



ORIGINAL

REMEDIACIÓN SOSTENIBLE DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS: NUEVOS PROBLEMAS NUEVAS SOLUCIONES

SUSTAINABLE SOIL AND GROUNDWATER REMEDIATION: NEW PROBLEMS, NEW SOLUTIONS

Aurora Santos López^{1,2}

1. Departamento de Ingeniería Química y de los Materiales. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid.
2. Académica Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

RESUMEN

La contaminación del suelo y las aguas subterráneas es uno de los grandes desafíos ambientales del siglo XXI. A menudo invisible, su origen está en décadas de vertidos industriales, uso intensivo de productos químicos y mala gestión de residuos. Entre los contaminantes más complejos de eliminar se encuentran los NAPL (Líquidos No Acuosos de Fase Separada), como hidrocarburos o disolventes industriales. Estos líquidos se acumulan en el subsuelo, formando focos de contaminación persistente que liberan toxinas al agua subterránea y al aire en forma de vapores peligrosos. Su tratamiento requiere tecnologías específicas que movilicen, degraden o aislen estos compuestos de forma segura y eficaz. Junto a ellos, emergen nuevos contaminantes como los microplásticos y los PFAS, conocidos por su alta toxicidad y resistencia a la degradación. En este contexto, la remediación ambiental avanza hacia soluciones más sostenibles, como tecnologías híbridas, inteligencia artificial para optimizar procesos, y métodos basados en la naturaleza.

Palabras clave: Hemediación Sostenible; NAPL; PFAS; Microplásticos.

ABSTRACT

Soil and groundwater pollution is one of the major environmental challenges of the 21st century. Often invisible, was caused from decades of industrial discharges, intensive use of chemicals, and poor waste management. Among the most challenging pollutants to remove are NAPLs (Non-Aqueous Phase Liquids), such as hydrocarbons or industrial solvents. These liquids accumulate underground, forming persistent contamination hotspots that release toxins into groundwater and harmful vapors into the air. Treating them requires specific technologies to mobilize, degrade, or isolate these compounds safely and effectively. Alongside them, new pollutants are emerging, such as microplastics and PFAS, known for their high toxicity and resistance to degradation. In this context, environmental remediation is moving toward more sustainable solutions, including hybrid technologies, artificial intelligence to optimize processes, and nature-based methods.

Keywords: Sustainable Remediation; NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids); PFAS (Per- and Polyfluoroalkyl Substances); Microplastics.

Correspondencia

Aurora Santos López

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España
Calle Valverde, 22 · 28004 · Madrid, España

E-mail: Aursan@ucm.es

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos dos siglos, la humanidad ha tenido una visión materialista de la naturaleza, viendo sus recursos como infinitos. Esta idea empezó a cuestionarse a mediados del siglo XX, al evidenciarse los graves efectos ambientales de la explotación irresponsable de los recursos. En 1987, el Informe Brundtland introdujo el concepto de desarrollo sostenible, promoviendo un equilibrio entre crecimiento económico, bienestar social y protección ambiental. Aunque la conciencia ambiental creció a finales del siglo XX, la contaminación del suelo fue ignorada en favor de otros problemas como la calidad del aire o del agua. Sin embargo, casos graves de contaminación con sustancias tóxicas y metales pesados alertaron al público y a los gobiernos, impulsando normativas más estrictas tras evidenciar los riesgos para la salud humana y los ecosistemas.

La contaminación del suelo cobró visibilidad pública y legislativa tras varios desastres emblemáticos que evidenciaron sus graves impactos en la salud humana y el medio ambiente. Entre los más significativos se encuentran:

- Minamata (Japón, 1950s): Vertidos de metilmercurio causaron intoxicaciones masivas y daños neurológicos graves.
- Love Canal (EE.UU., 1970s): Residuos químicos filtrados al suelo provocaron cánceres y malformaciones, impulsando la ley Superfund en US.
- Lekkerkerk (Países Bajos, 1980): Un vecindario fue construido sobre un antiguo vertedero industrial, exponiendo a los residentes a sustancias tóxicas, lo que llevó a normativas más estrictas en los Países Bajos.
- Aznalcóllar (España, 1998): El colapso de una balsa minera liberó lodos tóxicos que contaminaron el río Guadiamar y amenazaron Doñana, subrayando la necesidad de mayor control sobre los residuos mineros.

Los contaminantes implicados en desastres ambientales —como metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos— tienen efectos graves como el cáncer, daño neurológico y toxicidad crónica. Estos eventos impulsaron normativas más estrictas para proteger el suelo. Aunque la Carta Europea de Suelos (1972)

ya advertía sobre su importancia, no fue hasta los años 80 y 90 (con conferencias como la de Países Bajos en 1985 y la Cumbre de Río en 1992) que se intensificó la acción internacional.

En España, la preocupación ambiental comenzó en los años 70 con la regulación del aire (Ley 38/1972), seguida por la calidad del agua en los 80 (RD 1423/1982 y Ley 29/1985). Sin embargo, la contaminación del suelo no fue regulada hasta el Real Decreto 9/2005, que identificó actividades contaminantes y criterios para declarar suelos contaminados. Posteriormente, el Real Decreto 9/2015 y la Ley 7/2022 actualizaron el marco legal, promoviendo la descontaminación, la prevención de nuevos daños y la economía circular en la gestión de residuos y suelos.

La recuperación ambiental de suelos contaminados se basa en varios principios clave recogidos en la legislación actual. Uno de los más importantes es el principio de responsabilidad del contaminador, que obliga a quien ha causado la contaminación a llevar a cabo las acciones necesarias para eliminar o reducir los riesgos asociados, garantizando así un entorno seguro.

También se aplican criterios de sostenibilidad en las acciones de recuperación. Estas deben garantizar niveles de riesgo aceptables según el uso previsto del suelo y priorizar soluciones que sean viables desde el punto de vista ambiental, técnico y económico. Se da preferencia a las tecnologías que actúan directamente en el lugar afectado (técnicas *in situ*), minimizando la generación y transferencia de residuos. Siempre que sea posible, se debe eliminar la fuente de contaminación; solo en casos justificados se opta por técnicas de confinamiento o traslado del suelo contaminado, ya que estas suelen ser costosas, con alto impacto ambiental y social, y generan una importante huella de carbono.

Además, se emplea un enfoque basado en el análisis del riesgo. Las estrategias de recuperación se adaptan a las características específicas de cada caso, teniendo en cuenta el uso futuro del suelo. Por ejemplo, un terreno destinado a uso urbano requiere estándares de descontaminación más exigentes que uno destinado a uso industrial.

Finalmente, se ha reconocido de forma más clara la relación entre el suelo y las aguas subterráneas, especialmente con la modificación del Reglamento del

Dominio Público Hidráulico (RD 665/2023). Dado que el suelo actúa como filtro natural para el agua que se infiltra hacia los acuíferos, su contaminación puede afectar seriamente la calidad del agua subterránea. Esta contaminación puntual suele originarse en fuentes específicas como vertidos accidentales, lixiviados de vertederos o fugas de tanques subterráneos. Por ello, la nueva normativa refuerza la protección de las aguas subterráneas mediante una gestión integrada del suelo y el agua, incluyendo medidas como la identificación de zonas vulnerables, el control de actividades contaminantes, la aplicación de técnicas correctoras para suelos afectados y la implementación de sistemas de monitoreo continuo.

El binomio suelo-agua subterránea representa una interacción casi inseparable, en la que los problemas de uno repercuten inevitablemente en la salud del otro. Los contaminantes presentes en el suelo pueden disolverse en el flujo de agua subterránea, formando plumas de contaminación que, en muchos casos, no pueden ser atenuadas de manera natural. Esta interacción pone de manifiesto la fragilidad del equilibrio entre ambos sistemas. Adicionalmente, los

contaminantes volátiles presentes en el suelo pueden migrar hacia la atmósfera, generando vapores tóxicos que, en zonas habitadas cercanas a la fuente de contaminación, pueden infiltrarse en edificios y hogares, comprometiendo la calidad del aire interior y la salud de las personas. (Figura 1).

La contaminación del suelo, junto con la contaminación secundaria del agua subterránea y del aire, representa un grave riesgo tanto para la salud humana como para los ecosistemas. Abordar estos desafíos requiere una comprensión profunda del origen de la contaminación, los mecanismos que controlan su transporte y transformación en el sistema suelo-aire-agua, y los riesgos asociados a estos flujos. Este conocimiento es fundamental para establecer objetivos de remediación que reduzcan el riesgo a niveles aceptables y permitan diseñar estrategias de recuperación que minimicen el impacto ambiental, fomenten la regeneración de los recursos y sean económicamente viables. Mientras la contaminación no fue sostenible, la remediación debe serlo, garantizando así un futuro más equilibrado para el medio ambiente y las comunidades.

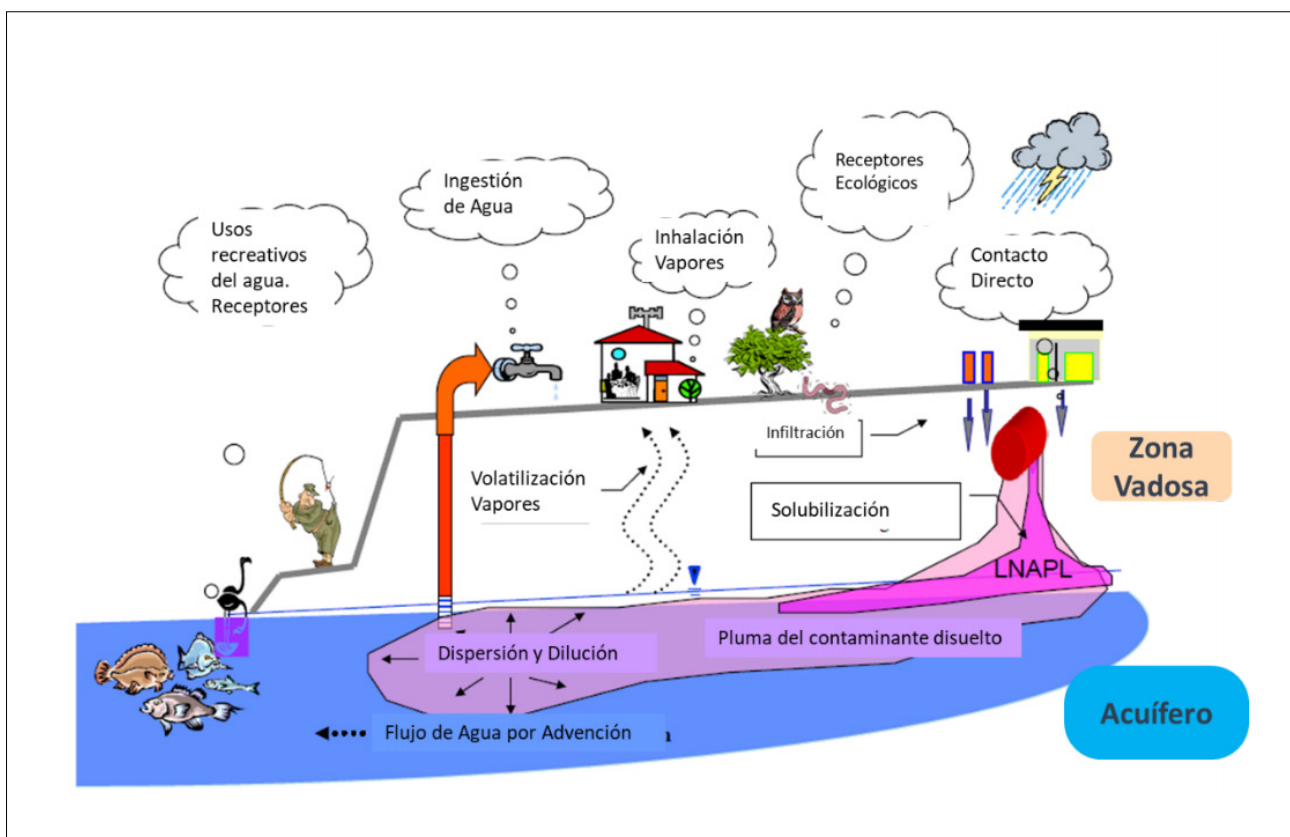


Figura 1. Contaminación del suelo: efecto dominó en la contaminación del agua y el aire.

ORIGEN Y CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: UN LEGADO DE DESAFÍOS AMBIENTALES

La contaminación del suelo y las aguas subterráneas tiene un origen multifacético que combina procesos naturales y, de forma mucho más alarmante, actividades humanas. Los fenómenos naturales, como la emanación de lava volcánica o la liberación de arsénico desde minerales presentes en acuíferos, pueden provocar la contaminación del suelo y la migración de compuestos tóxicos hacia las aguas subterráneas. Sin embargo, el impacto más significativo proviene de las actividades humanas, tanto intencionadas como accidentales, ya sea de forma difusa, como la resultante de prácticas agrícolas intensivas, o localizada, debido a actividades industriales, mineras y urbanas (Figura 2).

A esto se suma la actividad industrial, militar, minera, transporte y almacenamiento de químicos y gestión de residuos en vertederos. Se estima que existen cerca de 3 millones de emplazamientos con actividades potencialmente contaminantes en toda la Unión Europea, muchos de los cuales requieren investigaciones adicionales para evaluar los daños y determinar si es necesaria la remediación (limpieza) del suelo. Se han identificado ya más de 250000 sitios contaminados por focos locales en la Unión Europea (datos actualizados en 2020) y se prevé que esta cifra continúe en aumento. A pesar de los esfuerzos significativos realizados en algunos países, se necesitarán décadas para abordar el legado de la contaminación del suelo. En los últimos 30 años, se han descontaminado aproximadamente 80000 sitios en los países que cuentan con datos disponibles sobre remediación. <https://www.eea.europa.eu/themes/soil/soil-threats/soil-contamination-from-local-sources> (Figura 3)



Figura 2. Fuentes probables de polución de las aguas subterráneas debido a actividades humanas.

La agricultura y la ganadería intensiva han descargado grandes cantidades de nutrientes al suelo, desencadenando procesos como la eutrofización de cuerpos de agua cercanos y poniendo en peligro la biodiversidad acuática (Rodríguez-Eugenio, McLoughlin, and Pennock 2018). Además, el mercado de agroquímicos crece un 3,2% cada año. El 58% de los suelos agrícolas de Europa presentan múltiples residuos de plaguicidas, la mitad de los cuales son ilegales en la actualidad (Silva et al. 2019). Los medicamentos y fármacos suministrados a los animales en granjas intensivas y excretados por éstos, constituyen un contaminante emergente en los purines cuyo riesgo no puede obviarse.

Durante décadas, toneladas de residuos peligrosos, como pesticidas, mercurio, bifenilos policlorados (PCBs) y otros compuestos orgánicos persistentes (POPs), han sido vertidos, a menudo sin control, en vertederos, multiplicando los riesgos ambientales. Las actividades mineras y la explotación de recursos energéticos han contribuido significativamente a la contaminación del suelo. Las minas han generado residuos ricos en arsénico, cadmio, plomo y mercurio, mientras que los procesos de oxidación de sulfuros minerales han intensificado la lixiviación y toxicidad de estos metales. Por otro lado, los derrames de hidrocarburos durante el transporte y las fugas de tanques de almacenamiento han liberado compuestos como BTEX

(benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos), muchos de ellos con propiedades cancerígenas y mutagénicas.

La utilización masiva de compuestos clorados en la industria, como los halometanos, el tricloroetileno y el percloroetileno, ha dejado contaminaciones persistentes que, incluso décadas después, continúan afectando la calidad del suelo y el agua subterránea. Aunque muchas de estas sustancias han sido prohibidas o restringidas a través de regulaciones como el Convenio de Estocolmo, sus efectos perduran, con concentraciones de contaminantes que pueden superar miles de mg/kg en suelos contaminados o varias decenas de mg/L en aguas subterráneas. Además, los contaminantes presentes en el agua subterránea son un espejo de la presencia de estos contaminantes vertidos al suelo en esos focos locales (Figura 3).

Este complejo panorama exige no solo la remediación de los sitios afectados, sino también la implementación de regulaciones estrictas y medidas preventivas para minimizar futuros impactos. El desafío radica en gestionar este legado contaminante y mitigar sus efectos en acciones de remediación sostenibles.

CONTAMINANTES DE PREOCUPACIÓN EMERGENTE: DESAFÍOS AMBIENTALES DEL FUTURO

A los nutrientes, contaminantes orgánicos y metales o metaloides cuyos efectos nocivos son ya conocidos, se han sumado recientemente otros compuestos denominados de preocupación emergente, o contaminantes emergentes. Son un grupo de nuevos contaminantes ambientales cuya regulación por las

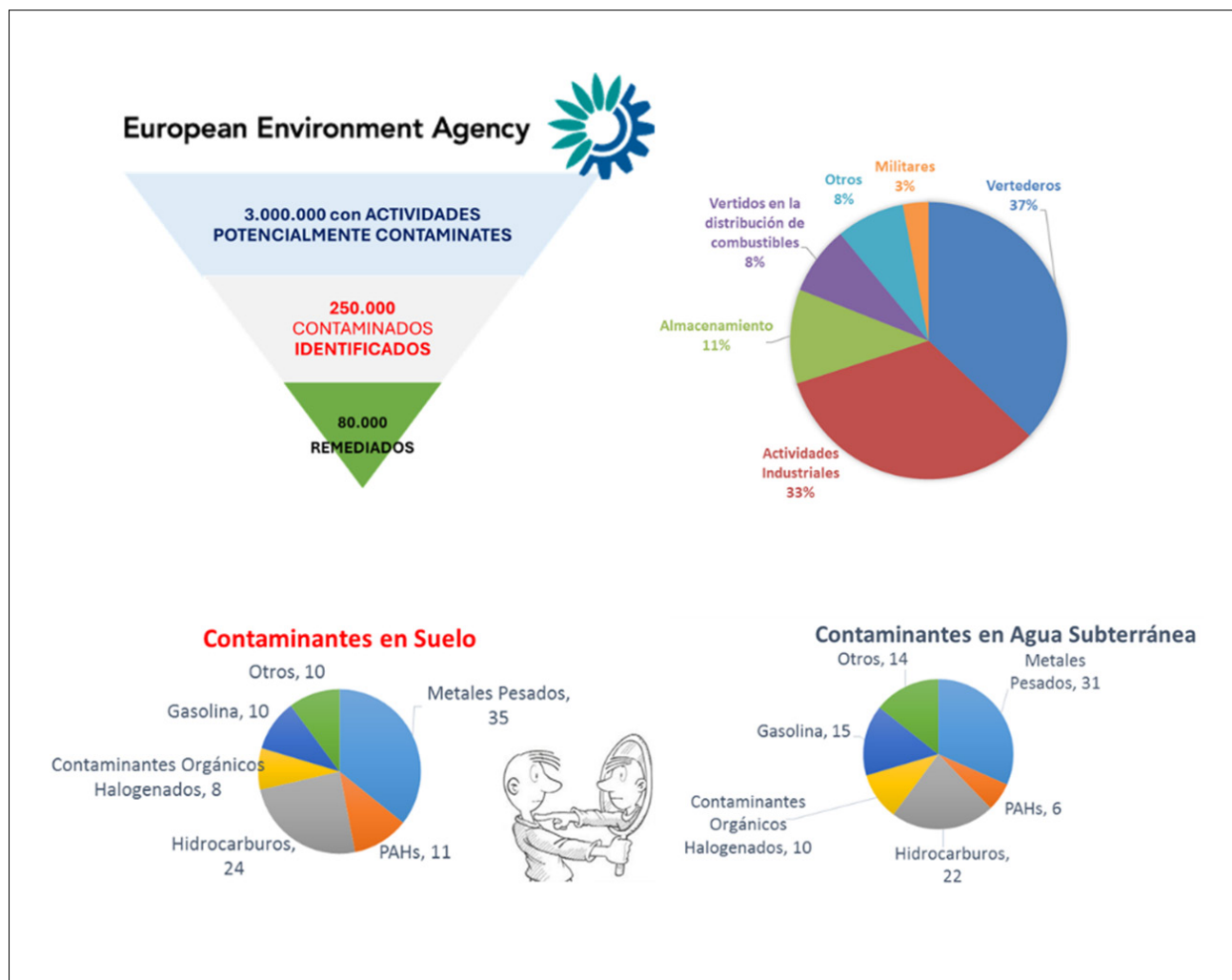


Figura 3. Contaminantes en el suelo y agua subterránea por vertidos locales de la actividad humana.

normativas actuales es parcial o no existe aún. Estos contaminantes suelen ser recalcitrantes, tóxicos, bioacumulativos y tienen el potencial de causar impactos adversos significativos en los ecosistemas y la salud pública. A menudo se detectan en niveles muy bajos en suelos y aguas subterráneas, gracias a los avances tecnológicos en el análisis químico. Los contaminantes emergentes se clasifican en dos categorías principales (Gao 2022): químicos de preocupación emergente (CECs), como los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) y los compuestos perfluorados (PFCs); y partículas de preocupación emergente (PECs), que incluyen nanopartículas y microplásticos (Figura 4). Aunque su detección y estudio aún son un desafío, especialmente para las PECs, se están realizando avances significativos en la comprensión de su presencia, destino e impacto ambiental.

1. Sustancias perfluoroalquiladas (PFAs)

Las sustancias perfluoroalquiladas (PFAs) son compuestos utilizados desde la década de 1950 en una amplia gama de aplicaciones domésticas y comerciales, incluyendo recubrimientos superficiales para alfombras, muebles, papel, cuero y metal, agentes de limpieza y espumas contra incendios. Algunos PFAS tienen propiedades muy tóxicas y bioacumulativas, siendo el PFOS (sulfonato de perfluorooctano) y PFOA (ácido perfluorooctanoico) dos de los PFAS más preocupantes y añadidos en 2019 al Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Estos compuestos tienen alta solubilidad en agua, son altamente móviles y persistentes, no se biodegradan y pueden migrar largas distancias en el agua subterránea y agua superficial (Kidd, Fabricato-

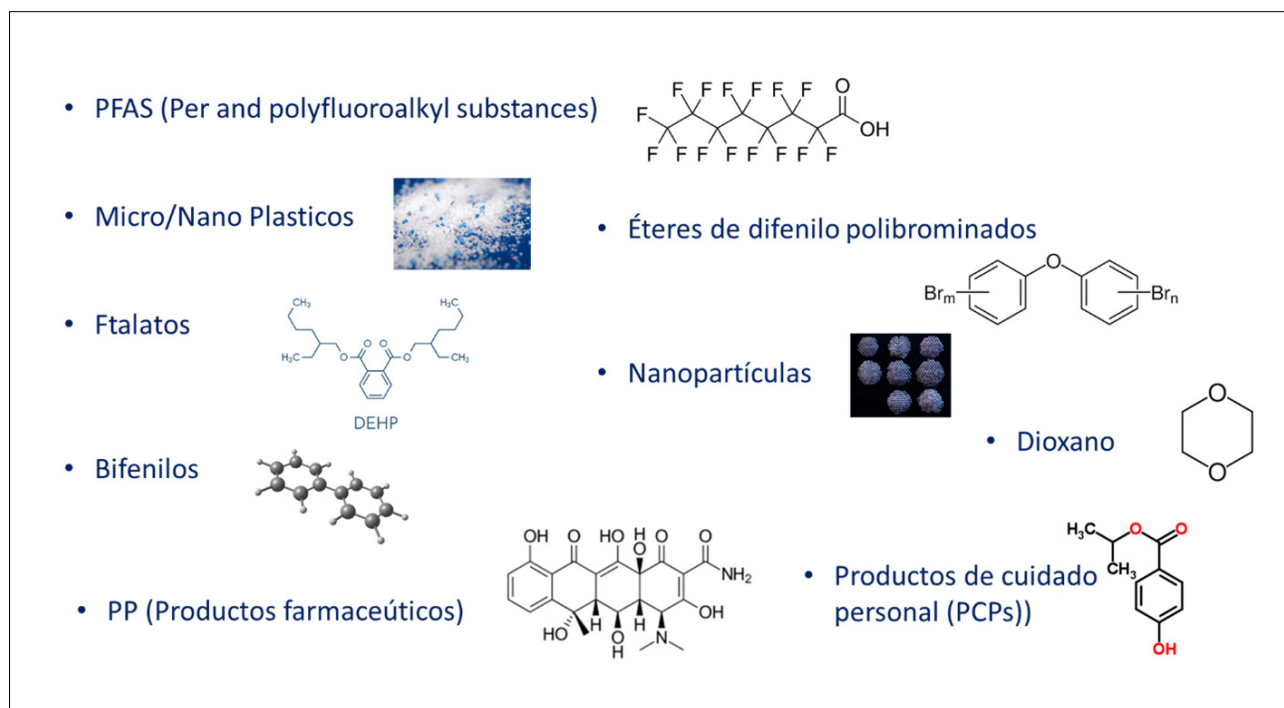


Figura 4. Contaminantes de preocupación Emergente (CECs) en suelo y Agua subterránea.

En los siguientes apartados se analiza la situación de dos tipos de contaminantes emergentes que están adquiriendo una creciente relevancia en suelos y aguas subterráneas: las sustancias perfluoroalquiladas (PFAS) y los micro- y nanoplásticos. Ambos presentan un interés creciente debido a su persistencia y potencial impacto ambiental, y podrían ser objeto de regulación en un futuro próximo.

re, and Jackson 2022). Son comúnmente conocidas como “forever chemicals” (químicos eternos) debido a su extraordinaria persistencia en el medio ambiente y su resistencia a la degradación natural (Figura 5). Su presencia es ubicua en Europa (Figura 6) <https://foreverpollution.eu/> y la concentración en suelos puede llegar hasta 36,000 µg/kg en zonas de entrenamiento con espumas anti-incendio y en agua subterránea

hasta 17 ng/L para PFAS totales cerca de bases militares y hasta 160 ng/L para PFBA en áreas contaminadas por lixiviados de vertederos (Bolan et al. 2021).

Las emisiones difusas (Stoiber, Evans, and Naidenko 2020, Xu et al. 2021) provienen del desgaste de recubrimientos superficiales, mientras que las emi-

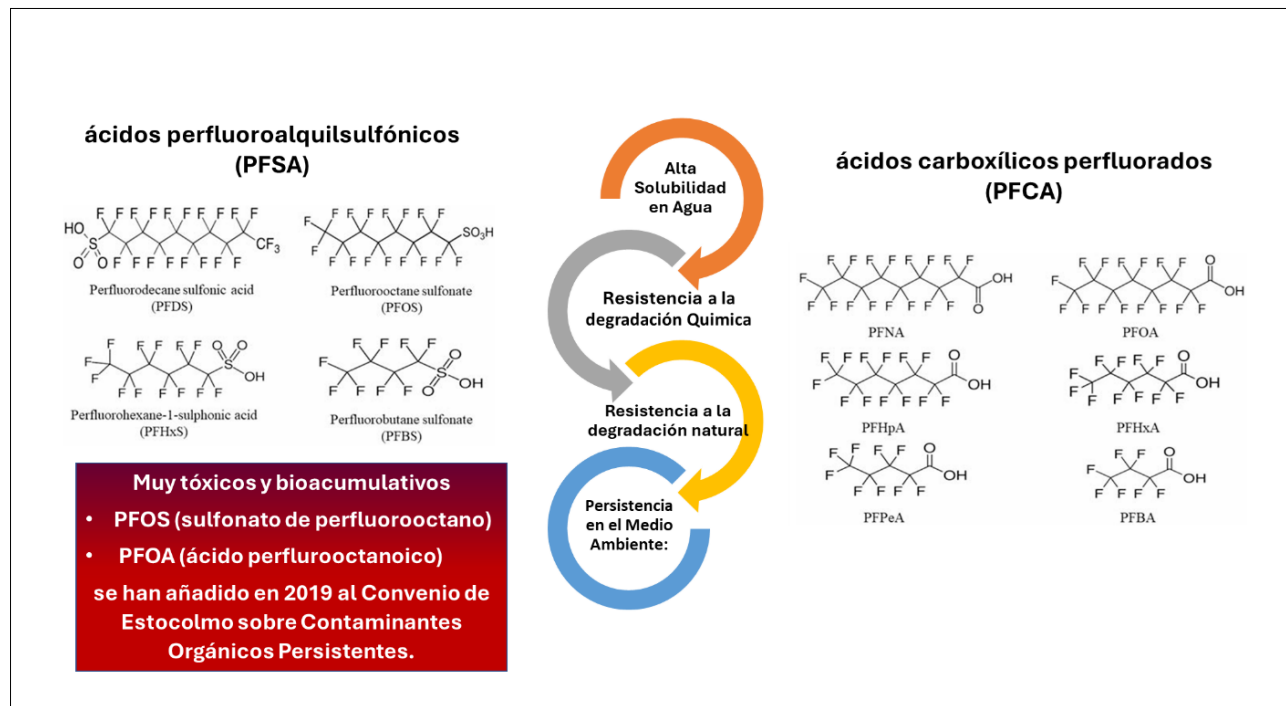


Figura 5. PFAS, Los químicos eternos.

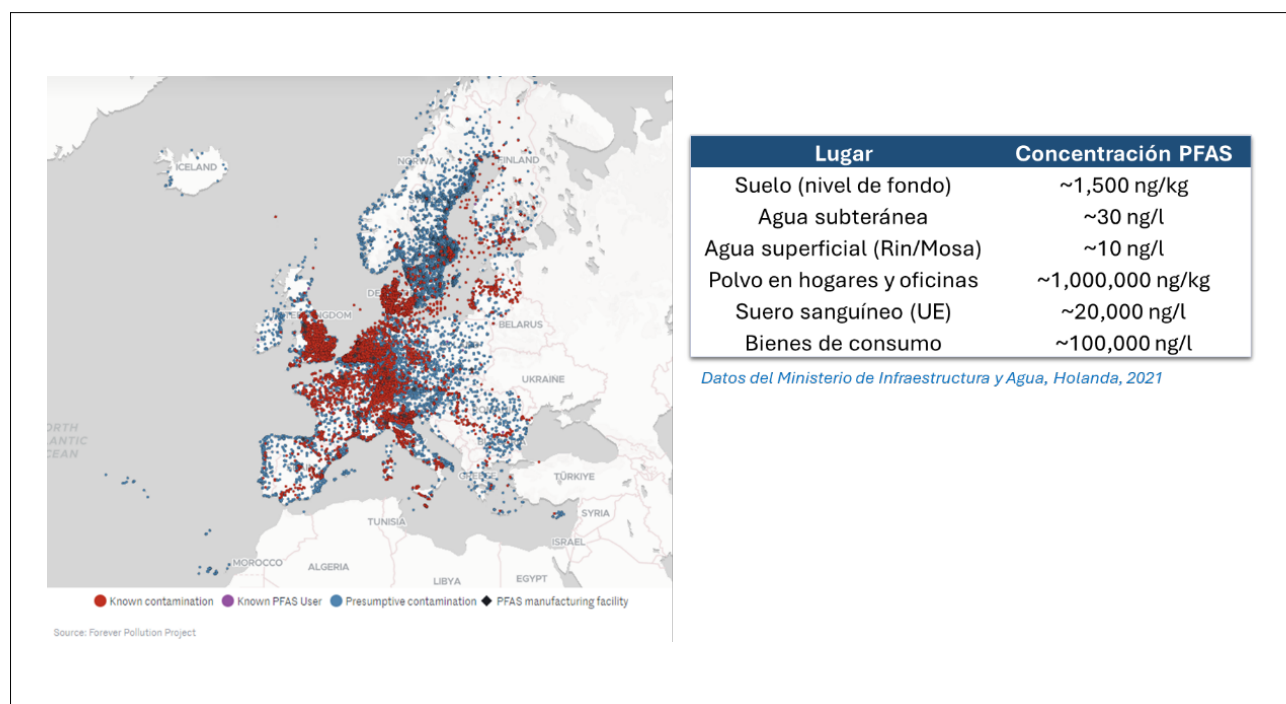


Figura 6. PFAS en EUROPA: Un problema ineludible <https://foreverpollution.eu/>

siones puntuales pueden originarse en vertederos, instalaciones petroquímicas, plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y lugares donde se ha producido extinción de incendios (Figura 7). Especialmente complejo es el tratamiento de penachos de PFAS en agua subterránea que puede impactar tomas de agua potable o aguas superficiales. En este caso una estrategia ya implantada es el control de la contaminación mediante biobarreras de nano carbón activo inyectado como una fase líquida en el suelo (Sorengard, Kleja, and Ahrens 2019).

destrucción química a través de procesos como la oxidación avanzada y métodos electroquímicos, y la concentración utilizando técnicas como la ósmosis inversa o el foam fractionation. Sin embargo, estas opciones son todavía limitadas y costosas. Además, los métodos analíticos para detectar precursores y productos de descomposición de PFAS están en desarrollo, lo que complica la evaluación y gestión efectiva de estos contaminantes. (ITRC 2023a). Un resumen de las tecnologías de eliminación de PFAS en suelos y aguas subterráneas se muestra en la Tabla I.

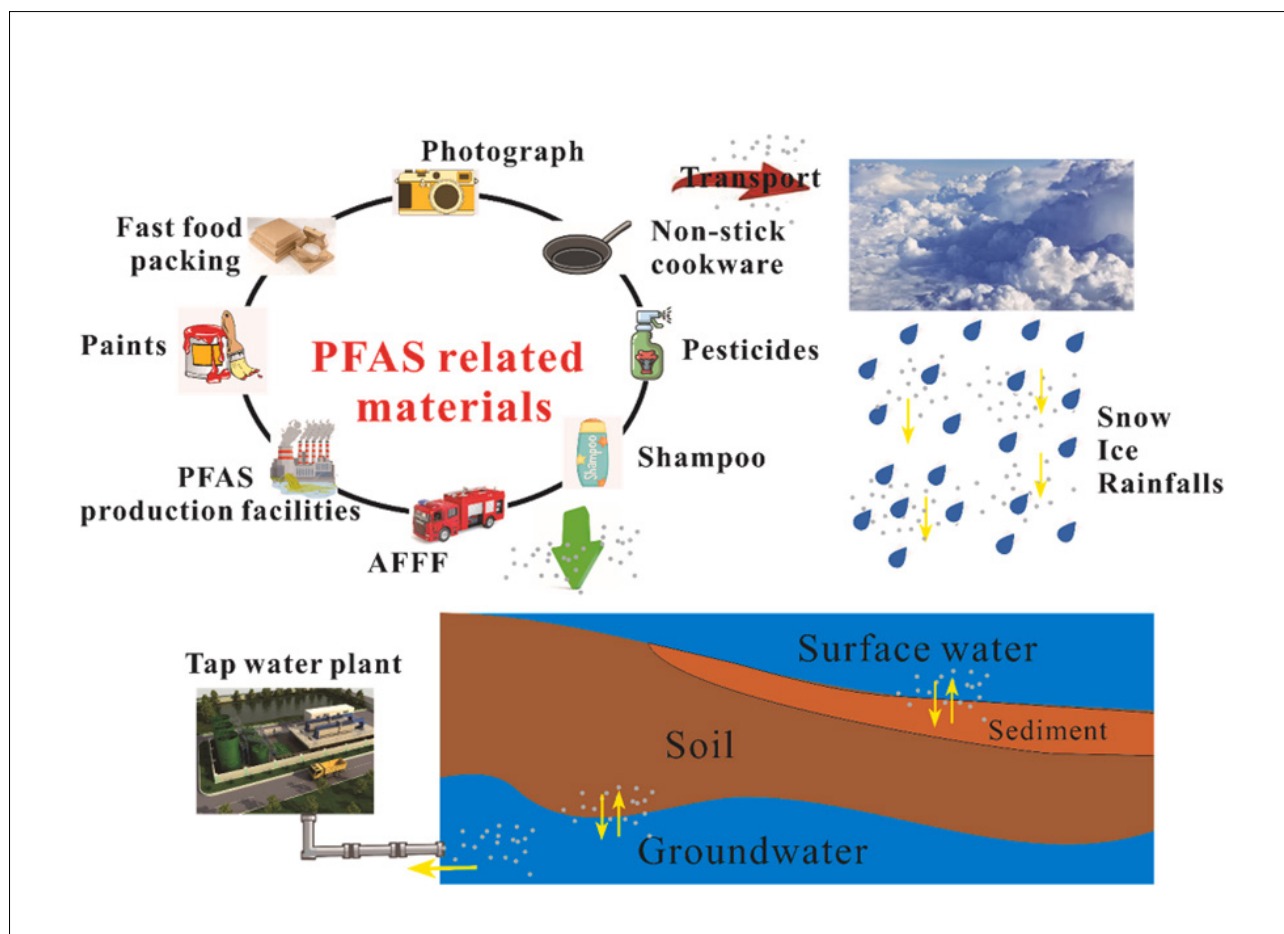


Figura 7. Diagrama esquemático de las posibles fuentes de PFAS en las aguas subterráneas (Xu et al. 2021) (PFAS and their substitutes in groundwater: Occurrence, transformation and remediation - ScienceDirect bajo licencia Creative Commons).

La remediación de la contaminación por PFAS en suelos y aguas subterráneas presenta desafíos significativos debido a la persistencia y complejidad de estos compuestos. Las estrategias actuales incluyen la movilización mediante lavado de suelos, la inmovilización con materiales como carbón activado y biochar, la

Varios países europeos han adoptado directrices para el agua potable y regulaciones para suelo y agua subterránea con respecto a uno o más compuestos de PFAS, mientras que la Unión Europea ha adoptado normas de calidad ambiental para el PFOS en aguas superficiales, estableciendo estándares ex-

tremadamente bajos. La normativa de PFAs en suelo y aguas subterráneas no se ha desarrollado aún a nivel europeo pero es un tema candente entre los legisladores ambientales (Pulster et al. 2024). Los retos relacionados con la monitorización, riesgos, regulación y remediación de los PFAS subrayan la necesidad de enfoques más efectivos y sostenibles para gestionar estos contaminantes persistentes.

2. Microplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs)

Los microplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs) son contaminantes emergentes originados principalmente por la mala gestión de residuos plásticos, el uso de lodos de depuradoras y el desgaste de textiles sintéticos. Aunque la producción global de plásticos supera los 350 millones de toneladas anuales (Park

Tecnología	Medio de Aplicación	Mecanismo de Acción	Eficacia Reportada	Madurez Tecnológica
Biochar	Suelos	Adsorción	Moderada	Emergente
Plasma no térmico	Suelos	Degradación química por especies reactivas	Alta (hasta 90%)	Piloto
Smoldering combustion	Suelos	Combustión auto-sostenida	Alta	Piloto
Lixiviación (Soil Washing)	Suelos	Lavado físico/químico	Variable	Comercial
Carbón Activado Granular (GAC)	Aguas subterráneas	Adsorción	Alta	Comercial
Foam Fractionation	Aguas subterráneas	Adsorción en burbujas de aire y separación por espuma	Alta para PFAS de cadena larga	Piloto/Comercial
Intercambio iónico	Aguas subterráneas	Intercommon iónico	Alta para PFAS de cadena corta	Comercial
Hierro Cero Valentente (ZVI/ nZVI)	Aguas subterráneas	Reducción química	Alta (más estudios necesarios)	Piloto
Reducción con metales alcalinos	Aguas subterráneas	Desfluorinación reductiva	Moderada	Laboratorio
Sistemas CHP	Aguas subterráneas	Oxidación avanzada	Limitada	Piloto
Persulfato activado	Aguas subterráneas	Radicales sulfato	Moderada-Alta	Piloto
Tecnología eBeam	Ambos	Radiación ionizante	Moderada	Piloto

Tabla I. Métodos de Eliminación de PFAS en suelos y aguas subterráneas y madurez tecnológica (basado en la información de (ITRC 2023a).

et al. 2024)., menos del 9 % proviene de materiales reciclados (Europe 2023), lo que contribuye a la persistencia de plásticos en el medio ambiente. Estos residuos se degradan, generando MPs (1 μm a 5 mm) y NPs (menos de 1 μm), reconocidos como un problema ambiental de gran relevancia.

Los MPs alteran las propiedades del suelo y dañan la microbiota, mientras que los NPs, por su alta movilidad y capacidad de acumulación, interactúan con otros contaminantes y se dispersan ampliamente. Su transporte y destino dependen de factores como la química del agua y las características del suelo. Las estaciones depuradoras (EDAR) actúan como fuentes importantes de dispersión de estos contaminantes, favoreciendo su distribución global y su impacto ambiental. (Wu et al. 2019, Kumar et al. 2020, Zhang et al. 2022, Awolesi, Oni, and Arwenyo 2023) (Figura 8)

con efectos significativos en los ecosistemas y cadenas tróficas (Figura 10). Forman además biofilms que pueden incluir microorganismos potencialmente peligrosos.

La eliminación de microplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs) en suelos y aguas subterráneas representa un desafío técnico aún en desarrollo. La estrategia más efectiva es la prevención en origen, mediante la reducción del uso de plásticos y la adopción de alternativas biodegradables. Cuando la prevención no es posible, se requiere mejorar la gestión de residuos y el tratamiento de aguas para limitar la entrada de MPs y NPs al medio ambiente (Pérez-López, Domínguez et al. 2025).

En aguas subterráneas, se sugiere el uso de sistemas de filtración seguidos de tratamientos térmicos o químicos para su degradación. En suelos agrícolas, es clave evitar la aplicación de compost derivado de

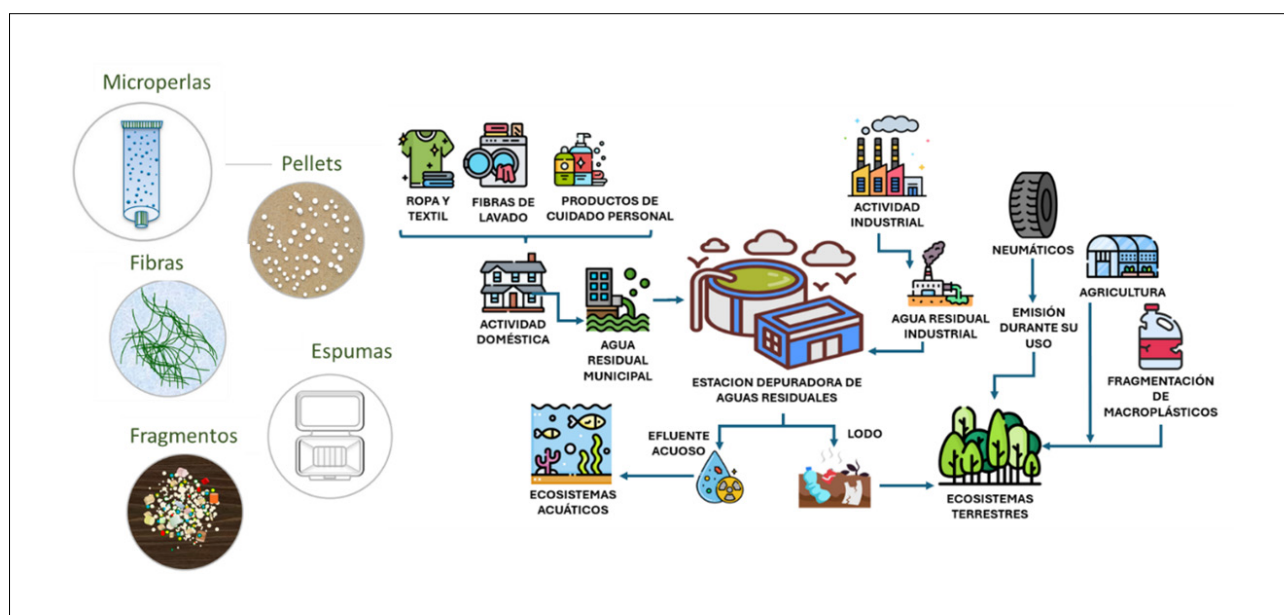


Figura 8. Dispersión de Nano y Microplásticos en suelos y aguas.

Los micro y nanoplásticos (MNP) actúan como vectores de contaminantes debido a su alta capacidad de adsorción (Figura 9), transportando metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, fármacos, PFAS y nutrientes que contribuyen a la eutrofización (Caruso 2019, Stapleton and Hai 2023, Wang, Guo, and Xue 2021). Además, los MNPs liberan aditivos como ftalatos y PAHs, potenciando su interacción con contaminantes y aumentando su dispersión en suelos y aguas,

lodos de depuradoras, que concentran MPs, aunque estos pueden separarse por métodos físico-químicos (Figura 11). Debido a sus bajas concentraciones (en rangos de nanogramos por kg o litro), las tecnologías convencionales resultan poco viables económica y técnicamente. Por ello, se requieren nuevas investigaciones, normativas específicas y el desarrollo de tecnologías híbridas más sostenibles para su detección, control y eliminación (Tabla II).

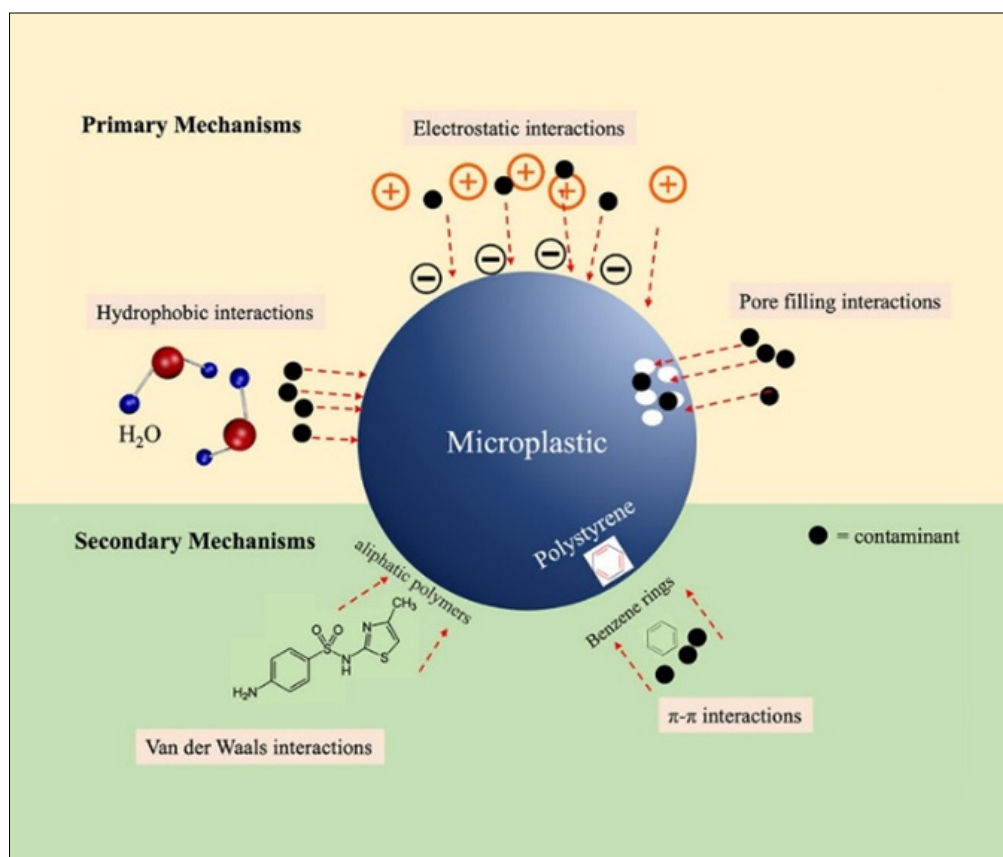


Figura 9. Mecanismo primario y secundario que permite que los microplásticos actúen como vectores de contaminantes. (Stapleton and Hai 2023, bajo licencia Creative Commons Microplastics as an emerging contaminant of concern to our environment: a brief overview of the sour).

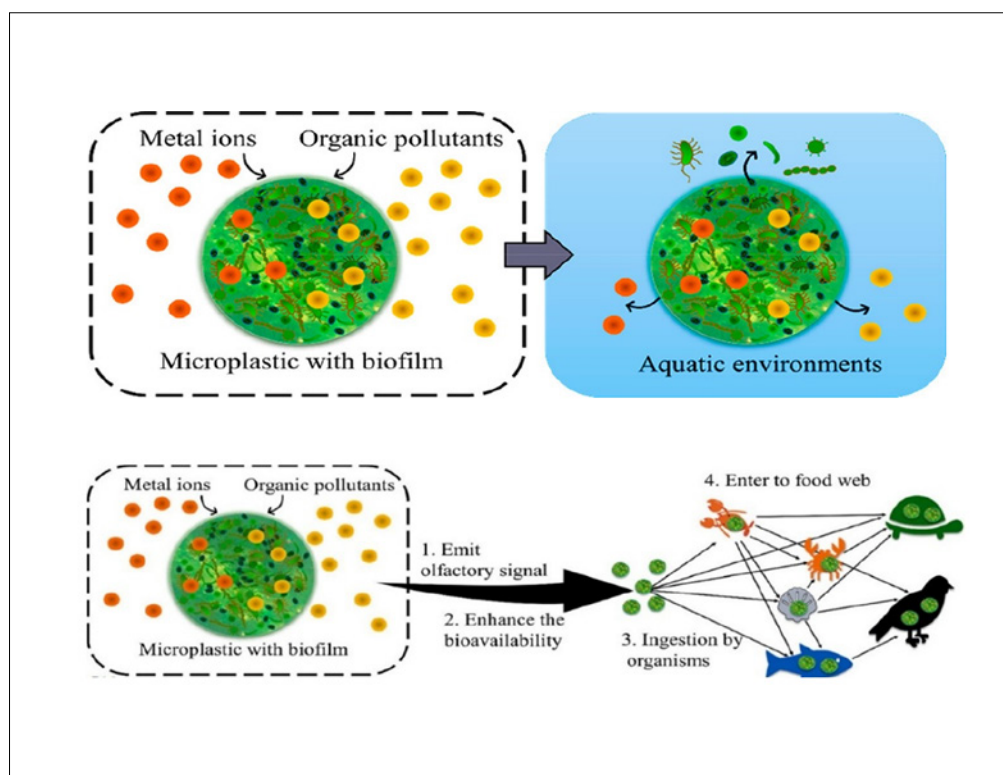


Figura 10 Izquierda: Microplásticos desarrollados con biofilm como vectores para introducir contaminantes en ambientes acuáticos. Derecha: Microplásticos desarrollados con biofilm como vectores para introducir contaminantes en los organismos. Reprinted with permission from <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04466> Copyright (Alfano, Albizzati, and Conte) American Chemical Society. (Wang, Guo, and Xue 2021).



Figura 11. Dispersión de MNPs en las aguas y lodos generados en la EDAR, Propuesta de eliminación de MPs en lodos de depuradoras empleados en compost (<https://www.ucm.es/inproquima>).

CONTAMINANTES ORGÁNICOS HIDRÓFOBOS: UNA AMENAZA QUE PERDURA EN EL TIEMPO

La contaminación del suelo por compuestos orgánicos hidrófobos (COHs) involucra sustancias químicas que no se disuelven fácilmente en agua, pero que tienen afinidad por las fases orgánicas del suelo, lo que dificulta su eliminación. Estos incluyen hidrocarburos (como el petróleo y los hidrocarburos aromáticos policíclicos), pesticidas organoclorados (como el DDT), bifenilos policlorados (PCB), solventes orgánicos (como benceno y tricloroetileno) y productos industriales como plastificantes y fármacos (Trellu et al. 2016). Debido a su persistencia en el ambiente y su tendencia a acumularse en los organismos, estos compuestos son altamente tóxicos y difíciles de remediar. La elección de la tecnología

para su eliminación debe considerar diversos factores, como la naturaleza del contaminante, su ubicación, concentración y fase (ya sea disuelto en agua o en una fase orgánica insoluble). Además, es crucial comprender la interacción de la contaminación con la matriz suelo-agua, utilizando modelos conceptuales que describan su tipo, ubicación y alcance, así como modelos litológicos e hidrológicos para predecir el movimiento de los contaminantes durante la remediación (Leharne 2022, Kokkinaki et al. 2013, Wang, Yang, and Chen 2023, Wang et al. 2023, Ramezanzadeh et al. 2022).

No existe una solución única para abordar la contaminación, por lo que a menudo se requieren enfoques combinados con distintas tecnologías. Las técnicas que impliquen la excavación y tratamiento en el sitio son viables solo si la contaminación está en las

capas superficiales del suelo. Métodos basados en la naturaleza, como la fitorremediación o la biorremediación, pueden no ser viables si la concentración de la contaminación es alta, los compuestos son recalcitrantes a los procesos biológicos o si se requieren tiempos de tratamiento reducidos.

1. Non Aqueous Phase Liquids, NAPLs

Los compuestos orgánicos hidrofóbicos (COHs), como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), solventes clorados, pesticidas y PCBs, tienen baja solubilidad en agua y forman fases líquidas en el subsuelo

	Tecnología	Eficiencia de Eliminación (%)	Estado de Desarrollo	Observaciones
agua potable	Coagulación/ Floculación	70	Comercial	Combinado con sedimentación y filtración
agua potable	Filtración por membrana	90	Comercial	Útil para partículas <1 µm
agua potable	Electrocoagulación	95	Experimental	Alta eficiencia en laboratorio
agua potable	Fotocatálisis	90	Experimental	Utiliza luz UV y catalizadores
agua potable	Extracción magnética	93	Experimental	Requiere nanopartículas magnéticas
agua subterránea	Extracción y tratamiento	80	Comercial	Captación de agua contaminada
agua subterránea	Filtración por membranas	95	Comercial	Requiere alto mantenimiento
agua subterránea	Oxidación electroquímica	90	Experimental	Alta eficiencia en condiciones controladas
agua subterránea	Adsorción avanzada	85	Experimental	Usa materiales como carbono activado
suelo	Compostaje	40	Piloto	Dependiente de temperatura y humedad
suelo	Biorremediación	50	Piloto	Usa microorganismos específicos
suelo	Extracción térmica	75	Piloto	Requiere energía para calentar el suelo
suelo	Lavado de suelos	60	Piloto	Adec. para suelos arenosos
suelo	Oxidación química	70	Experimental	No específico para MP, pero aplicable

Tabla II. Tecnologías de tratamiento de MNPs en suelos y aguas (ITRC 2023b).

llamadas NAPL. Estas pueden ser menos densas que el agua (LNAPL) o más densas (DNAPL), dependiendo del tipo de compuesto. Su presencia suele deberse a fugas de tanques o vertidos industriales pasados. Estas sustancias, debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación, contaminan las aguas subterráneas y pueden generar vapores peligrosos, representando un serio riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Figura 12) (Leharne 2021).

2. Remedición de NAPLs en suelos y aguas subterráneas: Un desafío no resuelto

La remediación de compuestos orgánicos hidrofóbicos (COHs) en suelos y aguas subterráneas es compleja debido a su baja solubilidad y a su persistencia en fases orgánicas separadas (NAPL), que pueden quedar atrapadas en zonas poco permeables del subsuelo. Estas fases actúan como fuentes continuas

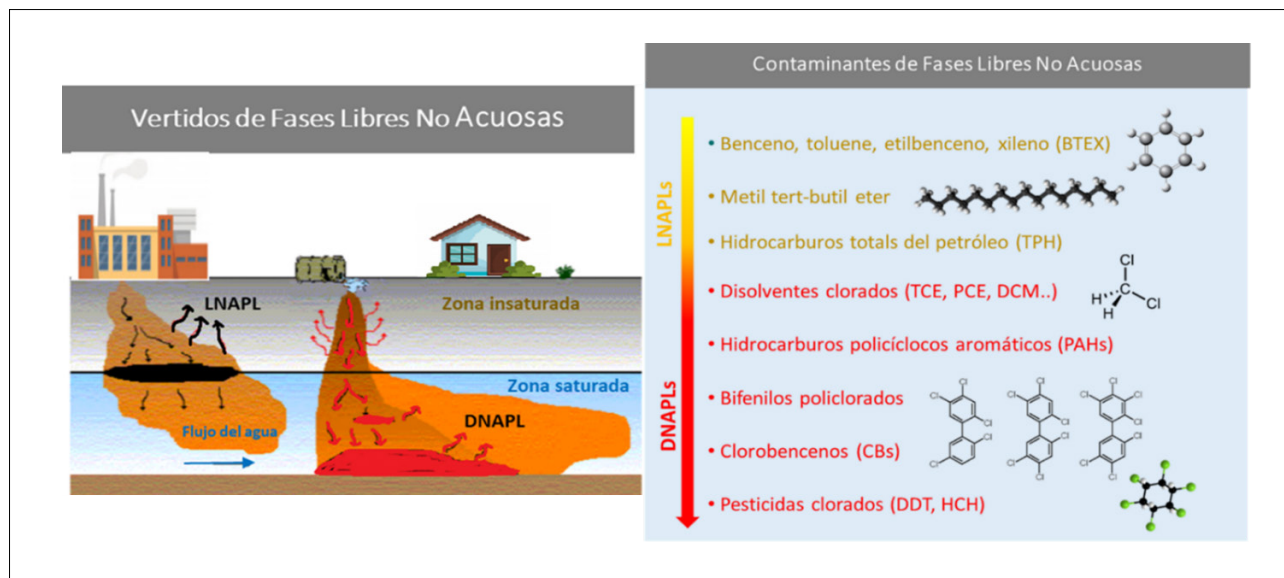


Figura 12. Compuestos Orgánicos Hidrófobos en el suelo y Agua subterránea.



Figura 13. Trenes de Tratamiento propuestos para la gestión sostenible de NAPLs en el subsuelo (www.inproquima.es).

de contaminación, generando penachos en el agua subterránea y, en el caso de compuestos volátiles, vapores peligrosos. Por ello, se requiere un enfoque integral y escalonado que combine distintas tecnologías (Figura 13) y haga el proceso de remediación sostenible.

La fracción más recuperable de los contaminantes puede extraerse mediante bombeo, sin necesidad de productos químicos, obteniendo tanto la fase orgánica insoluble como agua subterránea contaminada. Tras separar ambas fases, el agua puede tratarse in situ. La gestión de la fase orgánica varía según su composición: puede incinerarse si contiene compuestos peligrosos o utilizarse como combustible en el caso de hidrocarburos. Para tratar el agua con bajas concentraciones de contaminantes, se proponen tecnologías híbridas basadas en adsorbentes regenerables, que permiten concentrar y eliminar simultáneamente los contaminantes, fomentando además la economía circular mediante el uso de materiales residuales carbonosos. (Sánchez-Yepes et al. 2023, Sánchez-Yepes et al. 2022).

Cuando la extracción por bombeo no es eficaz, se pueden inyectar tensioactivos para movilizar los NAPL residuales mediante técnicas como ESPR o SEAR (Acosta and Quraishi 2014, Huo et al. 2020). Los surfactantes reducen la tensión interfacial, facilitando la solubilización y extracción de los contaminantes desde el suelo. La inyección y posterior extracción del surfactante permite eliminar grandes cantidades de NAPL en menos tiempo que los métodos tradicio-

nales como el "pump and treat", siendo especialmente útil para contaminantes hidrófobos o fuertemente adsorbidos. Este proceso, basado en la formación de micelas tras superar la concentración micelar crítica (CMC), reduce significativamente el tiempo, coste e impacto ambiental del tratamiento (Figura 14).

La aplicación de la tecnología SEAR requiere una caracterización precisa del emplazamiento contaminado: ubicación, tipo de contaminante, litología y dinámica del agua subterránea. Es esencial seleccionar el surfactante adecuado, definir una estrategia de inyección y extracción eficaz, y gestionar correctamente los residuos extraídos. El proceso es complejo debido a las interacciones entre el surfactante y el suelo, por lo que se necesita un conocimiento detallado de la solubilización, adsorción y absorción del surfactante. El uso de surfactantes biodegradables y económicamente viables, que no interfieran o favorezcan biorremediación, representa un reto clave (Bose, Kumar et al. 2024). Además, se debe controlar el movimiento de los fluidos para evitar la dispersión de la contaminación. Un ejemplo real de aplicación SEAR es la limpieza de DNAPL en vertederos contaminados por residuos de fabricación de lindano situados en Sabiñánigo (Huesca) (Guadaño et al. 2022) (Fernandez et al. 2024).

La tecnología SEAR genera emulsiones contaminadas que requieren procesos eficaces para eliminar selectivamente los COHs y recuperar surfactantes, promoviendo así la sostenibilidad y la economía circular. Las estrategias incluyen separación o degrada-

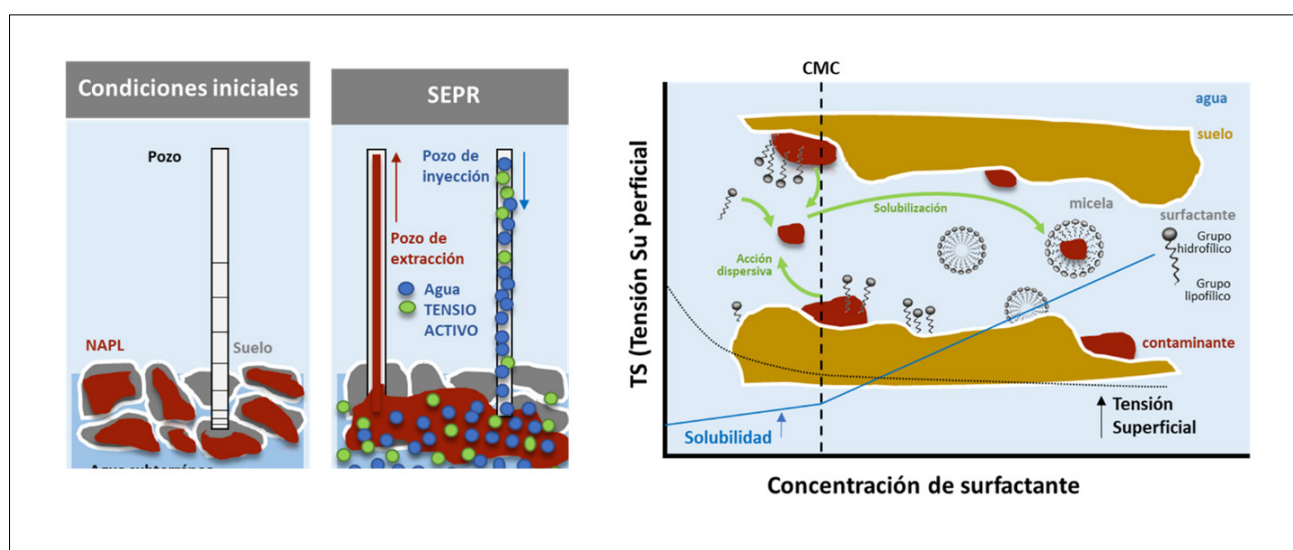


Figura 14. Solubilización y Movilización del NAPL con la tecnología SEAR.

ción de contaminantes mediante AOPs, ruptura de emulsiones con álcalis y calor, volatilización con adsorción en carbón activo, y uso de adsorbentes como carbón activado o biochar, cuya regeneración in situ es clave (Figura 15). Sin embargo, persisten desafíos como el alto consumo de reactivos, la toxicidad de los efluentes, la regenerabilidad de los adsorbentes y los costos. Además, la mayoría de los estudios se han realizado con emulsiones sintéticas, existiendo una necesidad urgente de investigar mezclas reales y complejas, más representativas de escenarios de contaminación reales (Sáez et al. 2022, Fernández et al. 2024) (Sánchez-Yepes et al. 2024b, a, Dominguez, Romero, and Santos 2019).

julio de 2011 (Hoag and Collins 2011), la propiedad intelectual y otros activos de VeruTEK fueron adquiridos por EthicalChem LLC. El tensioactivo, utilizado en menor concentración que en la etapa SEAR, aumenta la solubilidad de los contaminantes en la fase acuosa, facilitando su oxidación (Besha et al. 2018) (Figura 16)

Para optimizar la remediación mediante tecnologías como SEAR o S-ISCO®, es fundamental comprender las cinéticas de reacción, ya que contaminantes y tensioactivos compiten por el oxidante. Esto permite ajustar concentraciones, volúmenes y puntos de inyección, asegurando un tiempo de contacto adecua-

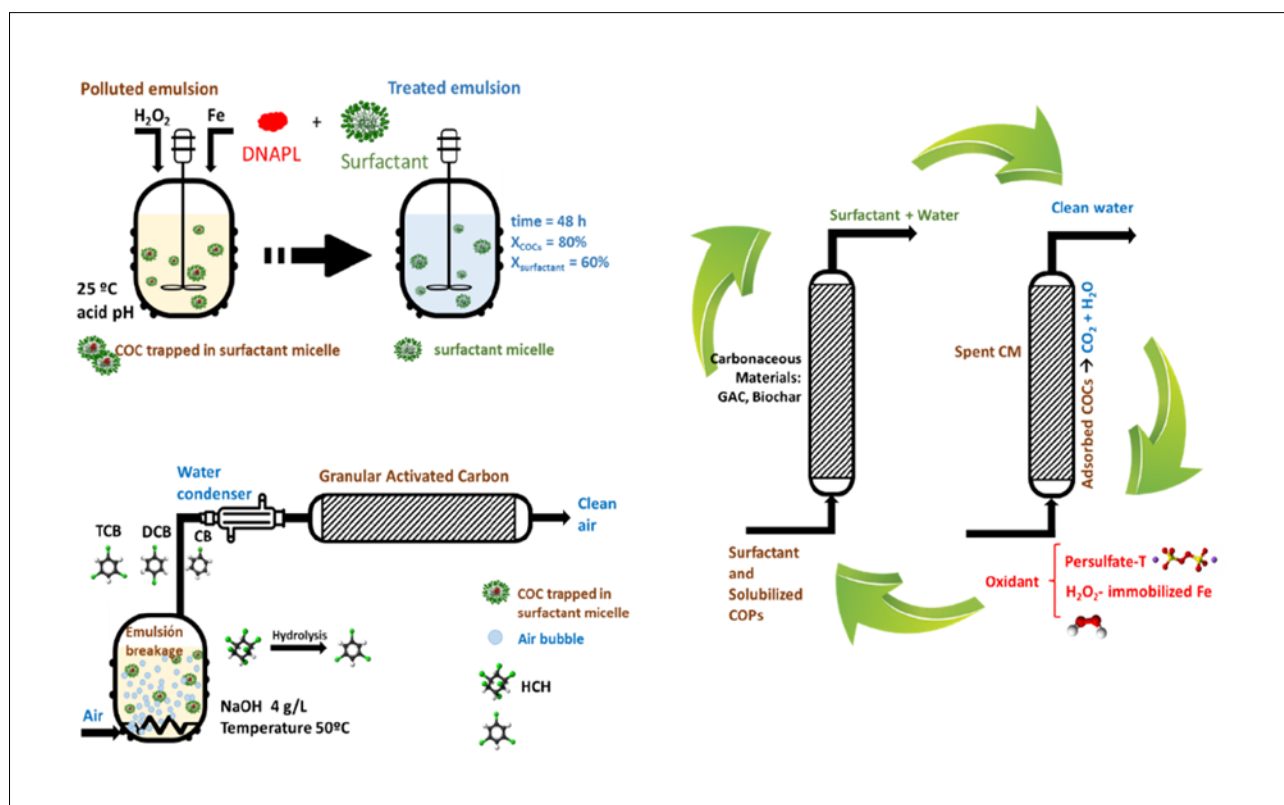


Figura 15. Gestión de Emulsiones contaminadas extraídas en la aplicación de SEAR. Izquierda, arriba Oxidación selectiva de contaminantes por Tratamiento Fenton, abajo rotura de emulsiones por álcali y temperatura y volatilización de contaminantes, derecha adsorción selectiva de contaminantes y regeneración de adsorbentes.

Una vez eliminada la mayor parte de la contaminación residual, el resto del NAPL puede ser tratado mediante la inyección simultánea de oxidantes y tensioactivos sin necesidad de extraer los fluidos. Esta tecnología, denominada S-ISCO® fue desarrollado por primera vez VeruTEK Technologies Inc y patentado en

do y evitando la dispersión de contaminantes hacia zonas sensibles. La elección del surfactante debe equilibrar su capacidad de solubilización, bajo consumo de oxidante, biodegradabilidad y coste. Aunque los surfactantes no iónicos son más eficaces y biodegradables, consumen más oxidante que los anió-

nicos, lo que obliga a tomar decisiones sostenibles en el diseño del proceso (García-Cervilla et al. 2021). El proceso S-ISCO® se ha llevado a cabo con éxito a escala piloto y real (Fernandez et al. 2024, Besha et al. 2018).

como Fe(II) o NaOH, que generan radicales altamente reactivos, como radical hidroxilos y sulfatos. Es clave que estos tratamientos sean compatibles con la biorremediación posterior, permitiendo recuperar condiciones favorables para los microorganismos. La

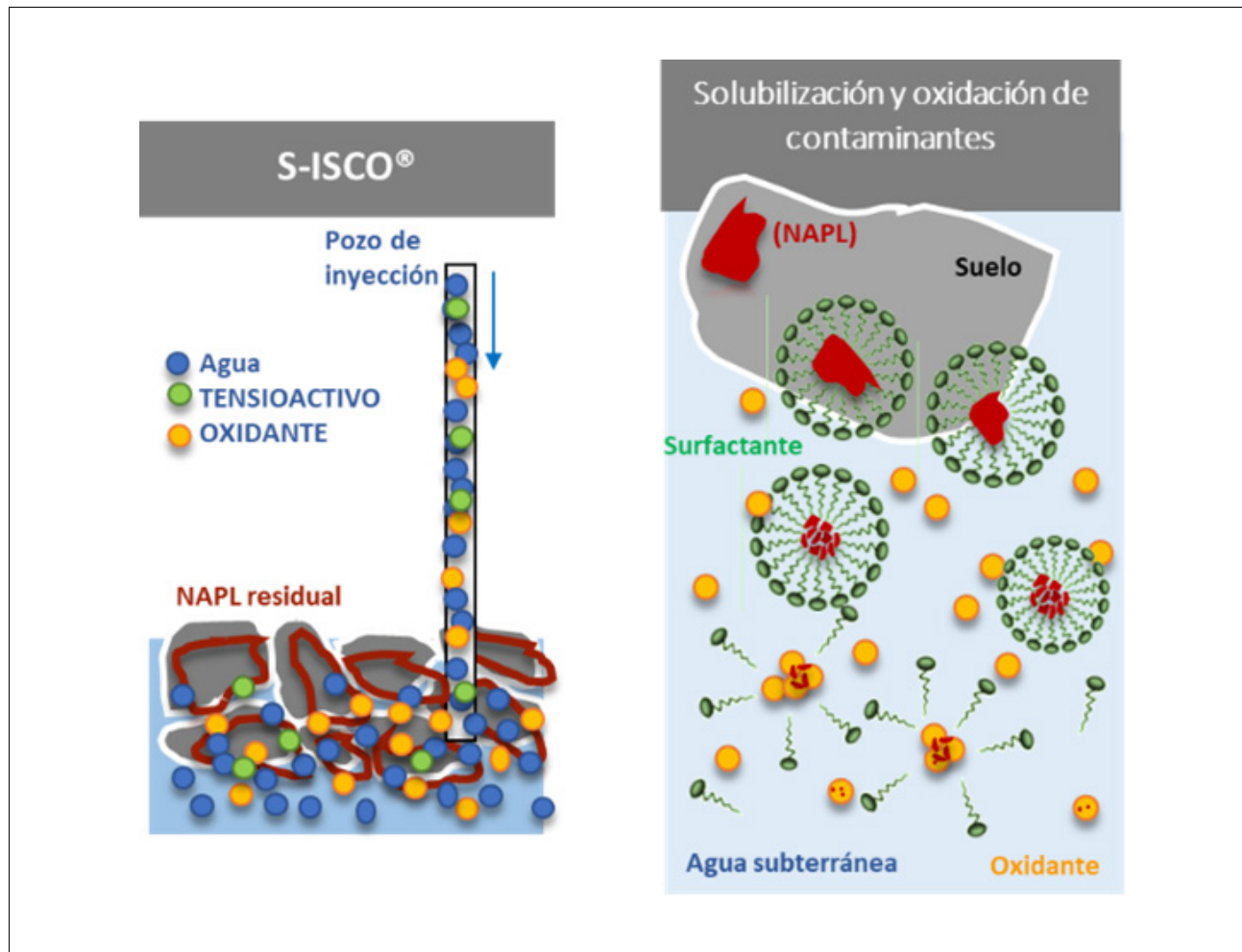


Figura 16. S-ISCO® principios de aplicación en la remediación de suelos.

Una vez eliminado el NAPL, los contaminantes disueltos pueden tratarse mediante la inyección de oxidantes (ISCO) o, si las condiciones lo permiten, mediante biorremediación in situ, ya sea como alternativa o complemento. Los oxidantes utilizados deben ser seguros y no generar subproductos peligrosos. En los últimos años, el permanganato ha sido sustituido por peróxido de hidrógeno (Vicente et al. 2011, Pardo et al. 2015b, Pardo et al. 2016) y persulfato sódico (Santos et al. 2018, Peluffo et al. 2016, Pardo et al. 2015a), cuya eficacia se incrementa con activadores

liberación controlada de estos radicales desde los oxidantes, minimizando los consumos improductivos en reacciones que no involucran a los contaminantes, constituye un área activa de investigación. Formulaciones con partículas de tamaño nano o micrométrico, que combinan oxidantes y activadores con baja solubilidad, permiten esta liberación controlada y aseguran un mayor tiempo de permanencia de los reactivos en el subsuelo. Uno de los principales retos en este enfoque es lograr una distribución efectiva de estas partículas durante la inyección.

En bioremediación, se prioriza el uso de microorganismos autóctonos y la bioestimulación (con aditivos como lactato o fosfato) frente a la bioaumentación, ya que los microorganismos externos suelen tener un rendimiento limitado en campo. Además, el uso de biobarreras con nano o micropartículas adsorbentes, como carbón activo líquido, permite inmovilizar contaminantes y mejorar su contacto con los microorganismos, potenciando la degradación. Esta estrategia es especialmente útil para tratar penachos con bajas concentraciones de contaminantes altamente tóxicos y sujetos a estrictas regulaciones, como ciertos disolventes clorados (Ottosen et al. 2021). La estimulación de microorganismos con capacidades de degradación aeróbica mediante la inyección de sustancias liberadoras de oxígeno en piezómetros que interceptan el penacho de contaminación está siendo explorada como una estrategia novedosa en investigación (Soder-Walz et al. 2025, Lu, Zhang, and Xue 2017).

NUEVOS DESAFÍOS EN LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Uno de los grandes retos actuales en remediación ambiental es integrar la inteligencia artificial (IA) para optimizar el diseño y operación de tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas (Janga, Reddy, and Raviteja 2023). La IA permite analizar grandes volúmenes de datos y predecir el comportamiento de contaminantes, mejorando la eficiencia, reduciendo costes y favoreciendo decisiones sostenibles (Alotaibi and Nassif 2024). Además, su aplicación abarca desde la optimización de dosis de reactivos hasta la selección de estrategias biológicas y la formulación de nuevos agentes remediadores.

Otra tendencia clave es el uso de trenes de tratamiento, que combinan tecnologías físicas, químicas y biológicas en secuencia para tratar contaminantes complejos de forma más eficaz y personalizada. Estas estrategias permiten aprovechar sinergias entre métodos y adaptarse a las características específicas de cada emplazamiento (Smith et al. 2023, Nguyen et al. 2023, Gamlin et al. 2024).

Frente a las técnicas convencionales, las tecnologías de remediación sostenible —incluyendo soluciones basadas en la naturaleza (NBS)— ofrecen menores impactos ambientales, reducciones significativas de emisiones y beneficios sociales y económicos, especialmente cuando se integran con procesos de regeneración del terreno y energías renovables (Witten-

berg and Shtober-Zisu 2023, Alshehri et al. 2023, Muduli, Choudhary, and Ray 2023, Lai Huat et al. 2024). Aun así, se requiere más investigación sobre su resiliencia a largo plazo y su equidad social.

Además, los contaminantes emergentes como microplásticos, PFAS y productos farmacéuticos, representan un desafío creciente por su persistencia y resistencia a tratamientos tradicionales. Abordarlos exige el desarrollo de tecnologías avanzadas, nuevos métodos de detección en tiempo real, y enfoques integrados y sostenibles (Gao 2022).

En conjunto, el futuro de la remediación ambiental requiere un enfoque holístico que combine innovación, sostenibilidad y cooperación internacional, con el objetivo no solo de eliminar la contaminación, sino también de restaurar los ecosistemas y fomentar un desarrollo verdaderamente sostenible.

CONFLICTO DE INTERESES

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, E. J., and S. Quraishi. 2014. *Surfactant Technologies for Remediation of Oil Spills*. Edited by P. Somasundaran, P. Patra, R. S. Farinato and K. Papadopoulos, *Oil Spill Remediation: Colloid Chemistry-Based Principles and Solutions*: Wiley.
2. Alfano, O. M., E. D. Albizzati, and L. O. Conte. 2015. Modelling of Photo-Fenton Solar Reactors for Environmental Applications. In *Handbook of Environmental Chemistry*.
3. Alotaibi, Emran, and Nadia Nassif. 2024. "Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis." *Discover Artificial Intelligence* no. 4 (1):84. doi: 10.1007/s44163-024-00198-1.
4. Alshehri, Khaled, Zhenghui Gao, Michael Harbottle, Devin Sapsford, and Peter Cleall. 2023. "Life cycle assessment and cost-benefit analysis of nature-based solutions for contaminated land remediation: A mini-review." *Heliyon* no. 9 (10). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20632.



5. Awolesi, Oluwafemi, Peter Oni, and Beatrice Arwenyo. 2023. "Microplastics and Nano-Plastics: From Initiation to Termination."
6. Besha, A. T., D. N. Bekele, R. Naidu, and S. Chadalavada. 2018. "Recent advances in surfactant-enhanced In-Situ Chemical Oxidation for the remediation of non-aqueous phase liquid contaminated soils and aquifers." *Environmental Technology & Innovation* no. 9:303-322. doi: 10.1016/j.eti.2017.08.004.
7. Bolan, Nanthi, Binoy Sarkar, Yubo Yan, Qiao Li, Hsintha Wijesekara, Kurunthachalam Kannan, Daniel C. W. Tsang, Marina Schauerte, Julian Bosch, Hendrik Noll, Yong Sik Ok, Kirk Scheckel, Jurate Kumpiene, Kapish Gobindlal, Melanie Kah, Jonathan Sperry, M. B. Kirkham, Hailong Wang, Yiu Fai Tsang, Deyi Hou, and Jörg Rinklebe. 2021. "Remediation of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) contaminated soils – To mobilize or to immobilize or to degrade?" *Journal of Hazardous Materials* no. 401:123892. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123892.
8. Caruso, Gabriella. 2019. "Microplastics as vectors of contaminants." *Marine Pollution Bulletin* no. 146:921-924. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.052>.
9. Dominguez, C. M., A. Romero, and A. Santos. 2019. "Selective removal of chlorinated organic compounds from lindane wastes by combination of non-ionic surfactant soil flushing and Fenton oxidation." *Chemical Engineering Journal* no. 376. doi: 10.1016/j.cej.2018.09.170.
10. Europe, Plastics. 2023. "Plastics—The Fast Facts 2023." *Plastics Europe*.
11. Fernández, J., C. Herranz, A. Salvatierra, R. García-Cervilla, A. Santos, and D. Lorenzo. 2024. "Sustainable emulsion treatment by volatilization enhanced by temperature and alkaline conditions in the remediation of a polluted landfill with lindane production wastes." *Process Safety and Environmental Protection* no. 184:271-283. doi: 10.1016/j.psep.2024.01.083.
12. Fernandez, Jesus, David Lorenzo, Jorge Net, Elena Cano, Patricia Saez, Carlos Herranz, Carmen M. Dominguez, Salvador Cotillas, and Aurora Santos. 2024. "Sustainable lindane waste remediation: Surfactant-driven residual DNAPL extraction and oxidation in a real landfill (LIFE SURFING)." *The Science of the total environment* no. 934:173260-173260. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173260.
13. Gamlin, Jeff D., Hassan Javed, Charles J. Newell, Emily Stockwell, Renee Caird, Joseph Scalia, Divina Navarro, and John Awad. 2024. "Bridging the Technology Gap for Cost-Effective and Sustainable Treatment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Surface Water and Stormwater." *Remediation-the Journal of Environmental Cleanup Costs Technologies & Techniques* no. 35 (1). doi: 10.1002/rem.21790.
14. Gao, Bin. 2022. *Emerging Contaminants in Soil and Groundwater Systems: Occurrence, Impact, Fate and Transport*: Elsevier.
15. García-Cervilla, R., A. Santos, A. Romero, and D. Lorenzo. 2021. "Compatibility of nonionic and anionic surfactants with persulfate activated by alkali in the abatement of chlorinated organic compounds in aqueous phase." *Science of the Total Environment* no. 751. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141782.
16. Guadaño, J., J. Gómez, J. Fernández, D. Lorenzo, C. M. Domínguez, S. Cotillas, R. García-Cervilla, and A. Santos. 2022. "Remediation of the Alluvial Aquifer of the Sardas Landfill (Sabiñánigo, Huesca) by Surfactant Application." *Sustainability (Switzerland)* no. 14 (24). doi: 10.3390/su142416576.
17. Hoag, George E, and John Collins. 2011. Soil remediation method and composition. Google Patents.
18. Huo, L., G. Liu, X. Yang, Z. Ahmad, and H. Zhong. 2020. "Surfactant-enhanced aquifer remediation: Mechanisms, influences, limitations and the countermeasures." *Chemosphere* no. 252:126620. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126620.
19. ITRC, Interstate Technology and Regulatory Council. *PFAS – Per- and Polyfluoroalkyl Substances* 2023a. Available from <https://pfas-1.itrcweb.org/>.
20. ITRC, Interstate Technology and Regulatory Council. *Microplastics* 2023b. Available from <https://mp-1.itrcweb.org/>.
21. Janga, Jagadeesh Kumar, Krishna R. Reddy, and K. V. N. S. Raviteja. 2023. "Integrating artificial intelligence, machine learning, and deep learning approaches into remediation of contaminated sites: A review." *Chemosphere* no. 345:140476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140476>.

22. Kidd, Justin, Emily Fabricatore, and Dennis Jackson. 2022. "Current and future federal and state sampling guidance for per- and polyfluoroalkyl substances in environmental matrices." *Science of The Total Environment* no. 836:155523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155523>.
23. Kokkinaki, A., D. M. O'Carroll, C. J. Werth, and B. E. Sleep. 2013. "Coupled simulation of DNAPL infiltration and dissolution in three-dimensional heterogeneous domains: Process model validation." *Water Resources Research* no. 49 (10):7023-7036. doi: [10.1002/wrcr.20503](https://doi.org/10.1002/wrcr.20503).
24. Kumar, Manish, Xinni Xiong, Mingjing He, Daniel C. W. Tsang, Juhi Gupta, Eakalak Khan, Stuart Harrad, Deyi Hou, Yong Sik Ok, and Nanthi S. Bolan. 2020. "Microplastics as pollutants in agricultural soils." *Environmental Pollution* no. 265:114980. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>.
25. Lai Huat, Lim, Swee Pin Yeap, Yao Huang, Huangpu Jiuru, Shao Feng Su, and Teo and Swee Sen. 2024. "Environmental Bioremediation: Microremediation, Mycoremediation, and Phytoremediation." *Environmental Claims Journal* no. 36 (2):186-205. doi: [10.1080/10406026.2024.2396492](https://doi.org/10.1080/10406026.2024.2396492).
26. Leharne, Stephen. 2021. "Risk assessment and remediation of NAPL contaminated soil and groundwater." *ChemTexts* no. 8 (1):5. doi: [10.1007/s40828-021-00156-9](https://doi.org/10.1007/s40828-021-00156-9).
27. Leharne, Stephen. 2022. "Risk assessment and remediation of NAPL contaminated soil and groundwater." *ChemTexts* no. 8 (1). doi: [10.1007/s40828-021-00156-9](https://doi.org/10.1007/s40828-021-00156-9).
28. Lu, Shuguang, Xiang Zhang, and Yunfei Xue. 2017. "Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review." *Journal of Hazardous Materials* no. 337:163-177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.064>.
29. Muduli, Monali, Meena Choudhary, and Sanak Ray. 2023. "Remediation and characterization of emerging and environmental pollutants from residential wastewater using a nature-based system." *Environmental Science and Pollution Research* no. 30 (16):45750-45767. doi: [10.1007/s11356-023-25553-0](https://doi.org/10.1007/s11356-023-25553-0).
30. Nguyen, Dung, Charles E. Schaefer, Jeffrey T. Barmer, Heather A. Lanza, Derek Wintle, Ken G. Maynard, Peter Murphy, and Richard H. Anderson. 2023. "Bench-scale testing of a novel soil PFAS treatment train for informed remedial planning and decision-making." *Remediation-the Journal of Environmental Cleanup Costs Technologies & Techniques* no. 33 (4):309-321. doi: [10.1002/rem.21758](https://doi.org/10.1002/rem.21758).
31. Ottosen, Cecilie B., Melissa Skou, Emilie Sammali, Jeremy Zimmermann, Daniel Hunkeler, Poul L. Bjerg, and Mette M. Broholm. 2021. "Dataset for laboratory treatability experiment with activated carbon and bioamendments to enhance biodegradation of chlorinated ethenes." *Data in Brief* no. 38:107291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107291>.
32. Pardo, F., M. Peluffo, A. Santos, and A. Romero. 2016. "Optimization of the application of the Fenton chemistry for the remediation of a contaminated soil with polycyclic aromatic hydrocarbons." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* no. 91 (6):1763-1772. doi: [10.1002/jctb.4767](https://doi.org/10.1002/jctb.4767).
33. Pardo, F., J. M. Rosas, A. Santos, and A. Romero. 2015a. "Remediation of a biodiesel blend-contaminated soil with activated persulfate by different sources of iron." *Water, Air, and Soil Pollution* no. 226 (2). doi: [10.1007/s11270-014-2267-4](https://doi.org/10.1007/s11270-014-2267-4).
34. Pardo, F., J. M. Rosas, A. Santos, and A. Romero. 2015b. "Remediation of soil contaminated by NAPLs using modified Fenton reagent: application to gasoline type compounds." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* no. 90 (4):754-764. doi: [10.1002/jctb.4373](https://doi.org/10.1002/jctb.4373).
35. Park, Bum Cheul, Andrew Brown, Frithjof Laubinger, and Peter Börkey. 2024. "Monitoring trade in plastic waste and scrap." *OECD Environment Working Papers*.
36. Peluffo, M., F. Pardo, A. Santos, and A. Romero. 2016. "Use of different kinds of persulfate activation with iron for the remediation of a PAH-contaminated soil." *Science of The Total Environment* no. 563-564:649-656. doi: [10.1016/j.scitotenv.2015.09.034](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.034).
37. Pulster, Erin L., Sarah R. Bowman, Landon Keele, and Jeffery Steevens. 2024. Guide to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) sampling within Natural Resource Damage Assessment and Restoration. In *Open-File Report*. Reston, VA.



38. Ramezanzadeh, M., M. Aminnaji, F. Rezanezhad, M. H. Ghazanfari, and M. Babaei. 2022. "Dissolution and remobilization of NAPL in surfactant-enhanced aquifer remediation from microscopic scale simulations." *Chemosphere* no. 289:133177. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133177.
39. Rodríguez-Eugenio, Natalia, Michael McLaughlin, and Daniel Pennock. 2018. "La contaminación del suelo: una realidad oculta."
40. Sáez, P., R. García-Cervilla, A. Santos, A. Romero, and D. Lorenzo. 2022. "Treatment of a Complex Emulsion of a Surfactant with Chlorinated Organic Compounds from Lindane Wastes under Alkaline Conditions by Air Stripping." *Industrial and Engineering Chemistry Research*. doi: 10.1021/acs.iecr.2c03722.
41. Sánchez-Yepes, A., A. Santos, A. Romero, and D. Lorenzo. 2024a. "Selective removal of chlorinated organic compounds from soil flushing emulsions: Adsorbent regeneration with thermal-activated persulfate and surfactant recovery." *Journal of Water Process Engineering* no. 57. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.104644.
42. Sánchez-Yepes, A., A. Santos, A. Romero, and D. Lorenzo. 2024b. "Sustainable application of surfactants in soil remediation: Selective pollutants adsorption and hydrogen peroxide-driven adsorbent regeneration." *Science of the Total Environment* no. 926. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171847.
43. Sánchez-Yepes, A., A. Santos, J. M. Rosas, J. Rodríguez-Mirasol, T. Cordero, and D. Lorenzo. 2022. "Regeneration of Granulated Spent Activated Carbon with 1,2,4-Trichlorobenzene Using Thermally Activated Persulfate." *Industrial and Engineering Chemistry Research* no. 61 (27):9611-9620. doi: 10.1021/acs.iecr.2c00440.
44. Sánchez-Yepes, A., A. Santos, J. M. Rosas, Rosas, J. Rodríguez-Mirasol, T. Cordero, and D. Lorenzo. 2023. "Sustainable reuse of toxic spent granular activated carbon by heterogeneous fenton reaction intensified by temperature changes." *Chemosphere* no. 341. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140047.
45. Santos, A., J. Fernandez, S. Rodriguez, C. M. Dominguez, M. A. Lominchar, D. Lorenzo, and A. Romero. 2018. "Abatement of chlorinated compounds in groundwater contaminated by HCH wastes using ISCO with alkali activated persulfate." *Science of the Total Environment* no. 615:1070-1077. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.224.
46. Silva, Vera, Hans G. J. Mol, Paul Zomer, Marc Tiensstra, Coen J. Ritsema, and Violette Geissen. 2019. "Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded." *Science of The Total Environment* no. 653:1532-1545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>.
47. Smith, Sanne J., Melanie Lauria, Lutz Ahrens, Philip McCleaf, Patrik Hollman, Sofia Bjalkfur Seroka, Timo Hamers, Hans Peter H. Arp, and Karin Wiberg. 2023. "Electrochemical Oxidation for Treatment of PFAS in Contaminated Water and Fractionated Foam?A Pilot-Scale Study." *Acs Es&T Water* no. 3 (4):1201-1211. doi: 10.1021/acseswater.2c00660.
48. Soder-Walz, Jesica M., Dani Salom, Elena Grana-dos-Rigol, David Fernández-Verdejo, Teresa Vicent, Ernest Marco-Urrea, and Paqui Blánquez. 2025. "Enhanced aerobic bioremediation of an aquifer heavily contaminated with a mixture of chlorobenzenes and hexachlorocyclohexanes at the Sardas landfill (Spain)." *Journal of Hazardous Materials* no. 484:136717. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136717>.
49. Sorengard, M., Dan Berggren Kleja, and Lutz Ahrens. 2019. "Stabilization of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) with colloidal activated carbon (PlumeStop®) as a function of soil clay and organic matter content." *Journal of Environmental Management* no. 249:109345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109345>.
50. Stapleton, Michael J., and Faisal I. Hai. 2023. "Microplastics as an emerging contaminant of concern to our environment: a brief overview of the sources and implications." *Bioengineered* no. 14 (1):2244754. doi: 10.1080/21655979.2023.2244754.
51. Stoiber, Tasha, Sydney Evans, and Olga V. Naidenko. 2020. "Disposal of products and materials containing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A cyclical problem." *Chemosphere* no. 260:127659. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127659>.
52. Trellu, C., E. Mousset, Y. Pechaud, D. Huguenot, E. D. van Hullebusch, G. Esposito, and M. A. Oturan.



2016. "Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: A critical review." *Journal of Hazardous Materials* no. 306:149-174. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.008.
53. Vicente, F., J. M. Rosas, A. Santos, and A. Romero. 2011. "Improvement soil remediation by using stabilizers and chelating agents in a Fenton-like process." *Chemical Engineering Journal* no. 172 (2-3):689-697. doi: 10.1016/j.cej.2011.06.036.
54. Wang, Jianlong, Xuan Guo, and Jianming Xue. 2021. "Biofilm-Developed Microplastics As Vectors of Pollutants in Aquatic Environments." *Environmental Science & Technology* no. 55 (19):12780-12790. doi: 10.1021/acs.est.1c04466.
55. Wang, Zejun, Zhibing Yang, and Yi-Feng Chen. 2023. "Pore-scale investigation of surfactant-enhanced DNAPL mobilization and solubilization." *Chemosphere* no. 341:140071-140071. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140071.
56. Wang, Zejun, Zhibing Yang, Ran Hu, and Yi-Feng Chen. 2023. "Mass transfer during surfactant-enhanced DNAPL remediation: Pore-scale experiments and new correlation." *Journal of Hydrology* no. 621. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129586.
57. Wittenberg, Lea, and Nurit Shtober-Zisu. 2023. "Restoring fire-affected soils: The potential of nature-based solutions." *Current Opinion in Environmental Science & Health* no. 36. doi: 10.1016/j.coesh.2023.100520.
58. Wu, Panfeng, Jinsheng Huang, Yuling Zheng, Yicheng Yang, Yue Zhang, Feng He, Hao Chen, Guixiang Quan, Jinlong Yan, Tiantian Li, and Bin Gao. 2019. "Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics." *Ecotoxicology and Environmental Safety* no. 184:109612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>.
59. Xu, B. T., S. Liu, J. L. Zhou, C. M. Zheng, W. F. Jin, B. Chen, T. Zhang, and W. H. Qiu. 2021. "PFAS and their substitutes in groundwater: Occurrence, transformation and remediation." *Journal of Hazardous Materials* no. 412. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125159.
60. Zhang, Yue, Yinghua Li, Fei Su, Linlin Peng, and Deze Liu. 2022. "The life cycle of micro-nano plastics in domestic sewage." *Science of The Total Environment* no. 802:149658.

Si desea citar nuestro artículo:

Santos López A. Remediación sostenible de suelos y aguas subterráneas: nuevos problemas nuevas soluciones. RACSG.2026;114(01):21-42 [rac.2026.114.1.org02](https://doi.org/10.1016/j.rac.2026.114.1.org02)