

Qué hacer con los PFAS y sus metabolitos

Miquel Paraira

Aigües de Barcelona (Veolia Spain)

mparaira@aiguesdebarcelona.cat



Introducción: la problemática de los PFAS en las aguas

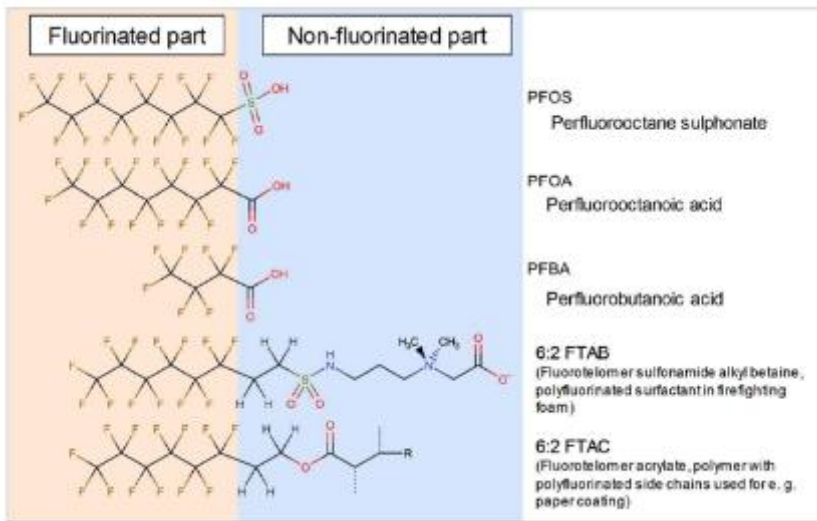
¿Qué son los PFAS ? Características Químicas y Aplicaciones.

- Compuestos químicos sintéticos **poli- y perfluoroalquilados**.
- Propiedades únicas **repelentes de aceites, agua y polvo**, proporcionadas por la unión extremadamente estable de los enlaces carbono-flúor: estas propiedades hacen que hayan sido muy utilizados desde hace décadas en muchos productos y aplicaciones, tales como productos textiles y de uso doméstico, embalajes alimentarios, espumas anti incendios, biocidas, etc.
- Estas mismas propiedades hacen que sean difíciles de degradar y por lo tanto sean **persistentes en el medioambiente**.
- Miles de sustancias en uso (industria y productos de consumo).



Características Químicas y Aplicaciones de los PFAS.

La familia de los PFAS se puede dividir en 2 grandes grupos, los **ácidos sulfónicos** fluorados (también denominados sulfonatos) y los **ácidos carboxílicos** (también denominados carboxilatos).

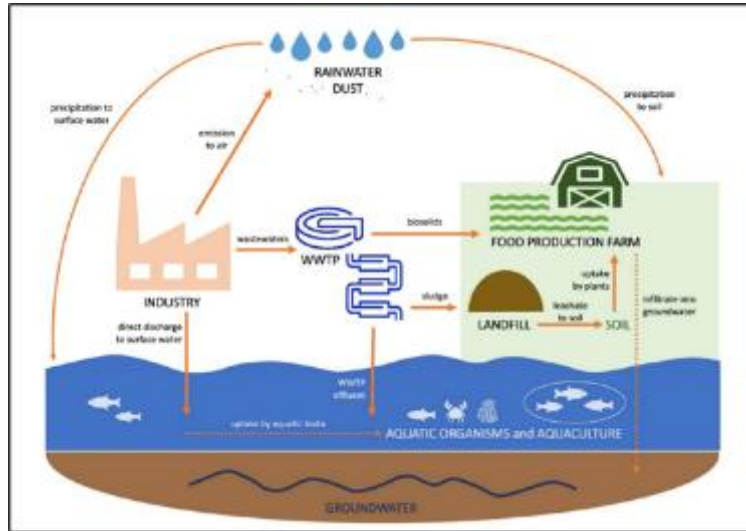


Según el número de átomos de carbono en la cadena alquílica, se habla de compuestos de **cadena larga** o **corta**, resultando los de cadena larga más persistentes y bioacumulables (PFOA, PFOS).

Difusión en el Medioambiente

Las propiedades de resistencia química y movilidad provocan:

- Acumulación en suelos, sedimentos y aguas (subterráneas y superficiales)
- Ubicuidad en el medioambiente: persistencia



Rutas básicas de difusión MA:

1. Emisión **aire** y precipitación
2. **Descarga directa** a aguas superficiales
3. Eliminación incompleta en **EDARs**
4. **Biosólidos y fangos contaminados** (lixiviados)

Vías de Exposición

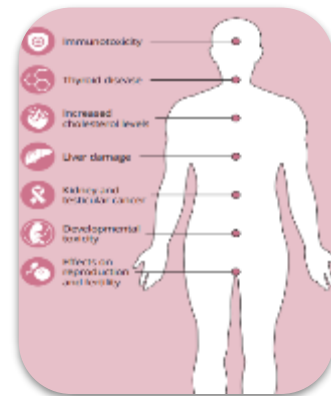
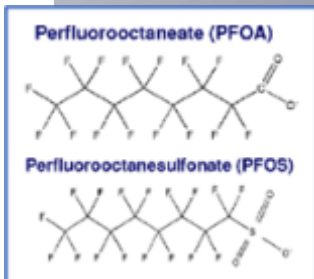
- **Inhalación**: aire y polvo
- **Ingesta**: alimentos, aguas contaminadas

EFSA (2020). Fuentes de exposición principales a PFAS: pescado, fruta, huevos y productos procesados derivados, aguas contaminadas

Riesgos para la Salud

Los efectos descritos incluyen toxicidad hepática, alteración del metabolismo lipídico, disfunciones del sistema inmunitario y efectos tóxicos sobre los mecanismos de desarrollo, destacando problemas durante la gestación y el desarrollo infantil.

Además, el PFOS y el PFOA han sido clasificados como **posibles carcinógenos**.



Una preocupación creciente a nivel global

Regulaciones más estrictas...



Límites máxs. - Aguas y Biosólidos

3 POPs* regulados en la
Convención de Estocolmo:
PFOA, PFOS, PFHxS

Registro potencial como
sustancias peligrosas

Prohibiciones / Restricciones

POPs: Persistent Organic Pollutants

...para todos



Autoridades Sanitarias



Operadores (Aguas y Residuos)



Industrias

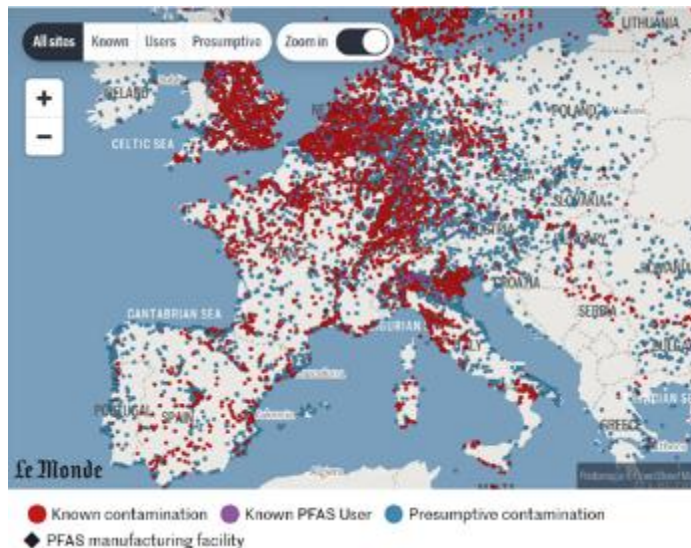


Municipios

Sus propiedades dificultan su tratamiento y destrucción (dificultad de rotura)

Contexto Mediático

Proyecto periodístico ***Forever Pollution Project*** (2023):



[Enlace Mapa](#)

Proyecto periodístico ***Forever Lobbying Project*** (2025):

Denuncia acciones del lobby de la industria para frenar las iniciativas legislativas europeas. Referencia explícita a la contaminación de las aguas de consumo y costes de descontaminación.

Contexto Mediático



PFAS: el rastro de los contaminantes eternos en España

No se degradan, se van acumulando en el medio ambiente y el organismo. Entran por los alimentos, el agua del grifo, al respirar el polvo de las casas. Hace décadas el ser humano sintetizó un tipo de compuesto irrompible que hace que las sartenes sean antiadherentes, la ropa impermeable, se usan en electrónica y construcción. Y están contaminándolo todo. Son los PFAS. Un elemento cancerígeno que a partir de determinados niveles afecta al sistema inmune, al cardiovascular, al reproductor y es un disruptor endocrino. Esta investigación transnacional ha logrado mostrar el mapa de su presencia en toda Europa. La industria lleva décadas retrasando su prohibición. Esta es la historia.



Tecnologías de Tratamiento

¿Cómo tratar los PFAS en el proceso de potabilización?

Opciones de tratamiento: selección de la solución adecuada



Factores a tener en cuenta para seleccionar una tecnología de tratamiento

CALIDAD DEL AGUA

Tipos de PFAS presentes y niveles de concentración

CALIDAD DEL AGUA A TRATAR:

- Materia Orgánica
- Co-contaminantes
 - Salinidad
 - Etc.

Niveles a alcanzar / rendimiento necesario

OPERACIONALES

Tren de tratamiento existente

Requerimientos de espacio

Volúmen de agua a tratar

CAPEX / OPEX

Importancia de pruebas previas en PLANTA PILOTO

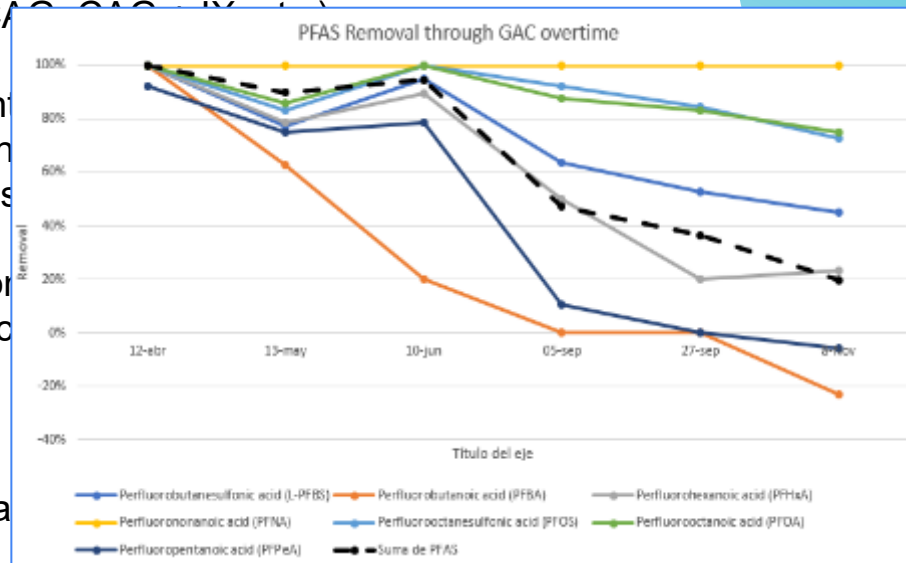
¿Cómo tratar los PFAS en el proceso de potabilización?

Opciones de tratamiento: selección de la solución adecuada

FACTORES CLAVES DE DECISIÓN			
Calidad del agua (consideraciones)	Permite eliminar numerosos contaminantes (CECs, precursores de DBPs...). La materia orgánica (COT) compite con los PFAS y puede limitar la eficiencia de eliminación	Las resinas IX o IEX están específicamente diseñadas para los contaminantes a eliminar. Los aniones (y la MO) compiten con los PFAS y pueden limitar la eficiencia de eliminación	Eliminan un amplio espectro de contaminantes, pero generalmente requieren un pre-tratamiento para proteger las membranas
Eficiencia/Selectividad eliminación PFAS	Eficiencia (y duración) limitada para PFAS de cadena corta y PFAS carboxilados	Eficiencia limitada para PFAS de cadena corta (aunque mejor que el CAG)	Flexibilidad para eliminar cualquier tipo de PFAS (incl. cadena ultracorta)
Coste del ciclo de vida	€€: Frecuencia de renovación del medio filtrante / Costes de reactivación y/o gestión del residuo	€€: Coste de resinas específicas / Sustitución resinas y gestión de residuos	€€€: CAPEX. Pre-tratamiento requerido. Consumo energético. Costes gestión salmuera
Autorización		Registro pendiente	
Gestión de residuos	Reactivación posible	No regenerables	Producción de salmuera (concentrada en PFAS)

Otras consideraciones respecto a los tratamientos de elección

- También se están utilizando **combinaciones de diferentes tecnologías de tratamiento** para mejorar el rendimiento de eliminación de PFAS y optimizar costes: etapa inicial + etapa “pulido” (p.ej: OI + CAG, CAG + IX, etc.)
- Existen diferencias apreciables en los rendimientos de diferentes tipos de carbones activos, siendo generalmente mejores para la eliminación de PFAS los de tipo **bituminoso** (importancia de la estructura del carbono)
- Algunos carbones presentan buenas eliminaciones de PFAS de cadena corta, pero hay que tener en cuenta que su eficiencia puede ser menor para los de cadena larga.
- El carbón activo en polvo puede constituir una alternativa menos eficiente que el CAG para los PFAS de cadena larga.
- Existe un buen número de **tecnologías emergentes** en desarrollo, tanto nuevos adsorbentes como diversas tecnologías destructivas.



Tecnologías emergentes para la eliminación de PFAS

Tecnologías de destrucción

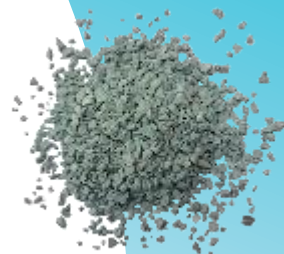
- Oxidación electroquímica
- Plasma
- Fotocatálisis
- Degradación sonolítica
- Oxidación en agua supercrítica
- Oxidación con persulfato
- etc

Tecnologías de separación

- Polímeros (naturales y sintéticos)
- Zeolitas
- Arcillas modificadas
- Adsorbentes en base de sílice
- Fraccionamiento por espuma
- etc

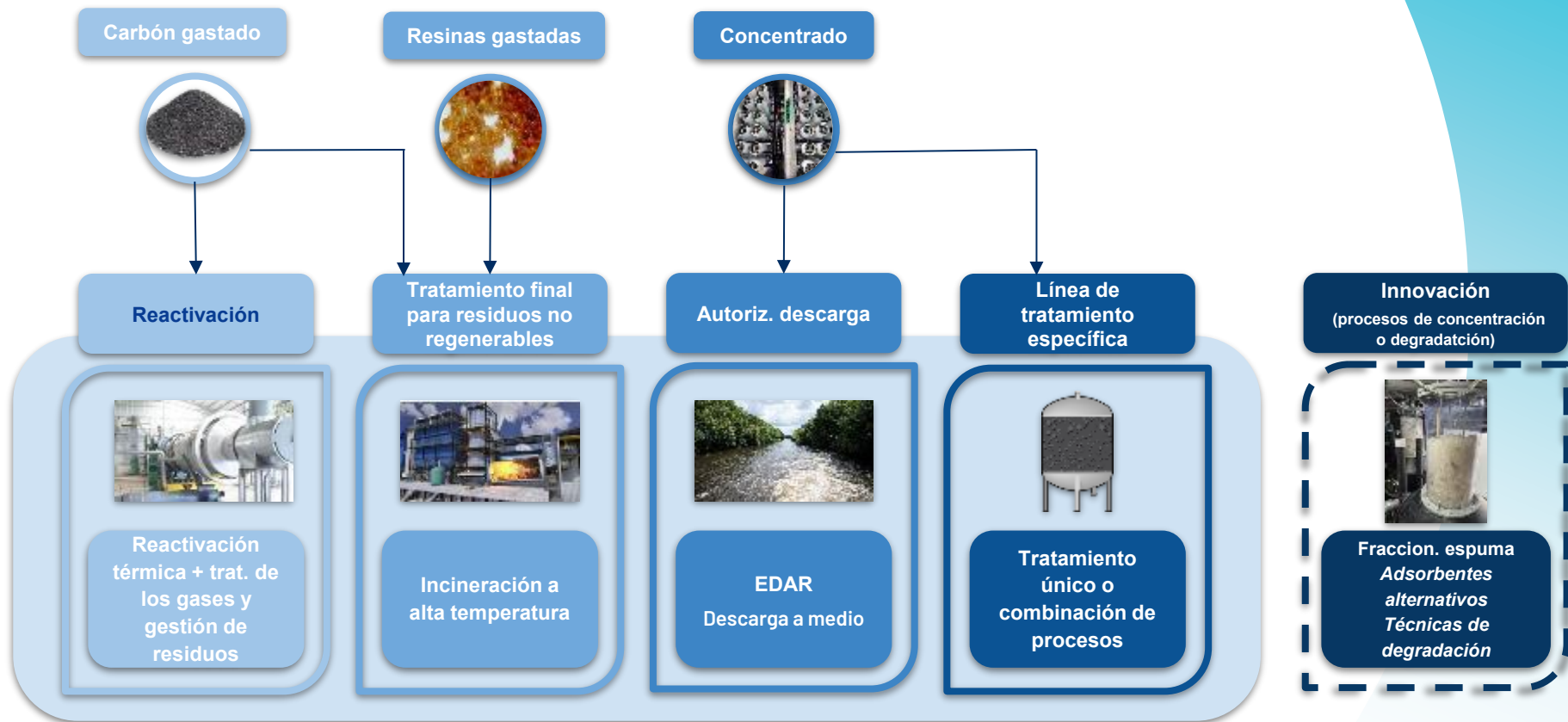
Combinación de tecnologías

- NF + CAG/IX
- NF + fraccionamiento por espuma
- NF + oxidación electroquímica
- CAG + persulfato
- IX + oxidación electroquímica
- etc



Aplicación a gran escala limitada por diversos factores, como la presencia de compuestos competidores que inhiben el proceso, la generación de contaminación secundaria en agua o aire, la elevada intensidad energética, el costo y el diseño complejo de los reactores.

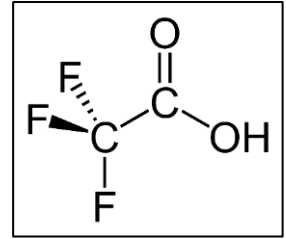
Gestión de los Residuos generados en el tratamiento de los PFAS



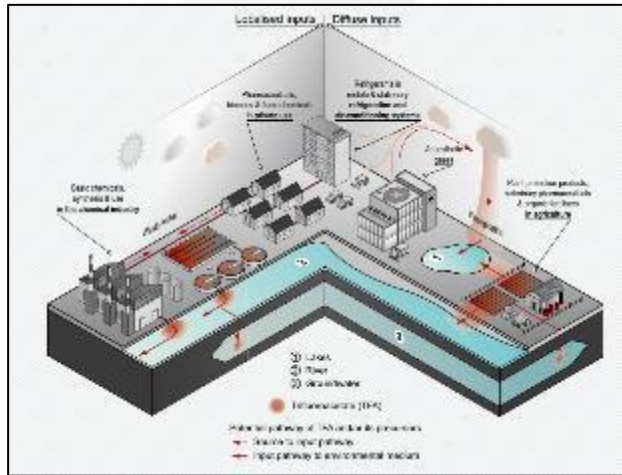
El TFA y la problemática en las aguas

El Ácido Trifluoroacético (TFA)

- Ácido orgánico fluorado muy utilizado en química orgánica y en diversos procesos industriales por su reactividad y propiedades únicas.
- Se utiliza ampliamente en síntesis orgánica como **disolvente**, **reactivo** y catalizador debido a su fuerza ácida y también se emplea en la fabricación de **medicamentos**, **productos agroquímicos**, **polímeros fluorados** y **materiales electrónicos**.
- El TFA, como el DFA, es considerado un compuesto de la familia de los PFAS de **cadena ultracorta** y es una sustancia hidrofílica, **móvil** y **persistente**, por lo que se mantiene en el medioambiente durante largo tiempo.
- Debido a su estructura, la Comisión Europea ha propuesto incluirlo dentro de la familia de los PFAS (parámetro “**Total PFAS**”).



TFA: vías de emisión y llegada a las aguas



Vías de emisión al medioambiente:

- Degradación fotoquímica de **precursores** en la atmósfera y posterior entrada por precipitación.
- **Emisiones industriales**, que pueden impactar incluso en cuencas hídricas lejanas a los puntos de descarga
- **EDARs urbanas**
- Degradación biológica de microcontaminantes como algunos **pesticidas o fármacos**. Son especialmente preocupantes los pesticidas pertenecientes al grupo de los PFAS
- Se ha observado que también puede formarse durante el proceso de **ozonización**, a partir de precursores presentes en las aguas residuales (con el grupo $-C-CF_3$).

Niveles en las aguas:

- Existen pocos estudios: se han reportado niveles del orden de entre **2 y 10 $\mu\text{g/L}$** en aguas superficiales e **inferiores a 0,5 $\mu\text{g/L}$** en aguas subterráneas.

TFA: riesgos para la salud y tratamiento

Riesgos para la salud y regulación:

- Aunque se trate de un PFAS, por su estructura y propiedades físico-químicas no se bioacumula y el nivel de toxicidad reportado es muy inferior que para los PFAS regulados.
- Las *Guidelines* de la OMS sobre aguas de consumo no consideran el TFA.
- Por su parte, el Reglamento Europeo sobre pesticidas lo considera un **metabolito “no relevante”**.
- Alemania (UBA) fija un valor guía (**60 µg/L**) para las aguas de consumo

Tratamiento:

- En los estudios publicados hasta la fecha, únicamente la **Ósmosis Inversa** se muestra efectiva para su eliminación.
- Como con el resto de PFAS, se están desarrollando **adsorbentes específicos** para la eliminación del TFA de aguas contaminadas, con la ventaja adicional de la posibilidad de regeneración de estos (en fase de investigación para el TFA).

Conclusiones

Conclusiones

- **Problemática medioambiental global**, causada por la producción y empleo de miles de compuestos en multitud de productos y aplicaciones.
- Propiedades de **persistencia y bioacumulación**.
- **Problemas de salud** demostrados para diversos compuestos de la familia.
- **Limites legales** cada vez más exigentes.
- Contexto **muy mediatizado**.
- Tecnologías de eliminación disponibles a escala real limitadas (**CAG, IX, NF/OI**), con muchas nuevas en desarrollo y estudio.
- Se trata de técnicas no destructivas: problemática del **residuo generado**.
- Importancia de la fase de **diseño del tratamiento**, con numerosos aspectos a tener en cuenta (solución adaptada a cada casuística).
- **TFA**: amplia presencia, menor toxicidad, no regulado, requiere OI
- Importancia de la **prevención en origen** para hacer frente a la problemática.