

1 Introducción

Esta ficha resume las tecnologías y métodos de tratamiento para las sustancias PFAS en el medio ambiente. Información adicional está disponible en el documento de orientación. Las tecnologías de tratamiento para las PFAS son el enfoque de investigación y desarrollo y están evolucionando rápidamente. Las tecnologías de tratamiento incluidas en esta ficha son categorizadas por el grado de desarrollo y el historial de implementación, así como también la confianza actual en la tecnología basada en la literatura evaluada por pares, literatura validada externamente y no evaluada por pares, y el juicio profesional de los autores.

Muchas de las tecnologías de tratamiento para las PFAS son ineficaces debido a la estabilidad única y la naturaleza surfactante de las PFAS, incluyendo aquellas tecnologías que dependen de la volatilización de contaminantes a temperatura ambiental (por ejemplo, extracción de aire, extracción de vapor del suelo) o biorremediación (por ejemplo, bioaspersión, bioestimulación, bioaugmentación). Incluso, las tecnologías agresivas como el tratamiento térmico y oxidación químico requieren condiciones extremas más allá de las prácticas típicas (por ejemplo, temperaturas elevadas, dosis de químicas altas, pH muy alto) para ser eficaz o parcialmente eficaz para volatilizar o destruir PFAS. Debido a que las tecnologías de tratamiento convencionales distintas de las tecnologías identificadas anteriormente han demostrado ser generalmente inadecuadas para tratar a las PFAS, las propiedades químicas únicas de las PFAS requieren tecnologías nuevas o combinaciones innovadoras de tecnologías existentes.

Resumen de las tecnologías de descontaminación de las PFAS

Esta ficha resume las “tecnologías implementadas en campo” que han sido demostradas en operación a gran escala para diferentes aplicaciones por múltiples partes en múltiples sitios y están bien documentadas en literatura evaluada por pares. El tratamiento a gran escala (implementado en campo) de líquidos o sólidos se limitan a tecnologías de secuestro que eliminan o unen las PFAS per los las destruyen.

Esta ficha también presenta “tecnologías de aplicación limitada,” que se han implementado en escala completa o a escala piloto en un número limitado de sitios por un número limitado de profesionales y puede ser que no se documentaron en práctica o en la literatura evaluada por pares, así como “tecnologías en desarrollo,” que son aquellas que se están desarrollando a través de investigación a escala de laboratorio, pero aún no se han demostrado en campo. Para obtener más detalles, consulte la sección 12, incluyendo las tablas 12.1 y 12.2 del documento de orientación.

Al momento de la publicación de esta ficha, la mayoría de las aplicaciones de tratamiento se han centrado en el agua potable, y las tecnologías de tratamiento de las PFAS en el agua incluyen la separación/eliminación usando carbón granular activado, resinas de intercambio iónico, u ósmosis inversa. El residuo resultante (carbón activado, resinas, y concentrado) debe manejarse a través de un tratamiento posterior y/o eliminación. El tratamiento de sólidos (por ejemplo, suelos, sedimentos) actualmente se basa en estabilización, excavación y eliminación, o incineración. La incineración ha recibido atención debido a la probable combustión incompleta y generación de subproductos y es el enfoque de estudios para comprender mejor el futuro de las PFAS. Los medios de eliminación de sólidos y residuos peligrosos son limitados, esto ha causado un interés en el desarrollo de alternativas de tratamiento y encapsulación in situ. En algunos sitios, puede ser razonable y necesario implementar acciones correctivas provisionales con la intención de aplicar soluciones más robustas y permanentes, ya que son desarrolladas. El tratamiento del aire no se incluye en esta ficha porque, actualmente, las investigaciones se limitan a las tecnologías de tratamiento para los líquidos y los suelos.

ITRC ha desarrollado una serie de fichas técnicas que resumen la ciencia reciente y tecnologías emergentes sobre PFAS. La información en esta y otras fichas sobre PFAS se describe en más detalle en el Documento de orientación técnica y regulatoria de ITRC (**Documento de Orientación** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>)).

El propósito de esta ficha técnica es de resumir:

- Efectos para la salud humana
- Efectos ecológicos
- Desafío de evaluación de riesgos en sitios

Factores específicamente desafiantes para la remediación de las PFAS incluyen:

- PFAS tienen múltiples estados iónicos
- Varios isómeros
- Diferentes grupos alquilo
- Efectos de remediación del pasado
- Co-contaminantes comunes
- Aceptación por parte del regulador/parte interesada

Tecnologías y métodos de tratamiento para las sustancias Per- y Polifluoroalquiladas (PFAS por sus siglas en inglés) *continuación*

Factores que afectan la selección de tecnología

La selección de un remedio con confianza de que se puede lograr los objetivos del tratamiento depende de varios factores claves, incluyendo las características del sitio, la disponibilidad de tecnologías de remediación comprobadas, y la capacidad y las herramientas para medir progreso y cumplimiento con los criterios de las medidas reguladoras aplicables.

Fundamental para la comprensión y presentación de la lógica y la justificación de la tecnología seleccionada es la preparación de un modelo conceptual de sitio. Debido a que las tecnologías de tratamiento probadas son limitadas, la selección de remedios se debe hacer con cuidado. La evaluación específica del sitio es necesaria para identificar la mejor tecnología alternativa para cada aplicación.

Los estándares regulatorios para el tratamiento de las PFAS continúan evolucionando, incluyendo que compuestos de las PFAS requieren tratamiento. Estos valores se resumen en las tablas de los valores de las PFAS del agua y valores de las PFAS del suelo (<https://pfas-1.itrcweb.org/fact-sheets/>).

Un resumen de los factores claves que afectan la selección de remedio para las PFAS incluye:

- **Características de las PFAS.** La variedad en las características químicas y físicas de las PFAS, como la obstinación a las tecnologías comunes debido a la fuerza del enlace carbono-flúor, estado iónico, tipos de grupos iónicos (sulfonato o carboxilato), longitud de la cadena, y concentración total, eficacia del tratamiento de impacto.
- **cambios en las propiedades de las PFAS.** Procesos naturales o acciones de remediación para otros contaminantes (mezclados), como solventes clorados e hidrocarburos de petróleo, pueden afectar la distribución y movilidad de las PFAS en las aguas subterráneas (McGuire et al., 2014).
- **co-contaminantes, materia orgánica y geoquímica.** La presencia de co-contaminantes, carbono orgánico total, la materia orgánica natural, los minerales, los cationes y los aniones pueden afectar significativamente la eficacia del tratamiento.
- **Aceptación de la comunidad.** Las partes interesadas, incluyendo miembros de la comunidad, a menudo se enfrentan a compensaciones en términos de costo, esfuerzo de limpieza y contaminación residual como parte de los esfuerzos de remediación.

2 Tecnologías de tratamiento de líquidos implementadas en campo

Las tecnologías de tratamiento de líquidos incluidas en esta sección se pueden aplicar a varios medios afectados por las PFAS, incluyendo el agua potable, aguas subterráneas, aguas superficiales, aguas residuales, o lixiviado de depósitos sanitarios. En actualidad, las tecnologías "implementadas en campo" son ex situ sistemas de tratamiento, esto significa que los líquidos afectados por PFAS son extraídos y tratados. Aunque algunas tecnologías descritas aquí se han aplicado in situ, estas aplicaciones aún no se consideran implementadas en campo.

Sorción

La sorción en carbón activado granular y medios de intercambio iónico se ha demostrado eficaz a gran escala. Una cantidad de parámetros del agua afluyente pueden afectar la eficacia y eficiencia de la sorción para un compuesto de PFAS específico. Estas incluyen el pH, la fuerza iónica, la naturaleza y concentración de co-contaminantes orgánicos (incluyendo la materia orgánica natural), los iones inorgánicos que compiten con PFAS normalmente presentes (por ejemplo, el sulfato, el nitrato, el bicarbonato y el cloruro), y todos los sólidos en suspensión o impurezas potencialmente precipitantes (por ejemplo, el hierro, el manganeso, el calcio) que pueden degradar el rendimiento de los medios. Para optimizar el rendimiento de los medios sorbentes puede ser necesario tomar pasos de pretratamiento, como coagulación, precipitación, filtración, ajuste de pH, o eliminación de oxidantes, para sacar los componentes que interfieren. Para lograr

Consideraciones clave de los costos para la selección de tratamiento para los líquidos incluyen:

- Mezcla de las PFAS y especies competitivos
- Necesidades de pretratamiento
- Concentraciones afluentes
- Tasa de flujo
- Criterios de descarga
- Eliminación/regeneración de medios gastados
- Tratamiento y eliminación de concentrado osmosis inversa

Tecnologías y métodos de tratamiento para las sustancias Per- y Polifluoroalquiladas (PFAS por sus siglas en inglés) *continuación*

una eficiencia óptima, en general, la tecnología de proceso orientada a eliminar las PFAS se coloca al final del tren de tratamiento después de la eliminación del contaminante.

Carbón activado granular (GAC por sus siglas en inglés)

La adsorción de GAC es una tecnología de tratamiento de agua que ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de las PFAS de cadena larga (como PFOS, PFOA, y PFNA). Las PFAS individuales tienen diferentes capacidades de carga en GAC y tiempos de ruptura, lo que normalmente se define como el número de volúmenes de lecho (el volumen total del recipiente de tratamiento que contiene el medio de tratamiento) tratados antes de la detección en el efluente (Eschauzier et al. 2010). La capacidad de GAC para eliminar la PFOS es mayor que para la PFOA, pero ambas se pueden eliminar de manera efectiva (McLeaf et al. 2017). En general, las PFAS de cadena corta tienen una capacidad de carga en GAC más baja y tiempos de ruptura más rápidos, pero se podría tratar de manera efectiva si se aumenta la frecuencia de cambio de GAC.

Los sistemas de GAC temporales (móviles y en un montaje deslizante) y permanentes se pueden implementar rápidamente. Diferentes tipos de los materiales base para GAC están actualmente disponibles y los datos muestran que los productos bituminosos son más efectivos en eliminar a las PFAS (McNamara et al. 2018; Westreich et al. 2018). Actualmente, los medios de GAC gastados se pueden desechar en vertederos o por incineración, o reactivados para su reutilización, puede ser que cada opción requiere aprobación regulatoria. Se necesitan estudios adicionales sobre la incineración y reactivación para investigar el destino de las PFAS.

Intercambio iónico (IX por sus siglas en inglés)

Las resinas de IX son sorbentes efectivos para una variedad de contaminantes e históricamente se han utilizado para el tratamiento del agua tal como la eliminación de nitrato, perclorato, y arsénico. Las opciones de resinas de IX para la eliminación de las PFAS incluyen resinas de un solo uso y regenerables. Se ha demostrado que las resinas de IX tienen una capacidad de nivel alto para varias PFAS de cadena corta (Woodard et al. 2017). Las resinas de un solo uso se utilizan hasta que ocurre una ruptura en un umbral predeterminado y luego se eliminan las resinas del recipiente. Las resinas regenerables se utilizan hasta la ruptura, pero después las resinas se regeneran en el sitio usando una solución regenerante para restaurar su capacidad de eliminar las PFAS. Actualmente, los medios de IX gastados se pueden desechar en vertederos o por incineración, o reactivados para su reutilización, puede ser que cada opción requiere aprobación regulatoria. El proceso de regeneración produce residuos que deben ser gestionados. Los sistemas temporales y permanentes de IX se pueden implementar rápidamente. El pretratamiento de las resinas puede ser necesario para preservar su capacidad de eliminar las PFAS, particularmente en el contexto de la remediación donde se espera una química compleja de contaminantes.

Ósmosis Inversa (RO por sus siglas en inglés)

Las membranas de RO son eficaces para la eliminación de la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos de las soluciones acuosas y han demostrado ser eficaz en la eliminación de las PFAS (Appleman et al. 2014; Tang et al. 2006; Tang et al. 2007). En los últimos años, la nueva química de polímeros y los procesos de fabricación han mejorado la eficiencia de las membranas de RO y esto ha reducido las presiones de operación y el costo. Como resultado, la industria utiliza cada vez más membranas de RO para concentrar o eliminar las químicas. Las membranas de RO pueden ensuciarse y/o incrustarse (fouling) (pérdida de capacidad de producción) debido a la acumulación de material en la superficie de la membrana, así que es necesario usar un pretratamiento eficaz en la eliminación de los sólidos en suspensión en cualquier sistema de RO. El caudal de rechazo contendrá concentrado enriquecido con PFAS, que debe gestionarse adecuadamente a través de tratamiento, descarga o eliminación.

3 Tecnologías de tratamiento de sólidos implementadas en campo

Las tecnologías en esta sección se pueden aplicar a una variedad de medios impactados por las PFAS, incluyendo suelos, sedimentos, lodos, o medios de tratamiento. Siempre se

Contención del suelo

La contención no figura como una tecnología específica pero se utiliza comúnmente para otros contaminantes y puede ser adecuado para las PFAS dependiendo de las condiciones específicas del sitio.

Para prevenir la infiltración o exposición de las PFAS se podría usar una tapadera, construir una pared para la lechada (o barrera de aislamiento), hacer adición de medios de sorción para prevenir la migración o el desecho en el vertedero para contener las PFAS. Las opciones de contención dependen de las consideraciones del sitio, la naturaleza de los materiales de las PFAS, y los requisitos reglamentarios locales.

Tecnologías y métodos de tratamiento para las sustancias Per- y Polifluoroalquiladas (PFAS por sus siglas en inglés) *continuación*

necesita una evaluación del sitio para identificar la mejor tecnología para cualquier escenario de tratamiento. Actualmente existen dos tecnologías implementadas en campo para tratar suelos contaminados con PFAS: sorción e inmovilización, y excavación y eliminación.

La Sorción y la inmovilización

La sorción y la inmovilización (estabilidad de contaminantes), que se consideran tecnologías de “inmovilización” o “fijación química,” se pueden seleccionar dependiendo la evaluación específica del sitio y proveen una estrategia relativamente rápida, sencilla, y de bajo costo (en relación con la eliminación fuera del sitio) para reducir el transporte continuo de las PFAS de origen hasta las vías fluviales y las aguas subterráneas. Esta estrategia no elimina las PFAS del área de origen, pero las inmoviliza, y esto reduce el riesgo de transporte adicional o migración. Para algunas adiciones de enmiendas (amendments), los métodos de evaluación han proyectado/modelado la estabilidad a largo plazo de las PFAS inmovilizadas en suelos enmendados (amended soils) (Stewart and MacFarland 2017). Las adiciones de enmiendas que se han demostrado en campo incluyen carbono activado y materiales compuestos como una mezcla de hidróxido de aluminio, caolín y carbono específicamente diseñados para tratar las PFAS de cadena larga y corta aniónicos, catiónicos y zwitteriónicos. Diferentes métodos de administración, como inyección o mezcla in situ, pueden proporcionar resultados diferentes y pueden aplicarse según la geología y los objetivos del tratamiento.

Excavación y eliminación

Los suelos/sólidos contaminados por PFAS se pueden excavar y desechar en un vertedero. Tratar los suelos/sólidos contaminados por PFAS con agentes estabilizadores puede reducir la capacidad de lixiviación (leachability) de las PFAS de esos suelos/sólidos y podría considerarse antes del vertido. El cambio en las regulaciones con respecto a la clasificación peligrosa de las PFAS puede complicar la implementación de esta opción, y los costos de eliminación aumentarían si los medios contaminados por PFAS tienen que desecharse como residuos peligrosos/regulados. Consultas individuales con los reguladores y propietarios de vertederos es probablemente el mejor curso de acción. Algunos vertederos de residuos no peligrosos no aceptan desechos de PFAS. En general, los problemas relacionados con la eliminación de las PFAS en vertederos son similares a los problemas comúnmente encontrados con otros contaminantes.

4 Incineración

La incineración se define como la destrucción (mineralización) de productos químicos utilizando altas temperaturas. El calor se aplica directamente a los sólidos contaminados con PFAS (suelo/sedimento/adsorbentes gastados/residuos) o líquidos (agua/aguas residuales/lixivados/productos químicos). Los productos de combustión vaporizados pueden oxidarse y/o capturarse (precipitación, limpieza húmeda (wet scrubbing)) y/o oxidarse aún más a temperatura elevada.

La incineración es una de las pocas tecnologías que probablemente puede destruir a las PFAS. Sin embargo, cuando se publicó esta ficha, la incineración es una área de investigación activa para evaluar las temperaturas de destrucción efectivas y el tiempo de tratamiento, el potencial para generar productos de combustión incompleta, análisis de gas de chimenea (stack gas analysis), deposición en la tierra, y otros factores de riesgo. Cuando se consideran las opciones de eliminación de desechos, se debe evaluar los costos de transporte, los costos de energía, las aprobaciones regulatorias y la disposición final de los desechos del proceso ya que difieren entre las instalaciones de incineración.

5 Tecnologías de tratamiento limitadas y en desarrollo

En el documento de orientación se puede encontrar un resumen de las tecnologías de aplicación limitada y tecnologías en desarrollo. Las tecnologías incluidas se enumeran en la tabla 1.

Tabla 1. Tecnologías de tratamiento limitadas y en desarrollo

Aplicación limitada	En desarrollo
Carbón activado coloidal (tratamiento in situ)	Arena recubierta (coated sand)
Precipitación/floculación/coagulación	Zeolitas/Minerales de arcilla (naturales o con modificaciones en la superficie)
Fraccionamiento de espuma generada por activación de la superficie	Biocarbón
Inyección de pozos profundos	Nanofiltración

Tecnologías y métodos de tratamiento para las sustancias Per- y Polifluoroalquiladas (PFAS por sus siglas en inglés) *continuación*

Aplicación limitada	En desarrollo
Sorción y inmovilización/Solidificación (para sólidos)	Manipulación redox (transformación), tales como: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas basadas en ozono • Sistemas basadas en peróxido de hidrógeno catalizado (CHP por sus siglas en inglés) • Persulfato activado • Oxidación sonoquímica/ultrasonido • Tratamiento electroquímico • Electrones solvatados (procesos de reducción avanzada) • Tecnología de plasma • Hierro cerovalente/Dopaje ZVI • Reducción metálica alcalina
	Biodegradación
	Rayo de alta energía de electrones - eBeam
	Desorción térmica

6 Referencias y acrónimos

Las referencias citadas en esta ficha y otras referencias se pueden encontrar en <https://pfas-1.itrcweb.org/references/> (en inglés). Los acrónimos usados en esta ficha y en el documento de orientación se pueden encontrar en <https://pfas-1.itrcweb.org/acronyms/> (en inglés).

Traducción a español:

Ivy Torres, MA (irtorres@uci.edu) Program in Public Health, University of California, Irvine (UCI)

y Christopher Olivares, PhD (chris.olivares@uci.edu) Civil & Environmental Engineering, UCI



Contactos del equipo de sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS)

Sandra Goodrow • New Jersey Department of Environmental Protection
609-490-4164 • Sandra.Goodrow@dep.nj.gov

Kate Emma Schlosser • New Hampshire Department of Environmental Services
603-271-2910 • KateEmma.Schlosser@des.nh.gov

April 2022



ITRC
1250 H St. NW, Suite 850
Washington, DC 20005
itrcweb.org

