Humanidades, Tecnología y Ciencia, del Instituto Politécnico Nacional
Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2010-0326124-14000-203 ISSN: 2007-1957

REMEDIACIÓN DE "CONTAMINANTES ETERNOS" CON NANOCOMPUESTOS MAGNÉTICOS

Margarita Clarisaila Crisóstomo Reyes
Instituto Politécnico Nacional – CECyT No. 8
mcrisostomo@ipn.mx

Sonia González García
Instituto Politécnico Nacional – CECyT No. 8
sgonzalez@ipn.mx

Jacqueline Rebollo Paz
Instituto Politécnico Nacional – CECyT No. 10
jrebollo@ipn.mx

Resumen

Las sustancias perfluoroalquiladas y, en sentido amplio, las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) son conocidas como "contaminantes eternos" debido a que su estructura química favorece una persistencia ambiental inusual, su movilidad en agua puede ser elevada y su control se vuelve técnicamente exigente cuando están en concentraciones muy bajas pero ambientalmente relevantes. Estos compuestos, presentes en productos cotidianos como sartenes antiadherentes y espumas contra incendios, se han filtrado a los mantos acuíferos, vinculándose con graves problemas de salud. Este artículo aborda cómo la nanotecnología puede contribuir a su remediación mediante nanocompuestos magnéticos dopados. El enfoque consiste en capturar PFAS de forma eficiente y, posteriormente, recuperar el adsorbente aplicando un campo magnético, lo que reduce tiempos de operación, pérdidas de material y generación de lodos. Su aporte no es "milagroso", sino práctico: integrar selectividad química en la superficie con una separación operativamente sencilla. Aun así, persiste un reto clave: la gestión segura del residuo concentrado tras la remoción.

Palabras clave: PFAS, sustancias perfluoroalquiladas, nanocompuestos magnéticos, adsorción, tratamiento de agua.

Durante décadas, la industria química utilizó las sustancias perfluoroalquiladas (PFAS) para fabricar desde sartenes antiadherentes hasta espumas contra incendios. Abarcan un universo químico amplio; organismos internacionales han trabajado precisamente en armonizar definiciones y alcances para investigación, monitoreo y regulación (OECD, 2021).

Lo que comparten, de forma general, es una arquitectura con enlaces carbono-flúor particularmente resistentes, lo que contribuye a su persistencia, además de propiedades (hidrofobicidad parcial y “cabezas” funcionales aniónicas en muchas PFAS de interés) que las hacen difíciles de tratar con métodos convencionales pensados para contaminantes más degradables (Imperial College London, s. f.).

Su estructura química es tan estable que no se degradan con el sol, el agua o el tiempo. Esta invencibilidad los ha llevado a filtrarse en el agua que bebemos.

La magnitud de esta contaminación es alarmante. Estudios recientes del Servicio Geológico de EE. UU. estiman que el 45% del agua del grifo contiene PFAS. En zonas industriales críticas, se han reportado concentraciones superiores a 100 ppm (partes por millón) en aguas subterráneas, una cifra abrumadora si consideramos que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) fijó recientemente límites de seguridad de apenas 4 ppt (partes por trillón) para proteger la salud humana (Smalling et al., 2023).

Dada la escala diminuta de estos compuestos, la respuesta reside en la ingeniería de materiales a nivel atómico. Mediante el desarrollo de nanoestructuras avanzadas, es posible maximizar el proceso de adsorción, logrando que los contaminantes se 'adhieran' firmemente a la superficie del material para ser eliminados del agua.

La arquitectura de un nanocompuesto magnético convencional se articula mediante la integración de tres componentes fundamentales que operan de manera sinérgica: en primer lugar, un núcleo o fase magnética, constituido predominantemente por óxidos de hierro como la magnetita (Fe_3O_4); en segundo lugar, una matriz funcional o "piel" protectora, que puede estar conformada por materiales como sílice, biocarbones, grafeno oxidado o polímeros; y finalmente, una serie de grupos químicos activos estratégicamente injertados.

La idea operativa es simple: el material entra en contacto con el agua, captura PFAS y, al terminar, se recupera con un imán o separador magnético. Esa recuperabilidad puede ser decisiva en sistemas reales: evita filtraciones finas complejas, disminuye pérdidas del adsorbente y facilita esquemas por lotes o “pulido” de efluentes (Zhang et al., 2011).

Mecanismos principales

En términos de química de superficie, la captura suele apoyarse en una combinación de:

- Interacciones electrostáticas: muchas PFAS relevantes en agua se comportan como aniones; superficies con grupos amina/protonables o funcionalidad catiónica pueden favorecer la atracción (Mahpishanian et al., 2024).
- Interacciones hidrofóbicas y partición: segmentos fluorados tienden a preferir microambientes menos polares; matrices carbonosas (biochar, carbón, grafeno) pueden ofrecer dominios afines (Hassan, 2022).
- Diseño de “doble personalidad” en la superficie: un ejemplo clásico es mezclar cadenas hidrofóbicas (p. ej., tipo C18) con grupos polares/amina para capturar contaminantes aniónicos de forma más eficaz, logrando un balance entre afinidad y accesibilidad en agua (Zhang et al., 2011).

No hay un único mecanismo universal: la eficacia depende de pH, fuerza iónica, materia

orgánica natural, competencia iónica y del "portafolio" de PFAS presentes (cadenas largas vs. cortas, sulfonatos vs. carboxilatos, mezclas) (Mahpishanian et al., 2024).

El siguiente paso es mirar qué diseños de nanocompuestos magnéticos han mostrado resultados consistentes frente a PFAS en condiciones experimentales y, sobre todo, qué aportan en términos de operación real. Tres familias de nanocompuestos con evidencia sólida son:

- Fe_3O_4/SiO_2 funcionalizado. Una ruta muy estudiada consiste en recubrir magnetita con sílice (estabilidad/funcionalización) y luego injertar grupos mixtos (por ejemplo, componentes hidrofóbicos y aminas) para mejorar la captura de compuestos aniónicos, incluyendo perfluorados. El valor aquí es el "control fino" de la superficie: se diseña el punto de interacción, y el magnetismo simplifica la recuperación del sorbente (Zhang et al., 2011).

- Biochar magnético: rendimiento práctico y costo potencialmente competitivo. El biochar aporta porosidad y dominios carbonosos; al "magnetizarlo" (incorporando óxidos de hierro), se gana la ventaja operativa de separarlo magnéticamente. Estudios experimentales han mostrado remoción efectiva de sulfonatos de perfluorooctano (PFOS) usando biochar magnético, analizando interacciones interfaciales y mecanismos de adsorción (Hassan et al., 2022).

  En términos de implementación, su atractivo es doble: materia prima potencialmente económica y posibilidad de escalamiento; su principal reto es la consistencia del material (lotes, cenizas, funcionalidad), además del manejo del sorbente agotado (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

- Grafeno oxidado amino-funcionalizado y magnético. Una línea de desarrollo reciente combina grafeno oxidado con grupos amina y nanopartículas de Fe_3O_4, obteniendo un nanocompuesto magnético con altas eficiencias reportadas para PFAS de cadena larga y, de forma relevante, buen desempeño también para PFAS de cadena corta en tiempos cortos de contacto. Este tipo de material ejemplifica hacia dónde se mueve el campo: adsorbentes "inteligentes" que buscan no solo capacidad, sino velocidad, tolerancia a rangos de pH y regeneración (Mahpishanian et al., 2024).

Desafío, riesgos y criterio

El desafío fundamental de la remediación actual reside en que remover los PFAS no equivale a destruirlos; la mayoría de las tecnologías, incluyendo el carbón activado y las membranas de ósmosis inversa, se limitan a transferir el contaminante del agua a un sólido o un concentrado. En este contexto, los nanocompuestos magnéticos emergen como una solución estratégica de "pulido" o preconcentración, permitiendo reducir drásticamente los volúmenes de residuos. No obstante, como subraya la U.S. Environmental Protection Agency (2024), cualquier proceso de adsorción debe contemplar la gestión del ciclo de vida del material agotado, ya sea mediante una incineración controlada o métodos destructivos, para evitar que la remediación sea simplemente un traslado del problema ambiental de un medio a otro.

Por otro lado, una "remediación responsable" con nanomateriales exige un rigor técnico que vaya más allá de la eficiencia inicial de captura. Es imperativo evaluar la estabilidad de los compuestos para prevenir la lixiviación de nanofases en el agua tratada, así como su desempeño en condiciones químicas reales donde la materia orgánica y las sales compiten por los sitios activos. Según estándares de la Royal Society of Chemistry, el éxito de estas tecnologías depende de su capacidad de regeneración tras múltiples ciclos y de una disposición final segura del sorbente. Sin estos criterios de control, el uso de nanoestructuras podría introducir riesgos adicionales, subrayando la importancia de un enfoque integral que priorice la seguridad hídrica a largo plazo.

9. Referencias

Hassan, M., Du, J., Liu, Y., Naidu, R., Zhang, J., Ahsan, M. A., & Qi, F. (2022). Magnetic biochar for removal of perfluorooctane sulphonate (PFOS): Interfacial interaction and adsorption mechanism. Environmental Technology & Innovation, 28, 102593. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102593

Imperial College London. (s. f.). UNSAFE - Understanding the Scale, Sources, Fate and Effects of PFAS pollution. School of Public Health. https://www.imperial.ac.uk/school-public-health/environmental-research-group/unsafe---understanding-the-scale-sources-fate-and-effects-of-pfas-pollution/

Mahpishanian, S., Zhou, M., & Foudazi, R. (2024). Magnetic amino-functionalized graphene oxide nanocomposite for PFAS removal from water. Environmental Science Advances, 3(12), 1698-1713. https://doi.org/10.1039/d4va00171k

OECD. (2021). Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: Recommendations and practical guidance (OECD Series on Risk Management of Chemicals). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/e458e796-en

Smalling, K. L., Romanok, K. M., Rogers, D. K., Cozzarelli, I. M., Haack, S. K., Lane, R. F., McCleskey, R. B., Nowell, L. H., Torres, N. W., Williams, J. H., & Bradley, P. M. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in United States tapwater: Comparison of self-supplied and public-supply samples and associated health outcomes. Environment International, 174, 107901. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107901

U.S. Environmental Protection Agency. (2024, abril). PFAS National Primary Drinking Water Regulation: PFAS Treatment Options and Considerations. https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/pfas-npdwr_fact-sheet_treatment_4.8.24.pdf

Zhang, X., Niu, H., Pan, Y., Shi, Y., & Cai, Y. (2011). Modifying the surface of Fe3O4/SiO2 magnetic nanoparticles with C18/NH2 mixed group to get an efficient sorbent for anionic organic pollutants. Journal Of Colloid And Interface Science, 362(1), 107-112. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.06.03