

## **Presencia, problemática y eliminación de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas en el agua: adsorción mediante carbón activado.**

Celia Pol Bodelón<sup>1</sup>, Marta Otero Cabero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduada en Ciencias Ambientales por la Universidad de León. [cpolbooo@estudiantes.unileon.es](mailto:cpolbooo@estudiantes.unileon.es)

<sup>2</sup>Departamento de Química y Física Aplicadas. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León. Campus de Vegazana, 24071 León. [marta.otero@unileon.es](mailto:marta.otero@unileon.es)

### **Resumen**

Los compuestos per- y polifluoroalquilados (PFAS), son contaminantes de gran preocupación, por su alta resistencia a la degradación, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Este trabajo tiene como objetivo analizar y caracterizar los PFAS mediante una revisión bibliográfica, basada en literatura científica reciente. Se estudian sus propiedades químicas, estructura molecular, comportamiento en el medio ambiente, vías de entrada y efectos sobre los seres humanos. Así mismo, se revisa la normativa vigente nacional e internacional, y las tecnologías de eliminación disponibles, con especial atención a la adsorción con carbón activado (en forma granular y en polvo). Este tipo de tratamiento destaca por su eficiencia en la retención de PFAS en el agua, aunque presenta limitaciones como la saturación rápida y la generación de residuos. En conclusión, los PFAS constituyen una amenaza directa, y esta revisión evidencia la necesidad de una mayor prevención, regulación estricta y desarrollo de tecnologías sostenibles para su eliminación.

### **Palabras clave**

Carbón activado, compuestos perfluoroalquilados, compuestos polifluoroalquilados, microcontaminantes, procesos de adsorción, tratamiento avanzado de aguas residuales.

### **Introducción**

En las últimas décadas, la contaminación ambiental se ha convertido en una de las mayores preocupaciones globales, especialmente en el medio acuático. El agua es un recurso esencial para la vida: permite el correcto funcionamiento de los ecosistemas, transporta nutrientes, regula la temperatura y el pH, y constituye la base de todos los procesos biológicos (Dargaville y Hutmacher, 2022). Sin embargo, la creciente presencia de contaminantes amenaza su calidad y, por tanto, la salud de los seres vivos y la estabilidad de los ecosistemas.

Actualmente, entre los contaminantes más preocupantes del agua se encuentran las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, conocidas como PFAS (del inglés *Per- and Polyfluoroalkyl Substances*). Estos compuestos, también conocidos como “químicos eternos”, se caracterizan por su enorme resistencia a la degradación y su capacidad para acumularse en los organismos vivos (*European Environment Agency*, 2023). Desde su introducción industrial en los años 40, los PFAS han estado presentes en productos cotidianos como sartenes antiadherentes, tejidos impermeables, envases de alimentos o espumas contra incendios (Barry *et al.*, 2013). Su uso masivo ha permitido que se extiendan por todo el planeta, siendo las aguas un medio de dispersión y transporte de PFAS en el ambiente (Sörengård *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025).

En el contexto descrito, el presente trabajo tuvo como objetivos: i) describir las propiedades químicas y la estructura molecular de las PFAS para comprender su comportamiento y persistencia ambiental; ii) identificar las principales vías de entrada de los PFAS en el medio ambiente y, evaluar el impacto ambiental de los PFAS, con especial atención a su bioacumulación, movilidad y efectos sobre los organismos; iii) analizar la exposición humana a los PFAS y los riesgos potenciales para la salud así como revisar la normativa nacional e internacional existente en relación con los PFAS; y iv) destacar la importancia de llevar a cabo y enumerar distintos tratamientos eficientes para eliminar los PFAS del agua, analizando con más detalle los procesos de adsorción mediante carbón activado.

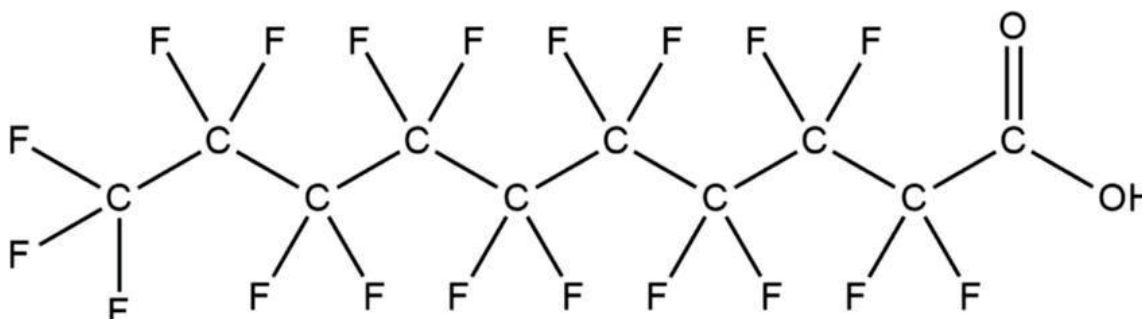
### Propiedades químicas y estructura molecular

Los PFAS forman una gran familia de compuestos químicos caracterizados por la presencia de una cadena de átomos de carbono en la que los hidrógenos han sido sustituidos total o parcialmente por flúor (Rodríguez-Jorquera *et al.*, 2015). Este enlace carbono-flúor es uno de los más fuertes en la química orgánica, lo que explica la extrema estabilidad de estas sustancias. Esa fortaleza química hace que los PFAS sean prácticamente indestructibles bajo condiciones naturales, resistiendo el calor, la radiación o la acción microbiana.

Las moléculas de PFAS tienen dos partes bien diferenciadas: una cabeza polar (hidrofilica) y una cola fluorada apolar (hidrofóbica). Esta combinación les otorga propiedades únicas, como repeler el agua y los aceites, o reducir la tensión superficial de los líquidos. Por eso han sido tan útiles en la industria: desde recubrimientos y textiles hasta envases alimentarios o productos cosméticos. En la **Figura 1** se muestra la estructura química del ácido perfluorodecanoico (PFDA ( $C_9F_{19}COOH$ )), compuesto que presenta una cadena de diez átomos de carbono.

Existen cientos de tipos de PFAS, que se clasifican según la longitud de su cadena de carbono. Los de cadena corta ( $C_3$ - $C_6$ ) son más solubles en agua y por ello, tienen mayor tendencia a la dispersión en el ambiente; los de cadena larga ( $>C_6$ ), por el contrario, se acumulan más en los organismos vivos (debido a su afinidad por las proteínas y baja tasa de eliminación renal). Además, pueden

presentarse en estructuras lineales o ramificadas, lo que también influye en su comportamiento químico y biológico.



**Figura 1.** Estructura química del ácido perfluorodecanoico (PFDA) (Macheka-Tendenguwo *et al.*, 2018).

Dentro de esta gran familia se pueden distinguir también los PFAS poliméricos y los no poliméricos (Billmeyer, 2020). Los primeros son moléculas de gran tamaño, sólidos, estables y con menor movilidad ambiental. Es el caso, por ejemplo, del PTFE (politetrafluoroetileno), conocido comercialmente como Teflón®, o del PVDF (polifluoruro de vinilideno). Los segundos, mucho más preocupantes desde el punto de vista ambiental, son moléculas más pequeñas, móviles (tanto en agua como aire) y persistentes, que tienden a bioacumularse y provocan efectos perjudiciales en la salud. Entre ellos se encuentran los dos más conocidos y estudiados como contaminantes: el PFOA (ácido perfluorooctanoico) y el PFOS (sulfonato de perfluorooctano) (Abunada *et al.*, 2020). Tanto PFOA como PFOS son solubles, estables, tóxicos y con vidas medias que pueden superar los tres años en el cuerpo humano. Hay que señalar que, los PFAS poliméricos pueden ser una fuente indirecta de PFAS no poliméricos durante su producción, uso (envejecimiento) o eliminación (por ejemplo, en procesos de incineración).

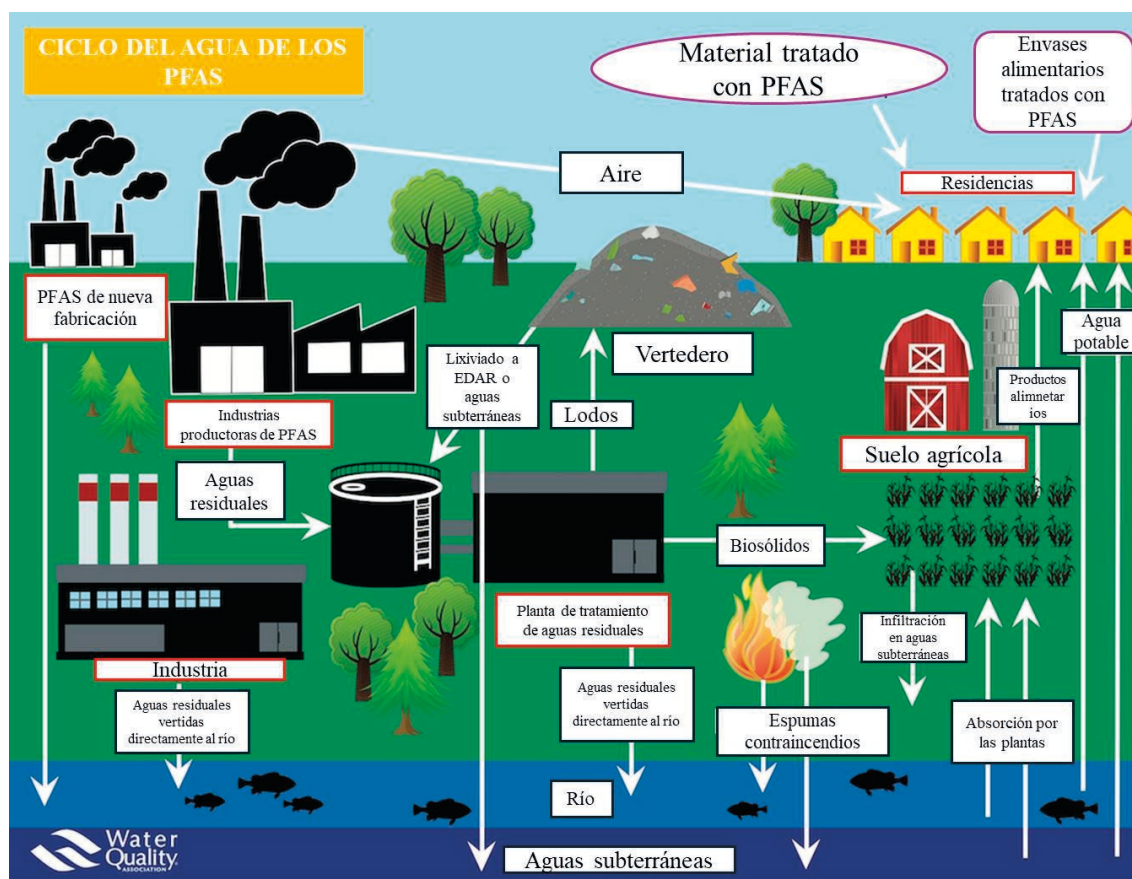
### Origen e impacto en el medio ambiente

Los PFAS no se encuentran de forma natural en la Tierra: su origen es exclusivamente antropogénico, ya que no existen fuentes naturales conocidas de estas sustancias en el ambiente. Se empezaron a fabricar en los años 40 mediante dos procesos principales: la fluoración electroquímica y la telomerización (Dhore y Murthy, 2021). La empresa estadounidense 3M fue pionera en su desarrollo y producción (PFAS Facts, 2019). Poco después, compañías como DuPont comenzaron a fabricar el famoso teflón, un producto que se convirtió en símbolo de la modernidad doméstica y que, sin saberlo, expandió los PFAS por el mundo (Dhore y Murthy, 2021).

Con el tiempo, las PFAS se empezaron a emplear en una infinidad de sectores: desde la construcción hasta la electrónica, pasando por la cosmética o la industria alimentaria (Glüge *et al.*, 2020). Durante décadas se consideraron

seguras, hasta que a comienzos de los años 2000 empezaron a detectarse en animales y en humanos de forma generalizada (PFAS Facts, 2019). A raíz de esos hallazgos, 3M y otras compañías comenzaron a retirar progresivamente algunos de sus productos más contaminantes, aunque muchos otros PFAS siguieron y siguen utilizándose en la actualidad.

Los PFAS pueden liberarse al medio ambiente durante cualquier etapa de su ciclo de vida: desde la fabricación industrial hasta el vertido de residuos o el uso de productos que los contienen (Navarro Martín, 2018). Las fuentes de contaminación se clasifican en: puntuales, como las industrias o estaciones depuradoras de aguas residuales; y difusas, más difíciles de identificar, como la degradación de productos domésticos o el transporte atmosférico (Perera y Meegoda, 2024). En la **Figura 2**, se muestra el ciclo de los PFAS en el agua.



**Figura 2.** Ciclo del agua de los PFAS, adaptado de Indalo (2023).

Entre las fuentes más importantes están los vertederos, donde los productos con PFAS se descomponen lentamente y liberan lixiviados que contaminan aguas subterráneas; las actividades militares, por el uso de espumas contra incendios; y las propias estaciones depuradoras de aguas residuales, que no solo no eliminan completamente estos compuestos, sino que pueden transformarlos



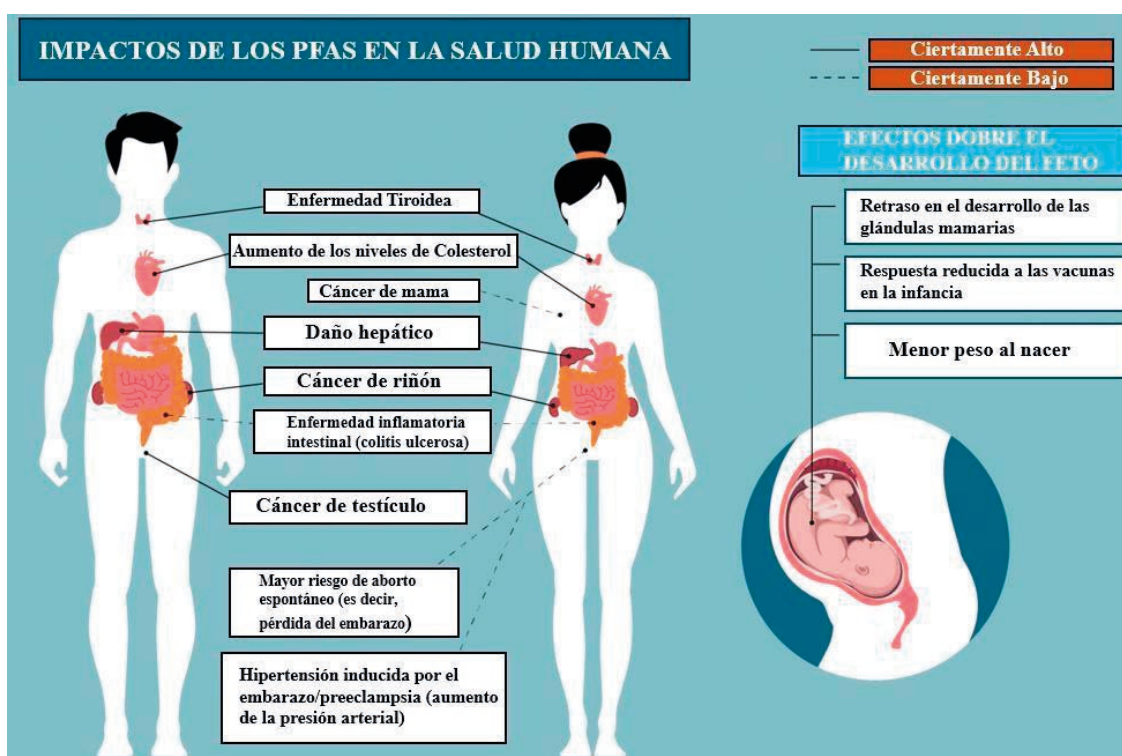
en formas aún más persistentes. A través de los lodos de depuradora, que se reutilizan en agricultura, los PFAS regresan al suelo, cerrando un ciclo de contaminación que parece no tener fin.

### Exposición y riesgos para la salud humana

La exposición humana a PFAS puede producirse por distintas vías, siendo la más importante el consumo de agua potable contaminada (DeLuca *et al.*, 2022). También pueden ingerirse a través de alimentos, especialmente pescados, mariscos, huevos o productos envasados. Otras fuentes de exposición son el aire, el polvo doméstico o el contacto con cosméticos y productos de limpieza.

Una vez dentro del cuerpo, los PFAS que, a diferencia de otros contaminantes orgánicos persistentes (COPs), no son liposolubles, se unen a proteínas en la sangre y se acumulan en órganos como el hígado o los riñones (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2021). Pueden permanecer en el organismo durante años, dependiendo del tipo de compuesto (Qi *et al.*, 2022).

Los efectos negativos de las PFAS sobre la salud son amplios. Se han relacionado con alteraciones del sistema hormonal, problemas en el desarrollo fetal, reducción de la fertilidad, aumento del colesterol, daños hepáticos e incluso mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer (Panieri *et al.*, 2022). En la **Figura 3**, se muestra un esquema general, que indica las diversas enfermedades y daños que los PFAS pueden causar en los órganos, señalando los riesgos más significativos tanto en hombres como en mujeres, así como los posibles efectos en el desarrollo del feto.



**Figura 3.** Impactos de los PFAS en la salud humana, adaptado de Jedra (2023).

Además de los efectos referidos, recientemente se ha comprobado que pueden afectar al sistema inmunitario, reduciendo la eficacia de las vacunas en niños (Adewuyi y Li, 2024). Los estudios en animales y modelos informáticos confirman su elevada toxicidad y capacidad de bioacumulación (Dickman y Aga, 2022).

### **Normativa**

Debido a la creciente preocupación a nivel global por la presencia de PFAS en el medio ambiente, las autoridades tanto nacionales como europeas han adoptado una serie de medidas normativas orientadas a limitar su presencia en el agua, los alimentos y los ecosistemas. La alta bioacumulación, persistencia y toxicidad han obligado a reforzar los sistemas de vigilancia y establecer límites legales que garanticen la protección de la salud humana.

En cuanto a la legislación sobre aguas, la Directiva Marco del agua (2000/60/CE), por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, es la base de toda la legislación sobre el agua en la Unión Europea. Aunque no menciona explícitamente la familia de los PFAS, sí obliga a todos los estados a controlar sustancias peligrosas como el PFOS, considerado prioritario (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2000). La Directiva (UE) 2020/2184 del 16 de diciembre de 2020, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, fija la obligación de control para PFAS bajo dos parámetros analíticos, la suma de PFAS (límite de 0,10 µg/L) y el total de PFAS (límite de 0,50 µg/L). La suma de PFAS incluye un grupo específico de compuestos de preocupación, por ejemplo, el ácido perfluorohexanoico (PFHxA), el ácido perfluorodecanoico (PFDA), el ácido perfluorobutano sulfónico (PFBS), entre otros. Por el contrario, el total de PFAS engloba el total de la concentración de PFAS (sin importar su cadena o estructura). Sin embargo, esta Directiva (UE) 2020/2184 no detalla un método analítico concreto para cuantificar el total de PFAS, lo cual implica que cada Estado miembro puede elegir la metodología que considere más adecuada (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2020).

En el caso específico de nuestro país, el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, establece los criterios técnico-sanitarios relativos a la calidad del agua de consumo, su control y suministro (Boletín Oficial del Estado, 2023). Esta normativa introduce por primera vez límites legales para determinadas PFAS, entre las que se encuentran: PFOA, PFOS, PFNA y PFHxS. El incumplimiento de estos valores (0,07 µg/L) implica que el agua no es apta para el consumo o requiere tratamiento adicional.

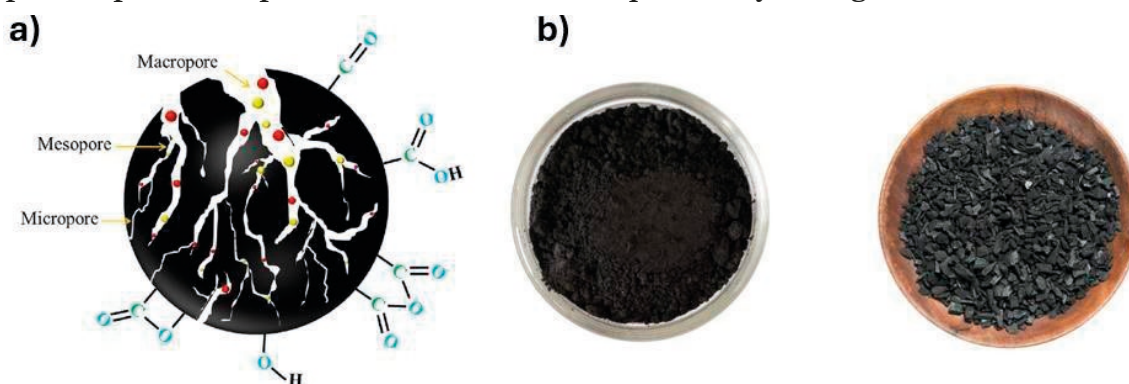
### **Tratamientos para la eliminación del agua: adsorción mediante carbón activado**

Eliminar los PFAS del agua es una tarea compleja debido a su resistencia a la degradación. Los métodos tradicionales de tratamiento, como los lodos activados o la cloración, no son eficaces. Por ello, se necesita la implementación

tecnologías de tratamiento avanzadas como el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la nanofiltración o la adsorción con carbón activado. Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y limitaciones, y su eficiencia depende de múltiples factores, como el tipo de PFA, la longitud de la cadena, las características del agua a tratar o el material utilizado, entre otros (Bayode *et al.*, 2024). Sin embargo, El Convenio de Estocolmo recomienda el uso de carbón activado como la mejor tecnología disponible para eliminar los PFAS (Desotec, 2023). Varios trabajos han destacado las ventajas del tratamiento de adsorción para la eliminación de PFAS del agua, señalando que es el proceso de adsorción más eficaz y respetuoso con el medio ambiente (Hussain *et al.*, 2025), además de tener una relación costo-eficiencia más favorable que otros procesos de eliminación (Venkatesh Reddy *et al.*, 2024).

El carbón activado es el adsorbente más utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Es un material de color negro, altamente poroso y con una gran superficie interna que permite retener moléculas contaminantes. Se obtiene a partir de la pirólisis de materiales ricos en carbono, como madera o cáscara de coco, y la activación mediante procesos físicos o químicos. En función de su tamaño de partícula, puede presentarse como carbón activado en polvo (PAC, del inglés *powdered activated carbon*) o granular (GAC, del inglés *granular activated carbon*). La **Figura 4** muestra el estado físico de ambos tipos, siendo el primer recipiente PAC, y el segundo carbón activado GAC.

El PAC tiene partículas muy pequeñas (5-50 micras ( $\mu\text{m}$ )) y es utilizado generalmente en reactores agitados. Al tener un tamaño de partícula pequeño, su superficie específica es mayor, lo que facilita una adsorción rápida, aunque se satura antes. El GAC, en cambio, presenta un tamaño de 0,2 – 5 milímetros (mm) y se utiliza en columnas de lecho fijo donde el agua circula de forma continua, permitiendo un tratamiento más duradero y una regeneración posterior del material. Ambos se aplican principalmente en la etapa final de las plantas depuradoras de aguas residuales, como tratamientos avanzados, cuando el agua ya ha pasado por las etapas de tratamientos fisicoquímicos y biológicos.



**Figura 4.** (a) Presentación esquemática de la estructura de los poros y los grupos funcionales de la superficie de carbón activado (Sultana *et al.*, 2022); y (b) Carbón Activado en Polvo (PAC) y Carbón Activado Granular (GAC) (Carbotecnia, 2023).

Durante la adsorción, las moléculas de PFAS se adhieren a la superficie del carbón gracias a interacciones físicas y electrostáticas. La eficacia del carbón activado en la eliminación de PFAS del agua depende de diversos factores: el tipo de carbón y su porosidad, la temperatura, el pH del agua, la dosis empleada y el tiempo de contacto. Por ejemplo, un pH bajo ( $<5$ ) o alto ( $>8,5$ ) puede reducir la eficiencia del proceso, mientras que un caudal de agua demasiado alto disminuye el tiempo de contacto y, por tanto, la eliminación de contaminantes es insuficiente por limitaciones cinéticas.

Aunque el carbón activado es una herramienta eficaz, su principal limitación es la saturación: una vez que los poros se llenan, pierde eficacia. La ventaja es que el carbón activado, puede regenerarse mediante tratamientos térmicos que eliminan los compuestos adsorbidos, lo que permite reutilizarlo y reducir residuos. En el caso del GAC, como se usa en lecho fijo, su recuperación es sencilla, lo que facilita la implementación de tratamientos de regeneración y uso posterior. Sin embargo, en el caso del PAC, debido a su pequeño tamaño de partícula, no es fácil de separar del agua después de su saturación. Por ese motivo, es menos común llevar a cabo su regeneración y, generalmente, se usa una sola vez y debe eliminarse junto con los lodos generados.

## Conclusión

Los PFAS representan uno de los desafíos ambientales más complejos de nuestro tiempo. Su estabilidad química, su capacidad de acumularse en los organismos y su presencia global convierten su presencia ambiental en un problema de difícil solución. Están en el agua que bebemos, en los alimentos que consumimos y en los objetos que usamos a diario.

Aunque se ha avanzado en su regulación y en la conciencia pública sobre sus riesgos, la realidad es que su eliminación completa sigue siendo un reto. Las tecnologías de tratamiento actuales, como la adsorción con carbón activado, ofrecen soluciones parciales, pero bastante eficaces, para reducir su concentración en el agua. No obstante, es fundamental seguir investigando, desarrollar materiales más sostenibles y, sobre todo, promover políticas que garanticen el fin de la producción y uso de estas sustancias.

## Bibliografía

- Abunada, Z., Alazaiza, M. Y. D. y Bashir, M. J. K. (2020). An Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment: Source, Fate, Risk and Regulations. *Water*, 12(12), pp.3590. doi:10.3390/W12123590.
- Adewuyi, A. y Li, Q. (2024). Emergency of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water: Status, regulation, and mitigation strategies in developing countries. *Eco-Environment & Health*, 3(3), pp. 355-368. doi:10.1016/J.EEHL.2024.05.008.



- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2021). *Toxicological Profile for Perfluoroalkyls*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK592138/> (Accedido: 16 de junio de 2025).
- Barry, V., Winquist, A. y Steenland, K. (2013). Perfluorooctanoic acid (PFOA) exposures and incident cancers among adults living near a chemical plant. *Environmental Health Perspectives*, 121(11-12), pp. 1313-1318. doi:10.1289/EHP.1306615.
- Bayode, A. A., Emmanuel, S. S., Akinyemi, A. O., Ore, O. T., Akpotu, S. O., Koko, D. T., Momodu, D. E. y López-Maldonado, E. A. (2024). Innovative techniques for combating a common enemy forever chemicals: A comprehensive approach to mitigating per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination. *Environmental Research*, 261, p. 119719. doi:10.1016/J.ENVRES.2024.119719.
- Billmeyer, F. W. (2020). *Ciencia de los polímeros*. 2.<sup>a</sup> ed. Barcelona: Editorial Reverté. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=FeoFEAAAQBAJ> (Accedido: 23 de mayo de 2025).
- Boletín Oficial del Estado (2023). BOE-A-2023-628 Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. *Boletín Oficial del Estado*, Número 9, pp. 4253– 4354. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2023-628> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Carbotecnia (2023). *Para el carbón activado ¿Qué rango de tamaño de partícula es el más adecuado para cada aplicación?* Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/tamano-particula/> (Accedido: 29 de junio de 2025).
- Dargaville, B. L. y Hutmacher, D. W. (2022). Water as the often neglected medium at the interface between materials and biology. *Nature Communications*, 13(1), pp. 1–10. doi:10.1038/s41467-022-31889-x.
- deLuca, N. M., Minucci, J. M., Mullikin, A., Slover, R. y Cohen Hubal, E. A. (2022). Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. *Environment International*, 162, p. 107149. doi:10.1016/J.ENVINT.2022.107149.
- Desotec (2023). *Una solución sostenible para eliminar para siempre los «químicos permanentes» de las aguas residuales y las emisiones al aire*. Disponible en: <https://www.desotec.com/es/knowledge-hub/article/sustainable-solution-to-remove-forever-chemicals-from-wastewater-air-emissions-for-good> (Accedido: 27 de junio de 2025).
- Dhore, R. y Murthy, G. S. (2021). Per/polyfluoroalkyl substances production, applications and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 341, p. 125808. doi:10.1016/J.BIORTECH.2021.125808.
- Dickman, R. A. y Aga, D. S. (2022). A review of recent studies on toxicity, sequestration, and degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Journal of Hazardous Materials*, 436, p. 129120 doi:10.1016/J.JHAZMAT.2022.129120.

- European Environment Agency (2023). *¿Qué son las PFAS y por qué son perjudiciales para mi salud?* Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/help/preguntas-frecuentes/que-son-las-pfas-y> (Accedido: 29 de junio de 2025).
- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C. A., Trier, X. y Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(12), pp. 2345–2373. doi:10.1039/DoEM00291G.
- Hussain, H. N., Jilani, M. I., Imtiaz, F., Ahmed, T., Arshad, M. B., Mudassar, M. y Sharif, M. N. (2025). Advances in the removal of Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from water using destructive and non-destructive methods. *Green Analytical Chemistry*, 12, p. 100225. doi:10.1016/J.GREEAC.2025.100225.
- Indalo (2023) *PFAS y el ciclo del agua*. Disponible en: <https://indalowater.com/pfas-y-el-ciclo-del-agua/> (Accedido: 18 de octubre de 2025).
- Jedra, C. (2023) *Forever Chemicals Have Been Found In Hawaii's Environment. Now What?* Disponible en: <https://www.civilbeat.org/2023/03/forever-chemicals-have-been-found-in-hawaiis-environment-now-what/> (Accedido: 19 de junio de 2025).
- Macheka-Tendenguwo, L. R., Olowoyo, J. O., Mugivhisa, L. L. y Abafe, O. A. (2018). Per- and polyfluoroalkyl substances in human breast milk and current analytical methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), pp. 36064–36086. doi:10.1007/S11356-018-3483-Z.
- Navarro Martín, I. (2018). *Sustancias perfluoradas: PFSA, PFCA, FOSA, N-MeFOSA y N-EtFOSA. Desarrollo de metodologías analíticas y aplicación a muestras ambientales*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <https://docta.ucm.es/entities/publication/31b618fd-72af-4a48-a46b-099d728b972a> (Accedido: 25 de mayo de 2025).
- Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Buha Djordjevic, A. y Saso, L. (2022). PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment. *Toxics*, 10(2), p. 44. doi:10.3390/TOXICS10020044.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2000). Directiva 2000/60/CE.... *Diario Oficial de la Unión Europea*, N.º 327, pp. 1–73. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2020). Directiva (UE) 2020/2184 *Diario Oficial de la Unión Europea*, N.º 435, pp. 1–62. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2020-81947> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Perera, D. C. y Meegoda, J. N. (2024). PFAS: The Journey from Wonder Chemicals to Environmental Nightmares and the Search for Solutions. *Applied Sciences*, 14(19), p. 8611. doi:10.3390/APP14198611.

- PFAS Facts (2019) *The Facts on PFAS*. Disponible en: <https://www.pfasfacts.com/> (Accedido: 21 de mayo de 2025).
- Qi, Q., Niture, S., Gadi, S., Arthur, E., Moore, J., Levine, K. E. y Kumar, D. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances activate UPR pathway, induce steatosis and fibrosis in liver cells. *Environmental Toxicology*, 38(1), p. 225. doi:10.1002/TOX.23680.
- Rodriguez-Jorquera, I. A., Kroll, K. J., Toor, G. S. y Denslow, N. D. (2015). Transcriptional and physiological response of fathead minnows (*Pimephales promelas*) exposed to urban waters entering into wildlife protected areas. *Environmental Pollution*, 199, pp. 155–165. doi:10.1016/J.ENVPOL.2015.01.021.
- Söregård, M., Bergström, S., McCleaf, P., Wiberg, K. y Ahrens, L. (2022). Long- distance transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer. *Environmental Pollution*, 311, p. 119981. doi:10.1016/J.ENVPOL.2022.119981.
- Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H. y Alam, S. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6. doi:10.1016/J.CLET.2021.100382.
- Reddy, C. V., Kumar, R., Chakraborty, P., Karmakar, B., Pottipati, S., Kundu, A. y Jeon, B. H. (2024). A critical science mapping approach on removal mechanism and pathways of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in water and wastewater: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 492, p. 152272. doi:10.1016/J.CEJ.2024.152272.
- Wang, C., Magnuson, J. T., Zheng, C. y Qiu, W. (2025). Incidence of pollution, bioaccumulation, biomagnification, and toxic effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aquatic ecosystems: A review. *Aquatic Toxicology*, 286, p. 107469. doi:10.1016/J.AQUATOX.2025.107469.