

1. Introdução

Esta ficha informativa fornece um resumo dos seguintes aspectos: i) a invenção e aplicação de PFAS, ii) o descobrimento dos efeitos nocivos à saúde humana, iii) a redução de PFAS e iv) os impactos ambientais. As PFAS são uma família de milhares de produtos químicos que variam amplamente em suas propriedades físicas e químicas, bem como em seus riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente. As características físicas e químicas exclusivas das PFAS lhes conferem propriedades de repelência a óleo, água, manchas e solo, estabilidade química e térmica, bem como redução de atrito a uma variedade de produtos. Essas substâncias têm aplicações em muitas indústrias, incluindo a indústria aeroespacial, de semicondutores, médica, automotiva, construção civil, eletrônica e aviação, bem como em produtos de consumo (como tapetes, roupas, móveis, equipamentos externos e embalagens de alimentos) e de combate a incêndios (3M Company 1999a; Buck et al. 2011; KEMI 2015a; USEPA 2017b). Informações adicionais estão disponíveis no Guia Técnico.

As PFAS têm seguido um padrão de descoberta e conscientização similar ao exibido por muitos outros contaminantes ambientais antropogênicos. A Figura 1 fornece uma linha de tempo geral da ocorrência de PFAS e conscientização sobre as mesmas, a qual inclui as seguintes categorias: 1) síntese / desenvolvimento; 2) produção comercial; 3) preocupações referentes à de saúde; 4) detecção no meio ambiente; e 5) reduções / alternativas.

O ITRC desenvolveu uma série de fichas informativas que resumem a ciência recente e tecnologias emergentes referentes às PFAS. As informações apresentadas nesta ficha informativa e em outras sobre PFAS encontram-se descritas em maiores detalhes no **ITRC PFAS Technical and Regulatory Guidance Document (Guia Técnico)** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>).

Esta ficha informativa fornece uma visão geral dos seguintes aspectos:

- descoberta e desenvolvimento de PFAS;
- detecção no meio ambiente;
- preocupações emergentes relacionadas aos efeitos de PFAS na saúde humana;
- esforços para reduzir o uso, substituição ou ambos;
- potenciais maiores fontes de liberação para o meio ambiente.

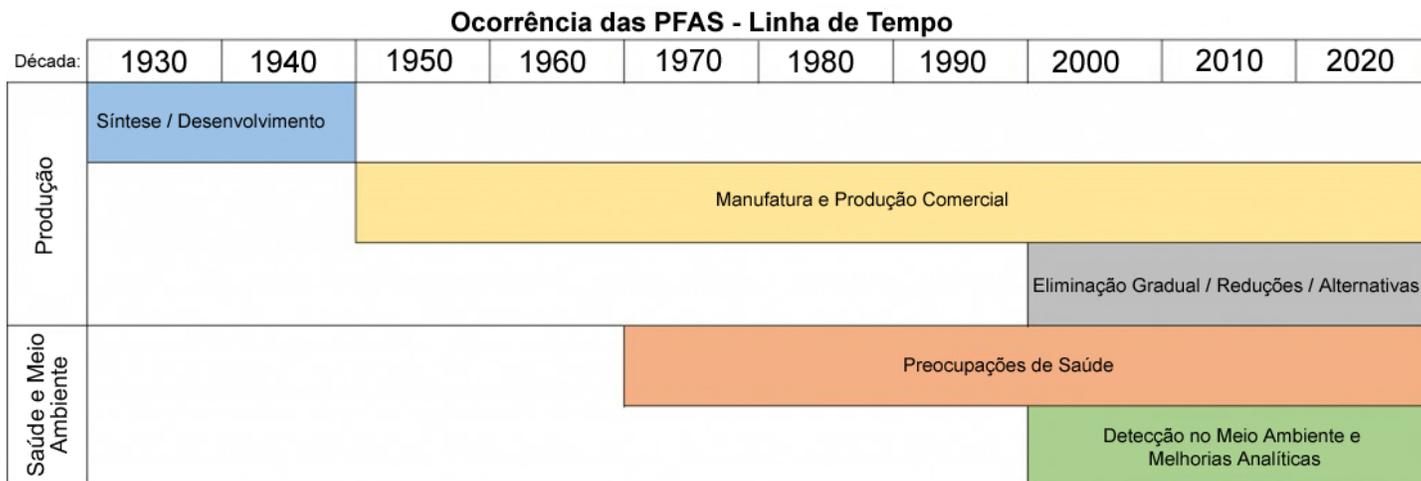


Figura 1. Linha de Tempo Geral da Ocorrência de PFAS e Conscientização sobre estas Substâncias.

Esta figura fornece uma indicação geral da ocorrência de PFAS e de conscientização sobre as mesmas por década, embora algumas atividades poderiam ter ocorrido antes ou depois das datas indicadas nessa linha de tempo. Atividades e eventos mais específicos estão descritos em maiores detalhes no Guia Técnico. "Reduções / Alternativas" refere à redução em produção / uso, incluindo outras PFAS que vêm substituindo os compostos químicos eliminados ou banidos.

Fonte: J. Hale, Kleinfelder. Usado com permissão. PFAS-1, Figura 2-1.

Histórico e Uso de Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) Encontradas no Meio Ambiente *cont.*

2 Descoberta e Fabricação

A química das PFAS foi descoberta no final da década de 1930. Desde a década de 1950, muitos produtos comumente usados pelos consumidores e pela indústria foram fabricados com ou a partir de PFAS. Dois processos principais, fluoração eletroquímica (ECF) e fluorotelomerização, foram (e ainda são) usados para fabricar substâncias PFAS que contenham cadeias perfluoroalquiladas: polímeros fluorados de cadeia lateral, ácidos perfluoroalquilados e surfactantes polifluoroalquilados (USEPA 2003b; Benskin, DeSilva e Martin 2010 ; KEMI 2015b; OCDE 2018). A **Tabela 1** resume os tipos de ácidos perfluoroalquilados (PFAAs) produzidos por esses processos. Mais de 600 processos intermediários têm sido utilizados para produzir certas PFAS e seus produtos finais associados.

Tabela 1. Processos de fabricação e potenciais PFAAs produzidos

| Processo de manufatura | Substâncias polifluoradas comumente encontradas | Potenciais PFAAs Produzidos |
|-------------------------|---|------------------------------------|
| Fluorotelomerização | FTSA ¹ , FTCA ² e FTOH | PFCA lineares ³ |
| Fluoração eletroquímica | FASE & FASAA | PFCA e PFSA ramificados e lineares |

¹ Fluorotelômero sulfonato: por exemplo, pode ser encontrado em locais de espuma formadora de película aquosa (AFFF); ² Ácidos carboxílicos fluoroteloméricos: por exemplo, ácido 5:3 pode ser encontrado no lixiviado de aterros; ³ Em certos casos, podem produzir uma mistura de carboxilatos perfluoroalquilados lineares e ramificados (PFCA)

Glüge et al. (2020) categorizaram as PFAS por tipo de uso, de acordo com as suas aplicações industriais e uso na prática, identificando mais de 200 tipos de uso para mais de 1.400 PFAS. Uma pesquisa da indústria focando em três fabricantes de PFAS que utilizam o processo de fluorotelomerização, reportada em Buck et al. (2021), identificou que apenas 256 das 4.700 PFAS com Números de Registro CAS são relevantes comercialmente, sendo que outras são de menor importância ambiental, mas com potencial ocorrência no meio ambiente. Entretanto, outras PFAS, fabricadas pela ECF e por outros produtores, também podem ser relevantes comercialmente.

3 Preocupações Emergentes Ambientais e de Saúde

Conscientização dos Impactos na Saúde Pública

O conhecimento da presença de ácidos perfluoroalquilados (PFAA) pode ser atribuído a estudos ocupacionais realizados na década de 1970 que reportaram detecções de algumas PFAS no sangue de trabalhadores expostos, e a outros estudos na década de 1990 que relataram detecções no sangue da população humana em geral (Buck et al. 2011). Nos últimos anos, a presença de vários PFAA de cadeia longa (PFOA, PFOS, PFNA e PFHxS) foi detectada na faixa de poucas partes por bilhão (ppb, equivalente a nanogramas por mililitro (ng/ml)) no soro sanguíneo de quase todos os residentes dos Estados Unidos e de outras nações industrializadas (Kato 2015; CDC 2018). Essas PFAS estão presentes independentemente do fato de essas pessoas terem sido expostas no local de trabalho ou não, provavelmente devido ao uso generalizado de PFAS em produtos de consumo e indústrias (Kannan et al. 2004; Kärman et al. 2006; Olsen et al. 2003). As concentrações de PFAS (especialmente PFOS) no sangue humano vêm diminuindo constantemente desde 2000 (ATSDR 2020a) com a eliminação voluntária de processos químicos geradores de compostos perfluorooctânicos por um grande fabricante dos EUA.

Estudos disponíveis ao público sobre saúde e toxicidade limitam-se a apenas uma pequena fração de PFAS, sendo que as tecnologias analíticas modernas e comercialmente disponíveis são geralmente apenas capazes de identificar e quantificar cerca de 70 PFAS, entretanto, o número vêm aumentando. Enquanto isso, a ATSDR está realizando um estudo nacional de PFAS em diversos *sites*, visando avaliar os impactos à saúde derivados de PFAS presentes na água potável (ATSDR 2020 Ref#1862).

Conscientização e Detecção no Ambiente

Embora algumas PFAS tenham sido fabricadas desde a década de 1950, as PFAS não foram amplamente documentadas em amostras ambientais até o início dos anos 2000, pois os testes de PFAS não estavam amplamente

Histórico e Uso de Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) Encontradas no Meio Ambiente *cont.*

disponíveis até essa época. Desde os anos 2000, métodos analíticos foram (e continuam sendo) desenvolvidos com limites de detecção cada vez mais baixos na água que correspondem aos níveis de potenciais efeitos à saúde humana.

Inicialmente, as investigações se concentraram principalmente nas contaminações de grande porte oriundas de fontes de fabricação e nos tipos de uso, como locais de uso de espuma de combate a incêndios. Entretanto, desde o início dos anos 2000, a ocorrência de PFAS no meio ambiente tem sido uma área de pesquisa muito ativa, com ocorrência de certas PFAS relatadas em uma ampla variedade de matrizes (Kannan et al. 2004; Yamashita et al. 2005; Higgins et al. . 2005; Rankin et al. 2016). Com a disponibilidade de métodos analíticos mais sensíveis, as PFAS (especialmente PFAA) vêm sendo amplamente detectadas em todo o mundo. Testes realizados no suprimento de água potável em toda parte dos EUA em 2012, sob a *Third Unregulated Contaminant Monitoring Rule* (UCMR3) da USEPA, levaram a quatro PFAAs adicionais (PFHpA, PFNA, PFBS, PFHxS) ganhar maior atenção. Amostragens de acordo com a UCMR5 estão ocorrendo entre 2023 e 2025, incluindo 29 PFAS (USEPA 2021 Ref#2672).

Em 2016, a USEPA emitiu um *Lifetime Health Advisory* (LHA) para dois PFAA mais amplamente detectados, PFOA e PFOS. O limite do LHA foi fixado em 70 nanogramas por litro (ng/L, equivalente a partes por trilhão [ppt]) na água potável, sendo aplicável a PFOS e PFOA individualmente ou em qualquer combinação (USEPA 2016c, d). Desde a publicação da UCMR3 e do LHA, outras substâncias polifluoroalquiladas estão recebendo maior atenção e muitas agências reguladoras estaduais agora solicitam ou exigem testes para uma lista extensa de PFAAs de cadeias longa e curta e para alguns precursores potenciais de PFAAs, como fluorotelômeros, conforme ilustrado abaixo na **Figura 2**. Desde junho de 2022, a USEPA vem emitindo avisos de saúde provisórios referentes à presença de PFOA e PFOS na água potável (USEPA 2022 Ref#2311). Estes avisos substituem os valores estabelecidos pela USEPA publicados em 2016. Além disso, em junho de 2022, a USEPA emitiu avisos de saúde definitivos referentes à presença de produtos químicos como GenX e PFBS na água potável (USEPA 2022 Ref#2311). Consultar a Tabela de Valores PFAS para Água e Solo do ITRC, publicada na página de fichas informativas referentes a esses valores (<https://pfas-1.itrcweb.org/fact-sheets>).

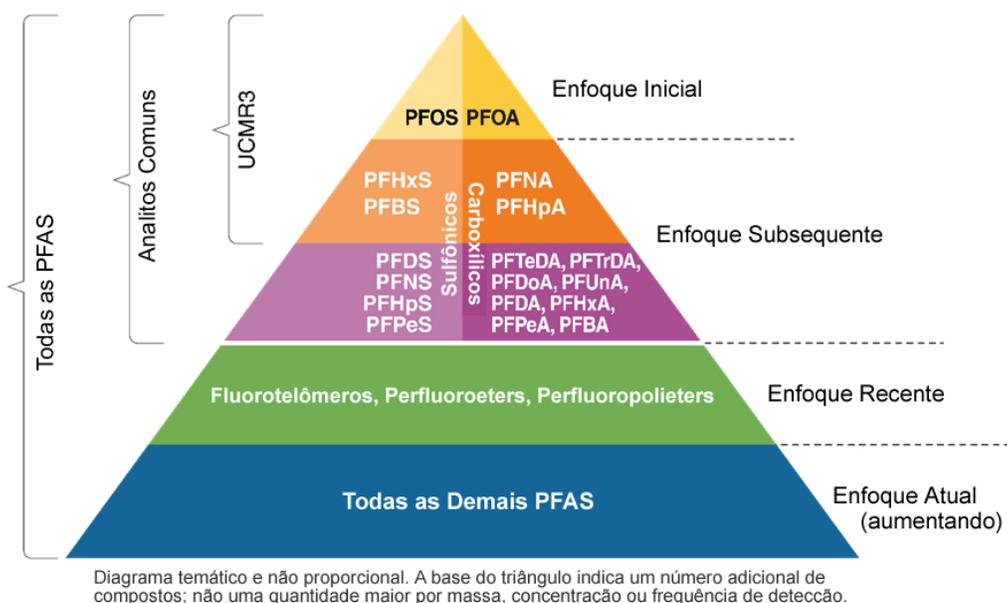


Figura 2. Conscientização emergente e ênfase na ocorrência de PFAS no meio ambiente.

Fonte: J. Hale, Kleinfelder. Usado com permissão.

Eliminação gradual de PFAS de cadeia longa

Devido a preocupações com os potenciais impactos à saúde e ao meio ambiente, houve uma redução dos índices de fabricação e uso de certos PFAA de cadeia longa. PFAA de cadeia longa incluem PFCA com oito ou mais carbonos plenamente fluorados (por exemplo, PFOA) e sulfonatos perfluorados (PFSA) com seis ou mais carbonos plenamente fluorados (por exemplo, PFHxS e PFOS), seus sais e compostos precursores capazes de formar PFAA de cadeia longa (Buck et al. 2011; OCDE 2013; Wang, Cousins, et al. 2015).

Histórico e Uso de Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) Encontradas no Meio Ambiente *cont.*

- Em maio de 2000, a 3M, principal fabricante mundial e única fabricante norte-americana de PFOS, anunciou a eliminação voluntária de PFAA de seis, oito e dez átomos de carbono, que incluíam PFOS, PFHxS, PFOA e precursores relacionados. (USEPA 2003b; USEPA 2017e; 3M Company 2017).
- Desde 2002, a USEPA emitiu várias *Significant New Use Rules* (SNURs) como parte da *Toxic Substances Control Act* (TSCA) exigindo que a USEPA seja notificada antes de qualquer fabricação, uso e/ou importação de certas PFAS quimicamente relacionadas (USEPA 2020c).
- Em janeiro de 2006, a USEPA iniciou o *PFOA Stewardship Program* (USEPA 2006b) no qual as oito principais empresas de fabricação ou processamento dessas substâncias se comprometeram a reduzir o uso de PFOA, outros PFCA de cadeia longa e precursores relacionados (USEPA 2017e).
- A Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) é um tratado das Nações Unidas, assinado em 2001, com o objetivo de reduzir ou eliminar a produção, uso e liberação dos mais importantes POPs. Após essa data, o tratado foi retificado para incluir PFOS e PFOA (KEMI 2004; KEMI 2015 Ref#658; USEPA 2017 Ref#929).

O aumento da produção internacional de PFAS tem potencialmente anulado a redução antecipada em decorrência da eliminação gradual do uso dessas substâncias nos Estados Unidos (OECD 2015 Ref#742). A importação nos Estados Unidos de materiais contendo PFAS sujeitas à eliminação gradual foi restringida através da publicação de uma *Significant New Use Rule* (USEPA 2021 Ref#3343). Existem no mercado numerosos rótulos e certificações relacionados à redução ou eliminação de PFAS de produtos e materiais, porém, existe uma grande variação nos termos usados para indicar o teor de PFAS, conforme resumido na Tabela 2-8 do Guia Técnico.

Compostos Químicos Alternativos

Os fabricantes vêm desenvolvendo tecnologias de substituição, incluindo a reformulação de substâncias de cadeia mais longa ou substituindo-as por produtos químicos não fluorados, tecnologias alternativas ou perfluoroalquilados de cadeia mais curta ou substâncias polifluoradas. Algumas PFAS alternativas incluem, mas não limitam-se a compostos produzidos com ECF e fluorotelomerização, como: FTOH, derivados à base de PBSF, ácidos per e polifluoroalquilados (por exemplo, produtos químicos GenX e ADONA) e outros tipos de PFAS (Hori et al. . 2006; OCDE 2007; Herzke, Olson e Posner 2012; Wang, Cousins, et al. 2013; Wang, Cousins, et al. 2015; Holmquist et al. 2016).

Muitas alternativas às PFAS são estruturalmente similares aos seus predecessores e fabricadas pelas mesmas empresas (CONCAWE 2016; Wang et al. 2015 Ref#875). Informações disponíveis ao público sobre a maioria dos produtos químicos substitutos são limitadas (Wang et al. 2015 Ref#875; RIVM 2016; OECD 2015 Ref#742). Informações adicionais relacionadas aos produtos químicos alternativos podem ser encontradas no Guia Técnico.

As PFAS são usadas em muitas aplicações industriais e de consumo que podem afetar o meio ambiente ou receptores, a vários níveis e através de diversos mecanismos.

Alguns usos de PFAS estão resumidos na Tabela 2-4 do Guia Técnico, incluindo, mas não limitando-se às seguintes áreas:

- Construção Civil
- Cabeamento e Fiação
- Acabamento e Galvanização de Metais
- Surfactantes Industriais e Produção de Fluoropolímeros
- Produtos e Embalagens de Papel
- Industrias de Fotolitografia / Semicondutores
- Têxteis, Couro e Vestuário (Incluindo Carpetes e Móveis)

4 Liberação de PFAS para o Meio Ambiente

Os mecanismos de liberação nas instalações de fabricação primária e secundária incluem emissões atmosféricas e dispersão no ar, derramamentos e descarte de resíduos de fabricação e efluentes.

Histórico e Uso de Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) Encontradas no Meio Ambiente *cont.*

Potenciais impactos ao ar, solo, águas superficiais, águas pluviais e águas subterrâneas existem não apenas nas áreas de liberação, mas potencialmente em toda a área circundante (Shin et al. 2011).

A **Figura 3** ilustra o ciclo de vida conceitual de PFAS.

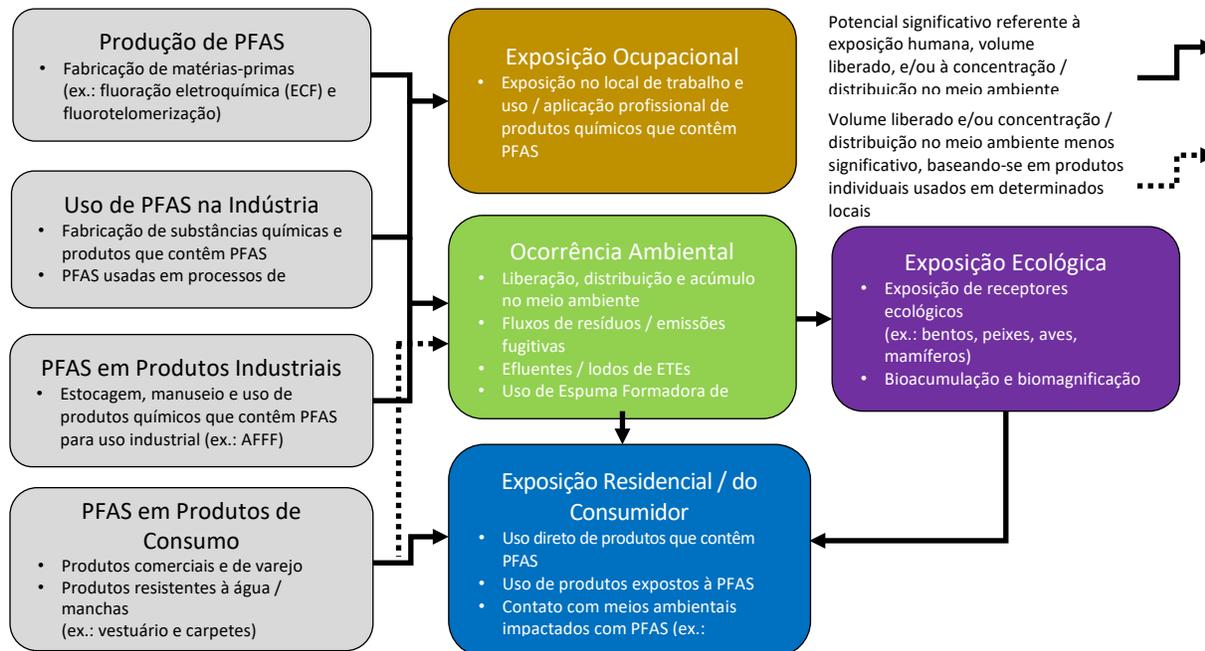


Figura 2. Usos generalizados de substâncias PFAS e exposição relativa, bem como potencial de impacto ambiental a partir do seu ciclo de vida.

Fonte: PFAS-1, Figura 2-2.

5 Referências e Acrônimos

As referências citadas nesta ficha informativa e em outros documentos podem ser encontradas em <https://pfas-1.itrcweb.org/references/>. Números de referência são incluídos nesta ficha informativa para citações não exclusivas na lista de referência do Guia Técnico.

Os acrônimos utilizados nesta ficha informativa e no Guia Técnico podem ser encontrados em <https://pfas-1.itrcweb.org/acronyms/>.



Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) - Contatos

Sandra Goodrow • New Jersey Department of Environmental Protection
609-940-4164 • Sandra.Goodrow@dep.nj.gov

Kristi Herzer • Vermont Department of Environmental Conservation
802-461-6918 • Kristi.Herzer@vermont.gov

Setembro de 2023