



TOXICOLOGIA AMBIENTAL

Nesta Edição

Matéria de Capa.....	01
Legislação.....	02
Principais Poluentes e Fontes de Contaminação.....	04
Vias de Exposição aos Poluentes Ambientais.....	07
Efeitos Tóxicos e Impactos Ambientais.....	09
Avaliação de Risco Toxicológico.....	12
Sustentabilidade e Perspectivas Futuras.....	13
Educação Ambiental.....	16
Agenda.....	18
Referências.....	19

Tutora

Profa. Dra. Leônia Maria Batista

Bolsistas

Alice Maria da Silva Oliveira

Anne Luise Andrade Dantas

Ellen Barbosa Quirino

Geiciely Filgueira Alves

João Vítor Gonçalves de Barros
Ferreira

Lorenzo Ciannella

Sabrina Lira da Cunha

Vitória Evelen de Paiva Monteiro

Informações

Email: petfarmaufpb@gmail.com

Campus Universitário I - Cidade

Universitária - João Pessoa PB

CEP-58.051-900

Fone: (83) 3216 - 7307

Matéria de Capa

A Toxicologia é a ciência responsável pelo estudo dos efeitos das substâncias químicas sobre os organismos vivos, analisando suas consequências para a saúde humana e para o meio ambiente. Trata-se de uma área ampla que abrange diferentes campos de aplicação, como a Toxicologia Clínica, Toxicologia Forense, Toxicologia de Alimentos e Toxicologia Ambiental (SBTOX, 2026).



Nesse contexto, a Toxicologia Ambiental destaca-se como o ramo da toxicologia dedicado ao estudo dos contaminantes químicos presentes no ambiente, e de seus impactos sobre os seres vivos. Essa área, investiga como as substâncias tóxicas presentes no ar, na água, no solo e nos alimentos podem provocar intoxicações e danos à saúde humana e aos ecossistemas. Além disso, busca compreender os riscos associados à exposição a agentes tóxicos, contribuindo para a prevenção de doenças e para a preservação ambiental (Olympio et al., 2025).

Atualmente, a poluição ambiental representa um dos principais fatores de risco para a saúde humana, uma vez que a contaminação dos recursos ambientais por substâncias químicas tóxicas, pode ocasionar diversos problemas de saúde, desde irritações leves até doenças crônicas graves (Fernandes; Hacon; Novais, 2021).

Entre os principais agentes poluentes destacam-se os metais pesados, pesticidas, resíduos industriais e compostos orgânicos persistentes, capazes de se acumular no organismo e provocar efeitos nocivos ao longo do tempo (Siqueira; Bressiani, 2023; Leitão; Leitão, 2025; Pereira, 2025). A exposição contínua a esses contaminantes afeta principalmente populações mais vulneráveis, como crianças, idosos e trabalhadores expostos ocupacionalmente, que apresentam maior risco de sofrer os efeitos da poluição ambiental (Fernandes; Hacon; Novais, 2021).



Dessa forma, compreender a relação entre poluição e saúde humana, desde as fontes de contaminação até as rotas de exposição, é fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas, estratégias de prevenção e ações voltadas à promoção da saúde e da qualidade de vida (Olympio *et al.*, 2025).



Além dos impactos sobre a saúde humana, os agentes tóxicos também comprometem os ecossistemas, afetando o equilíbrio ambiental e a sobrevivência de diferentes espécies. Isso ocorre pela capacidade de alguns contaminantes se dispersarem pelo ambiente, atingirem diferentes formas de vida e se acumularem nos organismos ao longo do tempo, fenômeno conhecido como bioacumulação. Ademais, essas substâncias podem ter sua concentração ampliada ao longo da cadeia alimentar, processo denominado biomagnificação (Rios; Batista; Crystello, 2024; Leitão; Leitão, 2025).

Diante desse cenário, o estudo dos agentes tóxicos torna-se essencial para compreender os impactos das substâncias químicas sobre a saúde humana e o meio ambiente, permitindo identificar riscos, prevenir intoxicações e desenvolver medidas de controle da poluição. Além de contribuir para o monitoramento da qualidade ambiental e da saúde coletiva, os conhecimentos toxicológicos também subsidiam a criação de normas e legislações ambientais e sanitárias responsáveis por regulamentar o uso, descarte e controle de substâncias potencialmente perigosas (De Souza, 2020).



Legislação

A legislação brasileira voltada para a toxicologia ambiental reúne normas destinadas à prevenção, ao controle e à fiscalização dos impactos causados por substâncias químicas e poluentes no meio ambiente, visando à proteção da saúde pública, da biodiversidade e do equilíbrio ambiental (Barroso *et al.*, 2025).



Nesse contexto, destaca-se a Lei nº 6.938/1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). Essa legislação estabeleceu conceitos essenciais como o de poluição, compreendida como a degradação da qualidade ambiental capaz de comprometer a saúde humana, a biota e as condições sanitárias, e de poluidor, atribuindo responsabilidade administrativa, civil e penal aos agentes públicos ou privados causadores de danos ambientais. Além disso, a PNMA possibilitou a criação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgãos fundamentais para a formulação, implementação e fiscalização das políticas ambientais brasileiras (Abe, 2017; Monteiro *et al.*, 2022).

De maneira complementar, a Lei nº 9.605/1998, denominada Lei de Crimes Ambientais, estabelece sanções de natureza penal e administrativa direcionadas às condutas prejudiciais ao meio ambiente, contemplando medidas punitivas para práticas associadas ao descarte indevido de resíduos perigosos, à contaminação de recursos hídricos, à emissão de poluentes atmosféricos e ao manuseio irregular de substâncias químicas (Couto, 2021).



Outro importante marco regulatório refere-se à Lei nº 12.305/2010, responsável pela instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual estabelece diretrizes voltadas ao gerenciamento ambiental, adequado dos resíduos sólidos. Nesse contexto, destacam-se a introdução de instrumentos como a logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, os quais atribuem deveres aos fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e ao poder público quanto à destinação adequada dos resíduos gerados (Dos Santos; Van Elk, 2021).

No que concerne à regulamentação de agrotóxicos, esta é atualmente regida pela Lei nº 14.785/2023, que objetiva reformular o uso de agrotóxicos e produtos de controle ambiental no Brasil, abrangendo desde a pesquisa e produção até a comercialização, utilização e destino final de resíduos e embalagens. No contexto da toxicologia ambiental, é estabelecida a análise de risco como o fundamento científico e sistemático para a tomada de decisões sobre o registro e controle dessas substâncias (Brasil, 2023).





Já no que se refere à manutenção da qualidade ambiental e à preservação dos ecossistemas, destacam-se importantes instrumentos normativos voltados ao controle da poluição e à proteção dos recursos naturais. No âmbito dos recursos hídricos, a Lei nº 9.433/1997, associada às Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011, estabelece diretrizes relacionadas aos padrões de qualidade da água e ao controle do lançamento de efluentes, contribuindo para a redução dos riscos de contaminação da biota aquática e dos impactos à saúde humana (Alves; Silva; Brugnolli, 2021).

No tocante à qualidade atmosférica, o cenário regulatório brasileiro foi recentemente atualizado pela Lei nº 14.850/2024, que instituiu a Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr), bem como pela Resolução CONAMA nº 506/2024, responsável pela revisão dos padrões nacionais de qualidade do ar. Ademais, o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) foi reestruturado por meio da Resolução CONAMA nº 513/2026, passando a integrar estratégias relacionadas à saúde pública e às mudanças climáticas (Brasil, 2026).



Por fim, a Resolução CONAMA nº 420/2009 estabelece valores de referência para áreas contaminadas, auxiliando na identificação, monitoramento e controle de substâncias tóxicas presentes no solo e no subsolo, constituindo-se como uma importante ferramenta para a gestão ambiental e sanitária (Batista; Cabral, 2023).

Principais Poluentes e Fontes de Contaminação

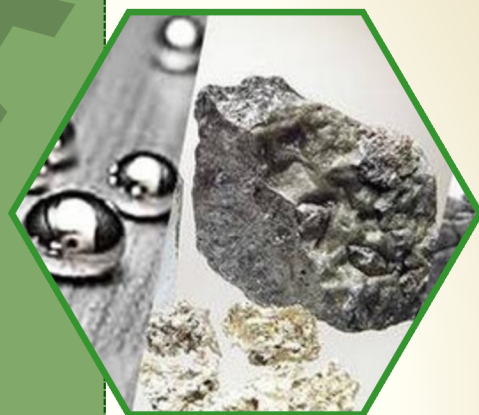
A presença de poluentes ambientais constitui um dos maiores desafios à saúde pública contemporânea, uma vez que diversos contaminantes estão amplamente distribuídos no ar, na água e no solo, afetando diretamente os ecossistemas e a qualidade de vida da população (Dos Santos, 2025). Entre esses poluentes, destacam-se os metais pesados, os agrotóxicos, os poluentes atmosféricos e os contaminantes hídricos, cada um com características específicas de toxicidade e impacto biológico (Siqueira; Bressiani, 2023; Leitão; Leitão, 2025; Torma; Ferreira, 2022; Pereira; Araújo, 2025).



Principais Poluentes

Inicialmente, no que se refere aos contaminantes de maior relevância toxicológica, destacam-se os metais pesados, representados pelo chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), arsênio (As), alumínio (Al) e cromo (Cr). Embora presentes naturalmente na crosta terrestre, suas concentrações ambientais são expressivamente amplificadas por atividades industriais, mineração, uso de agroquímicos e descarte inadequado de resíduos. Sua persistência e resistência à degradação favorecem a bioacumulação em solos, corpos hídricos e organismos vivos, com efeitos que incluem nefrotoxicidade, hepatotoxicidade, neurotoxicidade, neoplasias, distúrbios reprodutivos e alterações dermatológicas (Balali-Mood *et al.*, 2021; Jomova *et al.*, 2025).

Apesar desse espectro comum de toxicidade, cada metal apresenta um perfil de dano específico sendo o chumbo responsável pelo saturnismo, com efeitos neurotóxicos, hematológicos e gastrointestinais, especialmente prejudicial ao desenvolvimento neurológico infantil (Da Silva *et al.*, 2023). O cádmio se destaca pela elevada bioacumulação e pelos danos renais, ósseos e carcinogênicos (Machuca; Puga; Minaya, 2026). O arsênio é reconhecido carcinogênico, associado a cânceres de pele e alterações sistêmicas (He *et al.*, 2025). O mercúrio, especialmente em sua forma orgânica, causa danos neurológicos, cognitivos e renais, com risco amplificado por biomagnificação nos ecossistemas aquáticos (Da Silva *et al.*, 2025).



Além dos metais pesados, os agrotóxicos representam outra importante categoria de poluentes, amplamente utilizados no controle de pragas e capazes de contaminar o solo, a água, o ar e os alimentos. Sua exposição ocorre tanto de forma ocupacional, em trabalhadores rurais, quanto pela ingestão de alimentos contaminados pela população geral. Pesticidas como diclorodifeniltricloroetano (DDT), malathion, diazinon e glifosato são classificados como prováveis carcinogênicos, associados ao linfoma não Hodgkin e a distúrbios endócrinos, neurológicos e reprodutivos, com impacto especialmente relevante em populações rurais e crianças (Daufenback *et al.*, 2022; Da Silva; Pianovski; De Carvalho Filho, 2025).



Já no que se refere ao meio atmosférico, os poluentes de maior impacto incluem o material particulado (MP), o dióxido de nitrogênio (NO_2), o dióxido de enxofre (SO_2), o monóxido de carbono (CO) e o ozônio (O_3), provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis e de emissões industriais e veiculares. A exposição contínua a esses compostos desencadeia processos inflamatórios nas vias respiratórias, favorecendo asma, bronquite, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e infecções respiratórias, com maior vulnerabilidade em crianças, idosos e portadores de doenças pré-existentes (Torma; Ferreira, 2022; Pereira, 2025).

Ainda, os contaminantes hídricos, a exemplo do esgoto não tratado, dos resíduos de medicamentos e dos microplásticos, comprometem a qualidade da água e podem levar à ingestão de substâncias tóxicas, muitas vezes com efeitos ainda pouco compreendidos sobre a saúde humana. Os microplásticos merecem atenção crescente, uma vez que podem atuar como carreadores de outras substâncias químicas nocivas, ampliando o potencial de dano já associado aos demais poluentes discutidos (Medeiros, 2023; De Souza *et al.*, 2024; Cardoso, 2025).



Fontes de Contaminação

Atividades Industriais

As atividades industriais figuram entre as principais responsáveis pela contaminação do ar, do solo e da água. A emissão de material particulado, metais pesados e gases tóxicos como SO_2 e NO_x contribui para cerca de 9 milhões de mortes anuais no mundo (Manisalidis *et al.*, 2020). Processos como a metalurgia do cobre geram resíduos sólidos e poeiras contaminadas que, quando armazenados inadequadamente, liberam metais tóxicos por lixiviação para o solo e águas subterrâneas, além de dispersarem partículas finas pelo vento, comprometendo a cadeia alimentar (Izydorczyk *et al.*, 2021).

Atividades Agrícolas

As atividades agrícolas contribuem sobretudo pelo uso de agrotóxicos e pela queima de biomassa, esta libera material particulado, monóxido de carbono, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e benzeno, associados a doenças respiratórias e câncer de pulmão. O escoamento agrícola, por sua vez, leva pesticidas ao solo e à água, contaminando a cadeia alimentar e comprometendo a qualidade da água potável, com efeitos que já foram descritos na seção anterior (Manisalidis *et al.*, 2020; Da Silva; Pianovski; De Carvalho Filho, 2025).



Resíduos Urbanos



Os resíduos urbanos descartados de forma inadequada representam outra fonte relevante de poluição. O acúmulo de lixo doméstico, hospitalar e eletrônico libera metais pesados, microplásticos e substâncias tóxicas no ambiente. O chorume gerado pela decomposição de resíduos sólidos atravessam o solo por percolação e podem atingir aquíferos, enquanto o contato com corpos d'água favorece doenças como febre tifóide, hepatite e gastroenterite (Al-Dulaimi; Al-Taai, 2021; Bastos; Belotti; Laurindo, 2021). Vale destacar que dois terços das áreas contaminadas por indústrias estão relacionados ao descarte inadequado de resíduos, evidenciando a necessidade de políticas eficientes de coleta, tratamento e educação ambiental (Costa, 2022; Da Silva; Pianovski; De Carvalho Filho, 2025).

Queima de Combustíveis Fósseis

A queima de combustíveis fósseis é a maior fonte de poluição atmosférica global, com veículos respondendo por cerca de 80% das emissões atuais. Além dos poluentes já mencionados, essa queima contribui para o aquecimento global e a formação de ozônio troposférico. O material particulado fino (PM_{2,5}) desencadeia estresse oxidativo e inflamação sistêmica, aumentando a mortalidade por doenças cardiovasculares, o monóxido de carbono causa hipóxia e danos cardíacos, e o SO₂ e NO_x provocam irritação respiratória e chuva ácida (Manisalidis *et al.*, 2020; Shetty *et al.*, 2023).

Vias de Exposição aos Poluentes Ambientais



As vias de exposição correspondem aos diferentes meios pelos quais substâncias químicas, físicas ou biológicas presentes no ambiente podem entrar em contato com o organismo humano. Nesse contexto, destacam-se a inalação, a ingestão e o contato dérmico como as principais formas de exposição, cada uma associada a processos específicos de absorção e a diferentes efeitos tóxicos no organismo (Oga; Camargo; Batistuzzo, 2020).

A inalação constitui uma importante via de exposição na toxicologia ambiental, ocorrendo quando substâncias presentes no ambiente entram no organismo por meio da respiração. Nesse processo, contaminantes dispersos no ar, como gases tóxicos e partículas microscópicas, são inalados e percorrem as vias respiratórias até alcançarem os pulmões (Pereto *et al.*, 2025).



Nesse sentido, em razão de suas características físico-químicas, essas substâncias podem se depositar em diferentes regiões do sistema respiratório e, em alguns casos, atingir a circulação sanguínea. Como consequência, a exposição por inalação pode desencadear alterações respiratórias, processos inflamatórios e outros efeitos tóxicos no organismo, sobretudo quando ocorre de forma contínua e prolongada (Falcon-Rodriguez *et al.*, 2016; Aghapour *et al.*, 2022).



A ingestão, por sua vez, consiste em uma via de exposição na qual substâncias presentes no ambiente entram no organismo por meio do consumo de água, alimentos ou partículas contaminadas (EPA, 2026). Esse processo ocorre quando contaminantes ambientais, como pesticidas, metais pesados e compostos químicos persistentes, são incorporados à cadeia alimentar ou aos recursos hídricos, possibilitando a sua entrada no sistema gastrointestinal (Lebelo *et al.*, 2021). Após a ingestão, essas substâncias podem ser absorvidas pela mucosa intestinal e distribuídas pela corrente sanguínea para diferentes órgãos e tecidos do corpo (Chen *et al.*, 2025).



Já o contato dérmico corresponde à via de exposição em que substâncias presentes no ambiente entram em contato direto com a pele, possibilitando sua absorção pelo organismo. Essa exposição ocorre quando agentes químicos, físicos ou biológicos presentes no ar, na água, no solo ou em superfícies contaminadas aderem à pele durante atividades ocupacionais, domésticas ou ambientais (EPA, 2025).

Sendo assim, dependendo das características da substância e das condições de exposição, os contaminantes podem atravessar a barreira cutânea e alcançar a circulação sanguínea, distribuindo-se para diferentes tecidos e órgãos. Dessa forma, além de provocar irritações, alergias e lesões locais, determinados contaminantes ambientais podem desencadear efeitos sistêmicos e contribuir para o desenvolvimento de alterações tóxicas no organismo (Fitoussi *et al.*, 2022).



Efeitos Tóxicos e Impactos Ambientais

Efeitos no Organismo

Em relação aos efeitos tóxicos no organismo, é importante distinguir entre efeitos agudos e crônicos. Os efeitos agudos ocorrem após exposições de curta duração e, geralmente, em altas concentrações, manifestando-se por sintomas imediatos como irritação, intoxicação ou até mesmo morte. Como exemplo, a inalação de elevadas concentrações de monóxido de carbono pode provocar hipóxia tecidual, tontura, perda de consciência e óbito (Inácio, 2023). Da mesma forma, a exposição aguda a agrotóxicos organofosforados pode causar náuseas, vômitos, convulsões e insuficiência respiratória (De Menezes; Rodrigues; Campos, 2024).



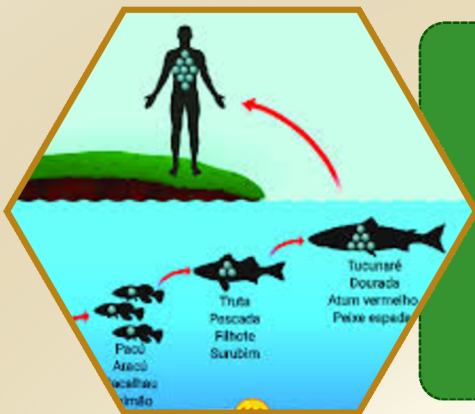
Os efeitos crônicos resultam de exposições prolongadas a baixas doses de poluentes, sendo frequentemente mais difíceis de identificar, pois se desenvolvem lentamente ao longo do tempo (De Souza et al., 2023; Salvá; Pereira; Portella, 2025). Situações comuns incluem a exposição contínua à poluição atmosférica em centros urbanos, ao contato ocupacional com metais pesados em atividades industriais e à ingestão prolongada de água ou alimentos contaminados (Nunes et al., 2024). A exemplo da exposição prolongada ao material particulado e ao dióxido de nitrogênio (NO_2) que pode contribuir para o agravamento de doenças respiratórias, como asma e bronquite crônica, além de aumentar o risco cardiovascular (Padilha et al., 2026). Além disso, essa exposição também é associada ao desenvolvimento de doenças como o câncer, doenças respiratórias e distúrbios neurológicos (Pereto et al., 2025; Porto et al., 2025).



Os processos de bioacumulação e biomagnificação agravam ainda mais esses riscos, especialmente quando substâncias tóxicas persistentes permanecem no ambiente por longos períodos e entram na cadeia alimentar (Fausto et al., 2026).

A bioacumulação ocorre quando uma substância se acumula em um organismo ao longo do tempo, em uma velocidade maior do que sua capacidade de metabolização ou eliminação. Isso acontece, por exemplo, com metais pesados e pesticidas persistentes (Alves, 2024). Um caso frequente é o acúmulo de mercúrio em peixes de rios e oceanos contaminados, que absorvem pequenas quantidades da substância repetidamente, armazenando-a em seus tecidos. Em seres humanos, o consumo contínuo desses peixes contaminados pode levar a alterações neurológicas, prejuízo motor e danos ao sistema nervoso central (Rocha, 2025).





Por sua vez, a biomagnificação refere-se ao aumento progressivo da concentração de uma substância tóxica ao longo da cadeia alimentar. Esse processo ocorre quando organismos menores contaminados são consumidos por organismos maiores, fazendo com que a quantidade da substância se torne cada vez mais elevada nos níveis tróficos superiores, afetando principalmente predadores e, conseqüentemente, o ser humano (Leitão; Leitão, 2025; Villa Nova *et al.*, 2025).

Dessa forma, a toxicidade ambiental não depende apenas da concentração inicial do poluente, mas também do tempo de exposição, da persistência da substância no ambiente e da capacidade de acúmulo nos organismos e ecossistemas, tornando seus impactos relevantes para a saúde humana e ambiental (De Carvalho, 2024).

Impactos nos Ecossistemas



Os impactos observados nos ecossistemas resultam da interação entre fatores naturais e, principalmente, das intervenções antrópicas, que modificam o equilíbrio dinâmico existente entre os organismos vivos e o meio em que estão inseridos. A intensificação das atividades humanas contribui para a ruptura da estabilidade ecológica, desencadeando importantes consequências ambientais (Botta; Ferreira, 2026). Entre os principais impactos, destacam-se a degradação da qualidade dos recursos hídricos e do solo, além da mortalidade em larga escala de diversas espécies, fatores que comprometem o funcionamento e a sustentabilidade dos ecossistemas, favorecendo, conseqüentemente, o desequilíbrio ecológico (Lal, 2025).

Contaminação da Água e do Solo

No que se refere aos recursos hídricos, a poluição das águas ocorre principalmente pelo lançamento de esgoto doméstico, efluentes industriais e resíduos agrícolas. Entre os principais impactos, destaca-se a eutrofização, fenômeno causado pelo excesso de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, no meio aquático (Baptista; Buss; Egler, 2025). Esse enriquecimento favorece a proliferação excessiva de algas e microrganismos, reduzindo o oxigênio dissolvido, alterando o pH e comprometendo a qualidade da água e a manutenção da biota aquática (Wan *et al.*, 2024).



Em relação ao solo, sua contaminação está associada principalmente às atividades industriais, à mineração, ao descarte inadequado de resíduos e ao uso intensivo de agrotóxicos. Compostos como derivados de petróleo, metais pesados e pesticidas alteram as características químicas e biológicas do solo, afetando os microrganismos, a fertilidade e o desenvolvimento vegetal (Martins, 2024; Ondrasek *et al.*, 2025). Além disso, a infiltração desses contaminantes pode atingir aquíferos subterrâneos, comprometendo a qualidade das reservas de água potável (Botta; Ferreira, 2026).

Mortalidade de Espécies



A mortalidade de animais e plantas constitui uma das consequências mais evidentes da degradação ambiental, estando relacionada à exposição a substâncias tóxicas e às alterações das condições do meio. Esses impactos comprometem a sobrevivência das espécies, o equilíbrio ecológico e a manutenção dos serviços ecossistêmicos (Dias *et al.*, 2025).

No âmbito dos impactos químicos, destaca-se a ação de pesticidas amplamente utilizados na agricultura, como o fipronil e o glifosato, que têm sido associados à mortalidade de abelhas e ao comprometimento de seus sistemas imunológicos. Tal situação repercute de forma significativa sobre o processo de polinização, essencial para a reprodução de diversas espécies vegetais e para a segurança alimentar (Moióli, 2024).



Além disso, substâncias persistentes no ambiente, como o diclorodifeniltricloroetano (DDT), apresentam elevada estabilidade química e permanecem ativas por longos períodos, podendo causar efeitos deletérios à fauna, bem como contribuir para a redução do sucesso reprodutivo e, consequentemente, para o declínio populacional das espécies (Halbach *et al.*, 2026).



Em ecossistemas aquáticos, a mortalidade de peixes está frequentemente associada à hipóxia ou anóxia decorrentes da eutrofização, comprometendo a respiração dos organismos aquáticos (Sánchez-Bayo, 2024). Esse quadro pode ser agravado pela presença de metais em altas concentrações, especialmente em episódios relacionados a rejeitos de mineração (Almeida *et al.*, 2024).

Outro fator de grande relevância é a destruição dos habitats naturais, especialmente em decorrência do desmatamento e das queimadas. A supressão da cobertura vegetal elimina fontes de alimento, áreas de reprodução e locais de abrigo, levando ao deslocamento forçado das espécies para outras regiões (Joly *et al.*, 2025). Em casos mais severos, essa perda de habitat pode resultar na extinção local de populações, comprometendo a biodiversidade e a estabilidade dos ecossistemas (Souza *et al.*, 2025).

Desequilíbrio Ecológico



O desequilíbrio ecológico ocorre quando alterações em fatores bióticos ou abióticos interferem significativamente na dinâmica e no funcionamento dos ecossistemas (Moióli, 2024; Plowright *et al.*, 2024). Como os ecossistemas são formados por relações interdependentes entre os organismos vivos e o meio físico, mudanças em um de seus componentes podem desencadear efeitos em cadeia, comprometendo sua estabilidade e capacidade de autorregulação (Estes *et al.*, 2025).

Entre as principais consequências desse processo, destaca-se a perda da biodiversidade. A redução ou extinção de uma única espécie pode comprometer funções ecológicas essenciais à manutenção do ecossistema. Um exemplo expressivo é a introdução de espécies exóticas em ambientes onde não possuem predadores naturais, que pode favorecer sua reprodução descontrolada, levando à competição com espécies nativas por recursos e espaço, o que altera significativamente a estrutura e a dinâmica do ecossistema (Halbach *et al.*, 2026).



Além disso, o desequilíbrio ecológico promove alterações sistêmicas que ultrapassam os limites locais e repercutem em escalas regionais e globais (Moióli, 2024). Paralelamente, a degradação ambiental intensifica o contato entre seres humanos e animais silvestres, criando condições propícias para o surgimento e a disseminação de zoonoses e outras doenças emergentes (Santos *et al.*, 2024).

Avaliação de Risco Toxicológico

A avaliação de risco toxicológico consiste em um procedimento sistemático e multidimensional destinado à investigação dos mecanismos de toxicidade e à caracterização dos potenciais efeitos adversos à saúde humana decorrentes da exposição a agentes químicos. Nesse contexto, entre seus objetivos centrais, destacam-se a análise da relação risco-benefício de medicamentos e demais substâncias químicas; o estabelecimento de parâmetros como dose diária aceitável e dose de referência; a definição de limites seguros para contaminantes ambientais e alimentares; além da implementação de estratégias de controle e redução dos riscos identificados (Shinde *et al.*, 2024).

Tal abordagem estrutura-se em quatro etapas fundamentais: (1) identificação do perigo; (2) avaliação da relação dose-resposta; (3) avaliação da exposição; e (4) caracterização do risco (Reale *et al.*, 2024).

A etapa de identificação do perigo caracteriza-se como um processo essencialmente qualitativo, que utiliza dados provenientes de estudos epidemiológicos, experimentação animal e ensaios *in vitro* para determinar se um agente químico ou físico possui potencial intrínseco para causar efeitos adversos à saúde humana ou ao meio ambiente. A avaliação da relação dose-resposta, por sua vez, corresponde à etapa responsável pela quantificação desses perigos, estabelecendo uma correlação estatística entre a dose administrada de um agente e a magnitude ou frequência do efeito adverso observado em uma população. Essa fase é fundamental para a identificação de limiares experimentais, como o Nível de Efeito Adverso Não Observado (NOAEL) e o Nível de Menor Efeito Adverso Observado (LOAEL), os quais são utilizados para estimar níveis de exposição seguros, bem como prever riscos (Timbrell; Barile, 2023).



A terceira etapa, que consiste na avaliação da exposição, dedica-se à mensuração ou estimativa da intensidade, frequência e duração da exposição humana a um agente químico presente no ambiente, considerando as vias de contato (oral, dérmica ou inalatória) e os meios de propagação, com o objetivo de quantificar a dose que efetivamente atinge o organismo. Já a quarta etapa, caracterização do risco, constitui a fase final do processo, na qual são integrados os dados obtidos nas etapas anteriores para estimar a probabilidade e a severidade de efeitos adversos em uma população sob condições específicas. Nesse estágio, geralmente realiza-se a comparação entre os níveis de exposição detectados e os limites de segurança ou toxicidade estabelecidos, a fim de subsidiar a tomada de decisão acerca da aceitabilidade do risco (Corrêa; Alonzo; Trevisan, 2021).

Sustentabilidade e Perspectivas Futuras

Desenvolvimento Sustentável

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como um modelo de crescimento que busca equilibrar aspectos econômicos, sociais e ambientais, garantindo recursos para as futuras gerações (De Oliveira; Genovese; Araújo, 2023; Lopes *et al.*, 2025). Na toxicologia ambiental, isso envolve a redução da produção e liberação de substâncias tóxicas por meio de práticas mais seguras e responsáveis (Hartung *et al.*, 2023; Richardson *et al.*, 2023).

Nesse contexto, destaca-se o conceito de Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD), ou "Seguro e Sustentável desde o Projeto", desenvolvido pela Comissão Europeia, que propõe avaliar a segurança de substâncias, materiais e produtos desde as etapas iniciais de desenvolvimento, considerando biodegradabilidade, baixa toxicidade e ausência de bioacumulação (Caldeira *et al.*, 2024; Slootweg, 2024).



Além disso, a economia circular substitui o modelo linear de produção (extrair-produzir-descartar) ao reaproveitar resíduos como insumos, reduzindo rejeitos, poluição e o uso de matérias-primas virgens (De Oliveira; Genovese; Araújo, 2023; Klotz *et al.*, 2024). Exemplos incluem a reciclagem química de plásticos e o desenvolvimento de processos industriais mais sustentáveis (Da Silva Júnior; De Jesus; Giroto Júnior, 2022; Slootweg, 2024).



Apesar dos avanços, desafios como a contaminação por poluentes eternos (PFAS) e microplásticos ainda persistem, exigindo cooperação e governança global para minimizar impactos ambientais e à saúde humana (UNEP, 2021; Amen *et al.*, 2023).

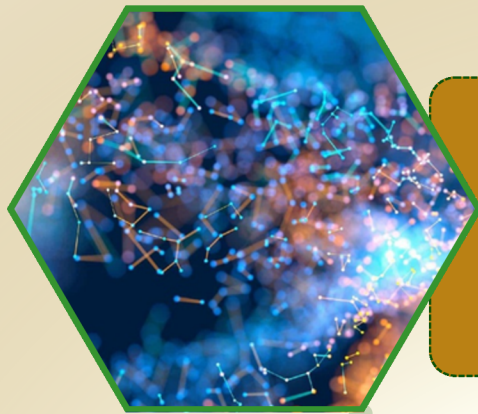
Redução de Poluentes

A redução dos poluentes ambientais é essencial para prevenir danos à saúde humana e ao meio ambiente. Dessa forma, medidas como controle de emissões industriais, uso de tecnologias limpas e fiscalização ambiental são fundamentais (Lopes *et al.*, 2025). A prevenção na fonte é considerada a estratégia mais eficaz para reduzir a poluição, sendo complementada por tecnologias de tratamento avançado (Amen *et al.*, 2023; Slootweg, 2024).



Neste contexto, surge o princípio do poluidor-pagador, inicialmente proposto pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), estabelecendo que os responsáveis pela poluição devem arcar com os custos de prevenção e remediação ambiental, incentivando práticas produtivas mais sustentáveis (Mukherjee, 2023; OECD, 2024).





Dentre as tecnologias utilizadas na remoção de poluentes destacam-se as nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI), empregadas na descontaminação de aquíferos, e a oxidação em água supercrítica (SCWO), capaz de degradar poluentes orgânicos persistentes em compostos menos nocivos (De Souza, 2022; Plessl; Russ; Vollprecht, 2023; Asghar *et al.*, 2024).

Os poluentes eternos (PFAS) representam um grande desafio devido à sua alta persistência ambiental (UNEP, 2021; Slootweg, 2024). Para sua remoção, são utilizadas tecnologias como carvão ativado, resinas de troca iônica e osmose reversa, embora ainda apresentem altos custos e dificuldades na destinação final dos resíduos gerados (Amen *et al.*, 2023).



Alternativas Ecológicas

As alternativas ecológicas baseiam-se nos princípios da Química Verde e da biomimética (imitação da natureza), substituindo substâncias tóxicas e não renováveis por opções biodegradáveis, renováveis e de baixa toxicidade (Da Silva Júnior; De Jesus; Giroto Júnior, 2022; Caldeira *et al.*, 2024). Essas estratégias buscam reduzir impactos ambientais e promover maior segurança desde o desenvolvimento dos produtos (Slootweg, 2024).



As principais categorias que lideram essa transformação são:

Biopesticidas

Derivados de organismos vivos (bactérias, fungos, plantas) ou compostos naturais, capazes de controlar pragas com menor impacto ambiental, baixa toxicidade e rápida degradação no ambiente, reduzindo a persistência de resíduos e os riscos ecológicos associados aos pesticidas convencionais (UNEP, 2021; D'amore, 2026);



Fitorremediação



A fitorremediação utiliza plantas hiperacumuladoras, como o girassol e a mostarda-indiana, para extrair, imobilizar ou degradar contaminantes ambientais, promovendo a recuperação de ecossistemas degradados de forma sustentável e biologicamente integrada (Islam; Saxena; Sharma, 2024);

Polímeros Biodegradáveis



São plásticos produzidos a partir de fontes renováveis, como milho, cana-de-açúcar e bactérias, capazes de se degradar por ação microbiana (UNEP, 2021), reduzindo a persistência ambiental e o potencial de bioacumulação. Exemplos de polímeros biodegradáveis: ácido polilático (PLA) e os poli-hidroxialcanoatos (PHA) (Slootweg, 2024);

Solventes Verdes

São alternativas de baixa toxicidade e volatilidade que substituem solventes orgânicos perigosos, como benzeno e clorofórmio (Da Silva Júnior; De Jesus; Giroto Júnior, 2022). Entre os principais exemplos estão o dióxido de carbono supercrítico ($scCO_2$) e a água, considerados opções mais seguras, sustentáveis e ambientalmente compatíveis (De Souza, 2022; Atwi-Ghaddar *et al.*, 2023).



Educação Ambiental

A educação ambiental (EA) é um processo de formação de valores e conhecimentos voltados à proteção ambiental e à sustentabilidade (Müller; Da Silva, 2023). Na toxicologia ambiental, ela contribui para conscientizar a população sobre vias de exposição e riscos associados a substâncias químicas presentes no cotidiano (Da Silva Júnior; De Jesus; Giroto Júnior, 2022; Hartung *et al.*, 2023).





A EA também promove mudanças comportamentais, incentivando práticas como o descarte correto de resíduos e medicamentos, reduzindo impactos ambientais e à saúde pública (UNEP, 2021; OECD, 2024). Além disso, fortalece a capacidade crítica da população frente ao *greenwashing* (ambientalismo enganoso), estimulando maior transparência e responsabilidade socioambiental (De Oliveira; Genovese; Araújo, 2023; Lopes et al., 2025). Outro aspecto importante é seu papel político e cidadão, ao capacitar comunidades para exigir justiça socioambiental e participar de decisões relacionadas à poluição e contaminação ambiental (Da Silva Júnior; De Jesus; Giroto Júnior, 2022; Da Silva Júnior et al., 2024).

No Brasil, a Política Nacional de Educação Ambiental estabelece sua inserção em todos os níveis de ensino, embora ainda existam desafios relacionados à formação técnica e aos materiais didáticos (Müller; Da Silva, 2023). Portanto, a expansão da educação com foco em toxicologia e o desenvolvimento de habilidades multidisciplinares são prioridades críticas para garantir a proteção da saúde pública e ambiental nas próximas décadas (WHO, 2018; Hartung et al., 2023; Lopes et al., 2025).





Agenda

Evento presencial - Simpósio III Simpósio de Ciências Forenses e Toxicológicas

Organização: PET-Farmácia UFPB

Data: 29/05/2026

Hora: 08h às 16h

Local: Auditório de Fonoaudiologia e Terapia
Ocupacional - CCS/UFPB

Comissão editorial

Profa. Dra. Leônia Maria Batista

Diagramação

Alice Maria da Silva Oliveira

Anne Luise Andrade Dantas

Ellen Barbosa Quirino

Geiciely Filgueira Alves

Lorenzo Ciannella

Vitória Evelyn de Paiva Monteiro



**Gostou do conteúdo?
Nos acompanhe nas
redes sociais!
@petfarmaciaufpb**



Referências

- ABE, F. R. **Toxicologia ambiental**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
- AGHAPOUR, M. *et al.* Role of air pollutants in airway epithelial barrier dysfunction in asthma and COPD. **European Respiratory Review**, v. 31, n. 163, 2022.
- AL-DULAIMI, W. A. M.; AL-TAAI, S. H. H.. Pollution and its impact on sustainable development. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 790, 2021.
- ALMEIDA, R. M. *et al.* Severe hypoxia and fish kills driven by eutrophication in tropical aquatic ecosystems. **Freshwater Biology**, v. 69, n. 3, p. 412-427, 2024.
- ALVES, L. B.; DA SILVA, C. A.; BRUGNOLLI, R. M. As legislações das águas superficiais e a gestão de bacias hidrográficas no contexto sul-mato-grossense. **Formação (Online)**, v. 28, n. 53, p. 955-980, 2021.
- ALVES, S. R. G. **Bioacumulação de elementos essenciais e metais pesados no fígado dos grandes predadores do Atlântico**. 2024. Dissertação (Mestrado em Segurança Alimentar) - Universidade de Lisboa, Portugal, 2024.
- AMEN, R. *et al.* A critical review on PFAS removal from water: removal mechanism and future challenges. **Sustainability**, v. 15, n. 23, p. 1-39, 2023.
- ASGHAR, N. *et al.* Advancement in nanomaterials for environmental pollutants remediation: a systematic review on bibliometrics analysis, material types, synthesis pathways, and related mechanisms. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 22, n. 26, p. 1-28, 2024.
- ATWI-GHADDAR, S. *et al.* Supercritical Fluid Extraction (SFE) of Polar Compounds from Camellia sinensis Leaves: Use of Ethanol/Water as a Green Polarity Modifier. **Molecules**, v. 28, n. 14, p. 01-15, 2023.
- BALALI-MOOD, Mahdi *et al.* Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. **Frontiers in Pharmacology**, Lausanne, v. 12, p. 1-19, 2021.
- BAPTISTA, D. F.; BUSS, D. I. F.; EGLER, M. **Macroinvertebrados como bioindicadores de ecossistemas aquáticos contaminados por agrotóxicos**. Rio de Janeiro: Fiocruz, Capítulo 8.
- BARROSO, G. M. *et al.* Pesticide residues in Brazil: analysis of environmental legislation and regulation and the challenge of sustainable production. **MDPI Sustainability**, v. 17, n. 6, p. 2583, 2025.
- BASTOS, L. R.; BELOTTI, F. M.; LAURINDO, E. A. Contaminação do solo e água subterrânea em áreas de disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 259-273, 2021.
- BATISTA, D. F.; CABRAL, J. B. P. Avaliação qualitativa dos níveis de contaminação por elementos potencialmente tóxicos na bacia do Ribeirão Santo Antônio em Iporá-GO. **Geoambiente On-line**, n. 45, p. 24-50, 2023.
- BOTTA, L. S.; FERREIRA, F. V. **Impactos da poluição no meio ambiente: solos, águas superficiais e subterrâneas**. São Carlos: EESC/USP.
- BRASIL. Lei nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem, a rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e das embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, de produtos de controle ambiental, de seus produtos técnicos e afins; revoga as Leis nºs 7.802, de 11 de julho de 1989, e 9.974, de 6 de junho de 2000, e partes de anexos das Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 9.782, de 26 de janeiro de 1999. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 28 dez. 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR**. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/programa-nacional-de-controle-da-qualidade-do-ar-pronar>. Acesso em: 21 maio 2026.

Referências

- CALDEIRA, C. *et al.* Safe and sustainable by design chemicals and materials: a review of safety and sustainability dimensions, aspects, methods, indicators, and tools. **Green Chemistry**, v. 26, n. 13, p. 7456-7477, 2024.
- CARDOSO, P. H. G. Heterogeneidade, Eficiência e Desempenho dos Serviços de Água e Esgoto no Brasil: Uma Revisão da Literatura sobre o Saneamento Básico e seus Desafios de Universalização. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 11, p. 12231, 2025.
- CHEN, X. *et al.* Interactions between environmental pollutants and gut microbiota: A review connecting the conventional heavy metals and the emerging microplastics. **Environmental Research**, v. 269, p. 120928, 2025.
- CORRÊA, C. L.; ALONZO, H. G. A.; TREVISAN, R. M. de S. Avaliação do risco. *In*: OGA, S.; CAMARGO, M. M. de A.; BATISTUZZO, J. A. de O. (Org.). **Fundamentos de toxicologia**. 4. ed. São Paulo: Atheneu, 2021.
- COSTA, D. S. **Disposição, origem e potencial de contaminação dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Pinheiro-MA**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Naturais – Biologia) – Universidade Federal do Maranhão, Pinheiro, 2022.
- COUTO, A. V. B. O alcance da responsabilidade penal da pessoa jurídica por crimes ambientais. **Revista da Procuradoria Geral do Estado do Rio de Janeiro**, v. 4, n. 149, 2021.
- D'AMORE, T. New Challenges in the Monitoring, Risk Assessment, and Management of Pesticides and Biocides in the “One Health Era”. **Journal of Xenobiotics**, v. 16, n. 1, p. 1-8, 2026.
- DA SILVA JÚNIOR, C. A. *et al.* The Role of the Periodic Table of the Elements of Green and Sustainable Chemistry in a High School Educational Context. **Sustainability**, v. 16, n. 6, p. 01-22, 2024.
- DA SILVA JÚNIOR, C. A.; DE JESUS, D. P.; GIROTTI JÚNIOR, G. Química Verde e a Tabela Periódica de Anastas e Zimmerman: tradução e alinhamentos com o desenvolvimento sustentável. **Química Nova**, v. 45, n. 8, p. 1010-1019, 2022.
- DA SILVA, D. B.; PIANOVSKI, M. A. D.; DE CARVALHO FILHO, N. P. Environmental pollution and cancer. **Jornal de Pediatria**, v. 101, supl. 1, p. S18-S26, 2025.
- DA SILVA, D. G. *et al.* Exposição ocupacional ao chumbo: uma revisão da literatura. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 8, 2023.
- DA SILVA, E. S. *et al.* Impactos ambientais causados pela contaminação de mercúrio e a relação com os problemas de saúde na população ribeirinha da Amazônia: uma revisão integrativa. **Revista Delos**, v. 18, n. 68, p. 5551, 2025.
- DAUFENBACK, V. *et al.* Agrotóxicos, desfechos em saúde e agroecologia no Brasil: uma revisão de escopo. **Saúde em Debate**, v. 46, p. 482-500, 2022.
- DE CARVALHO, L. B. R. **Agrotóxicos e sua relação com o meio ambiente e a saúde: uma modelagem in silico de perfil toxicológico e revisão de alternativas para redução de contaminação**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Saúde) - Escola de Ciências Médicas e da Vida, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2024.
- DE MENEZES, M. do S. F.; RODRIGUES, J. J.; CAMPOS, L. D. dos S. **Os impactos dos agrotóxicos na saúde dos trabalhadores rurais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Segurança no Trabalho) - Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Patos, 2024.
- DE OLIVEIRA, G. N.; GENOVESE, C. L. de C. R.; ARAÚJO, M. P. M. Educação ambiental e sustentabilidade: uma leitura crítica da influência da mídia sob a ótica da indústria cultural. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 18, n. 3, p. 345-364, 2023.

Referências

- DE SOUZA, C. E. A. *et al.* Abordagem inicial das intoxicações agudas: uma revisão integrativa. **Estudos Avançados Sobre Saúde e Natureza**, v. 17, 2023.
- DE SOUZA, G. B. M. *et al.* Supercritical water technology: an emerging treatment process for contaminated wastewaters and sludge. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, p. 75–104, 2022.
- DE SOUZA, J. D. **Reflexões sobre o ensino de toxicologia ambiental em cursos de graduação em ciências agrárias: estudo de caso no Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí**. 2020. Dissertação (Mestrado em Educação Agrícola) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- DE SOUZA, J. S. A. *et al.* MICROPLÁSTICOS EM ÁGUA DOCE: CARACTERIZAÇÃO, FONTES E IMPACTOS. **HOLOS**, v. 6, n. 40, 2024.
- DIAS, S. *et al.* Global consequences of the collapse of biotic interactions and ecosystem services. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 40, n. 3, p. 210-224, 2025.
- DOS SANTOS, A. **Remoção de poluentes ambientais em águas residuárias: revisão bibliográfica**. 2025. Trabalho de Curso (Graduação em Química tecnológica) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.
- DOS SANTOS, J. E. da S.; VAN ELK, A. G. H. P. Política Nacional de Resíduos Sólidos: breve análise do legado de uma década. **Revista Internacional de Ciências**, v. 11, n. 2, p. 229-242, 2021.
- ESTES, J. A. *et al.* Trophic cascades, ecosystem stability, and the loss of self-regulation capacity. **Ecology Letters**, v. 28, n. 2, p. 145-162, 2025.
- FALCON-RODRIGUEZ, C. I. *et al.* Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. **Frontiers in Immunology**, v. 7, p. 1-9, 2016.
- FAUSTO, J. P. *et al.* Meio ambiente e clima: impactos da poluição, do desmatamento e do uso intensivo de agroquímicos nos processos de degradação ambiental e assoreamento dos ecossistemas brasileiros. **Veredas do Direito**, v. 23, n. 5, 2026.
- FERNANDES, T.; HACON, S. de S.; NOVAIS, J. W. Z. Mudanças Climáticas, Poluição do Ar e Repercussões na Saúde Humana: Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 138–164, 2021.
- FITOUSSI, R. *et al.* Human skin responses to environmental pollutants: A review of current scientific models. **Environmental Pollution**, v. 306, p. 119316, 2022.
- HALBACH, L. *et al.* Ecotoxicological impacts of chemical pollutants on wildlife and plant fitness in anthropized habitats. **Environmental Pollution**, v. 342, p. 123-138, 2024.
- HARTUNG, T. *et al.* **Avançando a próxima revolução científica em toxicologia**. Washington, DC: Departamento de Defesa (DoD), 2023.
- HE, L. *et al.* Exposição ao arsênio e risco de câncer de pele (melanoma e não melanoma): revisão sistemática e metanálise. **Anais Brasileiros de Dermatologia (Português)**, v. 5, 2025.
- INÁCIO, D. C. O. de J. **Quando a Intoxicação por Monóxido de Carbono Não Mata**. 2023. Dissertação (Mestrado integrado em Medicina) - Universidade de Coimbra, Portugal, 2023.
- ISLAM, M. M.; SAXENA, N.; SHARMA, D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1269-1288, 2024.
- IZYDORCZYK, G. *et al.* Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. **Environmental Research**, v. 197, 2021.
- JOLY, C. A. *et al.* Deforestation, wildfires, and the catastrophic loss of tropical habitat and ecosystem functions. **Biological Conservation**, v. 291, art. 110-125, 2025.

Referências

- JOMOVA, K. et al. Heavy metals: toxicity and human health effects. **Archives of Toxicology**, v. 99, p. 153–209, 2025.
- KLOTZ, M. et al. The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics. **Science of the Total Environment**, v. 906, p. 1-14, 2024.
- LAL, R. Soil Degradation and Pollution as the Global Public Health Emergency. **Medical Research Archives**, v. 13, n. 5, p. 1-15, 2025.
- LEBELO, K. et al. Vias de contaminação química e suas implicações para a segurança alimentar nas diversas etapas da produção de alimentos: uma revisão. **Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública**, v. 18, n. 11, p. 1-23, 2021.
- LEITÃO, V. R.; LEITÃO, R. R. Contaminação Ambiental por Metais Pesados: Uma Revisão Sistemática de Revisões sobre Impactos Ecotoxicológicos. **Journal of Convergent Scientific Inquiry (ISSN 3085-8356)**, v. 1, n. 3, p. 1–12, 2025.
- LOPES, A. A. et al. Ecologia, meio ambiente e sustentabilidade: os impactos das ações antrópicas nos ecossistemas. **Revista DCS**, v. 22, n. 81, p. 1-13, 2025.
- MACHUCA, Y. A. R.; PUGA, N. A.; MINAYA, M. M. G. Níveis de cádmio em alimentos e riscos para a saúde da população: revisão sistemática. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 1, p. 1686-1704, 2026.
- MANISALIDIS, I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review. **Frontiers in Public Health**, v. 8, p. 14, 2020.
- MARTINS, T. da S. **Impactos químicos, biológicos e ecológicos de agrotóxicos e metais pesados em solos da Serra da Ibiapaba, Ceará**. 2024. 104 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- MEDEIROS, Ú. T. de P. **Fármacos como micropoluentes emergentes em sistemas de tratamento de esgoto doméstico: uma revisão sistemática**. 2023. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.
- MOIÓLI, J. **Queda na locomoção e falhas no sistema imune: estudo mostra como agrotóxicos afetam abelhas nativas**. BIOTA +20 (Agência FAPESP), 16 maio 2024.
- MONTEIRO, R. R. et al. Direito e Política Nacional do Meio Ambiente: os desafios enfrentados na atualidade no Brasil (2019-2021). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e20611729766-e20611729766, 2022.
- MUKHERJEE, S. Quanto o poluidor deve pagar? Tribunais indianos e a valoração de danos ambientais. **Journal of Environmental Law**, v. 35, n. 3, p. 331-351, 2023.
- MÜLLER, T.; DA SILVA, M. C. Educação Ambiental e Sustentabilidade Ambiental nos Anos Iniciais do Ensino Fundamental. **Ambiente & Educação**, v. 28, n. 1, p. 1-29, 2023.
- NUNES, E. P. et al. **Evidências globais em biomonitoramento humano: revisão sistemática das principais exposições e desfechos em saúde correlacionados**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Saúde Coletiva) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.
- OGA, S.; CAMARGO, M. M. de A.; BATISTUZZO, J. A. de O. **Fundamentos de Toxicologia**. 5. ed. São Paulo: Atheneu, 2020.
- OLYMPIO, K. P. K. et al. **Toxicologia ambiental: um guia para estudantes**. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da USP, 2025.
- ONDRASEK, G. et al. Metal contamination – a global environmental issue: sources, implications & advances in mitigation. **RSC Advances**, v. 15, n. 6, p. 3904-3927, 2025.

Referências

- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **The implementation of the Polluter Pays principle in the context of the Water Framework Directive**. OECD Environment Working Papers. Paris: OECD Publishing, 2024.
- PADILHA, E. O. *et al.* Consequências da degradação da qualidade do ar no surgimento e agravamento de doenças respiratórias. **Research, Society and Development**, v. 15, n. 1, 2026.
- PEREIRA, M. A. C.; ARAÚJO, J. do N. Monitoramento ambiental de poluentes atmosféricos decorrentes de queimadas na Amazônia Legal: uma revisão integrativa da literatura científica. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 9, p. 11558, 2025.
- PERETO, A. N. V. *et al.* Efeitos deletérios no sistema respiratório causados pela poluição ambiental: uma revisão narrativa. *In: Simpósio de Sustentabilidade e Contemporaneidade*, 12, 2025, Paraná. **Anais Simpósio de Sustentabilidade e Contemporaneidade**. Paraná: Centro FAG, 2025. p. 1-9.
- PLESSL, K.; RUSS, A.; VOLLPRECHT, D. Application and development of zero-valent iron (ZVI) for groundwater and wastewater treatment. **International journal of environmental science and technology**, v. 20, n. 6, p. 6913-6928, 2023.
- PLOWRIGHT, R. K. *et al.* Land-use change, wildlife spillover, and the ecology of emerging zoonotic diseases. **Nature Reviews Microbiology**, v. 22, n. 4, p. 235-249, 2024.
- PORTO, C. C. da C. S. *et al.* Impactos da poluição atmosférica na saúde pública: uma revisão integrativa (2019–2024). **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 7, 2025.
- REALE, E. *et al.* Human biomonitoring and toxicokinetics as key building blocks for next generation risk assessment. **Environment international**, v. 184, p. 108474, 2024.
- RICHARDSON, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, n. 37, p. eadh2458, 2023.
- RIOS, B.; BATISTA, P. F. da S.; CRYSTELLO, D. C. B. Impactos da poluição e alteração de habitat em ecossistemas de água doce: uma revisão bibliográfica. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 8, p. e6568-e6568, 2024.
- ROCHA, S. A. M. Poluição por mercúrio e seus efeitos sobre a saúde humana na região amazônica. **Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)**, v. 18, n. 6, 2025.
- SALVÁ, A. R.; PEREIRA, H. da C.; PORTELLA, R. B. Relação causal entre a ingestão de água fluoretada e coeficiente de inteligência em crianças: uma revisão narrativa da literatura. **Cadernos de Pesquisa do UNIFAA**, v. 3, n. 2, 2025.
- SÁNCHEZ-BAYO, F. Ecotoxicology of pesticides and heavy metals: From cellular mechanisms to ecosystem collapse. **Science of The Total Environment**, v. 912, art. 169-185, 2024.
- SANTOS, A. M. *et al.* Degradação ambiental e a emergência de zoonoses no Brasil: uma revisão integrativa. **Revista de Saúde Pública**, v. 58, art. 34, p. 1-12, 2024.
- SBTOX - Sociedade Brasileira de Toxicologia. **Toxicologia**. 2026. Disponível em: <https://sbtox.org/toxicologia/>. Acesso em: 18 maio 2026.
- SHETTY, S. S. *et al.* Environmental pollutants and their effects on human health. **Heliyon**, v. 9, n. 9, e19496, 2023.
- SHINDE, S. *et al.* Toxicological risk assessment and risk management. *In: Tekade, R. B. (Org.). Public Health and Toxicology Issues in Drug Research*. Academic Press, 2024.
- SIQUEIRA, B. B.; BRESSIANI, T. S. C. O uso de agrotóxicos e os impactos na saúde do trabalhador rural: uma revisão sobre o herbicida glifosato. **Vértices (Campos dos Goitacazes)**, v. 25, n. 2, p. 1-18, 2023.
- SLOOTWEG, J. C. Sustainable chemistry: Green, circular, and safe-by-design. **One Earth**, v. 7, n. 5, p. 754-758, 2024.

Referências

- SOUZA, L. C. *et al.* Ecotoxicological impacts of mining tailings on aquatic fauna: metal bioaccumulation and physiological stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, n. 8, p. 11405-11421, 2025.
- TIMBRELL, J.; BARILE, F. A. **Introduction to Toxicology**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.
- TORMA, R. F.; FERREIRA, H. L. RELAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E AS DOENÇAS RESPIRATÓRIAS: um estudo sistemático da literatura com o uso da bibliometria. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, v. 6, n. 3, 2022.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution**. Nairobi: UNEP, 2021.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches – Emerging Issues of Environmental Concern**. Nairobi: UNEP, 2022.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Exposure Assessment Tools by Routes - Dermal**. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/expobox/exposure-assessment-tools-routes-dermal>. Acesso em: 10 maio 2026.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Exposure Assessment Tools by Routes - Ingestion**. 2026. Disponível em: <https://www.epa.gov/expobox/exposure-assessment-tools-routes-ingestion>. Acesso em: 10 maio 2026.
- VILLA NOVA, J. *et al.* **Biomagnificação de microplásticos na teia trófica e impactos na saúde humana devido ao consumo de peixes: uma revisão**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Católica de Salvador, Salvador, 2025.
- WAN, N. *et al.* Effects of progressive degradation on ecosystem structure and functioning. **Journal of Applied Ecology**, v. 61, n. 4, p. 782-795, 2024.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air pollution and child health: prescribing clean air**. Geneva: World Health Organization, 2018.