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

CAPÍTULO 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.

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

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

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,

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

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

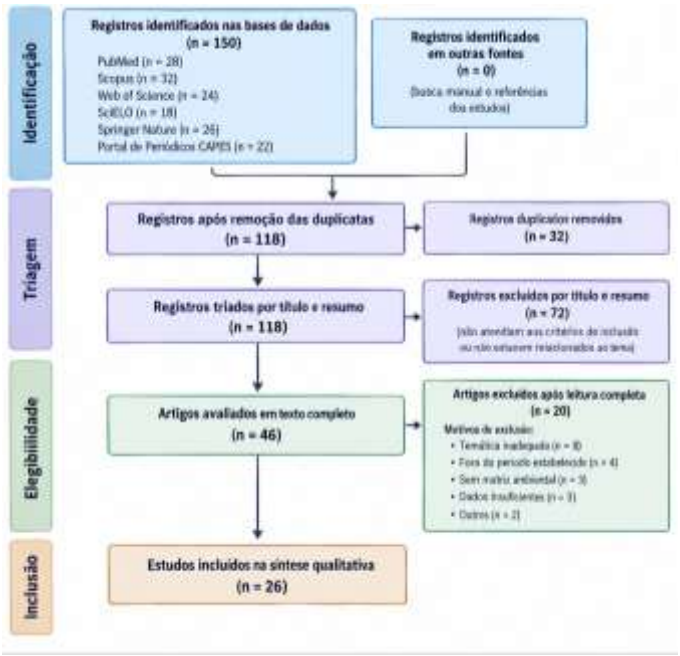
ISBN: 978-65-83121-31-8 DOI DO LIVRO: 10.29327/5963731

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.

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

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).

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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).

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

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

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

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.

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

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,

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

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.

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

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.

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

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.

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

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.