastics. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2018.

RILLIG, M. C. *et al.* Microplastic effects on soil organisms. Annual Review of Environment and Resources, 2023.

RODRIGUES, L. S. *et al.* Logística reversa rural. Revista de Economia e Sociologia Rural, 2022.

SALAMA, E. S.; GEYER, R. Agricultural plastics. Journal of Cleaner Production, 2023.

SANTI, T. L. *et al.* Plasticultura e sustentabilidade. Polímeros, 2022.

SANTOS, R. M. *et al.* Gestão de resíduos rurais. Ambiente & Sociedade, 2021.

SILVA, J. V. *et al.* Microplásticos em solos agrícolas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2021.

SINTIM, H. Y. *et al.* Biodegradable plastic mulch films. Soil Biology and Biochemistry, 2023.

SOUZA, G. R. Poluição por microplásticos. 2020. Dissertação – UFAM.

SOUZA, T. A. *et al.* Degradação de plásticos biodegradáveis. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 2022.

SUN, X. *et al.* Fate and transport of microplastics in terrestrial ecosystems: A review. Science of the Total Environment, v. 806, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150843

SUN, Y. *et al.* Microplastics in soils: fate and transport. Journal of Cleaner Production, 2022.

TAYYAB, M. *et al.* Microplastics in agroecosystems: soil–plant dynamics and effective remediation approaches. Chemosphere, 2024.

WANG, J. *et al.* Effects of microplastics on earthworms. Science of the Total Environment, 2021.

WESOŁOWSKA, A. *et al.* Detection of microplastics in soils. Microplastics and Nanoplastics, 2025.

WU, X. *et al.* Biodegradation of microplastics. Journal of Hazardous Materials, 2022.

XIANG, P.; ZHANG, T.; WU, Q.; LI, Q. Systematic Review of Degradation Processes for Microplastics: Progress and Prospects. Sustainability, v. 15, n. 17, 2023. DOI: 10.3390/su151712698.

YAO, S. *et al*. Soil metabolome and microplastics. Environmental Science & Technology, 2023.

YU, H. *et al.* Effects of microplastics on soil properties. Environmental Pollution, 2022.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. Resíduos plásticos e reciclagem. São Carlos: EdUFSCar, 2019.

ZHANG, D. *et al.* Plastic pollution in croplands. Global Change Biology, 2022.

ZHANG, G. *et al.* Microplastics contamination in soils. Journal of Hazardous Materials, 2023.

ZHANG, Z. *et al.* Microplastics in soil: occurrence and risks. Environmental Pollution, 2022.

ZHAI, X.; ZHANG, X.-H.; YU, M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. Frontiers in Microbiology, v. 14, 2023. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1127308.

CAPÍTULO 4

CONTAMINANTES EMERGENTE EM MATRIZES AMBIENTAIS: OCORRÊNCIA, DISPERSÃO, RISCOS ECOTOXICOLÓGICOS E ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-4

Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Maria Thalia Paulino de Farias, e-mail: maria.thalia@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/4370186459099148
Mariana Cabral do Nascimento Santos, e-mail: marianacabralsantos2@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7558622538353505
Maria Edwirges Vital Silva Diniz, e-mail: mariaedwirges3@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/2780096652976148
Pedro Almeida do Nascimento Júnior, e-mail: mailto:E-mail:pedroalmeidajr20@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/8833011108651984
Albani Correia de Vasconcelos, e-mail: mailto:albanivasconcelos@hotmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9413008499837926
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

Os contaminantes emergentes constituem uma preocupação crescente para a qualidade ambiental devido à diversidade de substâncias, à ocorrência em baixas concentrações e à capacidade de persistirem, serem transportados e interagirem com diferentes componentes dos ecossistemas. Esses contaminantes incluem fármacos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, hormônios, biocidas, plastificantes, substâncias perfluoroalquiladas (PFAS) e microplásticos, sendo detectados em águas superficiais, águas subterrâneas, sedimentos, solos e efluentes. Nesse contexto, esta revisão sistemática teve como objetivo analisar as principais evidências científicas sobre a ocorrência, distribuição, dispersão, riscos ecotoxicológicos, monitoramento, caracterização analítica e estratégias de remediação de contaminantes emergentes em matrizes ambientais. A pesquisa foi conduzida conforme as recomendações do protocolo PRISMA 2020, mediante buscas nas bases PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO, Springer Nature e Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações entre 2021 e 2026, nos idiomas português, inglês e espanhol. Foram identificados inicialmente 150 registros, submetidos às etapas de triagem, avaliação de elegibilidade e seleção dos estudos. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 26 estudos foram incluídos na síntese qualitativa. As evidências analisadas indicaram ampla ocorrência de contaminantes emergentes em diferentes matrizes ambientais, com distribuição influenciada por fontes de emissão, propriedades físico-químicas, condições ambientais e processos de transporte e transformação. A dispersão pode envolver adsorção, dessorção, sedimentação, biodegradação e fotodegradação, favorecendo a transferência entre compartimentos ambientais e a formação de produtos de transformação. Os efeitos ecotoxicológicos incluem alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas, além de estresse oxidativo e danos genotóxicos, especialmente diante de exposições crônicas e misturas de contaminantes. O monitoramento tem avançado com o emprego de LC-MS/MS, GC-MS e espectrometria de massas de alta resolução, incluindo abordagens direcionadas e não direcionadas. Quanto à remediação, destacam-se adsorção, processos oxidativos avançados, membranas, processos eletroquímicos e estratégias biológicas, cuja aplicação requer avaliação conjunta de eficiência, custos, consumo energético, geração de resíduos e produtos de transformação. Conclui-se que o enfrentamento dos contaminantes emergentes demanda integração entre monitoramento analítico, avaliação ecotoxicológica e desenvolvimento de tecnologias de tratamento sustentáveis, além da ampliação de estudos sobre exposição crônica, efeitos de misturas e contaminantes ainda não identificados.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminantes emergentes; Matrizes ambientais; Ecotoxicologia; Monitoramento ambiental; Remediação.

1. INTRODUÇÃO

A crescente diversidade de substâncias químicas utilizadas em atividades domésticas, industriais, agrícolas e comerciais tem ampliado a presença de contaminantes emergentes no ambiente. Esses compostos compreendem diferentes classes de substâncias, como fármacos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, hormônios, biocidas, plastificantes, substâncias perfluoroalquiladas (PFAS) e microplásticos, que podem alcançar os ecossistemas por diferentes vias de emissão. A ocorrência desses contaminantes tem sido registrada em águas superficiais, águas subterrâneas, sedimentos, solos e efluentes, muitas vezes em concentrações da ordem de ng L^{-1} a µg L^{-1}, o que dificulta sua detecção e avaliação por métodos convencionais (Anand *et al.*, 2022; Rocha *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022).

A presença desses compostos em matrizes ambientais está relacionada tanto à sua utilização contínua quanto à capacidade de persistirem, serem transportados e sofrerem transformações no ambiente. Processos como adsorção, dessorção, sedimentação, biodegradação e fotodegradação influenciam sua distribuição e destino, enquanto características físico-químicas dos contaminantes e condições ambientais podem favorecer sua mobilidade entre diferentes compartimentos. Além disso, produtos de transformação podem apresentar propriedades distintas dos compostos originais, tornando a avaliação ambiental ainda mais complexa (Ghosh *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2024; Montiel-León *et al.*, 2024). No caso dos PFAS, a elevada persistência ambiental constitui uma preocupação adicional, enquanto os microplásticos podem atuar como superfícies de sorção e transporte para outros contaminantes (Antonopoulou *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2024).

A ocorrência contínua desses contaminantes também representa preocupação ecotoxicológica, especialmente diante de exposições prolongadas a baixas concentrações e da presença simultânea de diferentes substâncias. Os efeitos podem envolver alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas, além de estresse oxidativo, danos ao DNA e outros processos associados à toxicidade celular. A interação entre contaminantes pode resultar em efeitos aditivos, sinérgicos ou antagônicos, enquanto a associação de microplásticos com outras substâncias pode modificar sua disponibilidade e potencial de exposição dos organismos (Hong *et al.*, 2025; Picinini-Zambelli *et al.*, 2025; Du *et al.*, 2024). Dessa forma, a avaliação dos riscos não deve considerar apenas a concentração individual dos

compostos, mas também sua persistência, mobilidade, bioacumulação e ocorrência em misturas.

A identificação e o acompanhamento desses contaminantes dependem do desenvolvimento de estratégias analíticas capazes de determinar compostos presentes em baixas concentrações e em matrizes de elevada complexidade. Técnicas como cromatografia líquida e gasosa acopladas à espectrometria de massas, especialmente LC-MS/MS, GC-MS e espectrometria de massas de alta resolução, têm sido empregadas no monitoramento de contaminantes conhecidos e na investigação de substâncias não previamente identificadas. Abordagens direcionadas, suspect screening e análises não direcionadas ampliam a capacidade de detectar compostos emergentes e produtos de transformação, embora limitações relacionadas à preparação das amostras, efeitos de matriz, disponibilidade de padrões analíticos e infraestrutura ainda dificultem o monitoramento sistemático (Alqarni, 2024; Li *et al*., 2024; Geletu *et al.*, 2025; Canchola *et al*., 2025).

Paralelamente ao monitoramento, diferentes tecnologias têm sido investigadas para reduzir a presença desses contaminantes nas matrizes ambientais e nos efluentes. Processos de adsorção, processos oxidativos avançados, tecnologias de membranas, métodos eletroquímicos e estratégias biológicas apresentam diferentes capacidades de remoção, mas também podem gerar subprodutos, resíduos ou correntes concentradas que precisam ser avaliados. Assim, a eficiência de uma tecnologia não deve ser determinada apenas pela porcentagem de remoção, sendo necessário considerar aspectos como toxicidade dos produtos de transformação, consumo energético, custos operacionais, geração de resíduos e viabilidade de aplicação em escala real (Harish; Jegatheesan, 2025; Xue *et al.*, 2025; Singh *et al*., 2025).

Diante da complexidade associada à ocorrência, ao transporte, aos efeitos ecotoxicológicos, à detecção e à remoção dos contaminantes emergentes, torna-se necessária uma análise integrada das evidências científicas disponíveis. Nesse contexto, esta revisão sistemática teve como objetivo analisar as principais evidências científicas sobre a ocorrência, distribuição, dispersão, riscos ecotoxicológicos, monitoramento, caracterização analítica e estratégias de remediação de contaminantes emergentes em matrizes ambientais, destacando os avanços, limitações e lacunas que ainda orientam as pesquisas na área.

2. METODOLOGIA

2.1 Tipo de estudo e protocolo da revisão

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de caráter qualitativo e descritivo, com o objetivo de analisar as evidências científicas relacionadas à ocorrência, distribuição,

dispersão, riscos ecotoxicológicos, monitoramento, caracterização analítica e estratégias de remediação de contaminantes emergentes em matrizes ambientais. A condução e o relato da revisão seguiram as recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020), que orienta a identificação, seleção, avaliação e síntese transparente dos estudos científicos (Page *et al.*, 2021).

A questão norteadora da revisão foi: Quais são as principais evidências científicas sobre a ocorrência, distribuição, dispersão, riscos ecotoxicológicos, monitoramento e estratégias de remediação de contaminantes emergentes em matrizes ambientais?

2.2 Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO, Springer Nature e Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações disponíveis no período de 2021 a 2026, nos idiomas português, inglês e espanhol.

Foram utilizados descritores relacionados aos contaminantes emergentes e aos principais aspectos investigados, incluindo: *"emerging contaminants", "contaminants of emerging concern", "environmental contaminants", "occurrence", "distribution", "environmental fate", "ecotoxicological risks", "analytical monitoring", "remediation", "wastewater", "surface water", "groundwater", "sediment", "soil"* e *"microplastics"*. Os termos foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, de acordo com as características de cada base de dados.

Ao final da estratégia de busca, foram identificados 150 estudos potencialmente relevantes para a revisão.

2.3 Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos científicos publicados entre 2021 e 2026, nos idiomas português, inglês ou espanhol, que abordassem contaminantes emergentes em matrizes ambientais e apresentassem informações relacionadas à sua ocorrência, distribuição, transporte, destino ambiental, efeitos ecotoxicológicos, monitoramento, caracterização analítica, tratamento ou remediação.

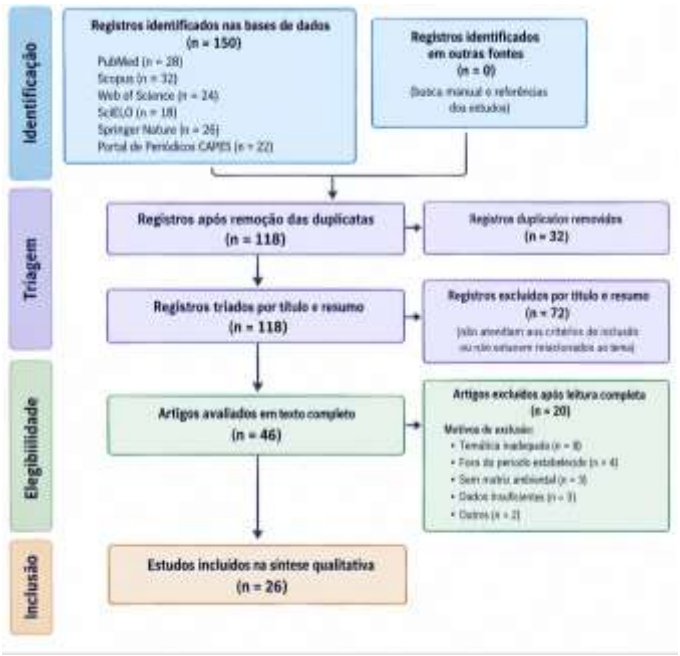
Foram excluídos estudos duplicados, publicações fora do período estabelecido, trabalhos sem relação direta com a temática, estudos exclusivamente clínicos ou farmacológicos sem abordagem ambiental, além de editoriais, cartas, resumos de eventos e

documentos que não apresentassem informações suficientes para responder à questão norteadora.

2.4 Seleção dos estudos

A seleção dos estudos foi realizada em etapas sucessivas, conforme o fluxo recomendado pelo PRISMA 2020: identificação, triagem, avaliação de elegibilidade e inclusão (Page *et al*., 2021). Inicialmente, foram identificados 150 registros nas bases de dados selecionadas. Após a remoção dos 32 registros duplicados, permaneceram 118 estudos para a etapa de triagem por título e resumo. Nessa etapa, 72 estudos foram excluídos, resultando em 46 artigos avaliados em texto completo. Após a leitura integral, 20 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade, totalizando 26 estudos incluídos na síntese qualitativa final.

Figura 1. Fluxograma do processo de seleção dos estudos, conforme o protocolo PRISMA 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.5 Extração e análise dos dados

As informações dos estudos selecionados foram organizadas de forma sistemática, considerando as seguintes categorias: autor e ano de publicação, classe de contaminante, matriz ambiental investigada, ocorrência e concentração, distribuição e comportamento ambiental, processos de transporte e transformação, efeitos ecotoxicológicos, técnicas de monitoramento e caracterização analítica e estratégias de tratamento ou remediação.

A análise foi realizada de forma qualitativa e temática, permitindo organizar as evidências em seis eixos principais: (1) ocorrência e distribuição dos contaminantes emergentes; (2) dispersão, transporte e destino ambiental; (3) riscos ecotoxicológicos; (4) monitoramento e caracterização analítica; (5) estratégias de tratamento e remediação; e (6) desafios, perspectivas e lacunas de pesquisa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Contaminantes emergentes e sua presença no ambiente

A ocorrência de contaminantes emergentes tem sido registrada em diferentes matrizes ambientais, especialmente águas superficiais e residuárias, efluentes de estações de tratamento, águas subterrâneas e sedimentos. Os ambientes aquáticos apresentam particular relevância por receberem e transportarem substâncias provenientes de atividades domésticas, industriais, agrícolas e hospitalares. Esses compostos podem ser detectados em baixas concentrações, geralmente entre ng L^{-1} e μg L^{-1}, exigindo métodos analíticos com elevada sensibilidade e seletividade (Anand *et al*., 2022; Rocha *et al*., 2022).

Entre as principais classes identificadas destacam-se fármacos, produtos de cuidados pessoais, pesticidas, hormônios, compostos fenólicos, biocidas, plastificantes e substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS). No Brasil, diferentes contaminantes de preocupação emergente já foram identificados em matrizes aquáticas, incluindo fármacos, pesticidas, hormônios, cafeína e bisfenol A, refletindo a diversidade de substâncias introduzidas continuamente nos recursos hídricos (Rocha *et al*., 2022).

Fármacos e produtos de cuidados pessoais apresentam ocorrência expressiva em águas residuárias e efluentes de estações de tratamento, principalmente em decorrência do consumo, excreção, descarte inadequado e lançamento de efluentes. Embora os processos convencionais possam remover parte desses compostos, sua eficiência é variável, favorecendo a permanência de determinadas substâncias nos efluentes tratados e sua posterior introdução nos corpos hídricos. Entre os compostos frequentemente encontrados estão antibióticos, analgésicos, anti-inflamatórios e hormônios (Anand *et al*., 2022). Já os pesticidas apresentam maior relevância em áreas agrícolas, alcançando águas superficiais e subterrâneas por escoamento superficial, lixiviação e transporte de partículas. Sua ocorrência varia conforme práticas agrícolas, características do solo, condições climáticas e proximidade dos corpos hídricos às áreas de aplicação (Rocha *et al*., 2022).

Os PFAS também merecem destaque devido à elevada estabilidade química de suas estruturas, que favorece sua persistência e permanência prolongada no ambiente. Essas substâncias podem atingir águas, solos e sedimentos por diferentes fontes antropogênicas, sendo sua mobilidade e distribuição condicionadas pelas propriedades físico-químicas e pelas características das matrizes ambientais (Antonopoulou *et al*., 2024). No caso dos microplásticos, sua ampla distribuição nos ambientes aquáticos e a capacidade de interagir com outros contaminantes acrescenta complexidade à dinâmica ambiental. Essas partículas podem sorver poluentes orgânicos e metais, favorecendo sua retenção e transporte, em processos influenciados pelo tipo de polímero, área superficial, tamanho, envelhecimento, pH, salinidade e temperatura (Samani; Meunier, 2023; Biswas *et al*., 2024). Essa associação pode modificar a mobilidade, distribuição e biodisponibilidade dos contaminantes (Liu *et al*., 2023; Biswas *et al*., 2024).

A distribuição dos contaminantes também varia dentro de um mesmo ambiente, sendo geralmente maior nas proximidades das fontes de emissão e modificada posteriormente por diluição, adsorção, sedimentação, biodegradação e transformação química. A redução do contaminante original, entretanto, não representa necessariamente sua eliminação, pois metabólitos e produtos de degradação podem permanecer no ambiente e apresentar propriedades distintas (Anand *et al*., 2022; Jiang *et al*., 2024). Essa heterogeneidade é influenciada pela urbanização, atividades industriais e agrícolas, padrões de consumo, infraestrutura de saneamento e eficiência dos tratamentos, resultando em diferentes perfis de contaminantes entre localidades (Rocha *et al*., 2022; Jiang *et al*., 2024).

De modo geral, a presença de contaminantes emergentes resulta da entrada contínua de substâncias antropogênicas, da persistência de determinados compostos e de sua capacidade de transferência entre compartimentos ambientais. A diversidade química e a ocorrência em baixas concentrações constituem desafios para o monitoramento, sobretudo diante da presença simultânea de diferentes contaminantes. Esse cenário reforça a necessidade de compreender as rotas de distribuição e dispersão desses compostos, aspecto aprofundado no tópico seguinte.

3.2 Ocorrência e distribuição em matrizes ambientais

A distribuição dos contaminantes emergentes ocorre de forma heterogênea entre as matrizes ambientais, sendo influenciada pelas propriedades físico-químicas das substâncias, pelas características dos compartimentos e pela proximidade das fontes de emissão. Águas superficiais e residuárias, águas subterrâneas, solos e sedimentos apresentam diferentes

padrões de concentração e permanência. Na América Latina, pesticidas e compostos farmacêuticos são frequentemente identificados em matrizes aquáticas, enquanto persistem lacunas sobre PFAS, desreguladores endócrinos e outros contaminantes (Oliveira *et al*., 2022).

Nas águas superficiais, a ocorrência é mais expressiva em regiões urbanizadas e sujeitas ao lançamento de efluentes, refletindo a entrada contínua de fármacos, pesticidas e produtos de cuidados pessoais. Em águas brasileiras, foram detectados acetaminofeno, naproxeno e metilparabeno em concentrações de até 575,9, 224,7 e 303,6 ng L^{-1}, respectivamente (Oliveira *et al*., 2024). Na América Latina, a maior frequência desses contaminantes também está associada às áreas urbanizadas, evidenciando a influência das atividades antrópicas (Sandoval *et al*., 2024).

As águas subterrâneas apresentam dinâmica distinta, pois os contaminantes podem alcançar os aquíferos por infiltração e percolação, principalmente quando possuem mobilidade e persistência. Fármacos, pesticidas e hormônios provenientes de atividades urbanas, agrícolas, industriais e do manejo inadequado de águas residuárias podem, assim, atingir esse compartimento e permanecer condicionados às características hidrogeológicas e geoquímicas locais (Coronado-Apodaca *et al*., 2023).

Nos sedimentos, a distribuição está relacionada à adsorção e à interação dos contaminantes com partículas e matéria orgânica, permitindo seu acúmulo e atuação como reservatório ambiental. Ducrocq, Merel e Miège (2024), em revisão de 163 artigos, identificaram 1.204 compostos orgânicos em sedimentos continentais, incluindo pesticidas, plastificantes, PFAS, fármacos, hormônios e produtos de cuidados pessoais, com concentrações variando de poucos ng kg^{-1} a vários mg kg^{-1} de sedimento seco.

A distribuição dos contaminantes, portanto, não se restringe ao compartimento de emissão, pois a transferência entre matrizes pode modificar sua permanência e disponibilidade. Substâncias presentes em águas residuárias podem alcançar águas superficiais, associar-se às partículas e acumular-se nos sedimentos, enquanto outras podem atravessar o solo e atingir águas subterrâneas. Alterações nas condições físico-químicas também podem favorecer sua mobilização ou retenção (Zhou *et al*., 2024; Coronado-Apodaca *et al*., 2023).

Em síntese, os contaminantes emergentes apresentam distribuição multicompartimental, com maior disponibilidade de dados para águas superficiais e residuárias e lacunas relevantes em solos, sedimentos e águas subterrâneas. Na América Latina, limitações

de infraestrutura analítica e de monitoramento dificultam a caracterização espacial de determinadas classes (Oliveira *et al*., 2022). Compreender essa distribuição é essencial para identificar rotas de dispersão, persistência e exposição dos organismos, aspectos diretamente relacionados aos riscos ecotoxicológicos.

3.3 Dispersão, transporte e destino ambiental

A dispersão dos contaminantes emergentes resulta da interação entre suas propriedades físico-químicas, as características das matrizes ambientais e as condições hidrológicas, climáticas e biogeoquímicas. Após a entrada no ambiente, essas substâncias podem permanecer dissolvidas na água, associar-se às partículas e à matéria orgânica, acumular-se nos sedimentos ou ser transportadas para outros compartimentos. Processos como sorção, dessorção, sedimentação, biodegradação, fotodegradação e transformação química determinam sua mobilidade e permanência ambiental (Ghosh *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2024).

As propriedades dos contaminantes influenciam diretamente seu transporte entre as matrizes. Compostos com maior afinidade pela matéria orgânica e pelas partículas tendem a permanecer retidos em solos e sedimentos, enquanto substâncias mais hidrossolúveis apresentam maior mobilidade na coluna d'água. Além disso, fatores como pH, temperatura, força iônica, matéria orgânica e condições de oxirredução podem alterar essas interações, fazendo com que uma mesma substância apresente comportamentos diferentes conforme as características do ambiente (Ghosh *et al*., 2024).

Os microplásticos também podem contribuir para o transporte de contaminantes, uma vez que suas superfícies favorecem a adsorção de compostos orgânicos, metais e fármacos. Esse processo é influenciado pelo tipo de polímero, área superficial, envelhecimento, formação de biofilme e condições ambientais, podendo modificar a distribuição dos contaminantes entre as fases aquosa e particulada (Biswas *et al*., 2024; Du *et al*., 2024).

Paralelamente ao transporte, os contaminantes podem sofrer processos de transformação bióticos e abióticos, como biodegradação, fotólise, hidrólise e oxidação. Essas transformações podem reduzir a concentração do composto original ou gerar produtos com propriedades distintas. No caso dos pesticidas, por exemplo, os produtos de transformação podem apresentar persistência e toxicidade diferentes da molécula precursora, tornando necessária sua inclusão nas avaliações ambientais (Montiel-León *et al*., 2024).

A redução da concentração de um contaminante em determinada matriz, portanto, não representa necessariamente sua eliminação. A substância pode ser transferida para outro compartimento ou transformada em novos produtos, modificando sua disponibilidade e toxicidade. Em ambientes aquáticos, por exemplo, compostos presentes na água podem ser adsorvidos por partículas, depositar-se nos sedimentos e posteriormente ser remobilizados (Zhou *et al*., 2024; Ghosh *et al*., 2024).

De modo geral, transporte, retenção e transformação ocorrem de forma simultânea e interdependente, permitindo que os contaminantes permaneçam no ambiente, sejam transferidos entre compartimentos ou originem produtos de transformação. Essa dinâmica pode ampliar a exposição de organismos mesmo distantes das fontes de emissão. Assim, compreender os processos de dispersão e destino ambiental é fundamental para relacionar ocorrência, exposição e possíveis efeitos ecotoxicológicos.

3.4 Riscos ecotoxicológicos dos contaminantes emergentes

A presença de contaminantes emergentes em diferentes matrizes ambientais constitui uma preocupação ecotoxicológica devido à exposição contínua dos organismos, mesmo em baixas concentrações, e à ocorrência simultânea de diferentes substâncias. Nesse contexto, a avaliação dos riscos deve considerar não apenas a concentração individual dos contaminantes, mas também sua persistência, biodisponibilidade, potencial de bioacumulação e interação com outros estressores ambientais (Zhang *et al*., 2024; Singh *et al*., 2025).

Entre os principais efeitos associados à exposição estão alterações fisiológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas. Fármacos, pesticidas e PFAS podem interferir no metabolismo, na regulação hormonal, no sistema imune e em processos neurológicos. Para os PFAS, por exemplo, foram relatadas alterações no metabolismo de glicose e lipídios, na regulação hormonal e na microbiota intestinal de organismos aquáticos, indicando efeitos que podem ultrapassar a toxicidade aguda e afetar processos fisiológicos de longo prazo (Hong *et al*., 2025).

Em nível celular e molecular, o estresse oxidativo constitui um dos mecanismos frequentemente relacionados à exposição aos contaminantes emergentes. O desequilíbrio entre espécies reativas e sistemas antioxidantes pode provocar danos a proteínas, lipídios e ao material genético. Alterações genotóxicas também merecem atenção, pois danos ao DNA podem ocorrer sem efeitos imediatos sobre a sobrevivência dos organismos. Evidências

envolvendo fármacos, pesticidas, metais, microplásticos e outros poluentes reforçam a importância de biomarcadores moleculares nas avaliações ecotoxicológicas (Picinini-Zambelli *et al*., 2025).

A exposição simultânea a diferentes contaminantes pode produzir efeitos aditivos, sinérgicos ou antagônicos, dependendo das concentrações, do tempo de exposição e dos mecanismos de ação. Os microplásticos podem intensificar essa complexidade ao interagir com outros contaminantes e modificar sua distribuição e disponibilidade, favorecendo exposições combinadas que nem sempre são representadas por ensaios com substâncias isoladas (Biswas *et al*., 2024; Du *et al*., 2024).

Em escala ecológica, alterações na reprodução, crescimento, comportamento, metabolismo e sobrevivência podem repercutir sobre populações, comunidades e relações tróficas. Esses efeitos podem ser agravados pela exposição crônica e pela atuação conjunta de outros estressores, como alterações de temperatura, degradação da qualidade da água e perda de habitat. Assim, a avaliação dos riscos deve considerar as condições ambientais e as interações entre diferentes fatores de estresse (Singh *et al*., 2025; Qiu *et al*., 2025).

De modo geral, os riscos ecotoxicológicos estão relacionados à combinação entre ocorrência, persistência, mobilidade, exposição contínua e capacidade de provocar efeitos em diferentes níveis de organização biológica. A presença de misturas e a ocorrência de efeitos subletais evidenciam limitações de avaliações baseadas exclusivamente na toxicidade aguda. Por isso, o acompanhamento de biomarcadores, bioacumulação e efeitos crônicos é fundamental para uma avaliação mais realista dos impactos ambientais e para subsidiar estratégias de controle e remediação.

3.5 Monitoramento e caracterização analítica

O monitoramento dos contaminantes emergentes requer métodos capazes de detectar concentrações muito baixas em matrizes ambientais complexas. Nesse contexto, técnicas cromatográficas acopladas à espectrometria de massas, especialmente LC-MS/MS e GC-MS, permanecem entre as principais ferramentas para a identificação e quantificação de fármacos, produtos de cuidados pessoais, pesticidas e outros contaminantes orgânicos. A evolução dessas técnicas tem ampliado a sensibilidade, seletividade e capacidade de realização de análises multirresíduo (Li *et al*., 2024; Alqarni, 2024).

A preparação das amostras também constitui uma etapa fundamental, considerando a presença de matéria orgânica, sólidos suspensos e outros interferentes em águas, solos, sedimentos e tecidos biológicos. Entre os procedimentos utilizados destacam-se a extração em fase sólida (SPE), extração líquido-líquido, microextração e técnicas assistidas por ultrassom ou micro-ondas. A SPE, por exemplo, permite concentrar os analitos e reduzir interferentes antes da análise instrumental, contribuindo para melhorar os limites de detecção e quantificação (Alqarni, 2024).

A espectrometria de massas de alta resolução (HRMS) representa outro avanço importante por possibilitar análises direcionadas, de suspeita e não direcionadas. Essas abordagens permitem investigar um conjunto mais amplo de sinais analíticos e identificar possíveis contaminantes que não foram previamente incluídos nos programas de monitoramento, aspecto relevante diante da constante introdução de novos compostos no ambiente (Geletu *et al*., 2025; Canchola *et al*., 2025).

A confiabilidade dos resultados depende ainda da validação dos métodos analíticos, considerando parâmetros como seletividade, linearidade, precisão, exatidão, recuperação, limites de detecção e quantificação e efeito de matriz. Esses critérios são especialmente importantes para análises em concentrações de ng L^{-1} ou ng kg^{-1}, nas quais pequenas interferências podem comprometer a interpretação. Por isso, procedimentos padronizados e estratégias de controle de qualidade são necessários para garantir maior comparabilidade entre estudos e regiões (Li *et al*., 2024; Geletu *et al*., 2025).

A ampliação do monitoramento também envolve a integração entre técnicas instrumentais, estratégias de amostragem e ferramentas computacionais. O uso de análise não direcionada, bancos de dados, inteligência artificial e aprendizado de máquina pode auxiliar na interpretação de grandes volumes de dados e no reconhecimento de padrões. Entretanto, a disponibilidade desigual de equipamentos de alta resolução, padrões analíticos e infraestrutura especializada ainda limita a expansão dessas abordagens, reforçando a necessidade de métodos mais acessíveis, padronizados e capazes de monitorar múltiplas classes de contaminantes (Geletu *et al*., 2025; Canchola *et al*., 2025).

3.6 Estratégias de remediação e tratamento

A remoção de contaminantes emergentes constitui um dos principais desafios para o controle da poluição ambiental, pois muitos apresentam estabilidade, persistência ou

resistência aos tratamentos convencionais. Embora os sistemas tradicionais de tratamento de águas residuárias sejam eficientes na redução de matéria orgânica e nutrientes, sua capacidade de remover fármacos, produtos de cuidados pessoais, PFAS, pesticidas e microplásticos é variável. Essa limitação tem estimulado o desenvolvimento de tecnologias complementares de retenção, separação e transformação dos contaminantes (Li *et al*., 2024; Harish; Jegatheesan, 2025).

A adsorção, especialmente com carvão ativado e outros materiais carbonáceos, destaca-se entre as alternativas investigadas por sua capacidade de remover diferentes compostos orgânicos em baixas concentrações. Entretanto, a transferência do contaminante para a fase sólida não implica necessariamente sua destruição, sendo necessário considerar a regeneração ou destinação do adsorvente. Os processos oxidativos avançados (POAs), por sua vez, utilizam espécies altamente reativas para transformar compostos persistentes, com aplicações envolvendo ozônio, peróxido de hidrogênio, fotocatálise e sistemas eletroquímicos. Nesses processos, a identificação dos produtos de transformação e sua possível toxicidade são importantes para avaliar a efetiva redução dos riscos (Li *et al*., 2024; Singh *et al*., 2025; Geletu *et al*., 2025).

As tecnologias de separação por membranas, como nanofiltração e osmose reversa, também apresentam elevada capacidade de retenção de diferentes micropoluentes. Contudo, fatores como consumo energético, fouling e geração de correntes concentradas podem limitar sua aplicação. Por isso, sistemas híbridos que associam membranas a processos eletroquímicos ou outras etapas de tratamento têm recebido atenção, buscando melhorar a eficiência e reduzir limitações operacionais (Xue *et al*., 2025).

Processos biológicos e soluções baseadas na natureza, como biorremediação e wetlands construídos, apresentam potencial para complementar os sistemas convencionais, embora sua eficiência dependa das características dos contaminantes, das comunidades microbianas e das condições ambientais. Nesse contexto, a combinação de diferentes mecanismos, como adsorção, oxidação, separação por membranas e tratamento biológico, pode superar limitações associadas ao uso de uma única tecnologia (Harish; Jegatheesan, 2025; Xue *et al*., 2025).

A escolha da estratégia de tratamento deve considerar, portanto, não apenas a porcentagem de remoção, mas também consumo energético, custos operacionais, geração de resíduos, formação de produtos de transformação e possibilidade de aplicação em escala real.

Tecnologias eficientes em condições laboratoriais podem apresentar desempenho diferente diante da complexidade das matrizes ambientais e das variações dos efluentes. Assim, o desenvolvimento de sistemas híbridos, processos mais sustentáveis e ferramentas de monitoramento em tempo real constitui uma perspectiva relevante para ampliar a eficiência e a viabilidade da remediação de contaminantes emergentes (Harish; Jegatheesan, 2025; Geletu *et al*., 2025).

3.7 Desafios, perspectivas e lacunas de pesquisa

Apesar da ampliação do conhecimento sobre contaminantes emergentes, permanecem lacunas relacionadas à sua ocorrência, comportamento ambiental, toxicidade e controle. A grande diversidade química dessas substâncias, associada às diferenças de propriedades físico-químicas, mecanismos de ação e persistência, dificulta a definição de padrões de ocorrência e distribuição. Além disso, a ausência de programas sistemáticos de monitoramento, métodos analíticos padronizados e dados suficientes para determinadas classes limita a comparação entre diferentes regiões e estudos (Li *et al*., 2024; Boahen; Owusu; Adjei-Anim, 2025).

Outra questão relevante está relacionada aos efeitos de exposições prolongadas e de misturas de contaminantes. Muitos estudos ainda utilizam substâncias isoladas e períodos de exposição relativamente curtos, enquanto os organismos estão expostos a combinações de compostos e outros fatores de estresse. Interações aditivas, sinérgicas ou antagônicas podem modificar as respostas observadas, tornando necessários estudos de longo prazo e avaliações integradas de misturas para aprimorar a estimativa dos riscos ecotoxicológicos (Boahen; Owusu; Adjei-Anim, 2025; Li *et al*., 2024).

Na química analítica, a identificação de contaminantes desconhecidos e produtos de transformação representa uma importante fronteira de pesquisa. A utilização de HRMS e de análises não direcionadas amplia a investigação para além dos compostos previamente selecionados, embora a interpretação dos dados ainda dependa de bibliotecas espectrais, padrões de referência e ferramentas computacionais. A integração dessas abordagens com aprendizado de máquina apresenta potencial para ampliar a identificação de contaminantes e a interpretação de grandes conjuntos de dados ambientais (Geletu *et al*., 2025; Canchola *et al*., 2025).

As estratégias de remediação também apresentam desafios relacionados à aplicação em escala real. Tecnologias como adsorção, processos oxidativos avançados, membranas,

tratamentos biológicos e sistemas eletroquímicos demonstram potencial, mas podem envolver custos elevados, consumo energético, manutenção, fouling, geração de resíduos e formação de produtos de transformação. Dessa forma, a eficiência de remoção não deve ser analisada isoladamente, sendo necessária a incorporação de aspectos como sustentabilidade, ciclo de vida, custos operacionais e comportamento dos subprodutos (Harish; Jegatheesan, 2025; Xue *et al*., 2025).

A dimensão geográfica constitui igualmente uma lacuna, especialmente em regiões com menor cobertura de monitoramento e infraestrutura analítica. A ampliação de pesquisas nessas localidades pode contribuir para reduzir desigualdades na produção de dados e melhorar a compreensão dos padrões regionais de exposição. De maneira geral, as perspectivas apontam para uma integração crescente entre química analítica, ecotoxicologia, ciência de dados, engenharia ambiental e políticas públicas, associada ao desenvolvimento de métodos não direcionados, inteligência artificial, sensores e tecnologias híbridas de tratamento. Contudo, esses avanços devem ser acompanhados pela padronização analítica, ampliação do monitoramento, geração de dados toxicológicos de longo prazo e fortalecimento dos mecanismos regulatórios (Li *et al*., 2024; Geletu *et al*., 2025; Boahen; Owusu; Adjei-Anim, 2025).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura evidenciou que os contaminantes emergentes constituem um importante desafio ambiental devido à diversidade de substâncias, à ocorrência em diferentes matrizes e à capacidade de persistência, transporte e transformação no ambiente. Fármacos, pesticidas, produtos de cuidados pessoais, PFAS, microplásticos e outros compostos podem alcançar águas, solos e sedimentos por diferentes fontes, apresentando distribuição condicionada pelas propriedades físico-químicas e pelas características ambientais.

Os contaminantes podem sofrer processos de sorção, dessorção, sedimentação, biodegradação, fotodegradação e transformação química, favorecendo sua transferência entre compartimentos e a formação de produtos com propriedades distintas. Além disso, os riscos ecotoxicológicos podem envolver alterações fisiológicas, bioquímicas, genéticas e reprodutivas, especialmente em exposições prolongadas e na presença de misturas. Dessa forma, avaliações baseadas apenas em substâncias isoladas e toxicidade aguda não representam completamente a complexidade das condições ambientais.

No monitoramento, técnicas como LC-MS/MS, GC-MS e HRMS apresentam importância para a identificação e quantificação de contaminantes em concentrações de traço. A incorporação de análises não direcionadas, inteligência artificial e aprendizado de máquina amplia as possibilidades de detecção e interpretação dos dados. Entretanto, limitações de infraestrutura, padronização analítica e cobertura do monitoramento ainda dificultam a obtenção de informações abrangentes, principalmente em regiões com menor disponibilidade de recursos.

As estratégias de remediação, incluindo adsorção, processos oxidativos avançados, membranas, tratamentos biológicos e sistemas eletroquímicos, apresentam potencial, mas sua aplicação deve considerar também custos, consumo energético, geração de resíduos, formação de subprodutos e viabilidade em escala real. Nesse cenário, sistemas híbridos e alternativas mais sustentáveis destacam-se como perspectivas promissoras.

Conclui-se que o enfrentamento dos contaminantes emergentes requer uma abordagem integrada, envolvendo química analítica, ecotoxicologia, engenharia ambiental, ciência de dados e políticas públicas. A ampliação do monitoramento, dos estudos sobre efeitos crônicos e misturas, da identificação de produtos de transformação e da avaliação de tecnologias em escala real é fundamental para reduzir as lacunas existentes e subsidiar estratégias mais eficientes de prevenção, controle e remediação ambiental.

REFERÊNCIAS

ALQARNI, A. M. Analytical methods for the determination of pharmaceuticals and personal care products in solid and liquid environmental matrices: a review. Molecules, v. 29, n. 16, 3900, 2024. DOI: 10.3390/molecules29163900.

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

ANTONOPOULOU, M. et al. Current state of knowledge of environmental occurrence, toxic effects, and advanced treatment of PFOS and PFOA. Science of the Total Environment, v. 913, 169332, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169332.

BISWAS, B.; JOSEPH, A.; RANJAN, V. P.; GOEL, S. Adsorption of emerging contaminants on microplastics in the environment: a systematic review. ACS ES&T Water, v. 4, n. 12, 2024. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00666.

BOAHEN, E.; OWUSU, L.; ADJEI-ANIM, S. O. A comprehensive review of emerging environmental contaminants of global concern. Discover Environment, v. 3, art. 144, 2025.

CANCHOLA, A. et al. Advancing non-target analysis of emerging environmental contaminants with machine learning: current status and future implications. Environment International, v. 198, 109404, 2025. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109404.

CORONADO-APODACA, K. G. et al. Occurrence, transport, and detection techniques of emerging pollutants in groundwater. MethodsX, v. 10, 102160, 2023. DOI: 10.1016/j.mex.2023.102160.

DU, Y. et al. Ecotoxicological effects of microplastics combined with antibiotics in the aquatic environment: recent developments and prospects. Environmental Toxicology and Chemistry, v. 43, n. 9, p. 1950–1961, 2024. DOI: 10.1002/etc.5950.

DUCROCQ, T.; MEREL, S.; MIÈGE, C. Review on analytical methods and occurrence of organic contaminants in continental water sediments. Chemosphere, v. 365, 143275, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143275.

GELETU, A. K. et al. Trends in monitoring of emerging contaminants: advances and challenges in detection and assessment. Regional Studies in Marine Science, v. 89, 104358, 2025. DOI: 10.1016/j.rsma.2025.104358.

GHOSH, R. et al. Occurrence, fate, transport, and removal technologies of emerging contaminants: a review on recent advances and future perspectives. CLEAN – Soil, Air, Water, v. 52, 2024. DOI: 10.1002/clen.202300259.

HARISH, H.; JEGATHEESAN, V. A review of sources, worldwide legislative measures and the factors influencing the treatment technologies for contaminants of emerging concern (CECs). Current Pollution Reports, v. 11, art. 44, 2025.

HONG, M.-S. et al. Ecotoxicological effects of per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic organisms: a review. Marine Pollution Bulletin, v. 214, 117678, 2025.

JIANG, T. et al. Occurrence and distribution of emerging contaminants in wastewater treatment plants: a globally review over the past two decades. Science of the Total Environment, v. 951, 175664, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175664.

LI, X. et al. Comprehensive review of emerging contaminants: detection technologies, environmental impact, and management strategies. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 278, 116420, 2024. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116420.

LIU, W.; ZU, B.; YANG, Q.; GUO, J.; LI, J. Sources, distribution, and environmental effects of microplastics: a systematic review. RSC Advances, v. 13, p. 15566–15574, 2023. DOI: 10.1039/D3RA02169F.

MONTIEL-LEÓN, J. M. et al. Pesticides in the environment: degradation routes, pesticide transformation products and ecotoxicological considerations. Science of the Total Environment, v. 935, 173026, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173026.

OLIVEIRA, et al. Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. Science of the Total Environment, v. 848, 157774, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157774.

OLIVEIRA, et al. Occurrence and Environmental Risk Assessment of Contaminants of Emerging Concern in Brazilian Surface Waters. Environmental Toxicology and Chemistry, 2024. DOI: 10.1002/etc.5953.

PICININI-ZAMBELLI, J. et al. Emerging pollutants in the aquatic environments: a review of genotoxic impacts. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, v. 795, 108519, 2025. DOI: 10.1016/j.mrrev.2024.108519.

ROCHA, et al. A review toward contaminants of emerging concern in Brazil: occurrence, impact and their degradation by advanced oxidation process in aquatic matrices. Science of the Total Environment, v. 836, 155605, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155605.

SAMANI, F. A.; MEUNIER, L. Interactions of microplastics with contaminants in freshwater systems: a review of characteristics, bioaccessibility, and environmental factors affecting sorption. Journal of Environmental Science and Health, Part A, v. 58, n. 3, p. 222–235, 2023. DOI: 10.1080/10934529.2023.2177458.

SANDOVAL, M. A. et al. Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America. Environmental Pollution, v. 345, 123397, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123397.

SINGH, C. K. et al. Managing the complexity of emerging contaminants in aquatic environments: exploring their ecotoxicological impacts, detection techniques, and the use of innovative technologies for their remediation. Discover Catalysis, v. 2, 9, 2025.

XUE, W. et al. Recent advances in membrane and electrochemical hybrid technologies for emerging contaminants removal. Water Cycle, v. 6, p. 176–194, 2025. DOI: 10.1016/j.watcyc.2025.02.004.

ZHOU, Q. et al. Occurrence, sustainable treatment technologies, potential sources, and future prospects of emerging pollutants in aquatic environments: a review. Frontiers in Environmental Science, v. 12, 1455377, 2024. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1455377.

CAPÍTULO 5

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

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-5

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

RESUMO

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

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

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. METODOLOGIA

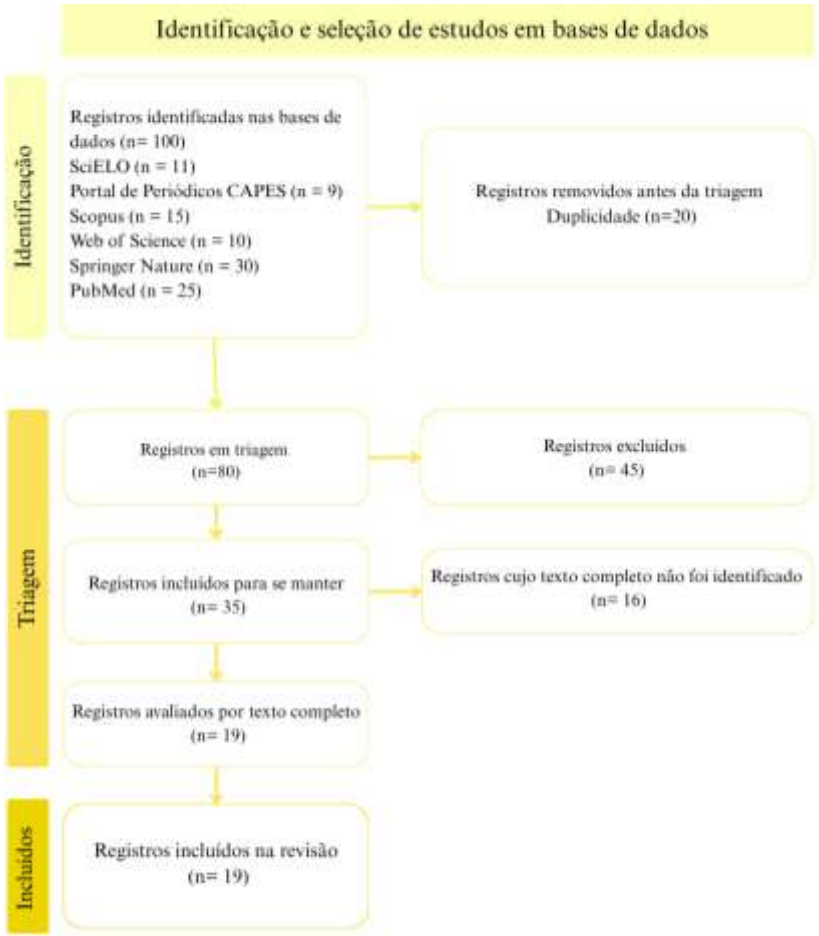
O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, conduzida de acordo com as recomendações do protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), proposto por Page *et al.* (2021). A revisão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

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

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

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

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



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

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

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

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

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ocorrência e distribuição de contaminantes farmacêuticos no ambiente

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2 Principais classes de contaminantes farmacêuticos e seus níveis de concentração

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

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

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

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

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

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

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

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

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3 Comportamento ambiental e impactos químicos dos contaminantes farmacêuticos

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

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

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

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

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

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

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

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

3.4 Efeitos biológicos e impactos sobre os ecossistemas

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

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

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

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

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

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

Tabela 1. Principais efeitos biológicos associados aos contaminantes farmacêuticos.

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

Fonte:Elaborado pelo autor (2026).

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

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

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

3.5 Riscos dos contaminantes farmacêuticos à saúde humana

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

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

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

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

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

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

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

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO 6

TRATAMENTO DE EFLUENTES NO ENSINO DE QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-6

Allysson Paulino da Silva, e-mail: allysson.silva2023@alunos.uneal.edu.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3645893800792095
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Paulo de Tárcio da Silva Júnior, e-mail: tarcio.jr@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/0793107269497381
Mariana Cabral do Nascimento Santos, e-mail: marianacabralsantos2@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7558622538353505
Erijane da Silva Macedo, e-mail: eryjannemacedoo@gmail.com, URL lattes: https://lattes.cnpq.br/9650393290140337
Maria Thalia Paulino de Farias, e-mail: maria.thalia@arapiraca.ufal.br, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/4370186459099148
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

A abordagem de questões ambientais no Ensino de Química constitui uma possibilidade para contextualizar conceitos científicos e aproximá-los de situações concretas do cotidiano e do mundo do trabalho. Nesse contexto, o tratamento de efluentes apresenta potencial didático por envolver diferentes processos físico-químicos, como ajuste de pH, coagulação, floculação, decantação e filtração. O presente estudo teve como objetivo desenvolver, aplicar e analisar uma Sequência Didática (SD) sobre tratamento de efluentes no contexto da formação profissional de operadores de tratamento de água e efluentes. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, descritiva e do tipo pesquisa-intervenção, realizada com 20 estudantes. A SD foi organizada em etapas articuladas, contemplando o levantamento dos conhecimentos prévios, aula teórica dialogada, problematização, resolução de situações-problema, simulação experimental das etapas de tratamento e sistematização dos conhecimentos. A produção dos dados ocorreu por meio de observações, registros das atividades e análise das respostas dos participantes. Os resultados evidenciaram que os estudantes apresentavam inicialmente conhecimentos fragmentados acerca dos processos de tratamento, especialmente quanto às funções da coagulação, floculação e decantação. Ao longo da intervenção, foram observados avanços na compreensão dos processos físico-químicos, na interpretação de falhas operacionais e na tomada de decisões diante de situações relacionadas ao tratamento de efluentes. A experimentação possibilitou a articulação entre os conhecimentos teóricos e os fenômenos observados, contribuindo para a contextualização da aprendizagem e para o desenvolvimento de uma postura crítica diante de questões ambientais e profissionais. Conclui-se que a utilização de uma Sequência Didática contextualizada constitui uma estratégia pedagógica pertinente para o Ensino de Química, especialmente em contextos de formação profissional.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de efluentes; Sequência Didática; Experimentação; Educação ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A discussão sobre a qualidade da água e o tratamento de efluentes tem adquirido crescente relevância diante da necessidade de reduzir impactos associados ao lançamento

inadequado de resíduos líquidos nos corpos hídricos. Os processos empregados no tratamento envolvem diferentes operações e fenômenos físico-químicos, cuja compreensão depende da análise de variáveis como turbidez, pH, concentração de substâncias e comportamento das partículas presentes no meio. Além de sua importância tecnológica e ambiental, esses processos apresentam possibilidades de abordagem no Ensino de Química por permitirem relacionar conceitos científicos a situações concretas e socialmente relevantes (Santos *et al.*, 2025; Lourenço; Amaral, 2024).

A inserção de problemas ambientais no contexto escolar pode contribuir para ampliar o significado atribuído aos conteúdos químicos, sobretudo quando o estudante é levado a interpretar situações que ultrapassam a dimensão conceitual e exigem posicionamento, análise e tomada de decisão. Nesse sentido, o tratamento de água e efluentes constitui uma temática com potencial para aproximar conhecimento científico, realidade social e Educação Ambiental. Propostas desenvolvidas nessa perspectiva demonstram que a discussão de problemas relacionados aos recursos hídricos pode estimular a participação dos estudantes e favorecer a percepção da aplicabilidade dos conhecimentos químicos em diferentes contextos (Santos *et al.*, 2025).

No Ensino de Química, entretanto, a aproximação entre conteúdo e realidade não depende somente da escolha de uma temática ambiental. É necessário organizar situações de aprendizagem que permitam ao estudante participar ativamente do processo, formular explicações, confrontar hipóteses e interpretar evidências. As sequências didáticas podem contribuir para essa organização ao estruturarem diferentes momentos de aprendizagem de maneira articulada, possibilitando que um mesmo conteúdo seja retomado sob diferentes perspectivas e níveis de complexidade (Melo; Santos; Araújo, 2021; Limeira; Oliveira, 2025).

Nessa perspectiva, a experimentação representa uma estratégia particularmente relevante, pois possibilita observar fenômenos que nem sempre são facilmente compreendidos por meio de explicações exclusivamente teóricas. Quando associada a questionamentos e situações investigativas, a atividade experimental pode favorecer a participação discente e estimular a construção de interpretações a partir dos resultados obtidos. Estudos recentes apontam que a experimentação investigativa pode contribuir para o desenvolvimento de habilidades conceituais, cognitivas e argumentativas, especialmente quando o professor atua como mediador do processo de construção das explicações (Chaves; Boa Morte; Cabral, 2024; Aleme; Santos; Antunes-Souza, 2026).

A utilização de situações-problema amplia ainda mais essa perspectiva, pois permite apresentar aos estudantes condições semelhantes às encontradas em situações reais de

tratamento, nas quais diferentes fatores precisam ser considerados simultaneamente. Questões relacionadas à dosagem de coagulantes, ao controle do pH, à velocidade de mistura e ao tempo de sedimentação, por exemplo, podem ser transformadas em objetos de investigação, permitindo mobilizar conhecimentos químicos para interpretar resultados e justificar escolhas. Desse modo, o conteúdo deixa de ser trabalhado apenas como informação a ser memorizada e passa a ser utilizado como ferramenta para compreender e solucionar situações contextualizadas (Matias; Souza, 2024).

A temática também favorece uma abordagem interdisciplinar, uma vez que o tratamento de efluentes envolve conhecimentos relacionados à Química, às Ciências Ambientais, à saúde e às tecnologias de controle da poluição. A articulação dessas dimensões pode contribuir para uma formação científica que considere não apenas a compreensão dos fenômenos, mas também suas implicações ambientais e sociais. Nesse sentido, a Educação Ambiental associada ao Ensino de Química pode ampliar a percepção dos estudantes acerca da responsabilidade individual e coletiva na conservação dos recursos hídricos (Santos *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2026).

Assim, trabalhar o tratamento de efluentes em atividades pedagógicas permite explorar simultaneamente conceitos químicos e problemas ambientais, criando oportunidades para que os estudantes relacionem fenômenos observáveis a explicações científicas. A combinação entre discussão conceitual, resolução de problemas e experimentação pode ainda favorecer uma aprendizagem em que os conhecimentos sejam construídos e reorganizados ao longo do processo, em vez de apresentados de forma fragmentada.

Diante dessa perspectiva, este capítulo apresenta uma experiência de desenvolvimento e aplicação de uma Sequência Didática (SD) voltada ao tratamento de efluentes no Ensino de Química. A proposta foi organizada em diferentes momentos, envolvendo levantamento dos conhecimentos prévios, discussão conceitual, resolução de situações-problema, atividade experimental e sistematização. Busca-se, a partir dessa experiência, discutir as possibilidades pedagógicas da temática para a compreensão de processos físico-químicos, para a aproximação entre teoria e prática e para a reflexão sobre questões ambientais relacionadas à qualidade da água e ao tratamento de efluentes.

2. METODOLOGIA

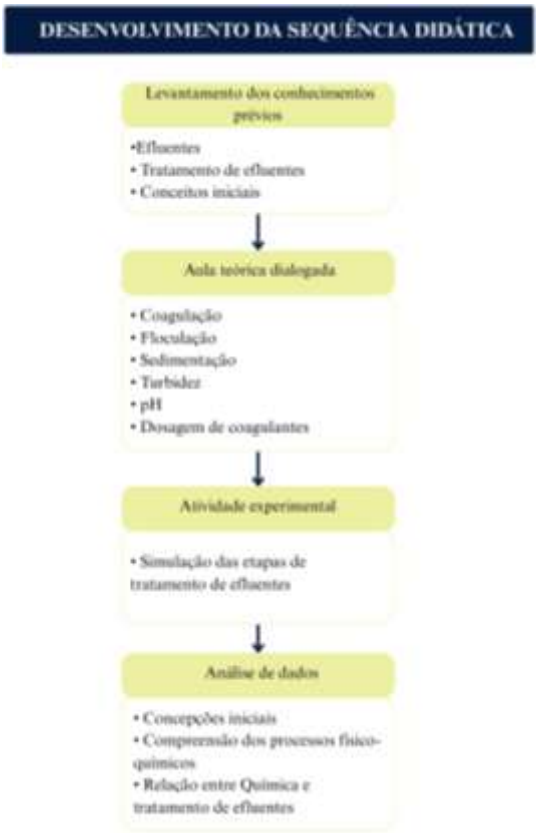
A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter descritivo, desenvolvida na perspectiva da pesquisa-intervenção no campo do Ensino de Química, tendo como objeto o desenvolvimento e a aplicação de uma SD sobre tratamento de efluentes. A abordagem

qualitativa mostrou-se adequada por possibilitar a compreensão das concepções, manifestações e formas de apropriação dos conhecimentos pelos estudantes ao longo do processo educativo, considerando as interações estabelecidas durante a intervenção (Lara *et al.*, 2022; Valle *et al.*, 2025). A pesquisa-intervenção articula investigação e ação educativa, possibilitando analisar os processos formativos concomitantemente à realização de ações voltadas à transformação da realidade investigada (Azevedo *et al*., 2026).

Participaram da pesquisa 20 estudantes, envolvidos nas diferentes etapas da intervenção pedagógica. A participação ocorreu de forma integrada às atividades propostas, considerando os conhecimentos prévios, as discussões realizadas, a resolução de situações-problema, a atividade experimental e a sistematização dos conhecimentos construídos ao longo da sequência didática.

A Sequência Didática foi estruturada de maneira articulada e progressiva, contemplando cinco etapas: (1) levantamento dos conhecimentos prévios; (2) aula teórica dialogada; (3) resolução de situações-problema; (4) atividade experimental de simulação das etapas de tratamento de efluentes; e (5) sistematização e discussão dos conhecimentos construídos. A organização das etapas buscou promover a articulação entre os conhecimentos prévios dos estudantes, os conceitos científicos e sua aplicação em situações relacionadas ao tratamento de efluentes. O percurso de desenvolvimento da Sequência Didática, desde o levantamento dos conhecimentos prévios até a análise dos dados produzidos durante a intervenção, está apresentado na Figura 1.

Figura 1. Percurso metodológico da pesquisa e etapas da Sequência Didática.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Inicialmente, realizou-se o levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes, com o propósito de identificar suas concepções iniciais acerca dos efluentes, dos processos de tratamento e dos fenômenos físico-químicos envolvidos. Essa etapa também subsidiou o planejamento das atividades subsequentes, considerando que a aprendizagem é favorecida quando os novos conhecimentos estabelecem relações significativas com conhecimentos previamente construídos (Moreira, 2021).

Na segunda etapa, foi desenvolvida uma aula teórica dialogada, abordando conceitos relacionados aos processos físico-químicos empregados no tratamento de efluentes, com ênfase em coagulação, floculação, sedimentação, turbidez, pH e dosagem de coagulantes. A abordagem buscou estabelecer relações entre os conceitos químicos e situações concretas relacionadas à qualidade da água e ao tratamento de efluentes.

Em seguida, foram propostas situações-problema relacionadas às condições operacionais dos processos de tratamento, envolvendo aspectos como turbidez, pH, dosagem de coagulantes, mistura, formação de flocos e sedimentação. As atividades foram elaboradas de modo a estimular a interpretação de diferentes condições de tratamento, a formulação de

hipóteses e a tomada de decisões fundamentadas nos conhecimentos químicos construídos durante a intervenção (Santos *et al.*, 2026; Passos; Vasconcelos; Silveira, 2022).

A atividade experimental foi desenvolvida sob uma perspectiva investigativa, possibilitando aos estudantes a simulação de etapas do tratamento de efluentes e a observação das transformações ocorridas nas amostras. Foram analisadas diferentes condições relacionadas aos processos de coagulação, floculação e sedimentação, permitindo aos participantes estabelecer relações entre os fenômenos observados experimentalmente e os conceitos químicos abordados nas etapas anteriores. A experimentação articulada à problematização e à reflexão favorece a aproximação entre teoria e prática, contribuindo para a construção de aprendizagens contextualizadas (Melo; Santos; Araújo, 2021; Nóbrega; Benite, 2024).

Ao final da intervenção, realizou-se a sistematização dos conhecimentos por meio da discussão coletiva dos resultados obtidos nas atividades e da análise dos fenômenos observados durante a experimentação. Nessa etapa, buscou-se estabelecer relações entre os processos simulados em escala experimental e aqueles empregados em sistemas reais de tratamento de efluentes, favorecendo a compreensão dos conteúdos químicos e a reflexão acerca de questões ambientais e sanitárias.

A produção dos dados ocorreu por meio das observações realizadas durante as atividades, dos registros produzidos ao longo da intervenção e das respostas apresentadas pelos estudantes nas situações propostas. Os registros foram utilizados para acompanhar a participação dos estudantes, as discussões estabelecidas, as estratégias empregadas na resolução das situações-problema e as relações estabelecidas entre os conhecimentos químicos e o contexto do tratamento de efluentes.

Para a análise dos dados, foram consideradas as manifestações e produções dos estudantes ao longo das diferentes etapas da sequência didática, buscando identificar indícios de mudanças nas concepções iniciais, avanços na compreensão dos processos físico-químicos envolvidos no tratamento de efluentes e a capacidade de estabelecer relações entre os conhecimentos científicos e situações concretas. A análise considerou o desenvolvimento dos estudantes durante todo o processo de intervenção, permitindo uma interpretação integrada das aprendizagens construídas e das interações estabelecidas no contexto educativo (Valle *et al.*, 2025; Azevedo *et al.,* 2026).

Foram adotados procedimentos para preservação do anonimato dos participantes, sendo as informações obtidas exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da Sequência Didática possibilitou acompanhar diferentes momentos de construção e ressignificação dos conhecimentos relacionados ao tratamento de efluentes. Ao longo das atividades, foram identificadas mudanças na forma como os estudantes compreendiam os processos de tratamento, especialmente no que se refere à relação entre os fenômenos físico-químicos, as condições operacionais e a qualidade do efluente obtido. Esse resultado reforça a potencialidade de propostas didáticas organizadas em etapas articuladas, nas quais os estudantes são conduzidos progressivamente da mobilização de conhecimentos prévios para a interpretação de situações-problema e a sistematização dos conceitos científicos (Limeira; Oliveira, 2025).

3.1 Conhecimentos iniciais e construção de novos significados

O levantamento inicial revelou que os estudantes possuíam conhecimentos prévios sobre o tratamento de efluentes, porém esses conhecimentos se apresentavam de maneira fragmentada. As concepções identificadas estavam, em grande parte, relacionadas à ideia de uma simples separação de resíduos visíveis, com pouca compreensão acerca dos mecanismos envolvidos nas etapas de coagulação, floculação e decantação.

Também foram observadas dificuldades em estabelecer relações entre parâmetros de qualidade da água e as condições necessárias para o adequado funcionamento dos processos de tratamento. Esse resultado evidencia a importância de estratégias diagnósticas no início de uma intervenção pedagógica, uma vez que o conhecimento apresentado pelos estudantes pode orientar a seleção dos conteúdos, a organização das atividades e as formas de mediação adotadas pelo professor. Estudos sobre sequências de ensino investigativas destacam justamente a relevância de considerar as concepções iniciais dos estudantes para favorecer a construção progressiva dos conhecimentos científicos (Limeira; Oliveira, 2025).

Nesse sentido, o levantamento dos conhecimentos prévios não assumiu apenas uma função diagnóstica, mas constituiu uma etapa orientadora da própria intervenção. Ao reconhecer as lacunas conceituais apresentadas inicialmente, tornou-se possível direcionar as discussões para aspectos que posteriormente seriam retomados nas situações-problema e na atividade experimental. Tal perspectiva aproxima-se dos pressupostos da aprendizagem significativa, segundo os quais a construção de novos conhecimentos está relacionada à

interação entre os novos conteúdos e os conhecimentos previamente existentes na estrutura cognitiva dos estudantes (Moreira, 2021).

A literatura também evidencia que a utilização de sequências didáticas planejadas favorece a organização de situações de aprendizagem nas quais os estudantes podem retomar e reelaborar conceitos ao longo de diferentes momentos pedagógicos. Passos e Vasconcelos (2025), em revisão sistemática sobre propostas voltadas à avaliação da aprendizagem em Química, destacam a utilização de sequências didáticas e unidades de ensino como estratégias capazes de acompanhar a evolução conceitual dos estudantes e oferecer diferentes oportunidades de construção do conhecimento.

3.2 Contextualização dos conteúdos e participação dos estudantes

Durante a aula teórica dialogada, percebeu-se uma ampliação da participação dos estudantes, principalmente quando os conteúdos químicos foram associados a situações relacionadas ao funcionamento de sistemas de tratamento de água e efluentes. A discussão de conceitos como coagulação, floculação, sedimentação, turbidez e pH deixou de ocorrer de maneira isolada e passou a ser compreendida a partir de uma situação concreta de aplicação.

A maior frequência de questionamentos e manifestações orais indicou que a contextualização contribuiu para aproximar o conteúdo científico da realidade formativa dos participantes. Essa aproximação é relevante no Ensino de Química, uma vez que situações contextualizadas podem favorecer o estabelecimento de relações entre conceitos científicos e problemas presentes no cotidiano.

Essa interpretação encontra respaldo em estudos recentes que utilizaram temas ambientais como eixo organizador de sequências didáticas. Santos *et al.* (2025), ao desenvolverem uma proposta sobre tratamento de água articulada à Educação Ambiental, observaram que a temática favoreceu reflexões sobre a conservação dos recursos hídricos e possibilitou aproximar os conhecimentos químicos de questões ambientais. Entretanto, os autores também observaram que a mudança das concepções científicas não ocorre automaticamente, exigindo mediação pedagógica e retomada dos conhecimentos ao longo das atividades.

A experiência desenvolvida mostrou, portanto, que a contextualização não precisa representar apenas uma etapa complementar da aula. Ela pode constituir o próprio eixo organizador da aprendizagem, utilizando um problema ambiental concreto como ponto de partida para a mobilização de conhecimentos químicos. Essa perspectiva também é encontrada

em estudos que defendem o uso de temas socialmente relevantes como recurso para tornar o ensino mais significativo e favorecer a participação dos estudantes (Santos *et al*., 2021).

3.3 Experimentação e articulação entre teoria e prática

A atividade experimental constituiu um momento de integração entre os conhecimentos discutidos nas etapas anteriores. A simulação das etapas de coagulação, floculação e sedimentação permitiu visualizar transformações que, quando apresentadas apenas de forma teórica, poderiam permanecer abstratas para os estudantes.

Nas amostras conduzidas sob condições consideradas adequadas, observaram-se flocos maiores e mais densos, acompanhados da sedimentação do material particulado e da redução da turbidez do sobrenadante. Em contrapartida, nas condições em que foram simuladas falhas operacionais, verificou-se a formação de flocos menores e menos estáveis, menor eficiência de sedimentação e manutenção de maior turbidez.

A comparação entre os sistemas foi pedagogicamente significativa porque permitiu aos estudantes compreender que as etapas do tratamento não funcionam de forma independente. Alterações na coagulação repercutem na floculação e, consequentemente, na sedimentação. Dessa maneira, o experimento favoreceu a construção de uma visão integrada do processo.

Mais do que demonstrar um fenômeno, a atividade possibilitou que os estudantes observassem, comparassem, interpretassem e discutissem os resultados. Essa característica aproxima a experimentação de uma perspectiva investigativa, na qual o estudante deixa de ocupar uma posição exclusivamente receptiva e passa a participar ativamente da construção das explicações.

Resultados semelhantes são apontados por estudos recentes sobre experimentação investigativa no Ensino de Química. Aleme, Santos e Antunes-Souza (2026), por exemplo, identificaram que atividades experimentais investigativas podem contribuir para o desenvolvimento de habilidades conceituais, cognitivas e de interação social, embora também revelem dificuldades dos estudantes em articular diferentes níveis de representação do conhecimento químico.

Além disso, Silva (2021) destaca que a experimentação pode assumir papel relevante quando integrada a uma sequência didática estruturada, especialmente quando os experimentos são acompanhados por questões que conduzem os estudantes à observação e interpretação dos fenômenos. Assim, os resultados observados nesta intervenção sugerem que o potencial

pedagógico do experimento esteve associado não apenas à manipulação dos materiais, mas principalmente à articulação entre observação, discussão e construção de explicações.

3.4 Situações-problema como estratégia para o desenvolvimento do raciocínio químico

As situações-problema constituíram um dos momentos de maior aproximação entre os conhecimentos conceituais e a tomada de decisões. Ao analisar diferentes condições de funcionamento do tratamento, os estudantes passaram a considerar que a eficiência de um sistema não depende exclusivamente da presença de um determinado produto químico, mas da interação entre diferentes variáveis operacionais.

Na situação relacionada ao aumento da turbidez após períodos chuvosos, os estudantes utilizaram o Jar Test para avaliar diferentes dosagens de sulfato de alumínio. A atividade permitiu observar que alterações na qualidade da água de entrada podem exigir modificações nas condições de tratamento. A formação de flocos em diferentes condições e a posterior redução da turbidez favoreceram a compreensão da necessidade de estabelecer uma dosagem adequada do coagulante, em vez de considerar esse parâmetro como uma condição fixa.

A discussão sobre o pH ampliou essa compreensão. Ao realizar ajustes prévios em diferentes faixas de pH antes da adição do coagulante, os estudantes observaram alterações na formação dos flocos e na turbidez final. O resultado contribuiu para evidenciar que os processos de tratamento estão associados a condições químicas específicas e que a eficiência da coagulação pode ser influenciada pelas características do meio.

Na situação envolvendo a velocidade de mistura durante a floculação, a observação da ruptura dos flocos diante do aumento da agitação permitiu compreender a importância do controle da intensidade da mistura. O fenômeno observado experimentalmente possibilitou superar uma concepção simplificada de que uma agitação mais intensa necessariamente produziria melhores resultados.

De forma semelhante, a análise de diferentes tempos de sedimentação evidenciou a relação entre o período de decantação e a permanência de partículas em suspensão. Os estudantes identificaram que tempos reduzidos estavam associados a maiores valores de turbidez, reconhecendo a necessidade de condições adequadas para que os flocos formados pudessem sedimentar.

Na comparação entre diferentes coagulantes, os estudantes utilizaram mais de um critério para avaliar a eficiência do processo, considerando a turbidez final, o volume de lodo

produzido e o aspecto visual dos flocos. Essa atividade foi particularmente relevante por ampliar a compreensão de eficiência, que passou a ser considerada de maneira multidimensional e não apenas pela aparência visual da água tratada.

O conjunto dessas situações evidencia características próprias de abordagens investigativas, nas quais o estudante precisa analisar informações, comparar possibilidades, interpretar evidências e justificar decisões. Matias e Souza (2024), ao analisarem uma sequência didática investigativa em Química, destacam a importância de situações que articulem conhecimentos científicos a questões sociais e favoreçam a participação ativa dos estudantes.

A resolução de problemas também pode contribuir para ampliar a autonomia intelectual dos participantes, especialmente quando as atividades não se restringem à aplicação mecânica de procedimentos. Nesse sentido, a experiência desenvolvida permitiu que os estudantes relacionassem as variáveis do tratamento aos resultados observados, aproximando o conhecimento químico de uma situação concreta de tomada de decisão.

3.5 Contribuições da Sequência Didática para o Ensino de Química

Considerando o conjunto das atividades, a Sequência Didática mostrou-se como uma estratégia capaz de articular diferentes dimensões do processo educativo: conhecimentos prévios, fundamentação conceitual, problematização, experimentação, discussão coletiva e sistematização.

Um dos principais aspectos observados foi a mudança na relação dos estudantes com o conteúdo. O tratamento de efluentes deixou de ser abordado apenas como um conjunto de operações técnicas e passou a constituir um contexto para a compreensão de conceitos químicos e de suas aplicações. A utilização de situações-problema e experimentação contribuiu para que os estudantes analisassem as condições do processo, comparassem resultados e justificassem decisões (Santos *et al.*, 2026).

Esse resultado se aproxima de estudos que apontam a potencialidade de sequências didáticas planejadas e organizadas a partir de situações investigativas. Limeira e Oliveira (2025) observaram que uma sequência de ensino investigativa pode favorecer a compreensão conceitual e ampliar o envolvimento dos estudantes, mesmo em contextos com recursos experimentais simples.

Do mesmo modo, a literatura indica que sequências didáticas voltadas ao tratamento da água podem contribuir para aproximar conceitos químicos de questões ambientais. Santos *et*

al. (2025) demonstraram que a temática pode favorecer reflexões socioambientais e ampliar o interesse dos estudantes, embora a evolução conceitual exija acompanhamento e mediação ao longo de todo o processo.

Entretanto, os resultados devem ser compreendidos considerando as características específicas da intervenção. A participação de 20 estudantes e a realização das atividades em um único contexto formativo limitam a possibilidade de extrapolação dos achados para outros grupos ou instituições. Além disso, o período de aplicação da proposta não permitiu acompanhar possíveis efeitos em longo prazo, especialmente quanto à permanência dos conhecimentos construídos e à capacidade de transferi-los para novas situações.

Apesar dessas limitações, a experiência evidencia possibilidades concretas para o desenvolvimento de propostas de Ensino de Química contextualizadas em questões ambientais. O tratamento de efluentes, nesse sentido, apresenta-se como uma temática com potencial para integrar conceitos químicos, atividades experimentais, resolução de problemas e discussões relacionadas à sustentabilidade e à qualidade ambiental.

A experiência também aponta para a possibilidade de ampliação da proposta em diferentes contextos educacionais, com a incorporação de novas variáveis de tratamento, diferentes tipos de efluentes, instrumentos de monitoramento da qualidade da água e estratégias de avaliação da aprendizagem. Dessa forma, a temática pode constituir não apenas um conteúdo para o ensino de processos físico-químicos, mas um eixo articulador para a construção de conhecimentos científicos contextualizados, investigativos e socialmente relevantes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experiência desenvolvida evidenciou que a utilização de uma Sequência Didática sobre tratamento de efluentes constitui uma possibilidade pedagógica relevante para o Ensino de Química, especialmente quando os conteúdos são articulados a situações concretas, atividades experimentais e problemáticas ambientais. A organização das atividades em etapas progressivas possibilitou partir dos conhecimentos prévios dos estudantes, avançar para a construção e aplicação dos conceitos e, posteriormente, promover sua sistematização a partir dos fenômenos observados.

Os resultados indicaram que, inicialmente, os estudantes apresentavam conhecimentos fragmentados sobre o tratamento de efluentes, sobretudo em relação às funções e à interdependência das etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Ao longo da

intervenção, entretanto, foram observados avanços na compreensão dos processos físico-químicos e na capacidade de estabelecer relações entre variáveis como turbidez, pH, dosagem de coagulantes, intensidade da mistura e tempo de sedimentação.

A utilização de situações-problema mostrou-se importante para deslocar os estudantes de uma postura predominantemente receptiva para uma participação mais ativa, favorecendo a análise de condições operacionais, a comparação de resultados e a tomada de decisões. De forma complementar, a experimentação investigativa possibilitou a visualização dos fenômenos e favoreceu a articulação entre conhecimentos teóricos e situações práticas, contribuindo para uma compreensão mais integrada das etapas do tratamento.

Outro aspecto relevante foi a aproximação estabelecida entre os fenômenos observados em escala experimental e o funcionamento de sistemas reais de tratamento. A discussão sobre parâmetros de qualidade dos efluentes e suas implicações ambientais e sanitárias ampliou o significado dos conteúdos químicos trabalhados, possibilitando compreender a Química também como instrumento para interpretar e enfrentar questões relacionadas à conservação dos recursos hídricos e à qualidade ambiental.

A experiência também demonstrou que os processos de aprendizagem ocorrem de maneira heterogênea, sendo necessária a mediação docente contínua para atender aos diferentes ritmos de compreensão e favorecer a participação dos estudantes. Nesse sentido, a Sequência Didática mostrou-se não apenas como uma organização de atividades, mas como uma estratégia de intervenção capaz de integrar contextualização, problematização, experimentação e reflexão.

Diante dos resultados obtidos, considera-se que a temática do tratamento de efluentes apresenta significativo potencial para o desenvolvimento de práticas contextualizadas no Ensino de Química, possibilitando a abordagem de conceitos químicos vinculados a situações ambientais concretas. A proposta pode ainda ser ampliada e adaptada a diferentes níveis e contextos educacionais, incorporando novos tipos de efluentes, parâmetros de qualidade, técnicas de tratamento e estratégias de investigação.

Por fim, embora os resultados estejam relacionados a um grupo específico de 20 estudantes e a um único contexto formativo, a experiência oferece elementos que podem subsidiar novas propostas pedagógicas e investigações na área. Recomenda-se a realização de estudos posteriores com diferentes grupos, maior período de acompanhamento e instrumentos diversificados de avaliação, de modo a ampliar a compreensão sobre as contribuições de

Sequências Didáticas contextualizadas para a aprendizagem de conceitos químicos e para a formação ambiental dos estudantes.

REFERÊNCIAS

ALEME, Helga Gabriela; SANTOS, Pedro Henrique dos Santos; ANTUNES-SOUZA, Thiago. Experimentação investigativa para o ensino de Química Analítica na formação de professores. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, v. 14, 2026. DOI: 10.26571/reamec.v14.19071.

AZEVEDO, J. A.; VERAS, K. da C. B. B.; GOMES, E. D. P.; FERNANDES, M. P. R.; CAMELO, F. A. de M.; MATOS, N. C. de S. F.; TORRES, R. A. M.; FERREIRA, H. S. O uso do podcast no processo de ensino-aprendizagem do curso de fonoaudiologia. Caderno Pedagógico, [S. l.], v. 23, n. 2, p. e23139, 2026. DOI: 10.54033/cadpedv23n2-020.

CHAVES, Élison Patrício; BOA MORTE, Guilherme Rubens Soares; CABRAL, Wallace Alves. A experimentação no ensino de Química e a promoção dos níveis do conhecimento químico. Educação em Foco, v. 29, n. 1, e29017, 2024. DOI: 10.34019/2447-5246.2024.v29.43793.

LARA, Juliana Siqueira de *et al.* Entre telas e teclas: pesquisa-intervenção com crianças e adolescentes na pandemia. Cadernos CEDES, v. 42, n. 118, p. 232-247, 2022

LIMEIRA, Juliana Alexandre; OLIVEIRA, Irlane Maia de. Aplicação de uma sequência de ensino investigativa para a promoção da aprendizagem significativa. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, v. 13, 2025. DOI: 10.26571/reamec.v13.18470.

LOURENÇO, Taynara Bonfim Riquiere; AMARAL, Fabiano Pereira do. Queimadas: contextualizando o Ensino de Química e a Educação Ambiental. Revista Ciências & Ideias, v. 15, n. 1, e24152418, 2024. DOI: 10.22407/2176-1477/2024.v15.2418.

MATIAS, E. F.; SOUZA, V. C. de A. Análise de uma sequência didática investigativa com o foco no estudo das questões químicas e sociais relacionadas às bebidas alcoólicas. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, v. 12, e24012, 2024. DOI: 10.26571/reamec.v12.16135.

MELO, Â. G. de; SANTOS, M. L. dos; ARAÚJO, C. S. T. Sequências didáticas no ensino de Química: possibilidades para a experimentação. Revista Ciências & Ideias, v. 12, n. 3, 2021. DOI: 10.22407/2176-1477/2021.v12i3.1561.

MOREIRA, Marco Antonio. Ensino de Ciências: críticas e desafios. Experiências em Ensino de Ciências, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2021

NÓBREGA, Lorrana Nara Naves; BENITE, Cláudio Roberto Machado. A experimentação investigativa no ensino de química para a sondagem de indicadores de altas habilidades ou superdotação. Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas, v. 20, n. 44, p.191-209, 2024.

PASSOS, B. S.; VASCONCELOS, A. K. P.; SILVEIRA, F. A. Ensino de Química e aprendizagem significativa: uma proposta de sequência didática utilizando materiais alternativos em atividades experimentais. Revista Insignare Scientia, v. 5, n. 1, p. 610-630, 2022. DOI: 10.36661/2595-4520.2022v5n1.12649.

PASSOS, Blanchard Silva; VASCONCELOS, Ana Karine Portela. Avaliação da aprendizagem em Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) no Ensino de Química: uma revisão sistemática entre 2014 e 2023. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, v. 13, 2025. DOI: 10.26571/reamec.v13.18316.

SANTOS, Adriana Tavares dos; TAMIASSO-MARTINHON, Priscila; SOUSA, Célia; ROCHA, Angela Sanches. Educação Ambiental e Ensino de Química: relato docente sobre atividades pedagógicas para abordar o conteúdo curricular. Revista Virtual de Química, v. 13, n. 3, p. 595-607, 2021. DOI: 10.21577/1984-6835.20210032.

SANTOS, Diego Marlon. Um levantamento bibliográfico sobre o desenvolvimento de sequências didáticas numa perspectiva CTS no Ensino de Química. EDUCERE – Revista da Educação da UNIPAR, v. 25, n. 1, p. 18-37, 2025. DOI: 10.25110/educere.v25i1.2025-11625.

SANTOS, Maria Itamara dos; SANTOS, Adrielle Silva dos; OLIVEIRA, Filipe Silva de; FRAGA, Luciano Evangelista. Tratamento de água como tema gerador de uma sequência didática voltada à Educação Ambiental no Ensino de Química. Scientia Plena, v. 21, n. 8, 2025. DOI: 10.14808/sci.plena.2025.087206.

SANTOS, Mariana Cabral do Nascimento *et al.* Ensino de química em contexto profissional: aplicação e análise de uma sequência didática sobre tratamento de efluentes. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 1–12, 2026. DOI: 10.51891/rease.v12i3.24878.

SILVA, Rafael Soares. Experimentação no ensino de Química: uma sequência didática sobre a formação da ferrugem. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, Cuiabá, v. 9, n. 2, p. e21058, 2021. DOI: https://doi.org/10.26571/reamec.v9i2.12744

VALLE, Paulo Roberto Dalla; FERREIRA, Jacques de Lima. Análise de conteúdo na perspectiva de Bardin: contribuições e limitações para a pesquisa qualitativa em educação. Educação em Revista, 41, e49377. Epub 10 de janeiro de 2025.https://doi.org/10.1590/0102-469849377.

CAPÍTULO 7

TRATAMENTO DE EFLUENTES COMO TEMA GERADOR NO ENSINO DE QUÍMICA: DESENVOLVIMENTO DE UMA PROPOSTA DIDÁTICA

DOI DO CAPÍTULO: 10.29327/5963731.1-7

Rosália Cristina da Silva Nunes Andrade, e-mail: crist.rosala1234@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/9340940473431056
Jozadake Petry Fausto, e-mail: jozadakepetryfausto@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/3339996527225371
Mariana Cabral do Nascimento Santos, e-mail: marianacabralsantos2@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7558622538353505
Giselle Silva de Souza, e-mail: giselle.silva908@gmail.com URL lattes: http://lattes.cnpq.br/7391062473926377
Josilene Pereira Silva, e-mail: pereirasilvajosilene41@gmail.com, URL lattes: http://lattes.cnpq.br/5717569162096842

RESUMO

O tratamento de efluentes constitui uma problemática ambiental relevante e apresenta potencial para a contextualização de conceitos químicos no Ensino de Química. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo desenvolver uma proposta didática tendo o tratamento de efluentes como tema gerador, articulando conceitos químicos às tecnologias de adsorção com carvão ativado e ao processo Fenton. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter descritivo e propositivo, desenvolvida a partir das etapas de definição da temática, seleção dos conceitos químicos e das tecnologias de tratamento, elaboração das atividades experimentais, produção do material didático e organização da proposta didática. Como produto, foi elaborado o folder "Tecnologias Avançadas", estruturado para abordar a problemática da contaminação de águas e efluentes e apresentar, de forma integrada, os fundamentos da adsorção com carvão ativado e do processo Fenton. A proposta contempla conceitos relacionados ao pH, propriedades dos materiais, processos de separação, adsorção, transformações químicas, oxidação e redução e Processos Oxidativos Avançados. A organização das atividades busca estabelecer relações entre problematização, conhecimentos científicos e aplicações tecnológicas, utilizando a experimentação como recurso para aproximar conceitos químicos de fenômenos observáveis. Os resultados indicam que o material desenvolvido apresenta potencial para subsidiar práticas contextualizadas no Ensino de Química, especialmente por integrar uma problemática ambiental concreta a diferentes conceitos e tecnologias de tratamento. Ressalta-se, contudo, que a proposta não foi aplicada aos estudantes, não sendo possível inferir efeitos sobre a aprendizagem. Conclui-se que o material elaborado constitui um recurso didático com potencial para favorecer a articulação entre Química, tecnologia e meio ambiente, podendo ser posteriormente aplicado e avaliado em diferentes contextos educacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de efluentes; Adsorção; Processo Fenton.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos constituem questões de elevada relevância ambiental e social, especialmente diante da intensificação das atividades urbanas, industriais e agrícolas e da consequente geração de águas residuárias. Esses efluentes podem apresentar diferentes classes de contaminantes, cuja presença representa riscos aos ecossistemas e à qualidade da água. Nesse contexto, o tratamento adequado de efluentes

constitui uma estratégia fundamental para a redução da poluição hídrica e para o uso sustentável dos recursos naturais (UNESCO, 2024; UNEP, 2023).

As características complexas das águas residuárias têm impulsionado a busca por tecnologias capazes de remover ou transformar contaminantes de diferentes naturezas. Entre as alternativas investigadas, destacam-se a adsorção, especialmente com materiais carbonáceos, e os Processos Oxidativos Avançados (POAs). A adsorção apresenta potencial para a remoção de contaminantes devido às interações estabelecidas entre as espécies presentes no efluente e a superfície do adsorvente, enquanto os POAs possibilitam a transformação de compostos recalcitrantes por meio da geração de espécies altamente reativas (Li *et al.*, 2024; Lin *et al*., 2022).

No Ensino de Química, a problemática dos efluentes pode ser utilizada como contexto para aproximar os conhecimentos científicos de situações ambientais presentes na sociedade. A abordagem contextualizada possibilita relacionar conteúdos químicos a problemas concretos, favorecendo a compreensão da aplicabilidade da Química e a articulação entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (Demelash; Belachew; Andargie, 2023; Eilks; Linkwitz, 2022). Nesse sentido, conceitos como pH, propriedades dos materiais, processos de separação, adsorção, transformações químicas e oxidação e redução podem ser trabalhados de maneira integrada a partir de uma problemática ambiental.

A experimentação, quando articulada à problematização e à investigação, também pode contribuir para estabelecer relações entre conceitos teóricos e fenômenos observáveis. Em uma abordagem dessa natureza, atividades relacionadas ao tratamento de efluentes podem favorecer a participação dos estudantes na análise de situações-problema e na interpretação dos resultados experimentais, superando uma perspectiva exclusivamente demonstrativa da experimentação (Zammit; Connor; Raker, 2024).

Diante desse contexto, o tratamento de efluentes apresenta-se como uma temática com potencial para integrar conhecimentos químicos, questões ambientais e tecnologias de tratamento em uma proposta didática contextualizada. Assim, o presente estudo teve como objetivo desenvolver uma proposta didática para o Ensino de Química tendo o tratamento de efluentes como tema gerador, integrando conceitos químicos às tecnologias de adsorção com carvão ativado e ao processo Fenton, com apoio de um material didático elaborado para essa finalidade.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter descritivo e propositivo, desenvolvida no campo do Ensino de Química, com o objetivo de elaborar uma proposta didática tendo o tratamento de efluentes como tema gerador para a abordagem contextualizada de conceitos químicos. A utilização de problemáticas ambientais como eixo para o ensino possibilita aproximar os conhecimentos científicos de situações concretas, favorecendo a articulação entre os conteúdos escolares e questões relacionadas ao cotidiano e ao ambiente. Nesse viés, propostas de contextualização no Ensino de Química têm demonstrado a possibilidade de utilizar problemas ambientais como ponto de partida para a construção de conhecimentos científicos e para o desenvolvimento de discussões socioambientais (Baruque *et al.*, 2023; Lourenço; Amaral, 2024).

A proposta foi elaborada considerando a problematização, a contextualização e a experimentação como elementos articuladores do processo didático. Essa perspectiva busca superar uma abordagem exclusivamente conceitual da Química, estabelecendo relações entre os conteúdos científicos, suas aplicações e situações reais. Estudos recentes apontam que a experimentação, quando articulada a uma problemática contextualizada, pode contribuir para aproximar teoria e prática e favorecer a compreensão dos fenômenos químicos relacionados a questões ambientais (Oliveira *et al.*, 2024; Jesus; Martins; Silva, 2023).

A construção da proposta foi organizada em etapas sucessivas, contemplando (1) definição da temática geradora; (2) seleção dos conceitos químicos; (3) seleção das tecnologias de tratamento; (4) elaboração das atividades experimentais; (5) produção do material didático; e (6) organização da proposta didática. O percurso metodológico foi estruturado de modo a estabelecer uma relação entre a problemática ambiental, os conhecimentos químicos e as tecnologias empregadas no tratamento de efluentes.

2.1 Estruturação da proposta didática

Inicialmente, foi definida a temática do tratamento de efluentes como eixo articulador da proposta, considerando sua relevância ambiental e seu potencial para a abordagem de conceitos químicos. A escolha da temática está relacionada à necessidade de aproximar o ensino de situações ambientais concretas, possibilitando a discussão sobre a qualidade da água, a presença de contaminantes e as tecnologias utilizadas para sua remoção. A utilização do tratamento de água e efluentes como tema gerador apresenta potencial para integrar Educação Ambiental e conhecimentos químicos, favorecendo a contextualização dos conteúdos e a discussão de problemas relacionados aos recursos hídricos (Santos *et al*., 2025; Baruque *et al*., 2023).

Na sequência, foram selecionados os conteúdos químicos que poderiam ser articulados à temática, contemplando pH, processos de separação, adsorção, transformações químicas, oxidação e redução e Processos Oxidativos Avançados (POAs). A seleção considerou a possibilidade de relacionar os conceitos aos fenômenos observados nas atividades experimentais e às aplicações das tecnologias de tratamento. A articulação entre conceitos químicos e situações experimentais contextualizadas pode favorecer a compreensão dos fenômenos científicos ao estabelecer relações entre conhecimentos teóricos e aplicações práticas (Oliveira *et al*., 2024).

Foram selecionadas duas estratégias para compor a proposta: adsorção utilizando carvão ativado e Processo Fenton. A escolha dessas tecnologias possibilita abordar diferentes mecanismos de tratamento de contaminantes, permitindo discutir tanto a retenção de espécies químicas na superfície de um adsorvente quanto processos de oxidação de compostos orgânicos. A adsorção destaca-se como uma alternativa amplamente estudada para o tratamento de águas residuárias, especialmente pela utilização de materiais carbonáceos com elevada capacidade de interação com diferentes contaminantes (Liu *et al*., 2024).

O Processo Fenton foi selecionado por possibilitar a abordagem dos Processos Oxidativos Avançados e dos mecanismos envolvidos na degradação de contaminantes orgânicos. Nesse processo, a combinação de espécies de ferro e peróxido de hidrogênio favorece a formação de espécies altamente reativas, especialmente radicais hidroxila, capazes de promover a oxidação de diversos compostos orgânicos. A literatura recente evidencia a relevância dos processos Fenton no tratamento de águas residuárias e seu potencial diante de diferentes classes de contaminantes (Ribeiro; Sarinho; Nunes, 2024; Song *et al.*, 2024).

2.2 Elaboração dos materiais didáticos

Como recurso didático para subsidiar a proposta, foi elaborado um folder intitulado “Tecnologias Avançadas”, destinado à apresentação da problemática ambiental, dos conceitos químicos e das atividades experimentais relacionadas ao tratamento de efluentes. A elaboração do material buscou utilizar linguagem acessível e recursos visuais capazes de favorecer a compreensão dos conteúdos e estabelecer relações entre os conhecimentos científicos e suas aplicações tecnológicas. A utilização de materiais didáticos associados à contextualização e à experimentação constitui uma estratégia relevante para aproximar os estudantes dos fenômenos químicos e de suas aplicações em situações ambientais (Jesus; Martins; Silva, 2023; Oliveira *et al*., 2024).

O folder foi estruturado de maneira integrada, contemplando inicialmente uma contextualização sobre a presença de corantes em águas e efluentes e a necessidade de tecnologias capazes de promover sua remoção ou degradação. Na sequência, foram apresentadas as duas estratégias selecionadas para a proposta: adsorção com carvão ativado e Processo Fenton. A escolha de tecnologias de tratamento como eixo da proposta permite relacionar conceitos químicos a processos tecnológicos empregados na resolução de problemas ambientais, fortalecendo a relação entre ciência, tecnologia e ambiente (Santos *et al*., 2025).

Na abordagem da adsorção, o folder apresenta o carvão ativado como material adsorvente e orienta uma atividade experimental envolvendo água, corante e carvão ativado. A atividade foi planejada para possibilitar a observação visual da alteração da coloração da solução e a discussão do fenômeno de adsorção e de sua aplicação no tratamento de águas e efluentes. A escolha do carvão ativado encontra respaldo em estudos recentes que destacam sua estrutura porosa, elevada área superficial e capacidade de interação com diferentes contaminantes, características que contribuem para sua aplicação em processos de tratamento de águas residuárias (Liu *et al*., 2024).

No segundo eixo, o folder apresenta o Processo Fenton como uma alternativa inserida no grupo dos Processos Oxidativos Avançados, contemplando informações sobre os reagentes utilizados, o princípio geral do processo e as etapas da atividade experimental. A abordagem possibilita relacionar o fenômeno experimental aos conceitos de oxidação e redução, formação de espécies reativas e degradação de compostos orgânicos, estabelecendo uma relação entre o conteúdo químico e sua aplicação no tratamento de efluentes. Estudos recentes destacam a aplicação dos processos Fenton na remoção e degradação de contaminantes orgânicos em águas residuárias (Ribeiro; Sarinho; Nunes, 2024; SONG *et al.*, 2024).

2.3 Organização da proposta didática

Após a definição dos conteúdos químicos, das tecnologias de tratamento e das atividades experimentais, a proposta didática foi organizada de forma a estabelecer uma sequência lógica entre problematização, construção dos conhecimentos e aplicação dos conceitos químicos. Essa organização buscou favorecer a contextualização do ensino de Química a partir de uma problemática ambiental concreta, articulando conhecimentos científicos e situações relacionadas ao tratamento de efluentes.

A estrutura da proposta foi organizada conforme o fluxograma apresentado na Figura 1, partindo da problematização da contaminação de águas e efluentes, seguida pela abordagem

dos conceitos químicos necessários à compreensão dos processos de tratamento. Posteriormente, foram introduzidas as tecnologias de adsorção com carvão ativado e processo Fenton, culminando na realização das atividades experimentais e na discussão dos fenômenos químicos envolvidos.

Figura 1. Fluxograma da organização da proposta didática.



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produto didático desenvolvido

O processo de elaboração descrito na metodologia resultou na produção do folder didático "Tecnologias Avançadas", concebido como recurso de apoio à abordagem do tratamento de efluentes no Ensino de Química (Figura 2). O material constitui o produto central da proposta desenvolvida e foi organizado com a finalidade de integrar uma problemática ambiental a conhecimentos químicos e a estratégias tecnológicas de tratamento. Sua construção buscou estabelecer uma relação entre o conhecimento científico e situações concretas relacionadas à contaminação de águas e efluentes, favorecendo uma abordagem na qual os conceitos químicos são apresentados em associação às suas aplicações ambientais.

Figura 2. Folder didático "Tecnologias Avançadas".



Fonte: Elaborado pelas autoras (2026).

A análise do material produzido evidencia uma organização que favorece a articulação entre problema ambiental, conhecimento químico e aplicação tecnológica. Essa estrutura é particularmente relevante no Ensino de Química, uma vez que permite deslocar a apresentação dos conteúdos de uma perspectiva exclusivamente conceitual para uma abordagem relacionada a situações nas quais o conhecimento químico possui função explicativa e tecnológica. Nesse sentido, a proposta desenvolvida converge com Santos *et al.* (2026), que utilizaram o tratamento de efluentes como eixo para a construção de uma sequência didática, articulando conhecimentos químicos e atividades experimentais em torno de uma problemática ambiental.

Outro aspecto observado no material é a integração entre diferentes formas de tratamento em uma mesma proposta. A presença da adsorção com carvão ativado e do processo Fenton possibilita estabelecer uma discussão comparativa acerca dos mecanismos envolvidos na remoção e transformação de contaminantes. Essa característica amplia o potencial do material, pois permite abordar o tratamento de efluentes não como uma operação única, mas

como um conjunto de possibilidades tecnológicas cuja aplicação depende das características dos contaminantes e das condições do sistema.

A organização visual do folder também desempenha uma função importante na proposta, uma vez que permite sintetizar informações e apresentar os conteúdos de maneira articulada. Nesse contexto, o material pode atuar como elemento mediador entre a apresentação do problema ambiental e o desenvolvimento das atividades propostas, auxiliando na retomada dos conceitos e na sistematização das discussões realizadas durante a sequência didática.

3.2 Abordagem da adsorção com carvão ativado

A inserção da adsorção com carvão ativado no material possibilita explorar um fenômeno físico-químico associado à interação de contaminantes com a superfície de um material adsorvente. No contexto da proposta, essa tecnologia representa uma possibilidade de aproximar conceitos relacionados às propriedades dos materiais, fenômenos de superfície e processos de separação de uma aplicação diretamente relacionada ao tratamento de águas e efluentes.

A relevância do carvão ativado para essa finalidade é evidenciada por Silva *et al.* (2024), que discutem sua utilização na remoção de azul de metileno em efluentes por meio da adsorção. Os autores destacam a aplicabilidade desse material no tratamento de contaminantes presentes em matrizes aquosas, evidenciando a relação entre suas características e a capacidade de retenção das espécies presentes na solução. Essa aplicação tecnológica fornece suporte para que o fenômeno seja explorado didaticamente a partir de uma situação concreta, favorecendo a relação entre o conceito químico e sua utilização ambiental.

No âmbito da proposta didática, a adsorção apresenta ainda potencial para discutir que a remoção de um contaminante não corresponde necessariamente à sua destruição. O processo envolve a interação e retenção da espécie na superfície do adsorvente, aspecto que permite problematizar o destino do contaminante após o tratamento. Essa abordagem pode contribuir para uma compreensão mais crítica dos processos de tratamento, evitando uma interpretação simplificada segundo a qual a alteração visual da água representa, por si só, a eliminação completa dos contaminantes.

A atividade experimental associada à adsorção também possibilita explorar a relação entre observação macroscópica e interpretação microscópica. A alteração observável na coloração da solução pode constituir o ponto de partida para discutir os fenômenos que ocorrem em escala molecular e superficial. Dessa forma, o experimento deixa de assumir apenas uma

função demonstrativa e passa a constituir uma possibilidade de problematização dos conceitos químicos envolvidos.

3.3 Abordagem do processo Fenton

A inserção do processo Fenton amplia a dimensão conceitual da proposta ao introduzir uma estratégia baseada na transformação química de contaminantes. Diferentemente da adsorção, cuja atuação está relacionada à retenção de espécies na superfície de um material, o processo Fenton possibilita discutir mecanismos de oxidação e a participação de espécies químicas altamente reativas na degradação de compostos orgânicos.

A relevância dessa tecnologia no tratamento de águas residuárias é discutida por Prates *et al.* (2023), que realizaram uma revisão sistemática sobre a aplicação do processo Fenton em tratamentos de águas residuárias. A ampla utilização dessa tecnologia em estudos de remediação evidencia sua pertinência como exemplo de aplicação dos conhecimentos relacionados aos processos oxidativos no enfrentamento de problemas ambientais.

A abordagem do Fenton no material didático também favorece a discussão de conteúdos relacionados às reações de oxidação e redução, permitindo relacionar conceitos químicos a uma aplicação tecnológica. A partir dessa perspectiva, a reação deixa de ser apresentada apenas como uma representação simbólica e pode ser discutida em função de sua finalidade, das espécies envolvidas e das transformações promovidas sobre os contaminantes.

Além disso, o processo Fenton possibilita introduzir uma discussão sobre as limitações e condições de aplicação das tecnologias ambientais. Estudos recentes indicam que diferentes configurações do processo Fenton vêm sendo investigadas para ampliar sua eficiência e superar limitações dos sistemas convencionais, incluindo questões relacionadas às condições operacionais e à recuperação dos catalisadores (Liu *et al.*, 2026). Dessa maneira, a tecnologia pode ser utilizada não apenas para ensinar uma reação química, mas também para discutir criticamente a relação entre eficiência, condições operacionais e sustentabilidade.

3.4 Integração das tecnologias e potencial pedagógico

Um dos aspectos mais relevantes do material desenvolvido é a possibilidade de estabelecer uma relação entre adsorção e processo Fenton. Embora os mecanismos envolvidos sejam distintos, a apresentação conjunta das tecnologias permite discutir diferentes possibilidades de atuação sobre contaminantes presentes em águas e efluentes. Essa abordagem amplia a compreensão sobre os processos de tratamento e possibilita discutir as vantagens e limitações associadas a diferentes estratégias.

A literatura evidencia que a combinação entre processos de adsorção e oxidação pode apresentar caráter complementar. Song *et al.* (2024) discutem o efeito sinérgico entre adsorção e oxidação Fenton na remediação de contaminantes orgânicos em água, destacando que a associação de mecanismos distintos pode ampliar as possibilidades de tratamento. Essa perspectiva fortalece a escolha das duas tecnologias para composição do material didático, uma vez que permite apresentar aos estudantes diferentes mecanismos empregados na resolução de uma mesma problemática ambiental.

Do ponto de vista pedagógico, essa integração possibilita trabalhar os conteúdos químicos de maneira articulada. A adsorção pode ser utilizada para discutir propriedades superficiais, interação entre materiais e contaminantes e processos de separação, enquanto o Fenton permite explorar transformações químicas, oxidação e redução e processos oxidativos. Assim, diferentes conteúdos podem ser relacionados a uma única temática, evitando sua apresentação de maneira fragmentada.

A estrutura desenvolvida também favorece a utilização do folder como recurso de apoio às atividades experimentais. O material pode ser empregado para introduzir a problemática, orientar discussões sobre os processos de tratamento e posteriormente retomar os conceitos mobilizados durante as atividades. Dessa forma, o folder apresenta potencial para desempenhar diferentes funções ao longo da proposta, funcionando como recurso de contextualização, mediação e sistematização.

Essa característica aproxima a proposta da perspectiva defendida por Santos *et al.* (2026), na qual o tratamento de efluentes é utilizado para articular diferentes momentos do ensino de Química. Entretanto, diferentemente de uma pesquisa de intervenção, o presente estudo concentra-se na elaboração do recurso didático e na estruturação da proposta, não tendo sido realizada aplicação com estudantes nesta etapa.

Consequentemente, os resultados apresentados não permitem afirmar efeitos sobre aprendizagem, desenvolvimento de habilidades ou mudanças na compreensão dos estudantes. O principal resultado obtido corresponde à produção e organização de um material didático contextualizado, fundamentado em duas tecnologias de tratamento de efluentes e articulado a conceitos químicos. A avaliação de sua efetividade pedagógica constitui uma etapa posterior, que deverá envolver sua aplicação em contexto educacional e a análise das evidências produzidas pelos estudantes.

De modo geral, o folder “Tecnologias Avançadas” apresenta potencial para contribuir com práticas contextualizadas no Ensino de Química ao aproximar conhecimentos científicos de uma problemática ambiental relevante. A articulação entre adsorção com carvão ativado e processo Fenton permite explorar diferentes mecanismos de tratamento e, simultaneamente, estabelecer relações entre Química, tecnologia e meio ambiente. Nesse sentido, o material desenvolvido configura-se como uma possibilidade de recurso didático para abordar conceitos químicos a partir de uma situação-problema concreta, podendo posteriormente ser submetido à aplicação e avaliação em contexto escolar.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo possibilitou o desenvolvimento de uma proposta didática que utiliza o tratamento de efluentes como tema gerador para o Ensino de Química, articulando conhecimentos científicos, tecnologias de tratamento e questões relacionadas à problemática ambiental. A partir da organização metodológica adotada, foi elaborado o folder “Tecnologias Avançadas”, concebido como recurso de apoio para a abordagem contextualizada de conceitos químicos relacionados ao tratamento de águas e efluentes.

A proposta desenvolvida possibilitou integrar diferentes conteúdos químicos, incluindo processos de separação, pH, adsorção, transformações químicas, oxidação e redução e Processos Oxidativos Avançados, a partir de uma problemática ambiental concreta. A utilização da adsorção com carvão ativado e do processo Fenton permitiu contemplar mecanismos distintos de tratamento, favorecendo uma abordagem que relaciona fenômenos químicos a aplicações tecnológicas voltadas à remoção e transformação de contaminantes.

O folder elaborado constitui o principal produto da proposta e apresenta potencial para atuar como recurso de contextualização, problematização e sistematização dos conhecimentos trabalhados. Sua associação às atividades experimentais amplia as possibilidades de articulação entre teoria e prática, permitindo que os conceitos químicos sejam discutidos a partir de fenômenos e tecnologias relacionados a uma situação ambiental real. Nesse sentido, o material pode contribuir para uma abordagem do Ensino de Química que ultrapasse a apresentação fragmentada dos conteúdos e estabeleça relações entre ciência, tecnologia e meio ambiente.

Ressalta-se, entretanto, que a proposta não foi aplicada a estudantes, de modo que não é possível atribuir ao material resultados relacionados à aprendizagem, à participação ou ao desenvolvimento de competências. Os resultados deste estudo estão, portanto, relacionados à elaboração e estruturação da proposta didática e do material educativo, evidenciando seu

potencial de utilização em práticas futuras. A aplicação em contexto escolar constitui uma etapa necessária para verificar sua efetividade pedagógica e identificar possíveis adequações quanto à linguagem, às atividades experimentais e à abordagem dos conceitos químicos.

Dessa forma, considera-se que a proposta desenvolvida apresenta potencial para subsidiar práticas contextualizadas no Ensino de Química, especialmente por utilizar uma problemática ambiental contemporânea como eixo de articulação dos conhecimentos. A abordagem integrada da adsorção e do processo Fenton possibilita discutir diferentes formas de tratamento de efluentes e, simultaneamente, favorecer a compreensão da Química como área do conhecimento relacionada à identificação e ao enfrentamento de problemas ambientais. Como perspectiva futura, recomenda-se a aplicação da proposta em diferentes contextos educacionais, acompanhada de instrumentos de avaliação que permitam analisar suas contribuições efetivas para a aprendizagem dos estudantes.

REFERÊNCIAS

BARUQUE, L. S. *et al.* "Cuidar, saber e agir": uma proposta de contextualização do Ensino de Química a partir da poluição do Rio Pavuninha. Revista Diálogo Educacional, 2023.

BRACAMONTES-RUELAS, A. R. Application of the Fenton Process for the Removal of Emerging Contaminants in Real Wastewater—A Short Review. Molecules, v. 31, n. 11, 1916, 2026. DOI: 10.3390/molecules31111916.

DEMELASH, M.; BELACHEW, W.; ANDARGIE, D. Context-based chemistry learning: a systematic literature review. Jurnal Pendidikan MIPA, v. 23, n. 4, p. 1446–1463, 2022.

EILKS, I.; LINKWITZ, M. Greening the chemistry curriculum as a contribution to education for sustainable development: when and how to start? Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 37, 100662, 2022.

JESUS, B. M.; MARTINS, M.; SILVA, M. A. A. Planejamento de uma Sequência de Ensino Investigativa para a Licenciatura em Química: uma proposta para um ensino contextualizado na formação inicial de professores-cidadãos. Revista Insignare Scientia, v. 6, n. 6, p. 790-811, 2023.

LIN, *et al.* Synergistic effects of oxidation, coagulation and adsorption in the integrated Fenton-based process for wastewater treatment: a review. Journal of Environmental Management, v. 306, 114460, 2022.

LIU,X *et al.* Carbonaceous adsorbents in wastewater treatment: from mechanism to emerging application. Science of the Total Environment, v. 955, 177106, 2024.

LIU, X. *et al.* Research Progress on Fenton Process for Industrial Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. Catalysts, v. 16, n. 7, 644, 2026. DOI: 10.3390/catal16070644

LOURENÇO, T. B. R.; AMARAL, F. P. Queimadas: contextualizando o ensino de Química e a Educação Ambiental. Revista Ciências & Ideias, v. 15, 2024.

OLIVEIRA, C. S. *et al.* O ensino de Química ambiental: a experimentação como potencializadora da aprendizagem significativa sobre a temática poluição atmosférica. Research, Society and Development, v. 13, n. 2, 2024.

PRATES, M. P.; MARCIONÍLIO, S. M. O. L.; MACHADO, K. B.; ARAÚJO, D. M. F. Fenton: A Systematic Review of Its Application in Wastewater Treatment. Processes, v. 11, n. 8, 2466, 2023. DOI: 10.3390/pr11082466.

RIBEIRO, J. P.; SARINHO, L.; NUNES, M. I. Application of life cycle assessment to Fenton processes in wastewater treatment – A review. Journal of Water Process Engineering, v. 57, 104692, 2024.

SANTOS, M. I. *et al.* Tratamento de água como tema gerador de uma sequência didática voltada à Educação Ambiental no Ensino de Química. Scientia Plena, v. 21, n. 8, 087206, 2025.

SANTOS, M. C. N. *et al.* Ensino de Química em contexto profissional: aplicação e análise de uma sequência didática sobre tratamento de efluentes. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 12, n. 3, 2026. DOI: 10.51891/rease.v12i3.24878.

SILVA, K. K. *et al.* Artigo de revisão sobre tratamento de efluentes têxteis por adsorção do azul de metileno por meio do uso do carvão ativado a partir do mesocarpo de coco verde. Revista de Gestão e Secretariado, v. 15, n. 12, e4520, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i12.4520.

SONG, J. *et al.* The synergistic effect of adsorption and Fenton oxidation for organic pollutants in water remediation: an overview. RSC Advances, 2024.

UNEP. Wastewater: turning problem to solution. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023.

UNESCO. United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace. Paris: UNESCO, 2024.

ZAMMIT, K. M.; CONNOR, M. C.; RAKER, J. R. Evaluating the level of inquiry in postsecondary instructional laboratory experiments: results of a national survey. Chemistry Education Research and Practice, v. 25, p. 79–91, 2024.

Da partícula ao ecossistema, do laboratório à sala de aula.

Dos microplásticos que percorrem rios e solos aos fármacos que alcançam os corpos d'água, a química está no centro de questões que afetam o ambiente e a saúde. Esta obra reúne sete capítulos que discutem a atuação dos microplásticos como vetores de contaminantes, os riscos dos resíduos plásticos na agricultura, a ocorrência e a remediação de contaminantes emergentes e os impactos dos contaminantes farmacêuticos sobre os ecossistemas e a saúde humana.

O volume também analisa a caracterização físico-química do leite e sua influência nos processos fermentativos da indústria de alimentos e apresenta propostas didáticas que tomam o tratamento de efluentes como tema gerador no ensino de Química. Um livro para pesquisadores, professores e estudantes interessados em conectar ciência, ambiente, saúde e educação.

TEMAS DA OBRA

- Microplásticos como vetores de contaminantes
- Resíduos plásticos na agricultura
- Contaminantes farmacêuticos e saúde
- Físico-química do leite e fermentação
- Contaminantes emergentes e remediação
- Tratamento de efluentes no ensino de Química

ISBN: 978-6-58312-131-8
9 786583 121318

EDITORA MANUAL