

1 Introdução

Esta ficha informativa resume as informações técnicas emergentes sobre o risco e gestão de biossólidos (<https://www.epa.gov/biosolids>) impactados por substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS). As informações nesta ficha informativa baseiam-se no conteúdo do Guia Técnico (os números das seções estão incluídos no texto desta ficha) e incluem uma discussão de tópicos significativos em que a gestão e o uso de biossólidos contendo PFAS podem disseminar PFAS no meio ambiente.

As PFAS oriundas de diversas fontes podem ser transportadas e agregadas em lodos gerados por estações de tratamento de efluentes (ETE), criando assim fontes de liberação secundárias em áreas onde os biossólidos são produzidos, aplicados e enviados para disposição. A importância relativa dessas formas de liberação varia com base na composição da substância PFAS, no(s) mecanismo(s) de liberação (como por exemplo, taxa, frequência e duração de aplicação para biossólidos aplicados no solo) e nos controles ambientais empregados ao longo deste ciclo de vida. Consultar as Seções 2.1 e 2.6.4 para obter maiores informações.

A composição de PFAS em biossólidos é uma função das diferentes fontes do volute tratado na ETE e dos processos utilizados na estação (Chen, Lo e Lee 2012; Oliaei, Kriens e Kessler 2006; Frömel et al. 2016; Schultz et al. 2006) . Impactos mais significativos estão associados ao lançamento de efluentes industriais. De acordo com as informações disponíveis, PFAS não são adicionadas a biossólidos durante o processamento ou aplicação dos mesmos.

A exposição a biossólidos contendo PFAS pode ocorrer durante (1) o processo de produção de biossólidos, (2) o gerenciamento de biossólidos contendo PFAS, (3) o uso de, ou contato com produtos comerciais e de consumo contendo biossólidos contendo PFAS, ou (4) a exposição (humana ou ecológica) a matrizes ambientais que foram impactadas por biossólidos contendo PFAS, como por exemplo, solo, água subterrânea, plantas e biota. A importância relativa destas exposições também deve variar consideravelmente.

2 Liberação ao Meio Ambiente Associada a Abordagens de Manejo

A liberação de PFAS para o meio ambiente tem sido associada ao gerenciamento de biossólidos através da aplicação no solo como fertilizante ou através do uso ou descarte em aterros. Alguns sólidos contaminados por PFAS são ou foram gerenciados por meio de incineração, entretanto, conforme descrito mais detalhadamente na Seção 12.4, a incineração é um tópico de estudo atual que tem por objetivo obter um melhor entendimento sobre o destino de substâncias PFAS, devido à possível combustão incompleta e geração de subprodutos (USEPA 2020 Ref#1919).

APLICAÇÃO NO SOLO

PFAS, como por exemplo, ácidos carboxílicos perfluoroalquilados (PFCA) e ácidos sulfônicos perfluoroalquilados (PFSA) (ver Seção 2.2.3.1), foram detectados no lodo de esgoto doméstico (Higgins et al. 2005; Yoo et al. 2009) (ver abaixo e a Seção 6), sendo que cerca de 43% do lodo de esgoto produzido nos Estados Unidos é aplicado em terras agrícolas na forma de biossólidos (USEPA 2023 Ref#2347). Portanto, o uso de biossólidos como corretivo do solo pode introduzir PFAS no meio ambiente através da sua aplicação no solo, potencialmente levando à migração de PFAS a águas superficiais através do escoamento ou a água subterrânea por infiltração (Lindstrom et al. 2011 Ref#306). O impacto em águas superficiais ou subterrâneas depende dos seguintes fatores: quantidade e composição das PFAS presentes nos biossólidos, propriedades do solo, taxa de infiltração, práticas de aplicação no solo, uso do solo, precipitação, clima e declive do terreno. Concentrações de PFAS podem ser elevadas em águas superficial e subterrânea nas proximidades de campos agrícolas que receberam biossólidos contaminados por PFAS oriundos de lançamentos industriais durante um longo período de tempo (Washington et al. 2010). Outros estudos indicam que potenciais liberações de PFAS, a partir de biossólidos municipais gerados por ETE, que não recebem lançamentos industriais de efluentes contendo PFAS, podem apresentar um risco muito menor para a qualidade da água subterrânea, dependendo da história do local e do contexto hidrogeológico (Gottschall et al. 2017; Pepper et al. 2021).

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 **Guia Técnico Técnica e Regulatória do ITRC sobre PFAS (Guia Técnico)** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>).

Esta ficha informativa descreve questões relacionadas a biossólidos contendo PFAS, incluindo:

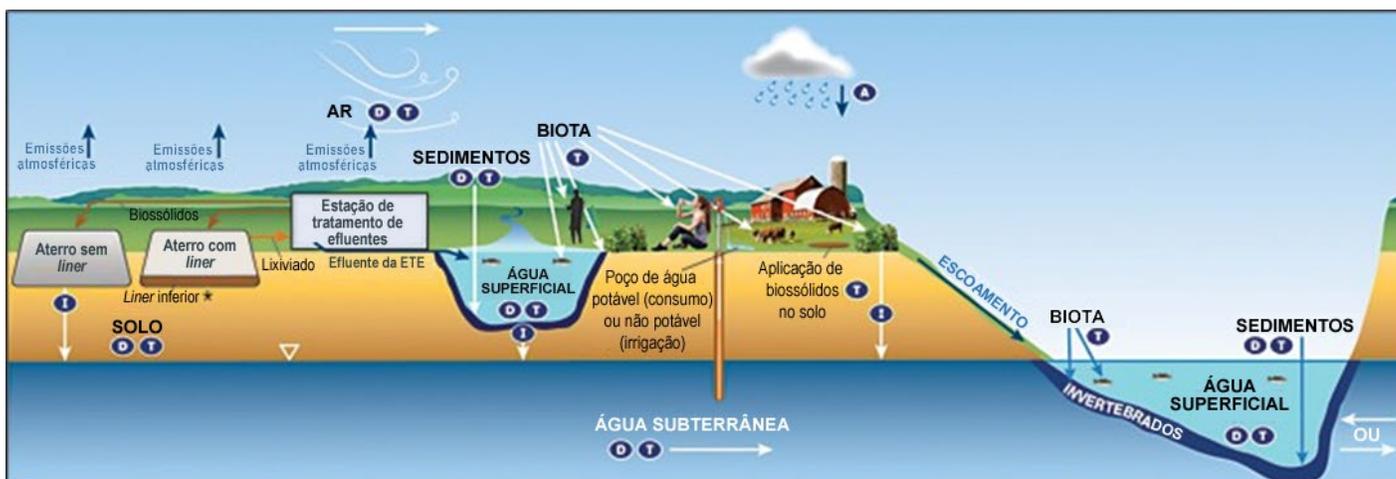
- Liberação no meio ambiente associada a abordagens de gerenciamento;
- Mobilidade, lixiviação e transporte;
- Ocorrência;
- Amostragem e análise;
- Tratamento;
- Regulamentos e diretrizes.

ATERROS

Os biossólidos podem ser descartados em aterros ou, dependendo dos requisitos legais existentes, os aterros podem utilizar como materiais de cobertura os lodos de ETE e produtos derivados de lodos (como biossólidos) (Pohland e Graven 1993), os quais são potenciais fontes de PFAS. Outras fontes da ocorrência de PFAS em aterros estão descritas na Seção 2.6.3.

Os biossólidos depositados em aterros podem ser uma fonte de PFAS que pode migrar para o lixiviado dessas instalações, sendo que já foi demonstrado que o lixiviado gerado em alguns aterros é uma fonte de liberação de PFAS para o meio ambiente (Busch et al. 2010; Eggen, Moeder e Arukwe 2010), embora os processos de destino e transporte de PFAS a partir de aterros para o lixiviado não sejam bem compreendidos até o presente momento. Os processos de manejo de lixiviados têm implicações quanto ao transporte e destino final de PFAS. Se a camada de base do aterro (*liner*) ou os sistemas de coleta de lixiviados falharem, as PFAS poderão adentrar diretamente no meio ambiente. O lixiviado coletado de aterros é normalmente tratado no local, ou transportado para uma ETE ou lagoas de evaporação. O tratamento de lixiviado por meio de ETE é comum antes do seu lançamento em águas superficiais ou distribuição para uso agrícola ou comercial (Lang 2016 Ref#667). No entanto, as tecnologias padrão de ETE são geralmente ineficazes na redução ou eliminação de PFAS (Hamid e Li 2016; Ahrens et al. 2016 Ref#182; CRC CARE 2017 Ref#449). Consequentemente, lançamentos do lixiviado de aterros, mesmo que tratados em ETE, podem ser uma fonte significativa de geração de algumas PFAS para o meio ambiente (Ahrens et al. 2016 Ref#182; CRC Care 2017 Ref#449). Consultar a Seção 2.6.3 para obter mais informações.

A **Figura 1** mostra um modelo conceitual do *site* (MCS) para dispersão de PFAS em biossólidos aplicados ao solo, usados como cobertura de aterros ou descartados em aterros. Os componentes do modelo conceitual estão abordados na Seção 10.2.1.



* Poderá ocorrer o vazamento de lixiviado do aterro no caso de danos à integridade do *liner*

Legenda: A Deposição Atmosférica D Difusão/Dispersão/Advecção I Infiltração T Transformação de Precursores (abiótica/biótica)

Figura 1. MCS para aterros e ETEs

Fonte: Adaptada da figura de L. Trozzolo, TRC, usada com permissão. PFAS-1, Figura 2-22.

3 Mobilidade, Lixiviação e Transporte

Os biossólidos impactados por PFAS, aplicados no solo ou manejados em aterros, estão sujeitos a processos de transporte. O destino e os processos de transporte e distribuição de PFAS no meio ambiente estão abordados na Seção 5.3.3. As PFAS presentes em solos não saturados estão sujeitas à lixiviação vertical durante eventos de precipitação, inundação ou irrigação, os quais promovem a dissolução e migração da massa de contaminantes (Sepulvado et al. 2011; Ahrens e Bundshuh 2014; Sharifan et al. 2021). Este processo pode resultar no transporte de PFAS do solo superficial para águas subterrâneas e superficiais, uma vez que a contaminação por PFAS de biossólidos geralmente envolve sua aplicação na superfície do solo (Gellrich, Stahl e Knepper 2012; Anderson, Adamson e Stroo 2019; Galloway et al. 2020; Borthakur et al. 2022). A lixiviação também é potencialmente relevante na absorção por plantas, assim como no transporte de PFAS presentes em resíduos de aterro sem controle adequado de lixiviados (Benskin et al. 2012 Ref#10; Yan et al. 2015 Ref#278; Lang et al. 2017).

A migração de PFAS de solos rasos para a água subterrânea é influenciada por vários processos interativos, que podem aumentar ou limitar os índices de lixiviação de PFAS. O potencial de lixiviação será aumentado em áreas com elevados índices de infiltração de água, podendo incluir fontes naturais de água - como a precipitação, ou fontes artificiais, como irrigação. A espessura da zona não saturada (profundidade até o lençol freático) também afetará o potencial para lixiviação. Esses fatores são consistentes com outros contaminantes (não PFAS) em solos rasos. Por outro lado, conforme descrito na Seção 5.2, vários processos específicos de substâncias PFAS (como o particionamento de PFAS em fases sólidas e a adsorção na interface ar-água) potencialmente limitam a magnitude da lixiviação de PFAS do solo raso para as águas subterrâneas (Brusseau e Guo 2022 Ref#2276; Brusseau 2020 Ref#1837).

4 Absorção por Plantas e pela Biota

A aplicação de biossólidos municipais ou industriais como corretivo de solo pode resultar na transferência de PFAS para o solo (Sepulvado et al. 2011). Estas PFAS podem então ser em parte absorvidas por plantas e organismos do solo (Yoo et al. 2011). Há indicações de que os ácidos perfluoroalquilados (PFAA) podem entrar na cadeia alimentar através do uso de solo corrigido com a aplicação de biossólidos (Lindstrom et al. 2011 Ref#306; Blaine et al. 2013 Ref#259; Blaine et al. 2014 Ref#1334; Navarro et al. 2017). Os animais podem apresentar concentrações elevadas de PFAS em seus tecidos se forem alimentados com silagem oriunda de campos onde foram aplicados biossólidos contendo PFAS (Lindstrom et al. 2011 Ref#306; Skutlarek, Exner e Farber 2006). Consultar as Seções 5.6 e 9.

A absorção de PFAS tem sido bem documentada em diferentes espécies nativas e exóticas. A maioria desses estudos concentrou-se na absorção do ácido perfluorooctanóico (PFOA) e ácido perfluorooctano sulfônico (PFOS) por culturas agrícolas, embora já tenha sido demonstrado que muitas outras PFAS estão sujeitas à absorção por plantas. O índice de absorção por plantas é específico para cada substância PFAS e tipo de solo. Wang et al. (2020 Ref#1890) identificaram pelo menos 16 estudos de campo normalmente focados na absorção associada a fontes pontuais de PFAS. Fatores de bioconcentração (BCF) e fatores de bioacumulação (BAF) para certas PFAS em plantas selecionadas estão exibidos na Tabela 5-2 (consultar as *External Data Tables* em <https://pfas-1.itrcweb.org>).

Ao utilizar modelos ambientais de destino e transporte para estimar concentrações no ponto de exposição (EPC) na biota, a modelagem deve se concentrar na parte do organismo que pode ser consumida por seres humanos ou por receptores ecológicos. As substâncias PFAS geralmente se ligam a proteínas e se acumulam em tecidos ricos em proteínas, incluindo o sangue, fígado e rins (ATSDR 2020 Ref#1942). Atualmente, os modelos de absorção por plantas são limitados, mas vários estudos documentaram a absorção de PFAS a partir do solo corrigido com biossólidos contaminados por PFAS (Blaine et al. 2013 Ref#259; Blaine et al. 2014 Ref#1334; Wen et al. 2016).

5 Amostragem e Análise

Os métodos de amostragem de biossólidos variam de acordo com o estado e a homogeneidade dos materiais a serem coletados. Além disso, como os materiais são frequentemente coletados e armazenados durante um período de dias ou semanas, concentrações variadas de PFAS no lodo podem causar concentrações variáveis na matriz de biossólidos, a menos que seja feita uma mistura para homogeneização adequada. A falta de homogeneidade pode ser reduzida através da mistura rigorosa dos materiais e/ou do uso de um grande número de amostras para formar uma amostra composta para análise.

O Método USEPA Draft 1633 (USEPA 2023 Ref#2762) é aplicável a biossólidos, bem como a outras matrizes. No entanto, os analitos quantificados através do uso do método 1633 para biossólidos talvez não incluam algumas PFAS importantes para a caracterização de biossólidos (por exemplo, diésteres de polifluoroalquil fosfato - diPAPs) (Dickman e Aga 2022). Consultar a Seção 11 para obter maiores informações.

6 Ocorrência

Foi reportado que a ocorrência de PFAS em biossólidos é comum em todo o país (Venkatesan e Halden 2013). Estudos iniciais relataram que as PFAA mais abundantes (ver Seção 2.2.3.1) encontradas em biossólidos (PFOS e PFOA) são semelhantes aos encontrados em efluentes de ETEs, embora os biossólidos também possam conter outras PFAS, incluindo PFAS de cadeia longa (Hamid e Li 2016; Washington e outros 2010). Embora vários estudos tenham relatado dados estatisticamente significativos mostrando a transformação de substâncias polifluoroalquiladas em PFAA nos biossólidos aplicados no solo (Yoo et al. 2010; Sepulvado et al. 2011; Washington et al. 2010), outras evidências indicam que algumas substâncias polifluoroalquiladas permanecem em solos corrigidos por biossólidos por muitos anos, ou até décadas (Yoo et al. 2010; Rich et al. 2015; Washington et al. 2018). Consultar a Seção 2.6.4.2 para obter maiores informações.

Biossólidos e Substâncias Per e Polifluoroalquiladas (PFAS) *cont.*

Conforme descrito nas Seções 6 e 17 do Documento de Orientação, as PFAS vêm sendo detectadas em vários meios associados a áreas de produção e aplicação de biossólidos, incluindo no ar ambiente (Barton et al. 2006; Ahrens et al. 2011 Ref#144; Liu et al. 2006; Ahrens et al. 2011 Ref#144; Liu et al. 2006; Ahrens et al. 2011 Ref#144; Liu et al. 2015 Ref#340; Borthakur et al.), água subterrânea, água superficial, solo, sedimentos, plantas e biota. Uma revisão de 2021 dos valores publicados para biossólidos, adubos e biorresíduos relacionados destacou a ampla faixa de concentração das PFAS reportadas (principalmente PFAA), assim como a relação entre a fonte de biorresíduos e as concentrações resultantes (Bolan et al. 2021 Ref#2270).

Isto sugere que limitar a análise de substância PFAS em biossólidos ao conjunto padrão de analitos pode desconsiderar uma fração substancial da massa total de flúor (Schaefer et al. 2023; Thompson et al. 2023). A **Figura 1** mostra as concentrações de PFAS encontradas em vários estudos.

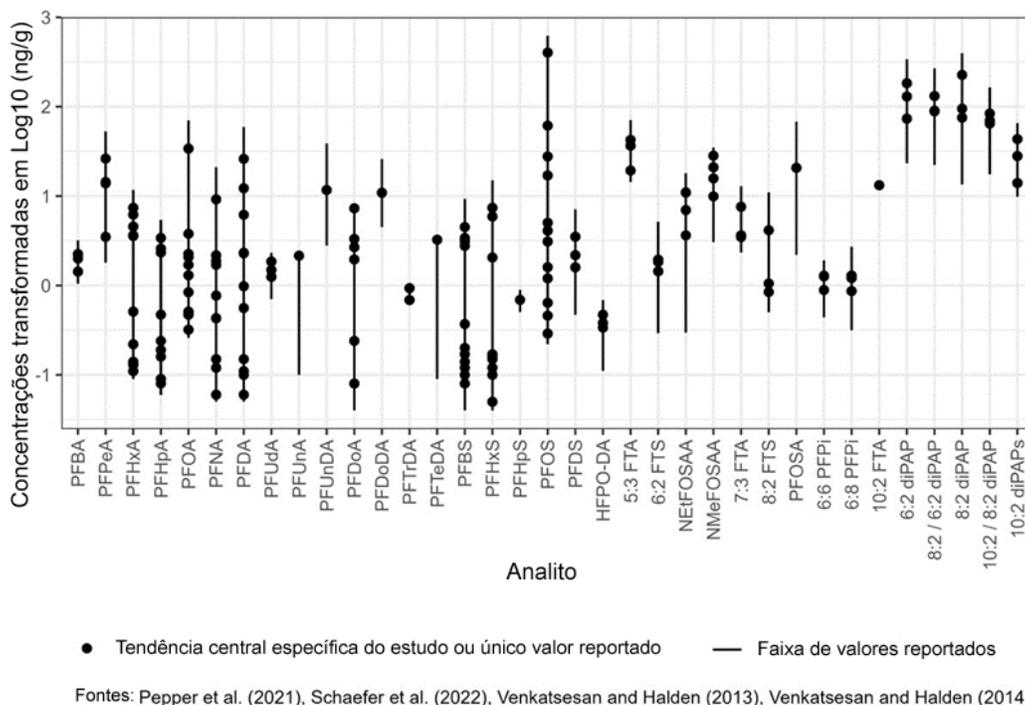


Figura 1. Concentrações de PFAS observadas em biossólidos e solos após aplicação de adubo
Fonte: PFAS-1, Figura 6-2C.

7 Tratamento

As tecnologias de tratamento de substâncias PFAS em meios ambientes ainda estão em evolução. Tecnologias de tratamento em desenvolvimento para sólidos, de aplicação limitada, implementadas em campo, que podem ser aplicáveis a biossólidos, estão descritas na Seção 12.3 e Seção 12.7, respectivamente, e na Tabela 12-1 (consultar as *External Data Tables* em <https://pfas-1.itrcweb.org/>). Os métodos incluem a incineração, assunto abordado na Seção 12.4.

8 Regulamentos e Diretrizes

A revisão ECOS de 2023 das atividades estaduais descobriu que apenas um estado proibiu a aplicação de biossólidos no solo, e apenas 6 exigem análises do teor de PFAS em biossólidos. Uma dúzia de estados reportaram a realização de testes de solo e água subterrânea ou água superficial em áreas a jusante de locais de aplicação de biossólidos no solo, e 21 têm ou terão dados publicamente disponíveis sobre PFAS em biossólidos (ECOS 2023 Ref#2608). Os regulamentos e diretrizes atuais estão abordados na Seção 8 e na *PFAS Regulatory Programs Summary Table* (consultar as *External Data Tables* em <https://pfas-1.itrcweb.org/>).

9 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 estão incluídos nesta ficha informativa para citações não exclusivas na lista de referência do Documento de Orientação.

Os acrônimos utilizados nesta ficha informativa e no Documento de Orientação 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