



The LIFE SOuRCE project (LIFE20 ENV/ES/000880) has received funding from the LIFE Programme of the European Union.

LIFE20 ENV/ES/000880
Septiembre 2021- Enero 2026
Coste total: 2,837,085 Euro
Contribución de la UE: 1,551,373 Euro



LIFE SOuRCE



LIFE SOuRCE

Demostración y evaluación de tecnologías sostenibles de remediación in situ para aguas subterráneas contaminadas por PFAS

LAYMAN report

Contexto

Las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) forman un amplio grupo de varios miles de compuestos químicos sintéticos ampliamente utilizados desde la década de 1950. Su atractivo radica en su estabilidad excepcional: los PFAS contienen enlaces carbono - flúor extremadamente fuertes y presentan una estructura molecular con una "cola" fluorada repelente al agua y una cabeza hidrofílica. Esta combinación los hace resistentes al calor y a la degradación. Debido a estas propiedades, los PFAS se han incorporado a numerosos productos de uso cotidiano, como utensilios de cocina antiadherentes, textiles repelentes al agua, envases alimentarios y espumas contra incendios.

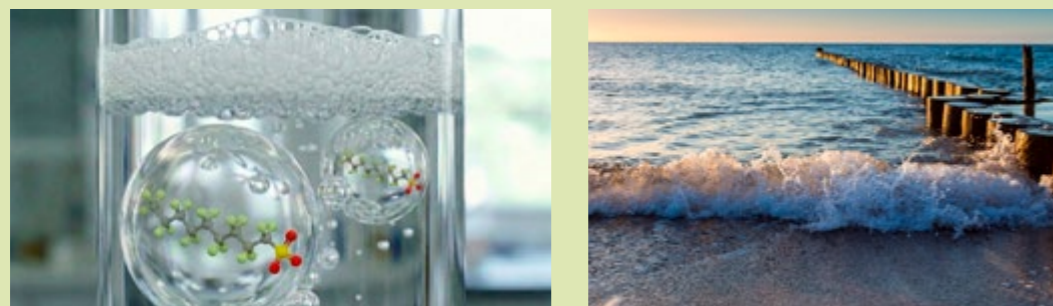
Productos que contienen PFAS



Sin embargo, las mismas características que hacen útiles a los PFAS también los convierten en contaminantes persistentes y altamente móviles en el medio ambiente. A menudo denominados "químicos eternos", no se degradan con facilidad y su elevada movilidad favorece su desplazamiento a largas distancias a través del suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Como consecuencia, la contaminación por PFAS está hoy ampliamente extendida, detectándose en fuentes de agua potable, suelos, sedimentos, fauna silvestre e incluso en zonas remotas como el Ártico.

La exposición a determinados PFAS se ha relacionado con diversos efectos sobre la salud, como disfunciones tiroideas y hepáticas, aumento de los niveles de colesterol, debilitamiento de la respuesta inmunitaria y mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer. El agua potable y los alimentos representan las principales vías de exposición, especialmente para comunidades cercanas a instalaciones industriales, zonas de entrenamiento contra incendios y vertederos. En toda Europa, miles de emplazamientos están potencialmente contaminados, lo que supone un riesgo tanto para los ecosistemas como para el suministro de agua potable.

Consciente de la magnitud de este reto, la Unión Europea ha introducido límites más estrictos para los PFAS en el agua potable mediante la Directiva (UE) 2020/2184. Así, cumplir estos estándares - y proteger la salud pública - requiere tecnologías de remediación innovadoras y rentables, capaces de tratar tanto PFAS de cadena larga como de cadena corta en entornos contaminados.



Los PFAS tienen una cola fluorada que repele el agua y una cabeza hidrofílica, lo que los hace altamente tensioactivos. Se acumulan en la interfaz aire-agua, y las burbujas de aire ascendentes pueden transportarlas hacia la espuma. Lo mismo ocurre en la naturaleza - por ejemplo, cuando las olas rompen y se forma espuma marina. Esta propiedad también se aprovecha en el proyecto LIFE SOuRCE para separar los PFAS de aguas subterráneas contaminadas.

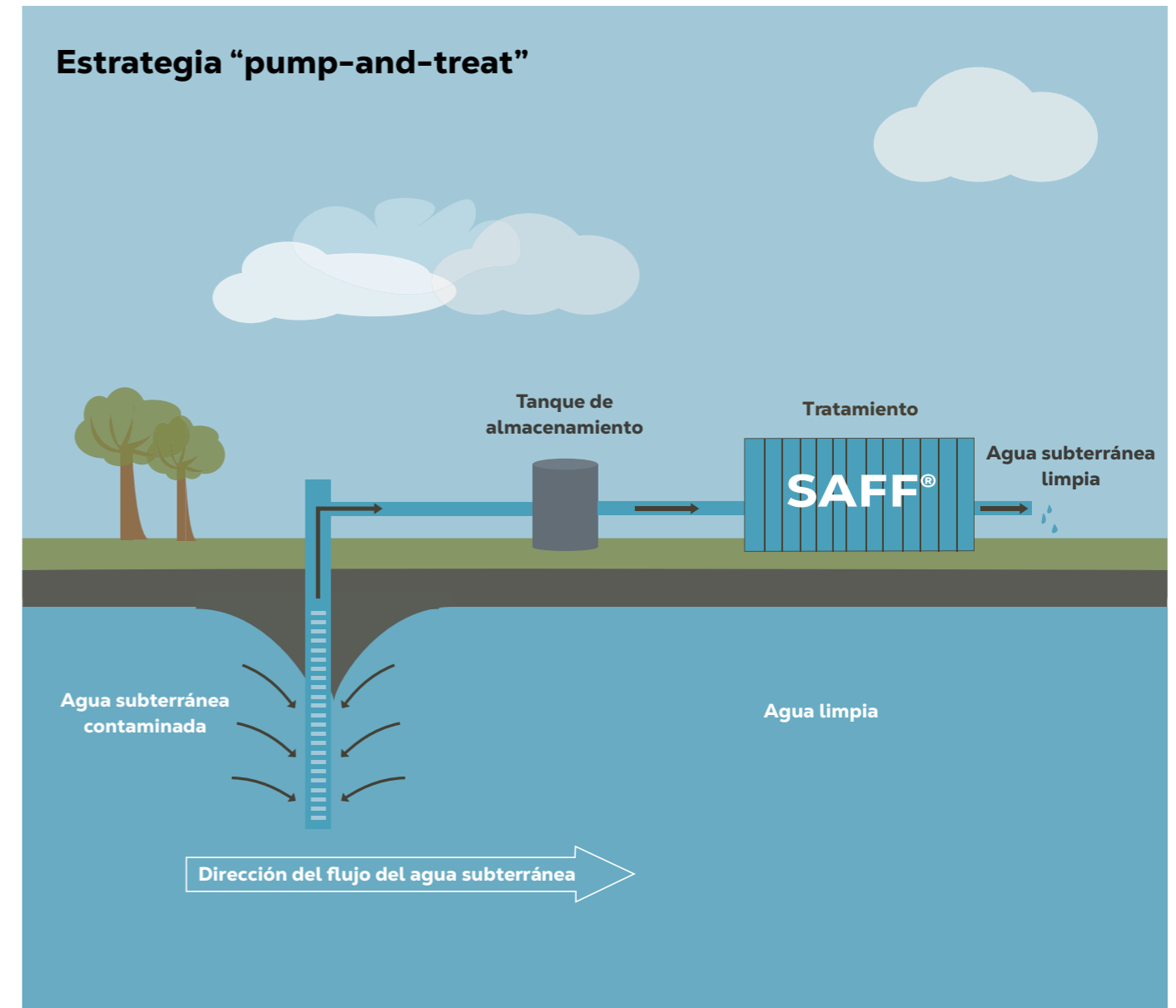
El proyecto LIFE SOuRCE

El objetivo del proyecto LIFE SOuRCE fue demostrar la aplicación de tratamientos *in situ* para abordar la contaminación por PFAS en aguas subterráneas. Esta solución de tipo "pump-and-treat" integró cuatro tecnologías complementarias: una etapa de separación, dos etapas de pulido y un proceso final de destrucción de PFAS. El propósito general fue demostrar que la descontaminación de aguas subterráneas contaminadas por PFAS puede ser eficaz y económicamente viable.

La técnica "pump-and-treat" es una de las estrategias más utilizadas para la remediación de aguas subterráneas en emplazamientos contaminados. El proceso se basa en el bombeo de agua subterránea mediante pozos para su tratamiento en superficie. Este bombeo reduce el nivel freático del acuífero y modifica el flujo del agua en la zona, favoreciendo la migración de los contaminantes hacia los pozos de extracción.

Una vez tratada, el agua puede reinyectarse en el subsuelo o descargarse al medio ambiente, siempre que las concentraciones de contaminantes sean suficientemente bajas. La técnica permite una monitorización continua de la calidad del agua y reduce el riesgo de propagación de la contaminación.

Este método funciona mejor en acuíferos con conductividad hidráulica moderada o alta y resulta muy eficaz para proteger rápidamente los recursos hídricos cuando las fuentes de contaminación no pueden eliminarse o tratarse *in situ*. Además, es particularmente adecuado para contaminantes móviles y altamente solubles en agua, como es el caso de los PFAS.



Objetivos y demostración de los trenes de tratamiento

Al inicio del proyecto, la contaminación por PFAS ya se consideraba un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia en Europa, especialmente en vertederos, zonas industriales y antiguas zonas de entrenamiento de extinción de incendios. En este contexto, LIFE SOuRCE tuvo como objetivo principal demostrar la eliminación de más del 99 % de los PFAS de cadena larga y el 95 % de los PFAS de cadena corta mediante la combinación de distintas tecnologías. El proyecto también buscó cumplir con los nuevos límites de la Directiva europea sobre agua potable (0,1 µg/L para compuestos individuales, con hasta 20 sustancias reguladas, y 0,5 µg/L para PFAS totales), manteniendo los costes de tratamiento bajos (hasta 0,1 €/m³ de agua subterránea tratada), garantizando así que la solución fuera aplicable en una amplia variedad de emplazamientos contaminados.

SAFF - Fraccionamiento de espuma tensioactiva. Proceso físico de separación y concentración diseñado para eliminar PFAS del agua mediante aireación, en el que los compuestos se adhieren a burbujas de aire y ascienden hasta la superficie en forma de espuma enriquecida en PFAS.

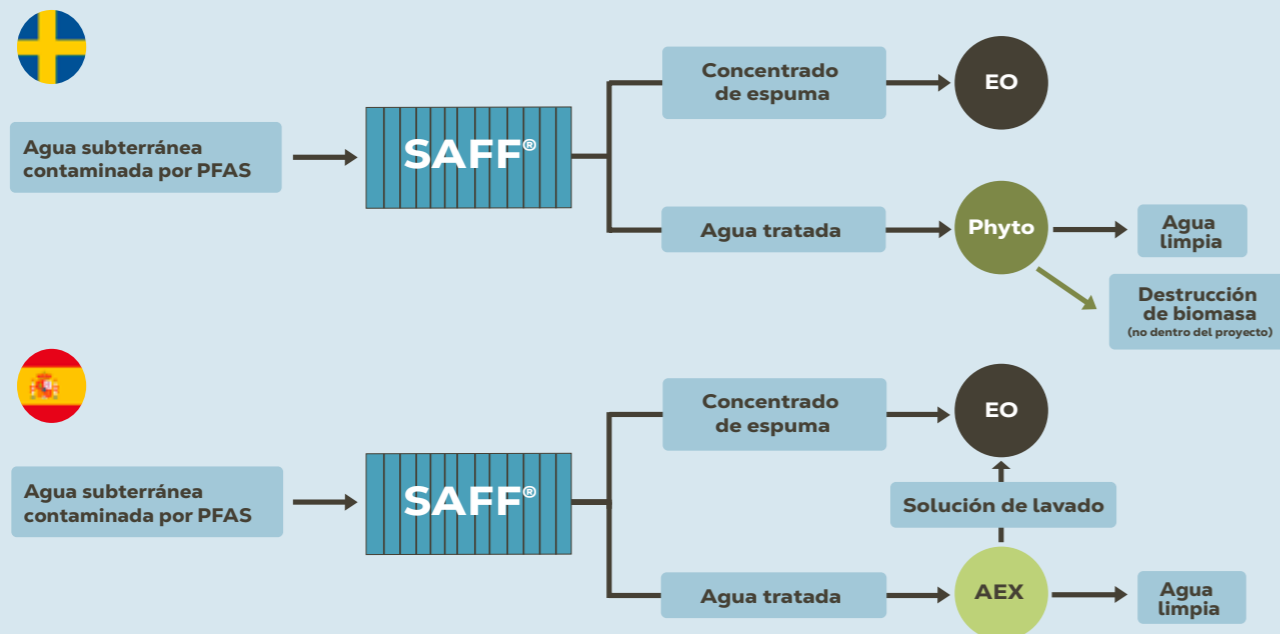
AEX - Filtros de intercambio aniónico. Etapa de pulido basada en columnas rellenas con resinas específicas que permiten eliminar los PFAS hasta niveles no detectables.

PHYTO - Fitorremediación. Etapa de pulido basada en un humedal artificial plantado con Salix (sauce), diseñado para capturar PFAS residuales mediante absorción por las plantas y sorción en el sustrato.

EO - Oxidación electroquímica. Proceso de destrucción que utiliza electrodos de diamante dopado con boro para mineralizar los PFAS en iones fluoruro (F⁻) y CO₂.

Estas tecnologías se demostraron en dos ubicaciones diferentes: un vertedero en Suecia y un campo de entrenamiento de prácticas de extinción en España. Esto permitió obtener información muy valiosa sobre el rendimiento del tratamiento bajo distintos climas, condiciones del suelo y niveles de contaminación. Al aplicar estos métodos en entornos tan contrastados, se pudo comprobar su eficacia y su capacidad de adaptación ante desafíos reales.

Los trenes de tratamiento demostrados



Emplazamiento Sueco

- Instalación de gestión de residuos
- Clima templado
- Fuente de PFAS: lixiviados de vertedero
- 2-3 µg ΣPFAS/L en agua subterránea
- Alta fuerza iónica y altos niveles de COD (carbono orgánico disuelto)



Emplazamiento Español

- Campo de entrenamiento de prácticas de extinción de incendios
- Clima mediterráneo
- Fuente de PFAS: espuma contra incendios
- 0,2-60 µg ΣPFAS/L en agua subterránea
- Baja fuerza iónica y bajos niveles de COD (carbono orgánico disuelto)



Fraccionamiento de espuma tensoactiva

El método SAFF (**Surface Active Foam Fractionation**) utiliza pequeñas burbujas de aire para eliminar los PFAS del agua contaminada. Cuando se inyecta aire en las columnas de tratamiento, las moléculas de PFAS se adhieren a las burbujas ascendentes y son transportadas a la superficie, donde forman una espuma rica en PFAS que puede separarse y recogerse. Este concentrado espumoso se somete posteriormente a etapas adicionales de aireación, produciendo un volumen muy pequeño de líquido altamente concentrado en PFAS que puede enviarse para su destrucción permanente mediante tecnologías comerciales, como la combustión a alta temperatura, o – como se demostró en LIFE SOuRCE – tratarse directamente in situ mediante oxidación electroquímica.

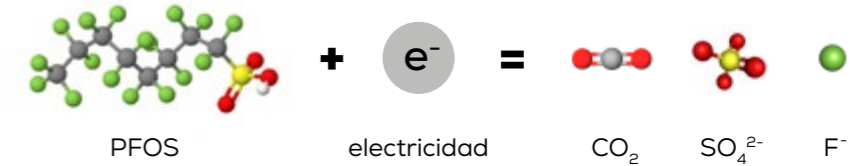
Esta tecnología puede eliminar hasta el 99,9 % de los PFAS de cadena larga y, con aditivos, también puede alcanzar altas tasas de eliminación para los PFAS de cadena corta. Las unidades SAFF son compactas y pueden instalarse en contenedores estándar.

En el proyecto LIFE SOuRCE se utilizó una unidad SAFF20, con una capaci-

dad de tratamiento de 10–20 m³ de agua por hora. En total, se trataron 28.000 m³ de agua subterránea en el emplazamiento sueco durante once meses, con un consumo energético medio de 0,62 kWh/m³.



La oxidación electroquímica



La oxidación electroquímica (EO) utiliza electrodos de diamante dopado con boro para descomponer los PFAS. Cuando una corriente eléctrica atraviesa los electrodos, se generan radicales oxidantes altamente reactivos en su superficie. Estos radicales atacan las moléculas de PFAS y rompen sus enlaces carbono-flúor, transformándolos en productos finales inocuos como dióxido de carbono y fluoruro.

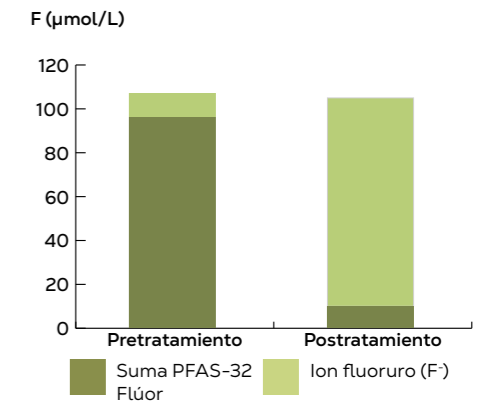
En el proyecto LIFE SOuRCE, la EO se utilizó para destruir los PFAS que habían sido concentrados previamente en la espuma de la unidad SAFF. Tratar este residuo concentrado, en lugar de toda el agua subterránea, hizo el proceso mucho más rentable y eficiente energéticamente. Durante el tratamiento, la EO logró degradar hasta el 88 % de los PFAS presentes en la espuma. Tiempos de trata-

miento más largos habrían aumentado la eliminación de contaminantes, pero también reducido la eficiencia energética. En su lugar, los residuos parcialmente tratados se devolvieron a la unidad SAFF para reconcentrarlos y tratarlos de nuevo con la EO.

Al aplicar la EO a la espuma, se observó una reducción inmediata de los PFAS de cadena larga. Sin embargo, los de cadena corta aumentaron inicialmente, mostrando que la degradación de los PFAS es secuencial, transformándose primero las cadenas largas en otras más cortas antes de degradarse por completo.

Los análisis de los PFAS de interés, de los iones fluoruro y los cálculos de balance de masas confirmaron que

el 97–99 % de los átomos flúor de los PFAS destruidos terminaron como fluoruro libre en la solución. Esto demuestra que los enlaces carbono-flúor se rompieron durante el proceso y que casi todos los PFAS degradados fueron completamente mineralizados.



El método de fitorremediación

El método de fitorremediación (PHYTO), basado en el uso de plantas para eliminar contaminantes, se probó como etapa posterior al tratamiento SAFF para mejorar la captura y eliminación de los PFAS de cadena corta, que el sistema SAFF retiene con menor eficiencia. Para ello, se construyó un humedal de flujo subsuperficial utilizando un sustrato de turba y biochar (carbón vegetal) donde se plantaron sauces. Mientras que el sustrato adsorbió principalmente los PFAS de cadena larga restantes y favoreció el crecimiento de las plantas, los sauces absorbieron los PFAS de cadena corta en sus tallos y hojas. Gracias a la incorporación del tratamiento PHYTO, la eliminación total de 20 PFAS analizados aumentó del 48 % al 75 %, en gran medida porque

los PFAS de cadena corta se capturaron de forma más eficaz.

Las demostraciones de LIFE SOuRCE también revelaron limitaciones importantes. La fitorremediación requiere grandes superficies de terreno, ya que su eficacia depende de la cantidad de agua que las plantas puedan absorber, lo que dificulta el tratamiento de grandes caudales. Además, todavía existe poco conocimiento sobre cómo gestionar el material vegetal contaminado por PFAS tras la cosecha. Por ejemplo, las hojas de sauce contienen altas concentraciones de PFAS de cadena corta y, si no se recolectan antes de la caída de las hojas, existe el riesgo de que los PFAS regresen al medio ambiente. Una solución para reducir este riesgo es cosechar los sauces anualmente

antes de la caída foliar. Estos desafíos muestran que, si bien el tratamiento PHYTO puede mejorar la eliminación de PFAS, es esencial una gestión cuidadosa para que su uso sea seguro y eficaz.



El humedal construido, poco después de ser plantado con sauce en 2023.

El intercambio aniónico

El intercambio aniónico (AEX) es una técnica basada en filtración en la que los PFAS son capturados por resinas especiales que atraen moléculas con carga negativa. A medida que el agua pasa a través de la resina, los PFAS se adhieren a su superficie mediante intercambio iónico e interacciones hidrofóbicas, permitiendo que el agua limpia continúe su flujo. Antes de utilizar esta técnica, se puede utilizar un pretratamiento para eliminar otras sustancias cargadas, evitando así que la resina específica para PFAS tenga una mayor vida útil y no se sature demasiado rápido.

El método AEX es eficaz frente a una amplia gama de PFAS, incluyendo tanto compuestos de cadena larga, como PFOS y PFOA, como PFAS de cadena corta más móviles, como

PFPeA y PFHxA. En el proyecto LIFE SOuRCE, se alcanzaron eficiencias de eliminación superiores al 99 % en el emplazamiento español para los 20 tipos de PFAS de interés, incluidos PFOS, PFOA y PFHxA.

El rendimiento del tratamiento siguió tres fases típicas: inicialmente, la resina nueva ofreció una eliminación muy elevada; con el tiempo, la eficiencia disminuyó a medida que la

resina se iba saturando; y finalmente fue necesaria la regeneración o sustitución de la resina para restablecer el rendimiento del tratamiento. Estos patrones resaltan la importancia de rutinas de mantenimiento adecuadas para garantizar tasas de eliminación elevadas y constantes.





Análisis de ciclo de vida y Costes de ciclo de vida

Para evaluar el rendimiento ambiental y económico de las de tecnologías aplicadas en LIFE SOuRCE, se realizaron un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y un Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV) a partir de datos operativos reales de los dos emplazamientos de demostración en España y Suecia. Los resultados se compararon con un tratamiento convencional basado en carbón activado granular (CAG), utilizando como unidad funcional 1 m³ de agua subterránea tratada y un límite del sistema "cradle to grave".

El ACV mostró diferencias significativas entre ambos emplazamientos, principalmente asociadas a efectos de escala y a las condiciones específicas de cada sitio. En el emplazamiento español, los impactos por m³ fueron elevados debido al reducido volumen de agua tratado durante la demostración, lo que hizo que la unidad SAFF dominara los impactos.

En Suecia, donde se trataron volúmenes de agua mucho mayores y la electricidad procedía principalmente de fuentes renovables, los impactos fueron considerablemente menores. En ambos emplazamientos, la EO contribuyó de forma marginal al impacto ambiental total. La comparación con el tratamiento convencional con CAG mostró que el sistema LIFE SOuRCE a escala piloto tuvo impactos más altos por m³, debido principalmente a la

escala limitada y al sobredimensionamiento de los equipos, efectos que se esperan mejorar al aplicarse a escala industrial. Un escenario de escalado industrial confirmó esta expectativa, mostrando una reducción aproximada del 94 % de los impactos ambientales al operar al caudal de diseño completo.

El CCV reflejó tendencias similares. El piloto español presentó un coste total elevado (39 €/m³) debido a que los costes del equipamiento se repartieron sobre un bajo volumen de agua tratada. En contraste, el piloto sueco, con casi 28.000 m³ de agua tratada, alcanzó un coste de 0,24 €/m³, comparable al coste estimado del tratamiento con CAG (0,33 €/m³) y con la ventaja adicional de destruir los PFAS. El escalado del sistema SAFF+AEX+EO permitiría reducir los costes hasta aproximadamente 0,15 €/m³. En ambos pilotos, el SAFF representó la mayor parte de la inversión de capital, mientras que el AEX (cuando se aplicó) fue la etapa más costosa debido a la sustitución y eliminación de resinas.

En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de tratamientos SAFF+AEX+EO es una solución eficaz, escalable y económicamente competitiva para la remediación de PFAS, con alto potencial de replicación en aplicaciones industriales de tratamiento de agua en Europa.

Evaluación de riesgos para la salud humana y el medio ambiente

Los riesgos para la salud humana y el medio ambiente asociados a los PFAS en aguas subterráneas se evaluaron antes y después de la implementación de los tratamientos del LIFE SOuRCE en los dos emplazamientos de demostración: 1) una zona industrial y agrícola en España (evaluación de riesgos para la salud humana), donde se aplicaron los tratamientos SAFF, AEX y EO y 2) un ecosistema fluvial en Suecia (evaluación de riesgos para el medio ambiente), donde se aplicaron los tratamientos SAFF, PHYTO y EO.

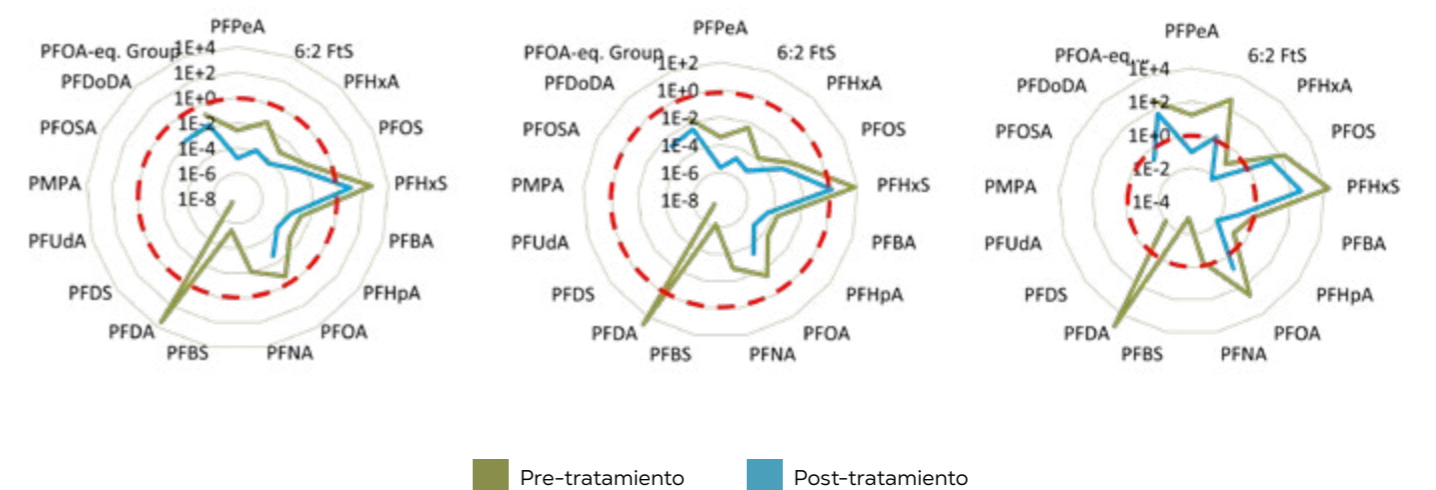
Para la evaluación de riesgos para la salud humana se analizaron dos escenarios de exposición. El primer escenario se centró en los trabajadores industriales que podrían ingerir agua contaminada con PFAS o estar expuestos por contacto dérmico durante actividades de limpieza, como el lavado de equipos o vehículos. El segundo escenario se centró en dos potenciales receptores: 1) agricultores expuestos a través de la ingestión y el contacto dérmico con el agua de riego y 2) la población general (dividida en dos grupos; adultos y niños) que podrían estar expuestos a través del consumo de cultivos (lechuga) afectados por PFAS debido a la irrigación con agua contaminada. Para este receptor, se identificó la ingestión como la principal vía de exposición.

Para la evaluación de riesgos para el medio ambiente, se evaluaron los riesgos para el ecosistema de agua dulce en un río sueco.

Los dos trenes de tratamientos evaluados, que combinaron SAFF, EO y AEX o PHYTO, redujeron significativamente los riesgos asociados a los PFAS, logrando una reducción del riesgo superior al 98 % para la salud humana y del 52-60 % para el medio ambiente.

La evaluación de riesgos, basada en las concentraciones de PFAS en el agua tratada en comparación con las concentraciones previas al tratamiento, mostró reducciones claras, aunque los resultados de riesgo finales superan los valores límite de riesgo aceptable (Riesgo carcinogénico inferior a 1x10⁻⁵, índice de riesgo no carcinogénico inferior a 1 y unidades de toxicidad ecológica inferiores a 1).

En resumen, los resultados muestran que los trenes de tratamiento evaluados son altamente eficaces para reducir los riesgos asociados a los PFAS en el agua subterránea extraída y también permitirán reducir los riesgos en aguas subterráneas y superficiales aguas abajo cuando esta solución de "pump-and-treat" se aplique a escala completa. Esto respalda la conclusión del proyecto de que las combinaciones de tecnologías evaluadas (SAFF+AEX/PHYTO+EO) ofrecen un enfoque escalable y competitivo para la remediación de PFAS, contribuyendo a una gestión del agua más segura y circular en toda Europa.



Riesgos de toxicidad para: izquierda) Escenario 1: trabajador in situ; centro) Escenario 2a: agricultor; y derecha) Escenario 2b: ingestión de vegetales (niño). La línea roja discontinua indica el umbral de aceptación (concierte de peligro, HQ=1). Nótese que los ejes radiales están en escala logarítmica.

Principales conclusiones del LIFE SOuRCE

Transferibilidad de los resultados del proyecto

El proyecto LIFE SOuRCE ofrece soluciones diseñadas para ser transferibles y aplicables en toda Europa. Un enfoque de tratamiento flexible y modular permite la adaptación a diferentes condiciones hidrogeológicas, perfiles de contaminación por PFAS y marcos regulatorios. Las tecnologías se probaron en condiciones reales, demostrando su aplicabilidad en entornos y condiciones operativas diversas. El proyecto ha generado así conocimiento práctico y orientación para fomentar su replicación en otros emplazamientos contaminados por PFAS en Europa.

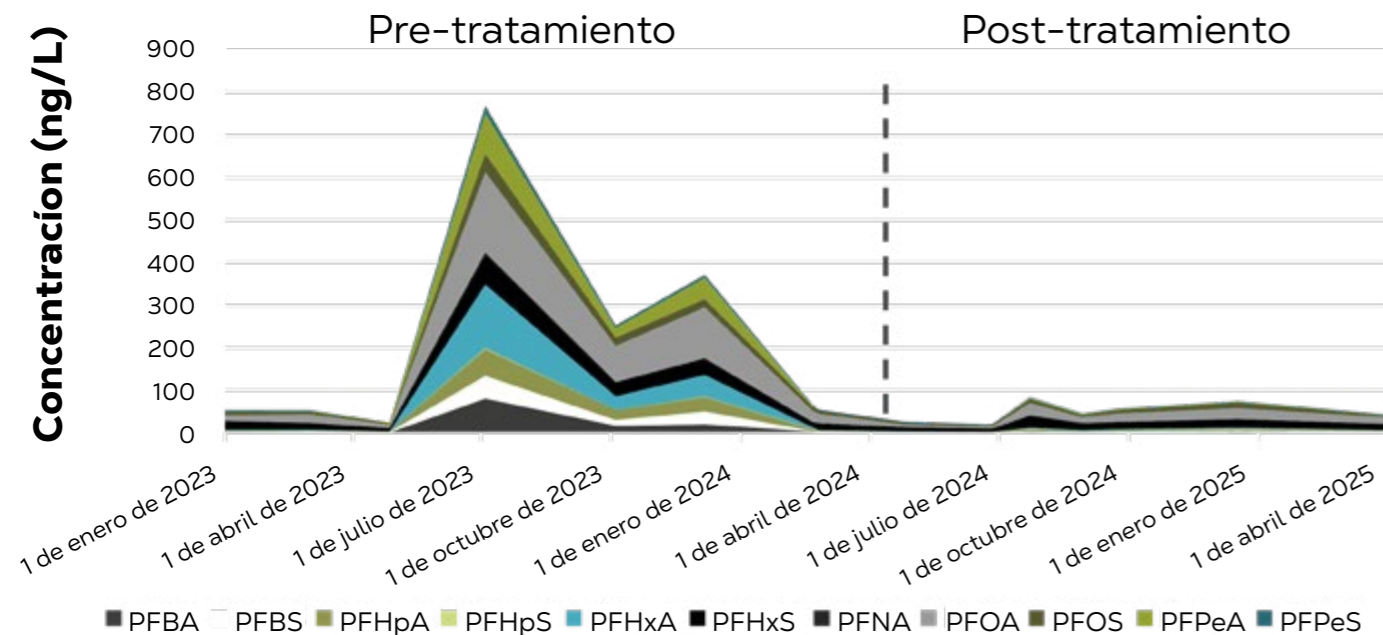
Evaluación de beneficios e impactos

Los resultados del proyecto indican que existe tecnología disponible capaz de separar y eliminar los distintos compuestos PFAS a un coste razonable. Sin embargo, la configuración final del sistema de tratamiento dependerá en gran medida del volumen a tratar, de la composición del agua de entrada y de los valores objetivo que se quieran alcanzar. Más allá de los resultados técnicos, este proyecto proporciona información valiosa para gestores del ciclo del agua, gestores de emplazamientos contaminados y responsables políticos. LIFE SOuRCE contribuye a una mejor toma de decisiones en la remediación de aguas

subterráneas y apoya los objetivos ambientales de la UE relacionados con la calidad del agua y la contaminación química.

Retos futuros

La contaminación por PFAS sigue siendo un desafío a largo plazo debido a la persistencia de estas sustancias y a la existencia de fuentes continuas de contaminación. Según los resultados del proyecto y desde un punto de vista técnico, los esfuerzos futuros deben centrarse en el escalado de métodos de regeneración rentables y escalables para AEX, una tecnología con una alta eficiencia para la eliminación de PFAS de cadena corta. Además, la remediación de PFAS se ve obstaculizada por importantes desafíos en materia de monitorización y análisis, ya que los métodos existentes aún no permiten detectar de forma eficiente y exhaustiva todo el espectro de PFAS conocidos y sus precursores, incluidos los compuestos de nueva generación. Por último, los esfuerzos técnicos deben alinearse con los marcos regulatorios y de gestión, que difieren entre regiones e imponen restricciones adicionales sobre las estrategias de monitorización, los objetivos de tratamiento y los plazos de implementación.



Concentración de PFAS en el agua subterránea después de los tratamientos aplicados.

Actividades de difusión

Los resultados se difundieron ampliamente para sensibilizar sobre la contaminación por PFAS y las soluciones de remediación de aguas subterráneas. Se llegó a más de 2.000 personas a través del sitio web del proyecto, redes sociales y redes de difusión. También se implicó a los grupos de interés mediante seminarios web, reuniones y eventos presenciales en España y Suecia.



Uno de los eventos on-site del proyecto LIFE SOuRCE en el emplazamiento sueco.

Resultados clave de los emplazamientos:

- **SAFF + PHYTO** alcanzó una eliminación cercana al 100 % en PFAS de cadena larga ($\geq C7$) y del 61 % en PFAS de cadena corta ($< C7$). La adición de surfactantes mostró un notable potencial para aumentar la eficacia de eliminación de los PFAS de cadena corta.
- **SAFF + AEX** alcanzó un 99 % de eliminación para PFAS de cadena larga y un 92 % para los de cadena corta, constituyendo una alternativa más viable a SAFF + PHYTO gracias a la regeneración de las resinas y al tratamiento mediante EO del concentrado del SAFF y del efluente resultante de la regeneración de las resinas.

- **EO** alcanzó hasta un 88 % de degradación durante el tiempo de tratamiento aplicado. El balance de masas de flúor mostró una recuperación casi completa (97-99 %), confirmando la mineralización de los PFAS degradados.

- **Los costes totales de tratamiento** del proceso completo se mantienen en niveles comparables al carbón activado granular (GAC), alrededor de 0,15 €/m³ de agua tratada.



Socios del proyecto

Fundació Eurecat (project coordinator)

Envytech Solutions AB

ESOLVE Consultoría e Ingeniería Medioambiental S.L.

Laqua Treatment AB

Nova Diamant AB

Swedish Geotechnical Institute (SGI)

Swedish University of Agricultural Sciences (SLU)

Uppsala Vatten och Avfall AB (UVA)



Contacto

info@eurecat.org

LIFE_SOURCE@eurecat.org

www.life-source.se

Las imágenes de este informe fueron producidas por los socios participantes, obtenidas de Adobe Stock, o generadas usando Google Gemini Nano Banana Pro.

