

## CONTAMINAÇÃO POR SUBSTÂNCIAS PER- E POLIFLUOROALQUILADAS (PFAS) NA EUROPA: MECANISMOS DE AÇÃO, RISCOS TOXICOLÓGICOS E IMPACTOS NA SAÚDE

CONTAMINATION BY PER- AND POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES (PFAS) IN EUROPE: MECHANISMS OF ACTION, TOXICOLOGICAL RISKS AND IMPACTS ON HEALTH

CONTAMINACIÓN POR SUSTANCIAS PER- Y POLIFLUOROALQUILADAS (PFAS) EN EUROPA: MECANISMOS DE ACCIÓN, RIESGOS TOXICOLÓGICOS E IMPACTOS EN LA SALUD

**Maeve Natalicio Pereira**

Universidade Estadual de Maringá | Maringá, Paraná, Brasil  
ORCID: 0009-0007-4421-3250

**Isabelly Vitoria da Silva Gonçalves**

Universidade Estadual de Maringá | Maringá, Paraná, Brasil  
ORCID: 0009-0000-1743-2414

**Thyago César da Silva Pires**

Universidade Estadual de Ponta Grossa | Ponta Grossa, Paraná, Brasil  
ORCID: 0009-0002-2497-1592

**Gabriel Iamassaki Staquicini de Paula**

Universidade Estadual de Maringá | Maringá, Paraná, Brasil  
ORCID: 0009-0001-7392-7371

**Joyce da Silva Guimarães**

Universidade Federal do Paraná | Curitiba, Paraná, Brasil  
ORCID: 0000-0002-9743-7254

**Yara Maria da Silva Pires**

Universidade Estadual de Maringá | Maringá, Paraná, Brasil  
ORCID: 0000-0003-1602-6566



978-65-84528-60-4



10.53524/lit.edt.978-65-84528-60-4/07

Submissão 26/11/25

Publicação 02/12/25

Como citar

PEREIRA, M. N. et al. Contaminação por substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS) na Europa: mecanismos de ação, riscos toxicológicos e impactos na saúde. //r. FONTES, F. L. L.; SILVA, J. S. (Org). **Ciência, Tecnologia, Inovação e Saberes Aplicados à Saúde**. Teresina: Literacia Científica Editora & Cursos, 2025, p. 65-73.

## RESUMO

**OBJETIVO:** Evidenciar o panorama da contaminação por substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS) na Europa, assim como seus mecanismos, riscos e estratégias de mitigação. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Estudo retrospectivo, documental e descritivo, com coleta de dados de livre acesso no *Forever Pollution Project*. **RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Foram documentados cerca de 22.934 locais contaminados por PFAS na Europa, incluindo mais de 2.300 pontos críticos com concentrações acima de 100 ng/L. Foram identificadas 20 indústrias produtoras, principalmente na Alemanha, França, Reino Unido e Itália, e quase 3.000 unidades emissoras. A remediação pode custar até €2 trilhões em 20 anos, ultrapassando €100 bilhões por ano se não houver restrições. Estudos mostraram que a exposição ocorre por água, alimentos, poeira e produtos de consumo e podem causar diversos danos à saúde. **CONSIDERAÇÕES FINAIS:** Regulamentações mais rígidas e tecnologias eficazes para degradar PFAS são urgentes. Também são necessários estudos na América Latina, pois a maior parte das pesquisas são centradas na América do Norte e na Europa.

**Palavras-chave:** Poluentes orgânicos persistentes. Química ambiental. Toxicidade. Cinética. Remediação.

## ABSTRACT

**OBJECTIVE:** To highlight the panorama of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination in Europe, as well as their mechanisms, risks, and mitigation strategies. **MATERIALS AND METHODS:** Retrospective, documental and descriptive study, with the collection of open-access data from the *Forever Pollution Project*. **RESULTS AND DISCUSSION:** Approximately 22,934 PFAS-contaminated sites were reported in Europe, including more than 2,300 hotspots with concentrations above 100 ng/L. Twenty production facilities were identified, mainly in Germany, France, the United Kingdom and Italy, with nearly 3,000 high emission sites. Remediation may cost up to €2 trillion over 20 years, exceeding €100 billion per year if restrictions are not implemented. Studies indicates that exposure occurs through water, food, dust and consumer products, and is associated with various health harms. **FINAL CONSIDERATIONS:** Stricter regulations and effective technologies for PFAS degradation are urgent. Studies are also needed in Latin America, as most research focuses on North America and Europe.

**Keywords:** Persistent organic pollutants. Environmental chemistry. Toxicity. Kinetics. Remediation.

## RESUMEN

**OBJETIVO:** Evidenciar el panorama de la contaminación por sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) en Europa, así como sus mecanismos de acción, riesgos y estrategias de mitigación. **MATERIALES Y MÉTODOS:** Estudio retrospectivo, documental y descriptivo, con recolección de datos de libre acceso provenientes del *Forever Pollution Project*. **RESULTADOS Y DISCUSIÓN:** Se documentaron alrededor de 22.934 sitios contaminados por PFAS en Europa, incluyendo más de 2.300 puntos críticos con concentraciones superiores a 100 ng/L. Se identificaron veinte industrias productoras, principalmente en Alemania, Francia, Reino Unido e Italia, y cerca de 3.000 unidades emisoras. La remediación podría costar hasta €2 billones en 20 años, superando los €100 mil millones anuales si no se imponen restricciones. Los estudios mostraron que la exposición ocurre a través del agua, alimentos, polvo y productos de consumo, lo que puede causar diversos daños a la salud. **CONSIDERACIONES FINALES:** La implementación de regulaciones más estrictas y tecnologías eficaces para degradar las PFAS son urgentes. También se necesitan estudios en América Latina, ya que la mayor parte de la investigación se centra en Norteamérica y Europa.

**Palabras Clave:** Contaminantes orgánicos persistentes. Química ambiental. Toxicidad. Cinética. Remediación.

## 1 INTRODUÇÃO

O surgimento das substâncias per e polifluoroalquiladas, do inglês *Per- and Polyfluoroalkyl Substances* (PFAS), está intrinsecamente ligado à manipulação e ao processamento do politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon. O PTFE foi descoberto acidentalmente pelo químico da indústria DuPont, Roy J. Plunkett, enquanto pesquisava novas moléculas que pudessem substituir os fluidos refrigerantes usados em geladeiras da época, que eram altamente tóxicos e inflamáveis (Funderburg, 2000; Mhaske *et al.*, 2023).

Durante as tentativas de produção, utilizando cilindros pressurizados, Plunkett observou a formação inesperada de um polímero sólido e branco, que se mostrou extremamente útil, pois apresentava alta tolerância a químicos e solventes, possuía uma superfície deslizante, não era afetado pela umidade. A substância não se degradava quando exposta à luz, nem à elevadas temperaturas por períodos extensos. Apresentava um ponto de derretimento anormal, sendo altamente resistente à degradação (Funderburg, 2000; Mhaske *et al.*, 2023).

Um dos primeiros usos do PTFE foi no Projeto Manhattan, devido à sua resistência à corrosão, inclusive ao gás hexafluoreto de urânio. No entanto, para sua síntese, foi observada que a reação de polimerização do monômero tetrafluoroetileno (TFE) em PTFE revelou-se altamente exotérmica e propensa a explosões, o que dificultava sua produção em larga escala (Funderburg, 2000). Para contornar esse problema, passou-se a utilizar o ácido perfluorooctanóico (PFOA), também chamado de *ou C8*, um tipo de PFAS, que atua como agente auxiliar no processamento, facilitando a fabricação de fluoropolímeros. Além disso, o PFOA também era empregado para auxiliar o PTFE a aderir a superfícies, como nas painéis com revestimento antiaderente (Olsen *et al.*, 2007).

Embora o PTFE em si não seja considerado tóxico, quando aquecido a temperaturas acima de 350°C pode liberar produtos de decomposição, responsáveis pela chamada “febre por vapores de polímeros”. Os sintomas dessa condição são geralmente leves e transitórios. Assim, produtos com revestimento de teflon foram considerados seguros durante muito tempo. Acreditava-se que, por se tratar de um composto estável e resistente à degradação, o PFOA não oferecia risco significativo ao organismo humano. No entanto, ao longo dos anos, estudos têm revelado que essa substância é altamente persistente, bioacumulativa e tóxica (Greenberg, Vearrier, 2015; Correia, Horowitz, 2023).

Os PFAS representam um amplo grupo de compostos químicos sintéticos caracterizado por uma cadeia de átomos de carbono ligado a pelo menos um átomo de flúor. Esta forte ligação carbono-flúor (C-F) confere uma elevada estabilidade química e resistência ambiental e biológica. Devido a sua versatilidade, os PFAS são amplamente utilizados em diversos setores industriais e em produtos de consumo. Quanto às características cinéticas, no organismo humano essas moléculas são reconhecidas metabolicamente como substâncias inertes, o que favorece seu acúmulo. Também apresentam afinidade por proteínas plasmáticas, especialmente pela albumina, permitindo ampla distribuição na corrente sanguínea. Apresentam meia-vida longa e sua principal via de eliminação é renal (Ding *et al.*, 2020).

A exposição elevada aos PFAS tem sido associada a efeitos imunotóxicos, principalmente quando atingem altas concentrações na corrente sanguínea, podendo gerar danos à saúde do ser humano. Entre os efeitos mais evidentes, destacam-se as alterações na imunidade humoral e na imunidade celular. Consequentemente, aumentam a susceptibilidade a infecções e doenças respiratórias, como asma, influenza, COVID-19, dentre outras (Corsini *et al.*, 2024).

Diante desses riscos e de seu impacto à saúde pública e à economia, os países vêm buscando regulamentar os níveis de exposição. Destaca-se que a Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA) estabeleceu parâmetros críticos por meio de valores de referência toxicológicos relacionados à ingestão de PFAS proveniente de alimentos, água, frutos-do-mar e utensílios de cozinha (Corsini *et al.*, 2024).

Segundo a literatura, 4 compostos são citados como os que mais afetam a saúde do ser humano: PFOA, ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS), ácido perfluorononanoico (PFNA) e ácido perfluorohexanossulfônico (PFHxS). Cada um desses PFAS, regulados pela EFSA, apresenta diferentes aplicações industriais e perfis toxicológicos relevantes. O PFOS é amplamente utilizado em espumas para o combate a incêndios e em revestimentos de superfícies de embalagens alimentícias, apresenta elevada afinidade por proteína do sangue e pelo fígado (Suman, Kwak, 2025).

O PFOA é empregado nos revestimentos de utensílios de cozinha, embalagem e produção têxtil, apresenta evidente toxicidade e potencial carcinogênico (Liang, Pan, Bin *et al.*, 2022). O PFNA é aplicado em espumas de incêndio, pigmentação, eletrônica e prevenção de corrosão, sendo conhecido como um desregulador endócrino ambiental (Zhong *et al.*, 2024). O PFHxS também é amplamente utilizado em impermeabilizantes e espumas de combate ao incêndio. Ele tem sido detectado em ambientes aquáticos e estudos alertam para sua bioacumulação em peixes e outras formas de vida marinha (Kreychman *et al.*, 2024).

Recentemente, as atividades regulatórias e legislativas ao redor do globo, apesar de apresentarem diferenças em termos de escopo e aplicação, têm tido um objetivo em comum de reduzir a utilização dos PFAS e incentivar as empresas a aderirem às produções seguras e livres destes compostos. A substituição de uma substância química tóxica é um dos meios mais eficazes para reduzir o risco, entretanto, recentes tentativas de substituição também vêm resultando em toxicidade semelhante, evidenciando necessidades de pesquisas científicas e de alerta à população (Brunn *et al.*, 2023; Figuière *et al.*, 2025).

Como exemplo destas substituições, destacam-se o ácido dímero de óxido de hexafluoropropileno (HFPO-DA) e seu sal de amônio, conhecidos como produtos químicos GenX. Assim, pesquisas indicam que a substituição por outros compostos, cuja toxicidade crônica ainda é pouco compreendida, não representa uma solução real para o problema (Brunn *et al.*, 2023; Figuière *et al.*, 2025).

Observa-se que o uso generalizado de PFAS tem resultado na onipresença desses químicos em todo o ambiente. Devido à crescente preocupação com os danos à saúde humana e à biodiversidade, é necessária uma atualização constante da literatura sobre seus efeitos nocivos, assim como o estabelecimento de regulamentações eficazes para proteger a saúde humana e ambiental em todos os países. À medida que a sociedade é informada sobre a contaminação, impactos e riscos, maiores são as chances de cidadãos, cientistas, governos e empresas reduzirem a exposição e seus impactos (Pelch *et al.*, 2019).

Dessa forma, a fim de evidenciar a problemática da contaminação e riscos dos PFAS, através da análise de dados do continente europeu, este trabalho apresenta conceitos, descreve mecanismos de ação e toxicidade, além de discutir custos e meios para remediação. Este estudo também se propõe a aprofundar o entendimento científico sobre o tema, uma vez que o aprimoramento contínuo das estratégias de enfrentamento e o desenvolvimento de soluções mais eficientes para a proteção da saúde pública e dos ecossistemas são urgentemente necessários.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma pesquisa descritiva, documental, com abordagem retrospectiva. Foram analisados dados de amostragem ambiental de vinte e três países europeus, disponíveis no banco de dados do "Forever Pollution Project". Neste projeto, foram incluídas informações de listas oficiais, diretórios de organizações do setor, relatórios anuais das empresas, custos, portfólios de produtos e fichas de dados de segurança dos produtos.

A coleta e análise dos dados ambientais (água, solo e organismos) presentes na base abordaram um período de 2003 a 2023, conforme as amostras registradas por equipes científicas e agências ambientais da Europa. A base de dados utilizada neste estudo é a versão atualizada (2024) e aprimorada pelo Centro Nacional de Pesquisa Científica da França (CNRS), que inclui dados geolocalizados e valores adicionais de amostragem. A confiabilidade da base de dados é reforçada pelo seu desenvolvimento, que contou com jornalismo investigativo de fronteira cruzada e revisão por especialistas científicos internacionais, como a Agência Europeia do Ambiente (*European Environment Agency*), garantindo a validade e o rigor dos dados.

O conjunto de dados de acesso livre, compilado a partir de múltiplas fontes, incluindo autoridades nacionais e publicações científicas, ofereceu um panorama completo e representativo da contaminação por PFAS em toda a Europa. O projeto também desenvolveu um "Mapa da Poluição Perpétua na Europa", o qual forneceu uma visão abrangente da contaminação ambiental por compostos PFAS em todo o continente.

Para discutir os achados, este trabalho utilizou bases científicas como PubMed, MEDLINE, Scopus e Google Scholar, utilizando artigos publicados entre 2000-2025. Fontes secundárias também foram consultadas, sem restrição de data de publicação, como entrevistas disponíveis no *Science History Institute Digital Collections* e sites governamentais para fornecer contextualização regulatória e histórica.

## 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 3.1 Cenário da contaminação e riscos

Os resultados das análises evidenciaram cerca de 22.934 locais contaminados, onde os níveis de PFAS excedem 10 ng/L, sendo provável que este número represente apenas uma estimativa muito subestimada da extensão real da contaminação na Europa. Esses locais incluem 2.300 pontos críticos onde as concentrações ultrapassam 100 ng/L, níveis potencialmente prejudiciais à saúde humana. Foram identificadas 20 instalações de fabricação (produtores) de PFAS, nas quais a Alemanha se destaca pelo maior número de empresas, totalizando seis. A França aparece em seguida, com quatro empresas listadas, o Reino Unido tem três e a Itália duas. Por fim, Bélgica, Países Baixos, Polônia e Espanha têm uma empresa cada.

Na Alemanha, a atividade é dominada pela indústria química de especialidades e materiais avançados, que atuam na fabricação de fluoropolímeros, intermediários químicos, aditivos e resinas. Há também uma forte presença de tecnologia de materiais de alto desempenho (como têxteis técnicos e dispositivos médicos) e na produção de fluidos de refrigeração e equipamentos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC).

Na Bélgica, a atuação se concentra em manufatura e química, especificamente na produção de fluoropolímeros e outros materiais avançados, como borrachas sintéticas para indústrias automotivas, aeroespaciais e químicas, adesivos para uso industrial e fluidos de precisão para semicondutores e indústria eletrônica. Segundo estudos, as empresas têm enfrentado uma onda de processos judiciais por contaminação por PFAS nos últimos anos, além do que, autoridades da região europeia ordenaram a paralisação temporária de diversos processos de fabricação após a detecção de emissões consideradas acima dos limites estabelecidos. Diante deste cenário, em 2022, uma destas empresas da Bélgica anunciou

que cessaria a fabricação e o uso de todos os PFAS até 2025, incluindo as versões de cadeia curta (Bartley, Fairbrother, 2025).

Nos Países Baixos, predomina o setor da química e a fabricação de fluidos refrigerantes de nova geração. Na Polônia, a indústria está fortemente orientada para a química e, em especial, a produção de fertilizantes (incluindo nitrogenados e complexos) em larga escala. Já na Espanha, o foco está no desenvolvimento de fluoropolímeros e materiais químicos avançados para sustentabilidade. Na França, o setor apresenta grande diversificação, abrangendo produtos de origem biológica, fluidos, refrigeração e diversos polímeros para aplicações industriais. No Reino Unido, a indústria também está voltada para a química de especialidades com ênfase em fluoro, produtos de alto desempenho e fornecimento de fluidos para a refrigeração.

Por fim, na Itália, uma das empresas encerrou as operações em 2018 após declarar falência e seu nome ficou associado a um dos maiores casos de contaminação por PFAS na Europa, com impacto no lençol freático e solo da região do Vêneto. As duas empresas atuavam majoritariamente no setor químico, produzindo compostos especiais, como a produção de intermediários contendo flúor. Seus produtos eram insumos cruciais para diversas indústrias, como a têxtil, farmacêutica e agroquímica, além de fornecer ingredientes para espumas de combate a incêndio e ceras de esqui fluoradas. A fábrica que permanece ativa é um dos centros produtivos químicos mais importantes da Europa para pesquisa e desenvolvimento de materiais como fluorelastômeros e fluidos fluorados, utilizados em produtos que exigem extrema resistência a calor e corrosão. Produtos químicos desta fábrica, incluindo possíveis substitutos dos PFAS, têm sido encontrados no solo, na água, em tecidos vegetais e na fauna silvestre. Sua origem permanece incerta e estudos adicionais são necessários para melhor compreender seus padrões de degradação e potencial bioacumulativo. Em relação às propriedades toxicológicas destes novos compostos, atualmente não existem estudos publicados por pesquisadores independentes, contudo, já foram destacados efeitos adversos à saúde (Bucalenti *et al.*, 2024)

Em adição, foram localizadas quase 3.000 instalações industriais classificadas como usuárias, ou seja, utilizam PFAS em seus processos para fabricar diversos produtos, como plásticos de alto desempenho, tintas, vernizes, agrotóxicos, tecidos impermeáveis, semicondutores e espumas de combate a incêndio. As maiores delas são cerca de 1.000 fábricas de papel, que, sozinhas, libertam entre 31 e 76 toneladas de PFAS para o ambiente diariamente, de acordo com a Comissão Europeia. Os resultados também mostram instalações usuárias de PFAS para fabricação e processamento de metais (N=812 locais), produção de plásticos em formas primárias (N=221), produção de produtos petrolíferos refinados (N=213), acabamento têxtil (N=126) e indústrias químicas e de processamento de couro.

Ainda, como resultado, foi evidenciado que o projeto destaca 4752 locais relacionados a resíduos contendo PFAS, incluindo 2616 estações de tratamento de águas residuais e 1325 aterros sanitários para resíduos não perigosos e perigosos, além de incineradores.

A exposição humana aos PFAS ocorre principalmente por água potável contaminada, considerada a via mais relevante e de maior risco, devido à persistência desses compostos e à ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento. Outra via importante é a ingestão de alimentos, especialmente peixes, mariscos, carne e vegetais contaminados, resultado da bioacumulação ao longo da cadeia alimentar. As exposições secundárias incluem a inalação de poeira e o contato com produtos de consumo que contêm PFAS, como embalagens alimentícias e tecidos impermeabilizados (Ghisi *et al.*, 2019).

Redmon *et al.* (2025) indicam uma forte correlação entre as concentrações de PFAS na água potável e amostras de cerveja, demonstrando que até mesmo este produto apresenta risco, pois a água utilizada no processo de fabricação é a principal via de contaminação por PFAS em cervejas. Por fim, estudos indicam que a exposição ocupacional ocorre principalmente por inalação e ingestão acidental (Ghisi *et al.*, 2019).

A combinação entre estabilidade, mobilidade e potencial de bioacumulação dos PFAS tem contribuído para uma crise ambiental global. As fortes ligações C-F, conferem elevada resistência, por exemplo, à água, ao óleo, produtos químicos e ao calor. Os PFAS de cadeia longa possuem menor mobilidade do que os de cadeia curta, o que dificulta sua remoção do ambiente (Brunn *et al.*, 2023). Também chamados de legados, sua estrutura molecular contém uma cadeia de seis (para ácidos perfluoroalquil sulfônicos), sete (para ácidos perfluoroalquil carboxílicos) ou mais átomos de carbono. Estas grandes moléculas, durante décadas, foram usadas para fabricar diversos produtos, incluindo painéis antiaderentes, embalagens de alimentos descartáveis e tecidos resistentes (Pelch *et al.*, 2019).

Os PFAS têm sido detectados em diversas regiões do mundo, inclusive em amostras de neve e água de degelo de locais remotos, como o Monte Everest, evidenciando sua persistência, mobilidade e alcance global (Miner *et al.*, 2021; Itumoh *et al.*, 2024). Entretanto, estudos na América Latina ainda são limitados.

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, do inglês, *Environmental Protection Agency* – EPA (2025) os PFAS podem ser originados de diversas fontes, incluindo instalações industriais que os produzem ou utilizam, como fábricas de eletrônicos, têxteis e papel. Também podem estar presentes em embalagens alimentícias, como papéis resistentes à gordura, caixas de pizza e sacos de pipoca de micro-ondas. No ambiente doméstico, aparecem em produtos impermeabilizantes usados em carpetes, estofados, roupas, produtos de limpeza, painéis antiaderentes, tintas e selantes. Em produtos de higiene pessoal, podem ser encontrados em alguns xampus, fios dentais e cosméticos.

A contaminação é global, uma vez que esses compostos são liberados no ambiente a partir de atividades de manufatura, descarte inadequado de resíduos e efluentes, bem como pelo uso de espumas de combate a incêndios, especialmente em áreas militares e aeroportuárias. A persistência dessas substâncias no solo e sua posterior lixiviação contribuem para a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, onde são detectadas em concentrações que variam de nanogramas a microgramas por litro. Além das fontes pontuais, como descargas industriais, os PFAS também se dispersam por meio de transporte atmosférico, precipitação e escoamento urbano, o que explica sua presença até mesmo em regiões remotas. Estudos populacionais nos Estados Unidos mostraram que quatro ou mais compostos PFAS foram detectados no sangue de mais de 96% da população, demonstrando a ampla exposição e persistência desses contaminantes no organismo humano (Wee, Aris, 2023; Botelho *et al.*, 2025).

Os PFAS têm sido associados a diversos efeitos nocivos à saúde, incluindo câncer, disfunção do sistema imunológico, danos ao fígado, danos ao desenvolvimento e à reprodução e disfunções hormonais (Pelch *et al.*, 2019)

De acordo com Dalsager *et al.* (2021), foi observada uma associação entre a exposição pré-natal aos PFAS e o risco geral de doenças infecciosas nos primeiros anos de vida. A exposição a PFOS e PFOA estaria associada a infecções do trato respiratório inferior, como pneumonia e bronquite. Os autores também observaram que as concentrações maternas (pré-natal) dessas substâncias estão relacionadas a sintomas como febre em crianças, havendo maiores chances de infecção (otite média, pneumonia, vírus sincicial respiratório e/ou varicela) durante os primeiros 4 anos de vida. Os achados demonstram efeitos a longo prazo destes compostos e sugerem a prevalência de doenças infecciosas leves e graves mesmo em populações com baixa exposição.

Com base em dados epidemiológicos e outras evidências reunidas pelo *C8 Science Panel* (2020), foi identificada uma ligação provável entre a exposição ao C8 e diversas condições de saúde. O painel concluiu, que há uma associação provável entre a exposição ao PFOA e o aumento do colesterol sérico, colite ulcerativa, doença da tireoide, câncer de testículo, câncer de rim e hipertensão induzida pela gravidez. Essas conclusões, derivam de um extenso projeto de pesquisa epidemiológica conduzido pelo C8 Science Panel, que investigou as comunidades do Vale do Médio Ohio (EUA), as quais foram potencialmente expostas ao PFOA liberado pela planta Washington Works da DuPont desde a década de 1950.

Diferentes tipos de PFAS apresentam distintos níveis de toxicidade. No caso do ácido perfluorodecanoico (PFDA), seus mecanismos de ação ainda não são totalmente compreendidos, mas acredita-se que envolva a desfosforilação de quinases e o estresse oxidativo, que ocorre devido à produção excessiva de espécies reativas de oxigênio, as quais são prejudiciais quando acumuladas em resposta a certos agentes (Jain, Bharti, 2025).

Em um estudo realizado com o auxílio de modelos de organóides intestinais, foram comparadas a toxicidade e os mecanismos de ação e cinética do PFOS e do PFOA. Observou-se que o PFOS afetou significativamente a função de absorção, enquanto o PFOA não apresentou esse efeito. Apesar das estruturas químicas semelhantes, o PFOS demonstrou maior toxicidade, possivelmente devido a diferenças nas energias e nos locais de ligação dessas moléculas às proteínas. Por apresentarem estruturas semelhantes às dos ácidos graxos, acredita-se que ambos os compostos possam interferir no metabolismo lipídico. Os resultados indicaram que o PFOS e o PFOA aumentaram a captação de ácidos graxos nos organóides por meio da ativação do receptor PPAR $\alpha$  e da indução de genes relacionados ao metabolismo lipídico. Como o PPAR $\alpha$  é altamente responsável pelo catabolismo de ácidos graxos pela regulação gênica, sua ativação pelo PFOS pode estar diretamente associada à toxicidade intestinal observada (Zhang *et al.*, 2024).

Em 2023 o PFOA foi classificado como carcinogênico para humanos pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC), com base em evidências suficientes de câncer em animais experimentais e fortes evidências mecanísticas em humanos expostos, como alterações epigenéticas e imunossupressão. Também houve evidência limitada de associação com carcinoma de células renais e câncer testicular. Já o PFOS foi classificado como possivelmente carcinogênico para humanos, apoiado por fortes evidências mecanísticas (Zahm *et al.*, 2024).

Estudos com modelos animais demonstraram que a exposição ao PFOA por meio da alimentação pode levar ao desenvolvimento de diversos tumores hepáticos, pancreáticos e uterinos, variando conforme o sexo. Em ratos machos, foram observados tumores hepáticos, nas células de leydig e células pancreáticas acinais, enquanto nas fêmeas, o PFOA induziu adenocarcinomas uterinos e aumentou significativamente a ocorrência de tumores de células acinares pancreáticas (Zahm *et al.*, 2024).

Verifica-se que diferentes metodologias têm confirmado os efeitos tóxicos do PFAS. Estudos epidemiológicos também identificaram alterações epigenéticas, sendo corroborados por estudos *in vitro*, os quais têm utilizado diferentes tipos celulares, como neuroblastos, pré-adipócitos e hepatócitos para investigar os efeitos epigenéticos dos PFAS. Em modelos animais, a exposição precoce a essas substâncias tem sido estudada principalmente em roedores, e, mais recentemente, em modelos aquáticos como o peixe-zebra (zebrafish). Diversos trabalhos também apontam o estresse oxidativo como um mediador central entre as modificações epigenéticas e os efeitos adversos à saúde (Kim *et al.*, 2021).

Considerando que a utilização de filmes formadores de espuma utilizados para combate a incêndio em bases militares e aeroportos configura um meio de disseminação de PFAS no ambiente próximo (Filipović *et al.*, 2015), um estudo demonstrou que militares, atuantes como bombeiros ou lotados em locais com água contaminada por PFAS apresentavam maiores concentrações dessas substâncias no organismo. Além disso, foi observado que o PFOS, um tipo de PFAS, estava

associado a um aumento no risco de ocorrência de câncer testicular (Purdue *et al.*, 2023). Assim, a exposição prolongada a essas substâncias têm levantado preocupações por sua associação com doenças graves.

### 3.2 Estratégias de remediação: Avaliação de custos e tecnologias de eliminação de PFAS

É crescente a preocupação com o uso e a exposição de PFAS tradicionais e de seus substitutos (Pelch *et al.*, 2019). Segundo os dados encontrados, a limpeza das fontes mais concentradas de PFAS de cadeia longa na Europa, incluindo PFOS, PFOA, PFNA e PFHxS, custaria 4,8 bilhões de euros por ano. A sociedade ou, em casos raros, os poluidores terão que arcar com esses custos financeiros mesmo que o uso de PFAS cesse imediatamente.

Os PFAS de cadeia curta e ultracurta, como o TFA, são extremamente móveis e podem entrar com muita facilidade nas células dos seres vivos. Essas moléculas são tão pequenas que conseguem passar pela maioria dos filtros de água. E em relação ao custo, após análise dos dados coletados, os resultados indicam que seria necessário cerca de 100 bilhões de euros por ano para removê-los do meio ambiente e destruí-los, esses custos representam mais de dois trilhões de euros em 20 anos.

Quanto aos processos de eliminação, verifica-se que os processos de purificação do solo, da água subterrânea e de tratamento da água potável são geralmente ineficazes e de alto custo. Segundo a literatura, a eficiência da destruição térmica varia conforme o tipo de técnica, as condições operacionais e as características estruturais dos PFAS, além de fatores como temperatura, presença de oxigênio e química da combustão. A destruição de PFAS por incineração requer temperaturas elevadas, cerca de 980-1200°C, para quebrar suas ligações estáveis, o que resulta em altos custos energéticos e operacionais, tornando o limitado (Meegoda *et al.*, 2022; Longendyke *et al.*, 2022).

Outras formas de eliminação também apresentam vantagens e desvantagens. A oxidação eletroquímica é uma técnica eficiente e ambientalmente limpa para degradar PFAS de cadeia longa como PFOA e PFOS, pois opera em baixas temperaturas e não requer reagentes químicos, no entanto, PFAS de cadeia curta podem ter aumento de concentração ou baixa taxa de remoção. Este método também apresenta alto custo operacional devido ao elevado consumo de energia e ao elevado preço dos eletrodos de diamante, limitando sua aplicação. A tecnologia de plasma não térmico (NTP) é promissora para a destruição de PFAS, apresentando altas taxas de degradação, curto tempo de tratamento e eficiência mesmo na presença de co-contaminantes. No entanto, sua eficácia pode ser reduzida pelo pH, matéria orgânica e nitratos da água, além de acidificar o efluente tratado. Há também formação de PFAS de cadeia curta, o que também restringe seu uso prático (Meegoda *et al.*, 2022). Verifica-se, portanto, que estudos são necessários para o desenvolvimento de novas técnicas eficazes e financeiramente viáveis.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É fundamental compreender plenamente os impactos do PFAS na saúde humana e no ambiente, assim como discutir seus impactos de forma ampla e informada com diversos setores da sociedade. Embora os estudos existentes tenham desempenhado um papel crucial ao evidenciar importantes associações entre a exposição ao PFAS e seus impactos à saúde, ainda assim, muitos apresentam limitações metodológicas. Portanto, é necessário aprimorar tanto o desenho dos estudos quanto as estratégias de enfrentamento da contaminação. Da mesma forma, estudos são necessários na América Latina, uma vez que a maior parte das pesquisas da temática se concentram na América do Norte e na Europa.

Técnicas mais eficazes para a degradação do C8 também são urgentemente necessárias. Assim, aprofundar o entendimento científico e avançar na busca por soluções de remediação eficientes e de baixo custo são passos indispensáveis para mitigar os riscos associados ao C8 e proteger tanto a saúde pública quanto os ecossistemas.

Dentre as limitações do estudo, ressalta-se que a ausência de bases de dados que reúnam a localização das atividades econômicas na União Europeia, assim como a impossibilidade de filtrar resultados do "The Forever Pollution Project" foram obstáculos, impossibilitando a análise individual de alguns dados e cenários específicos.

## REFERÊNCIAS

- BARTLEY, T.; FAIRBROTHER, M. Tackling toxins: Case studies of industrial pollutants and implications for climate policy. **Regulation & Governance**, v. 19, n. 2, p. 329-348, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/rego.12626>
- BOTELHO, J. C. et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure in the U.S. population: NHANES 1999–March 2020. **Environmental Research**, v. 270, 120916, 2025. DOI: [10.1016/j.envres.2025.120916](https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120916)
- BRUNN, H. et al. PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. **Environmental Sciences Europe**, v. 35, p. 20, 2023. DOI: [10.1186/s12302-023-00721-8](https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8).
- BUCALETTI, E.; BAROLA, C; GALARINI, R. Chloroperfluoropolyether carboxylate compounds: A review. **Chemosphere**, v. 357, p. 142045, 2024.
- C8 SCIENCE PANEL. The C8 Health Project – Studies and Results, 2020. Disponível em: <http://www.c8sciencepanel.org/index.html>. Acesso em: 11 de nov. 2025.
- CORREIA, M. S.; HOROWITZ, B. Z. Polymer fume fever. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): **StatPearls Publishing**, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK594276/>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- CORSINI, E.; IULINI, M.; GALBIATI, V. et al. EFSA Project on the use of NAMs to explore the immunotoxicity of PFAS. **EFSA Supporting Publications**, v. 21, n. 8, p. 8926E, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2024.EN-8926>.
- DALSAGER, L. et al. Exposure to perfluoroalkyl substances during fetal life and hospitalization for infectious disease in childhood: A study among 1,503 children from the Odense Child Cohort. **Environment International**, v. 149, p. 106395, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106395>.
- DING, N. et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and their effects on the ovary. **Hum Reprod Update**, v. 26, n. 5, p. 724-752, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/humupd/dmaa018>.
- FIGUIÈRE, R. et al. An overview of potential alternatives for the multiple uses of per- and polyfluoroalkyl substances. **Environmental Science & Technology**, v. 59, n. 4, p. 2031-2042, 2025. DOI: [10.1021/acs.est.4c09088](https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09088)
- FILIPOVIĆ, M. et al. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. **Chemosphere**, v. 129, p. 39-45, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.005>.
- FUNDERBURG, A. C. Making Teflon Stick. **Invention & Technology Magazine**, v. 16, n. 1, 2000. Disponível em: <https://www.inventionandtech.com/content/making-teflon-stick-1>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- GHISI, R. et al. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. **Environmental Research**, v. 169, p. 326-341, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>.
- GREENBERG, M. I.; VEARRIER, D. Metal fume fever and polymer fume fever. **Clinical Toxicology**, v. 53, n. 4, p. 195-203, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3109/15563650.2015.1013548>.
- ITUMOH, E. J. et al. Addressing the persistence of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS): current challenges and potential solutions. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3183-3201, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4su00152d>.
- JAIN, V.; BHARTI, S. Mechanistic insights into long-chain PFAS-induced toxicity: An in silico study using network pharmacology, molecular docking, and molecular dynamics. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 102, n. 12, p. 102261, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102261>.
- KIM, S. *et al.* Epigenetic changes by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). **Environmental Pollution**, v. 279, p. 116929, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116929>.

KREYCHMAN, M. *et al.* Uma revisão comparativa dos mecanismos de toxicidade do ácido perfluorohexanoico (PFHxA) e do ácido perfluorohexanossulfônico (PFHxS) em peixes. **Bioquímica e Fisiologia Comparativas Parte C: Toxicologia e Farmacologia**, v. 279, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.109874>.

LIANG, L.; PAN, Y.; BIN, L. *et al.* Immunotoxicity mechanisms of perfluorinated compounds PFOA and PFOS. **Chemosphere**, v. 291, n. 2, p. 132892, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132892>.

LONGENDYKE, G. K. *et al.* PFAS fate and destruction mechanisms during thermal treatment: a comprehensive review. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 24, p. 196-208, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1EM00465D>.

MEEGODA, J. N. *et al.* A review of PFAS destruction technologies. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 24, p. 16397, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416397>.

MHASKE, S. T.; MOHANTY, J. D.; CHUGH, K. W. Fluoropolymers: brief history, fundamental chemistry. In: LOHRASBI, S.; GHOSH, D. (Org.). **Advanced fluoropolymer nanocomposites: fabrication, processing, characterization and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2023.

MINER, K. R. *et al.* Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest. **Science of The Total Environment**, v. 759, 144421, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144421>.

OLSEN, G. W. *et al.* Half-Life of Serum Elimination of Perfluorooctanesulfonate, Perfluorohexanesulfonate, and Perfluorooctanoate in Retired Fluorochemical Production Workers. **Environmental Health Perspectives**, v. 115, n. 9, p. 1298-1305, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.10009>.

PELCH, K. E. *et al.* PFAS health effects database: Protocol for a systematic evidence map. **Environment international**, v. 130, p. 104851, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.045>

PURDUE, M. P. *et al.* A nested case-control study of serum per- and polyfluoroalkyl substances and testicular germ cell tumors among U.S. Air Force servicemen. **Environmental Health Perspectives**, v. 131, n. 7, p. 77007, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1289/EHP12603>.

SUMAN, T. Y.; KWAK, I. S. Compreensão atual dos padrões de bioacumulação humana e efeitos na saúde da exposição ao sulfonato de perfluorooctano (PFOS). **Journal of Hazardous Materials**, v. 487, p. 137249, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137249>.

WEE, S. Y.; ARIS, A. Z. Environmental impacts, exposure pathways, and health effects of PFOA and PFOS. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 267, 115663, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115663>.

ZAHM, S. *et al.* Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. **The Lancet Oncology**, v. 25, n. 1, p. 16-17, 2024. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8).

ZHANG, W. *et al.* PFOA/PFOS facilitated intestinal fatty acid absorption by activating the PPAR $\alpha$  pathway: insights from organoids model. **Environment & Health**, v. 2, n. 2, p. 85-94, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00129>.

ZHONG, J.; ZHANG, L.; CHEN, K. *et al.* Environmentally relevant concentration PFNA promotes degradation of SMAD7 to drive progression of ovarian cancer via TGF- $\beta$ /SMADs signaling pathway. **Ecotoxicol Environ Saf**, v. 284, p. 116907, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116907>.