

Guia de gestió i tractament dels PFAS en l'aigua d'abastament



**Agència Catalana
de l'Aigua**



**Generalitat
de Catalunya**

Guia de gestió i tractament dels PFAS en l'aigua d'abastament

Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya

Juliol de 2026

1a edició

Llicència:



Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual
CC BY-NC-SA

[Vegeu el resum de la llicència](#) | [Vegeu el codi legal](#)

Versió electrònica

Prefaci

Les substàncies per- i polifluoroalquilades (PFAS) constitueixen un dels principals reptes de contaminació ambiental per a la societat actual, amb una incidència especialment rellevant en el medi aquàtic. La seva elevada persistència i toxicitat fan necessari un control estricte de l'exposició humana, incloent-hi la via de l'aigua potable. En aquest context, els PFAS s'han incorporat a la Directiva (UE) 2020/2184 relativa a la qualitat de l'aigua destinada al consum humà, transposada a l'ordenament jurídic espanyol mitjançant el Reial decret 3/2023.

Aquests desenvolupaments normatius han situat els governs locals i les entitats responsables del subministrament d'aigua potable davant el repte de complir una nova legislació en un àmbit complex i en constant evolució. Atesa la gran quantitat de compostos PFAS i la diversitat del seu comportament fisicoquímic i toxicològic, la gestió tècnica d'aquestes substàncies és un repte considerable. Per aquest motiu, l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) vol donar suport als equips tècnics i a les administracions competents mitjançant l'elaboració d'una guia pràctica per a la gestió i el tractament dels PFAS en l'aigua d'abastament.

En aquest marc, l'ACA va encomanar a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) la redacció d'aquesta guia, que proporciona informació rellevant i actualitzada sobre les característiques d'aquests compostos, el marc normatiu, el seu origen i presència en el medi hídric i les opcions de gestió i tractament disponibles. La guia també inclou exemples pràctics d'actuacions en diferents escenaris de contaminació i d'infraestructures existents. Finalment, els annexos descriuen els mètodes d'anàlisi química i les línies de desenvolupament tecnològic emergents.

L'edició de la guia ha estat liderada per l'ICRA però ha comptat amb la col·laboració de la Secretaria de Salut Pública i amb diversos autors i entitats de referència en la gestió i el tractament de l'aigua, amb l'objectiu d'aportar coneixement contrastat i complementari. El 6 d'octubre de 2025 es va celebrar la primera reunió de presentació de la proposta a les diferents entitats col·laboradores, a partir de la qual es van definir grups de treball per capítols. Aquests grups de treball han redactat la guia de manera col·laborativa entre els mesos d'octubre i desembre de 2025, amb la participació de 14 entitats i 27 persones. Cal destacar també que el 27 de novembre de 2025 es va dur a terme un taller semipresencial a l'ICRA que va permetre consensuar els continguts i les recomanacions de la guia, especialment pel que fa a la seva aplicació davant diferents escenaris de contaminació per PFAS.

Així neix aquesta guia, fruit del consens entre diversos agents del sector i amb la voluntat d'esdevenir una eina de referència per a la presa de decisions en la gestió dels PFAS a Catalunya, contribuint, així, a la protecció de la salut pública i del medi ambient.

Wolfgang Gernjak

Professor ICREA a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)

Juliol 2026



Coordinadors

Wolfgang Gernjak, Oriol Gutiérrez, Pau Giménez-Grau (ICRA)

Tècnics responsables de l'Agència Catalana de l'Aigua:

Cristina Barberà, Míriam Planas, Clara Corbella (ACA)

Autors principals del capítols

Capítol 1 – Mira Petrovic (ICRA)

Capítol 2 – Mira Petrovic (ICRA)

Capítol 3 – Carme Bosch (Eurecat), Pau Giménez-Grau (ICRA), Míriam Planas (ACA)

Capítol 4 – Maria José Farré i Miquel Paraira (Aigües de Barcelona)

Capítol 5 – Oriol Gutiérrez (ICRA)

Annex A – Marta Llorca i Marinella Farré (IDAEA-CSIC)

Annex B – Jelena Radjenovic i Nick Duinslaeger (ICRA)

Col·laboradors

Wolfgang Gernjak (ICRA)

Pau Giménez-Grau (ICRA)

Oriol Gutiérrez (ICRA)

Mira Petrovic (ICRA)

Jelena Radjenovic (ICRA)

Nick Duinslaeger (ICRA)

Clara Corbella (ACA)

Cristina Barberà (ACA)

Míriam Planas (ACA)

Josep Àngel Sanchís (ACA)

Marta Llorca (IDAEA-CSIC)

Marinella Farré (IDAEA-CSIC)

Carme Bosch (Eurecat)

Maria José Farré (Aigües de Barcelona)

Miquel Paraira (Aigües de Barcelona)

Guillem Gilabert-Oriol (DuPont)

Fernando Valero (ATL)

Pere Emiliano (ATL)

Eduardo Arozamena (Canal de Isabel II)

Carlos Tomé (Canal de Isabel II)

David Güell (Aigües de Manresa)

Eva Corbella (Aigües de Manresa)

Aleix Martorell (Consorti d'Aigües de Tarragona)

Paula Aguirre (Transparenta)

Mireia Colom (Diputació Barcelona, Salut Pública)

Héctor Monclús (Universitat de Girona)



Resum executiu

La presència de substàncies per- i polifluoroalquilades (PFAS) en fonts de subministrament d'aigua destinada al consum humà constitueix un repte emergent per als sistemes d'abastament, especialment en municipis petits i mitjans. La seva elevada persistència, la diversitat de compostos existents i la complexitat associada als processos de tractament fan necessari disposar d'eines pràctiques que permetin definir actuacions adequades en funció de cada context.

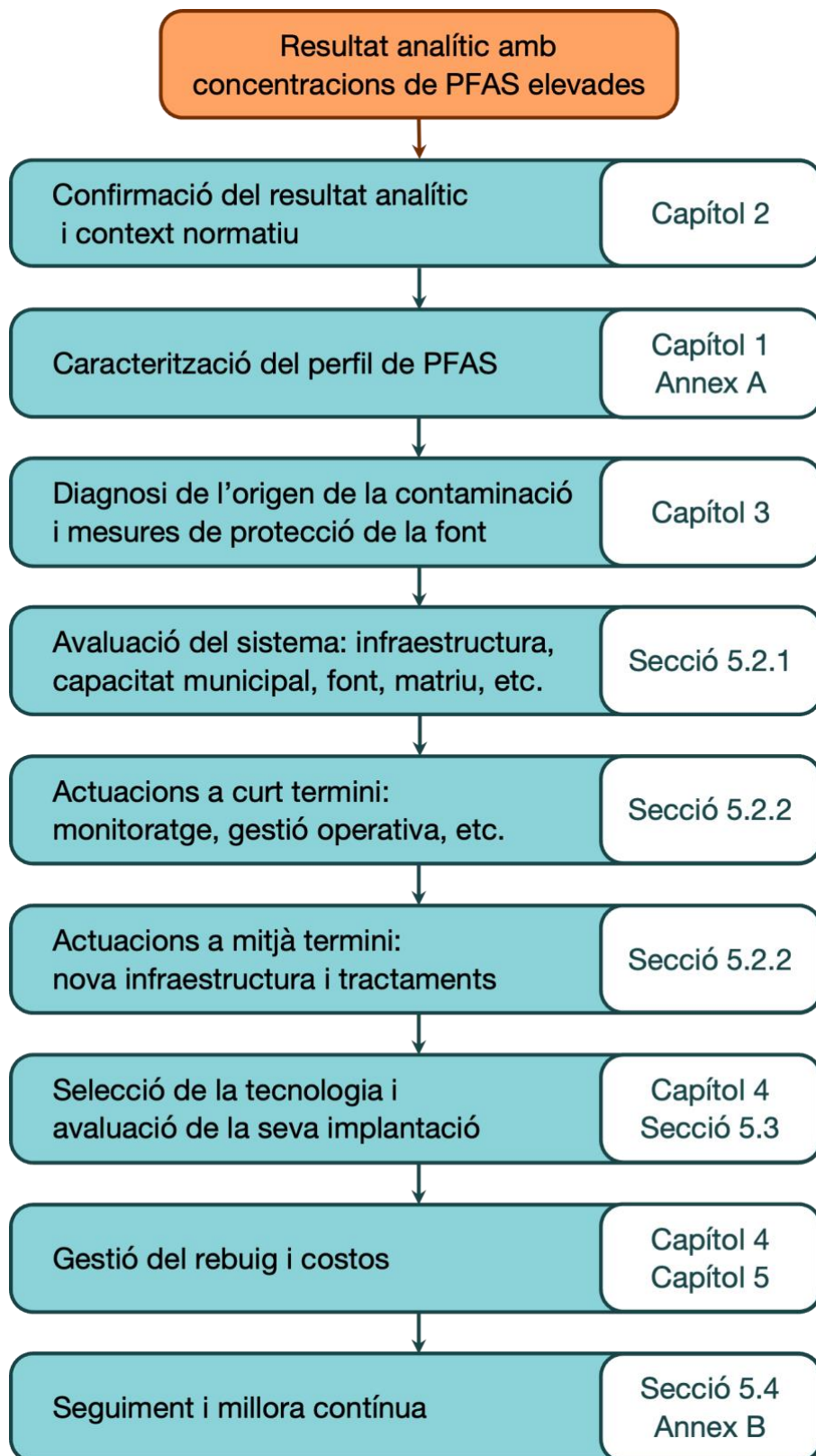
Aquesta guia té com a objectiu proporcionar un marc tècnic i operatiu per a l'anàlisi, la gestió i el tractament de la contaminació per PFAS en sistemes d'abastament d'aigua. Els capítols inicials descriuen les principals característiques dels PFAS, el marc normatiu que els regula, i les fonts i el comportament en el medi. Posteriorment, s'analitzen les tecnologies disponibles per al seu tractament, destacant-ne els avantatges i limitacions, els condicionants operatius, els costos i la gestió del rebuig associat.

El capítol 5 desenvolupa una metodologia d'anàlisi orientada a la presa de decisions. La caracterització de l'escenari, la implementació de mesures a curt termini i la protecció de la font se situen com a passos previs a la implantació de solucions estructurals de tractament. A partir d'aquesta metodologia, es defineixen sis escenaris tipus que representen situacions habituals en municipis petits i mitjans, sense pretendre cobrir totes les casuístiques possibles. Aquests casos seleccionats mostren com aplicar els criteris de la guia a contextos reals, tenint en compte factors com el tipus de captació, el perfil de PFAS, la infraestructura existent i la capacitat municipal.

Finalment, la guia incorpora recomanacions transversals relatives al seguiment, la gestió operativa i la necessitat d'adaptació progressiva davant l'evolució del coneixement científic i del marc regulador. L'enfocament proposat permet avançar cap a solucions proporcionades, sostenibles i adaptades a cada sistema d'abastament.

La guia es complementa amb dos annexos que aporten informació sobre aspectes més específics, com són les metodologies d'anàlisi de PFAS i les tecnologies de tractament emergents.

Com utilitzar la guia



Continguts

Prefaci.....	3
Resum executiu.....	5
Com utilitzar la guia.....	6
Glossari d'acrònims.....	9
Glossari de compostos PFAS	10
1. Descripció dels PFAS	11
1.1 Classificació	12
1.2 Propietats principals i aplicabilitat	13
1.3 Risc d'exposició a PFAS i toxicitat	14
2. Normativa actual i tendències.....	16
2.1 Marc regulador.....	17
2.2 Normatives sobre l'aigua de consum humà.....	18
2.3 Altres normatives rellevants	19
2.4 Desenvolupaments reguladors recents i perspectives.....	24
3. Origen de la contaminació per PFAS: detecció i prevenció.....	27
3.1 Fonts d'aigua potable a Catalunya	28
3.2 Origen de la contaminació per PFAS i transport en el medi	28
3.3 Concentracions de PFAS en el medi hídric a Catalunya	31
3.4 Actuacions per a la reducció de la contaminació en origen	33
4. Tecnologies de tractament de PFAS	35
4.1 Tecnologies de tractament de PFAS existents en el mercat.....	36
4.2 Carbó actiu.....	36
4.3 Resines d'intercanvi iònic (IX).....	39
4.4 Membranes de nanofiltració (NF) i d'osmosi inversa (OI).....	40
4.5 Combinacions de tecnologies	41
4.6 Resum dels tractaments i fitxes descriptives.....	42
5. Aplicació de la guia a escenaris tipus.....	49
5.1 Objectiu	50
5.2 Metodologia aplicada.....	50
5.3 Escenaris de referència.....	53
5.4 Recomanacions transversals	60
Annex A. Metodologies d'anàlisi de PFAS	63
A.1 Introducció sobre l'anàlisi i quantificació de PFAS.....	64
A.2 Presa i preservació de les mostres	64

A.3 Tractament de les mostres.....	65
A.4 Anàlisi de les mostres	66
A.5 Determinació del PFAS total	69
Annex B. Tecnologies innovadores en desenvolupament	70
B.1 El desenvolupament d'alternatives tecnològiques	71
B.2 Oxidació electroquímica (ELOX)	74
B.3 Oxidació en aigua supercrítica (SCWO)	74
B.4 Tractament hidrotermal alcalí (HALT)	75
B.5 Conclusions i perspectives	76
Referències	77

Glossari d'acrònims

Abreviació	Nom complet
AFFF	Escuma formadora de pel·lícula aquosa (de l'anglès: <i>Aqueous Film Forming Foam</i>)
BDD	Diamant dopat amb bor (de l'anglès: <i>Boron Doped Diamond</i>)
CAG	Carbó actiu granular
CAP	Carbó actiu en pols
CAS RN	Identificador numèric únic assignat a una substància química (de l'anglès: <i>Chemical Abstracts Service Registry Number</i>)
CMA	Concentració màxima admissible
DARU	Directiva europea sobre depuració d'aigües residuals urbanes
DBP	Productes de desinfecció (de l'anglès: <i>Disinfection By-Products</i>)
DOC	Carboni orgànic dissolt (de l'anglès: <i>Dissolved Organic Carbon</i>)
EBCT	Temps de contacte en el llit filtrant buit (de l'anglès: <i>Empty Bed Contact Time</i>)
ECHA	Agència Europea de Substàncies Químiques (de l'anglès: <i>European Chemicals Agency</i>)
EDAR	Estació depuradora d'aigües residuals
EFSA	Autoritat Europea de Seguretat Alimentària (de l'anglès: <i>European Food Safety Authority</i>)
ELOX	Oxidació electroquímica (de l'anglès: <i>Electrochemical Oxidation</i>)
ETAP	Estació de tractament d'aigua potable
FTOH	Alcohols fluorotelòmers
HALT	Tractament hidrotermal alcalí (de l'anglès: <i>Hydrothermal Alkaline Liquid Treatment</i>)
IX	Intercanvi iònic
LC-HRMS	Cromatografia de líquids acoblada a espectrometria de masses d'alta resolució (de l'anglès: <i>Liquid Chromatography coupled to High Resolution Mass Spectrometry</i>)
LQ	Límit de quantificació
MA	Mitjana anual
MWCO	Tall de pes molecular (de l'anglès: <i>Molecular Weight Cut-Off</i>)
NQA	Normes de qualitat ambiental
NF	Nanofiltració
OI	Osmosi inversa
OCDE	Organització per a la Cooperació i el Desenvolupament Econòmic
OMS	Organització Mundial de la Salut
PEEK	Polietereftercetona (de l'anglès: <i>Polyether Ether Ketone</i>)
PFAA	Àcids perfluoroalquilícs
PFAS	Compostos per- i polifluoroalquilats (de l'anglès: <i>Per- and polyfluoroalkyl substances</i>)
PFCA	Àcids perfluorocarboxílics
PFEA	Àcids d'èters perfluoroalquilícs
PFPAs	Àcids perfluoroalquil fosfònics
PFPE	Perfluoropolièters
PFPIAs	Àcids perfluoroalquil fosfínics
PFSA	Àcids perfluorosulfònics
POP	Contaminants orgànics persistents (de l'anglès: <i>Persistent Organic Pollutants</i>)
p. ex.	Per exemple
ppb	Parts per bilió (equivalent a micrograms per litre, µg/L)
PSA	Pla Sanitari de l'Aigua
RD	Reial decret
REACH	Reglament (CE) núm. 1907/2006 (de l'anglès: <i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>)
RPF	Factor de potència relativa (de l'anglès: <i>Relative Potency Factor</i>)
SCWO	Oxidació en aigua supercrítica (de l'anglès: <i>Supercritical Water Oxidation</i>)
SPE	Extracció en fase sòlida (de l'anglès: <i>Solid Phase Extraction</i>)
TRL	Nivell de maduresa tecnològica (de l'anglès: <i>Technology Readiness Level</i>)
TWI	Ingesta setmanal tolerable (de l'anglès: <i>Tolerable Weekly Intake</i>)
UE	Unió Europea

Glossari de compostos PFAS

Compostos del RD 3/2023 (ordenats per longitud de la cadena de carbonis). En aquesta guia s'utilitzen les abreviatures tècniques PFUnDS, PFDòDS i PFTrDS per als àcids perfluoroundecanosulfònic, perfluorododecanosulfònic i perfluorotridecanosulfònic, respectivament. Al RD 3/2023 aquests compostos apareixen com PFUnS, PFDòS i PFTris.

Abreviació	Nom complet	#CAS
PFBA	Àcid perfluorobutanoic	375-22-4
PFBS	Àcid perfluorobutanosulfònic	375-73-5
PFPeA	Àcid perfluoropentanoic	2706-90-3
PFPeS	Àcid perfluoropentanosulfònic	2706-91-4
PFHxA	Àcid perfluorohexanoic	307-24-4
PFHxS	Àcid perfluorohexanosulfònic	355-46-4
PFHpA	Àcid perfluoroheptanoic	375-85-9
PFHpS	Àcid perfluoroheptanosulfònic	375-92-8
PFOA	Àcid perfluorooctanoic	335-67-1
PFOS	Àcid perfluorooctanosulfònic	1763-23-1
PFNA	Àcid perfluorononanoic	375-95-1
PFNS	Àcid perfluorononanosulfònic	68259-12-1
PFDA	Àcid perfluorodecanoic	335-76-2
PFDS	Àcid perfluorodecanosulfònic	335-77-3
PFUnDA	Àcid perfluoroundecanoic	2058-94-8
PFUnDS	Àcid perfluoroundecanosulfònic	749786-16-1
PFDòDA	Àcid perfluorododecanoic	307-55-1
PFDòDS	Àcid perfluorododecanosulfònic	79780-39-5
PFTrDA	Àcid perfluorotridecanoic	72629-94-8
PFTrDS	Àcid perfluorotridecanosulfònic	791563-89-8

Compostos inclosos en les Normes de Qualitat Ambiental que no estan al RD 3/2023

Abreviació	Nom complet	#CAS
PFTeDA	Àcid perfluorotetradecanoic	376-06-7
PFHxDA	Àcid perfluorohexadecanoic	67905-19-5
PFODA	Àcid perfluorooctadecanoic	16517-11-6
TFA	Àcid trifluoroacètic	76-05-1
HFPO-DA (GenX)	Àcid hexafluoropropilè òxid dímer	13252-13-6
ADONA	Àcid 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoic	919005-14-4
C6O4	Perfluoroèter carboxílic (C6O4)	1190931-41-9
6:2 FTOH	6:2 fluorotelomer alcohol	647-42-7
8:2 FTOH	8:2 fluorotelomer alcohol	678-39-7

Altres compostos que no estan al RD 3/2023

Abreviació	Nom complet	#CAS
PTFE	Politetrafluoroetilè (tefló)	9002-84-0
FEP	Copolímer d'hexafluoropropilè i tetrafluoroetilè	25067-11-2
PVDF	Polifluorur de vinilidè	24937-79-9
TDFA	Àcid tridecafluoroheptanoic	51851-37-7

1. Descripció dels PFAS

1.1 Classificació

Els compostos per- i polifluoroalquilats (**PFAS**, de l'anglès *Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances*) són un ampli grup de productes químics sintètics que contenen almenys un àtom de carboni totalment fluorat ($-\text{CF}_2-$ o $-\text{CF}_3$). La característica principal és l'enllaç fort carboni-fluor ($\text{C}-\text{F}$), que confereix a aquestes substàncies estabilitat química, repulsió a l'aigua i resistència a la degradació.

Els PFAS inclouen substàncies perfluorades, en què tots els hidrògens de la cadena de carboni són substituïts per fluor, i substàncies polifluorades, en què la cadena de carboni encara conserva alguns àtoms d'hidrogen.

Els PFAS es divideixen en dues classes principals, polímers i no polímers, i cada classe conté diferents grups i subgrups de PFAS (vegeu Figura 1).

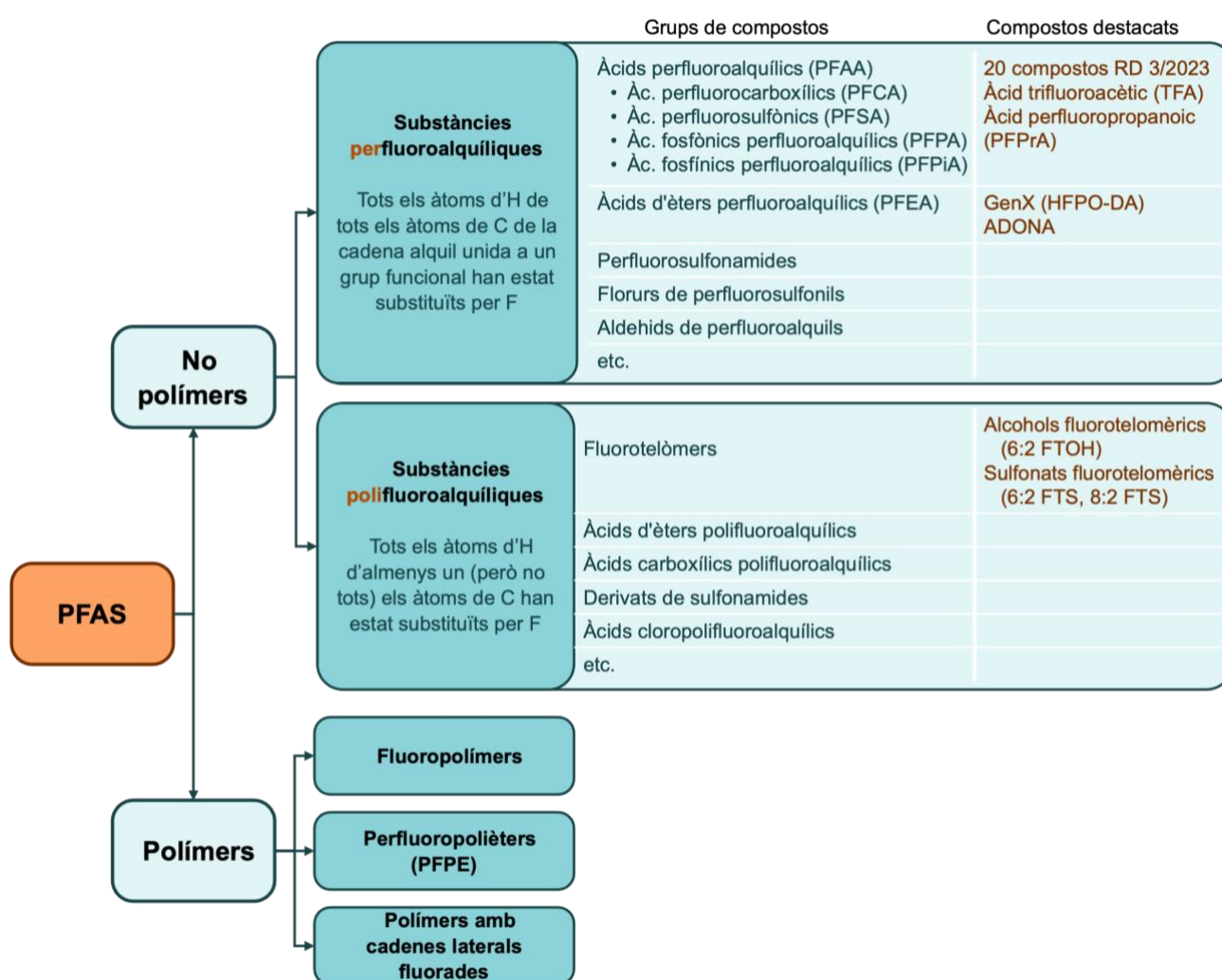
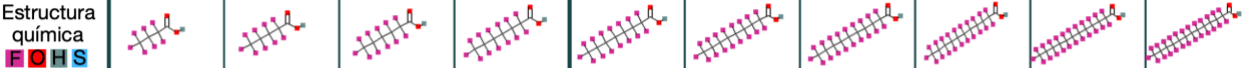
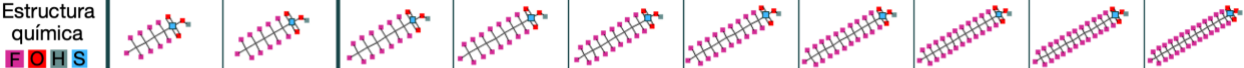


Figura 1. Arbre genealògic de la família de PFAS. Adaptat de [1], [2].

El grup dels àcids perfluoroalquílques, que inclou els àcids perfluorocarboxílics (PFCA) i els àcids perfluorosulfònics (PFSA) és actualment un dels més estudiats i regulats. En aquest grup podem diferenciar entre cadenes llargues i curtes (vegeu Taula 1), una característica que condiciona la seva persistència i el seu comportament en el medi i enfront dels tractaments d'eliminació.

Taula 1. Llista dels 20 PFAS (10 PFCA i 10 PFSA) regulats al RD 3/2023, estructura química i tipus de cadena.

	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTTrDA
Estructura química 										
# CAS	375-22-4	2706-90-3	307-24-4	375-85-9	335-67-1	375-95-1	335-76-2	2058-94-8	307-55-1	72629-94-8
Àtoms C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Àtoms C amb F	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cadena	PFCA cadena curta				PFCA cadena llarga					

	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFUnDS	PFDoDS	PFTTrDS
Estructura química 										
# CAS	375-73-5	2706-91-4	355-46-4	375-92-8	1763-23-1	68259-12-1	335-77-3	749786-16-1	79780-39-5	791563-89-8
Àtoms C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Àtoms C amb F	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cadena	PFSA cadena curta		PFSA cadena llarga							

Tot i que la normativa espanyola se centra en 20 PFCA i PFSA de cadenes curtes i llargues (vegeu Taula 1), existeixen molts altres PFAS que actualment no estan regulats però que són objecte d'atenció científica i ambiental [3]. D'entre aquests PFAS no regulats, cal destacar:

- PFAS de cadena ultracurta, normalment amb 2 o 3 carbonis, com l'àcid trifluoroacètic (TFA) i l'àcid perfluoropropanoic (PFPrA)
- Sulfonats fluorotelòmers (FTS), com el 6:2 FTS o el 8:2 FTS
- Alcohols fluorotelòmers (FTOH), com el 6:2 FTOH
- Àcids perfluoroalquil èter-carboxílics, com el GenX (HFPO-DA) i l'ADONA
- Àcids perfluoroalquil fosfònics (PFPA) i fosfínics (PFPIA)
- Acrilats i metacrilats polifluorats

Alguns d'aquests compostos s'han començat a utilitzar de manera més intensiva arran de les regulacions imposades sobre els PFAS de cadena llarga. Els FTS, el GenX o l'ADONA, per exemple, són sovint utilitzats com a alternatives al PFOA i el PFOS.

1.2 Propietats principals i aplicabilitat

La característica principal dels PFAS és l'enllaç carboni-fluor (C–F), un dels enllaços simples més forts de la química orgànica, que confereix a aquests compostos propietats úniques. Aquest enllaç és altament resistent a la degradació química, tèrmica i biològica, fent que els PFAS siguin extremadament persistents i s'acumulin en aigües, sòls i organismes vius durant períodes prolongats. Tant és així que els PFAS sovint s'anomenen substàncies eternes (*forever chemicals*). A més, l'enllaç C–F també contribueix a la seva naturalesa hidrofòbica i lipofòbica, és a dir, repel·leixen tant l'aigua com els olis.

Els PFAS són productes químics completament sintètics que s'han fabricat i utilitzat àmpliament des de la dècada de 1940. Fins avui s'han identificat milers de compostos

PFAS individuals, i es continuen desenvolupant i introduint nous PFAS en aplicacions comercials i industrials. Aquest nombre en augment de PFAS planteja reptes per al seguiment ambiental, l'avaluació de riscos i la regulació ja que les propietats, la persistència i la toxicitat de molts compostos nous encara no són prou conegudes [3].

Les seves propietats úniques repel·lents a l'aigua i als olis, l'estabilitat química i la resistència tèrmica han conduït a aplicacions àmplies tant en productes industrials com de consum. Entre els usos més comuns s'inclouen:

- recobriments antiadherents per a utensilis de cuina
- materials d'envasat d'aliments
- tèxtils resistents a taques i a l'aigua
- escumes antiincendis (AFFF)
- cosmètics
- pintures
- productes de neteja

Els PFAS poden ser alliberats al medi a través de múltiples vies (vegeu capítol 3). El grau de persistència i mobilitat dels PFAS en el medi varia en funció de l'estructura química de la molècula i la longitud de la cadena [3]. Concretament, els PFAS de cadena curta són més solubles i mòbils, la qual cosa fa que es puguin dispersar ràpidament en aigües superficials i subterrànies, mentre que els PFAS de cadena llarga són menys mòbils i tenen major tendència a adsorbir-se i acumular-se en sediments, partícules i sòls rics en matèria orgànica.

Amb el pas del temps, certes substàncies polifluorades de cadena llarga poden degradar-se en àcids perfluorats més petits, que també són, però, altament persistents. La combinació d'un ús generalitzat, la diversitat de fonts d'emissió, la gran mobilitat i l'elevada estabilitat química explica l'omnipresència dels PFAS al medi, amb deteccions reportades fins i tot en les zones més remotes del planeta.

1.3 Risc d'exposició a PFAS i toxicitat

Les principals vies d'exposició humana als PFAS són les següents:

- **Ingesta d'aliments:** és una de les vies principals d'exposició per a la població general. Els PFAS s'acumulen i es biomagnifiquen al llarg de la cadena tròfica; per tant, aliments com el peix i el marisc, la carn, els lactis, els ous o els cultius procedents de zones amb sòls, aigües o pinsos contaminats poden contribuir de manera significativa a l'exposició. També cal considerar la possible transferència d'aquests compostos des de determinats materials en contacte amb aliments o utensilis de cuina antiadherents, tot i que aquesta contribució sol ser menor.
- **Ingesta d'aigua de consum:** la seva contribució a l'exposició total és molt variable [4], [5], però pot representar una fracció important en zones amb aigües superficials o subterrànies contaminades.
- **Inhalació d'aire interior i pols:** és generalment una via secundària per a la població general, però pot ser rellevant en entorns tancats amb presència elevada

de productes tractats amb PFAS, com ara moquetes, tapisseries, tèxtils impermeabilitzats, determinats materials de construcció o altres productes de consum. Els PFAS també poden estar presents a la pols domèstica, que pot ser inhalada o ingerida accidentalment.

- **Contacte dèrmic:** es considera una via d'exposició minoritària per a la població general, ja que l'absorció cutània dels PFAS és limitada. Tot i això, pot contribuir a l'exposició en casos d'ús freqüent de productes que en continguin, com ara alguns cosmètics, productes de cura personal, productes de neteja o tèxtils tècnics.

L'exposició prolongada a determinats PFAS s'ha associat amb diversos efectes adversos per a la salut humana [6], [7]. Cal tenir en compte, però, que els PFAS constitueixen una família molt àmplia de compostos i que els efectes sobre la salut poden variar segons el compost concret, la magnitud i la durada de l'exposició, la via d'entrada i les característiques individuals de la població exposada. Per tant, no tots els PFAS presenten el mateix perfil toxicològic ni es poden associar amb tots els efectes descrits.

Entre els efectes més documentats, especialment per als PFAS més estudiats com el PFOA, el PFOS, el PFNA i el PFHxS, destaquen les alteracions hepàtiques i del metabolisme lipídic, en particular l'augment del colesterol sèric, així com possibles efectes sobre el sistema endocrí, inclosa la funció tiroïdal. També s'han observat associacions amb efectes reproductius i del desenvolupament, com una reducció del pes en néixer, alteracions en la fertilitat o altres resultats adversos durant l'embaràs i la descendència. Així mateix, l'exposició a alguns PFAS s'ha relacionat amb una menor resposta immunitària a les vacunes i amb una possible major susceptibilitat a infeccions. Pel que fa al càncer, l'Agència Internacional de Recerca sobre el Càncer, de l'Organització Mundial de la Salut, ha classificat el PFOA com a carcinogen per als humans (grup 1), i el PFOS com a possiblement carcinogen per als humans (grup 2B) [8]. Per a altres PFAS, l'evidència disponible és més limitada o encara es troba en avaluació.

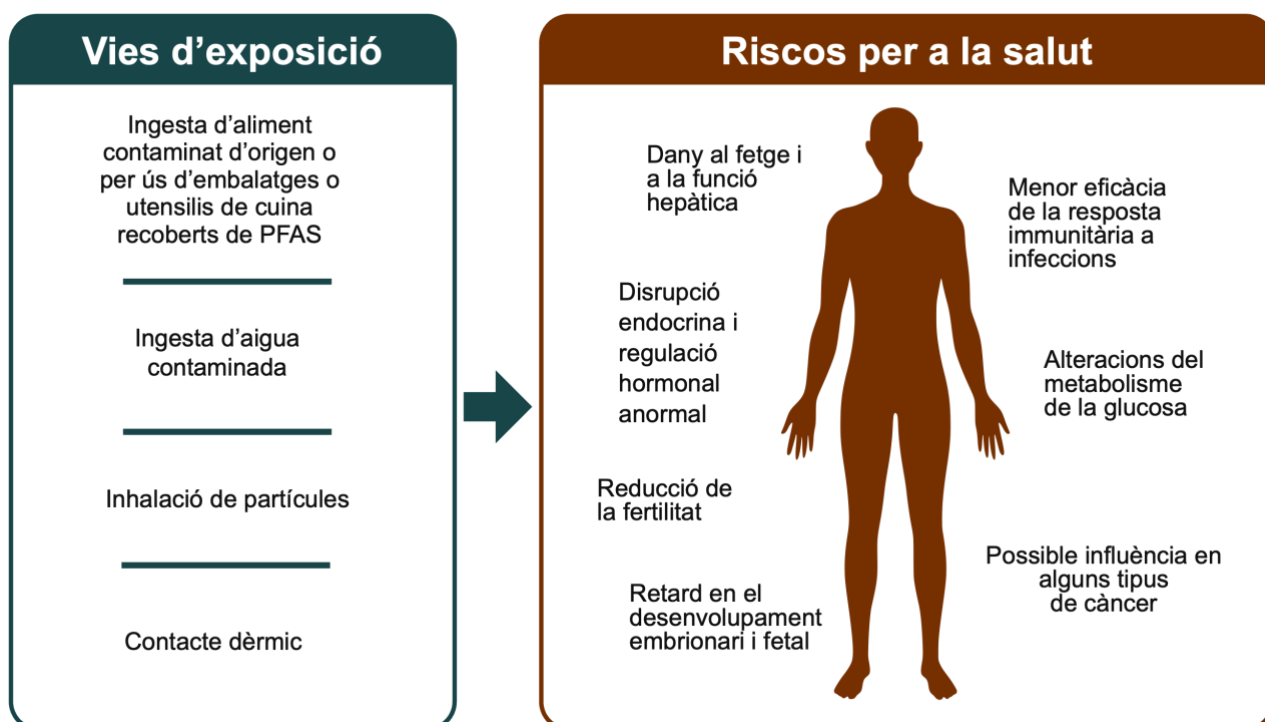


Figura 2. Principals vies d'exposició i riscos per a la salut reportats. Adaptat de [6].

2. Normativa actual i tendències

2.1 Marc regulador

L'evidència científica sobre els efectes perjudicials dels PFAS en els ecosistemes i en la salut humana ha anat creixent els darrers anys. Aquesta situació ha impulsat el desenvolupament de normatives que regulen les fonts de PFAS i protegeixen el medi ambient i els consumidors:

- **Normatives de protecció del consum:** l'objectiu és protegir la salut del consumidor.

L'aigua destinada a consum humà està regulada per la **Directiva (UE) 2020/2184**, transposada a Espanya mitjançant el **Reial decret 3/2023**. Aquesta norma estableix un líndar o valor paramètric de 0,1 µg/L per a la Suma de PFAS.

En matèria de seguretat alimentària, el **Reglament (UE) 2022/2388** fixa continguts màxims de certs PFAS en diversos aliments d'origen animal (ous, peix, marisc, carn, i òrgans). Si aquests límits són superats, els aliments no poden comercialitzar-se ni entrar al mercat de la UE.

- **Normatives de protecció del medi i gestió dels recursos hídrics:** l'objectiu és fer un seguiment de la qualitat ambiental i evitar la dispersió de la contaminació.

La Directiva 2000/60/CE, coneguda com a **Directiva Marc de l'Aigua (DMA)**, estableix el marc general per garantir la salut ecològica i química dels ecosistemes aquàtics. Aquesta directiva es coordina amb la **Directiva 2013/39/UE**, que defineix les Normes de Qualitat Ambiental (NQA) per a substàncies prioritàries en aigües superficials i biota, amb la **Directiva 2006/118/CE**, enfocada a la protecció de les aigües subterrànies, i amb la recent **Directiva (UE) 2026/805**, que revisa les normes de qualitat ambiental per ambdues classes de masses d'aigua.

Altres normatives que poden incidir en la gestió dels PFAS i el seu cicle integral són: la directiva sobre el tractament d'aigües residuals urbanes, el reglament sobre reutilització d'aigua i la directiva sobre fangs de depuradora.

- **Normatives de control de la font de contaminació:** l'objectiu és regular la producció i comercialització de compostos contaminants.

El **Conveni d'Estocolm** és un tractat internacional que identifica els contaminants orgànics persistents (en anglès, "POPs"), els classifica segons el grau de perillositat i utilitat, i requereix que els estats adoptin mesures per a la seva restricció parcial o total. A la Unió Europea, el Conveni s'aplica mitjançant el Reglament (UE) 2019/1021 ("**Reglament POP**"), d'aplicació directa i obligatòria als estats membres.

El Reglament (CE) 1907/2006 ("**Reglament REACH**") és la norma principal de la UE per al control de substàncies químiques i es basa en quatre pilars: registre, avaluació, autorització i restricció. L'**Annex XVII de REACH** recull les restriccions a la fabricació, comercialització o ús de determinades substàncies perilloses. En general, el Reglament REACH té un abast més ampli i preventiu, mentre que el Reglament POP s'aplica a substàncies que compleixen criteris més específics i és més restrictiu.

El marc normatiu sobre els PFAS està evolucionant, amb una clara tendència cap a l'enduriment de les restriccions i cap a una regulació que inclogui més compostos, o fins i tot el conjunt de la família química (vegeu secció 2.4). Per tant, és necessari mantenir-se atent a les actualitzacions legislatives.

2.2 Normatives sobre l'aigua de consum humà

2.2.1 Normativa europea

Actualment, la norma que regula la qualitat de l'aigua destinada al consum a escala europea és la **Directiva (UE) 2020/2184** [9], que va entrar en vigor el 12 de gener de 2021, i estableix l'obligació de la Comissió Europea de revisar els seus annexos almenys cada cinc anys. La directiva preveu dues modalitats per regular els PFAS en l'aigua de consum: el "**PFAS total**", que inclou la totalitat d'aquests compostos i un valor paramètric de 0,5 µg/L, i la "**Suma de PFAS**" (**Σ20PFAS**), que inclou 20 PFAS específics i un valor paramètric de 0,10 µg/L. Els estats membres podien escollir la modalitat de regulació i havien d'implementar programes de monitoratge per assegurar-ne el compliment abans del 2026.

2.2.2 Normativa espanyola aplicable a Catalunya

A Espanya, la directiva europea d'aigua de consum va ser transposada mitjançant el **Reial decret 3/2023**, de 10 de gener [10], el qual defineix els criteris tècnics i sanitaris per al control i el subministrament de l'aigua. El RD 3/2023 regula el paràmetre "Suma de PFAS", fixant el límit de **0,10 µg/L per a la suma dels 20 PFAS** detallats a la Taula 1 i al Glossari de compostos d'aquesta guia. A més, la normativa va incloure una disposició temporal d'adaptació al nou marc normatiu, establint un valor paramètric transitori de 0,07 µg/L per a quatre compostos individuals (PFOA, PFOS, PFNA i PFHxS), aplicable fins al 2 de gener de 2026.

El Reial decret 3/2023 també estableix, en els articles 43 i 44, que les substàncies químiques, els medis filtrants i els materials en contacte amb l'aigua no poden posar en perill la salut humana, ni afavorir la proliferació microbiana, ni alterar les característiques organolèptiques de l'aigua, ni empitjorar-ne la qualitat. Els reactius químics i els medis filtrants utilitzats en la potabilització (com ara el carbó actiu o les resines d'intercanvi iònic) han de complir les normes UNE-EN corresponents o estàndards equivalents. En aquest sentit, els fabricants d'aquests productes han de lliurar a l'operador una declaració responsable que n'acrediti el compliment normatiu. Finalment, d'acord amb l'article 36, qualsevol nova instal·lació o modificació substancial dels processos de tractament requerirà l'informe favorable de l'autoritat sanitària competent.

2.2.3 Normativa en altres estats membres de la UE

Diversos estats membres han adoptat regulacions nacionals sobre PFAS en aigua de consum que són més ambicioses que els requeriments mínims de la Directiva (UE) 2020/2184, tal com es mostra a la Taula 2. En molts casos, aquestes regulacions es basen en el sumatori de PFOS, PFOA, PFHxS i PFNA (**Σ4PFAS**). Per a aquest grup de compostos, l'Autoritat Europea de Seguretat Alimentària (EFSA) ha establert una ingesta setmanal tolerable (TWI, de l'anglès *Tolerable Weekly Intake*) de 4,4 ng per kg de pes

corporal i setmana (0,0044 µg/kg pes corporal/setmana). Aquest valor fa referència a l'exposició procedent de totes les fonts (principalment aliments, però també aigua de consum i altres vies d'exposició). A partir del TWI es pot estimar un valor toxicològic orientatiu de 4,4 ng per litre d'aigua per persona, assumint un pes de 70 kg per individu, una ingesta diària de 2 litres i un factor de repartiment del 20 % (percentatge que representa l'aigua ingerida respecte del conjunt de fonts d'exposició). Alguns països han establert valors guia propers a aquests 4,4 ng/L, mentre que d'altres, com França o Alemanya, han adoptat valors més elevats (vegeu Taula 2). Més enllà del paràmetre Σ4PFAS, es troba també el cas de la normativa italiana, que fixa un límit específic de 10 µg/L per al compost de cadena ultracurta TFA, aplicable a partir de 2027.

Taula 2. Regulació en aigua de consum basada en el Σ4PFAS en diversos estats membres de la UE.

	Valor guia Σ4PFAS (ng/L)
EFSA	4,4
Dinamarca	2
Bèlgica	4
Suècia	4
Països Baixos	4,4
República Txeca	10
Alemanya	20
França	20

2.3 Altres normatives rellevants

2.3.1 Directiva Marc de l'Aigua i Normes de Qualitat Ambiental

La **Directiva 2000/60/CE**, coneguda com a Directiva Marc de l'Aigua (DMA) [11], constitueix el marc regulador general de la UE en matèria de protecció de les masses d'aigua. La directiva va ser posteriorment modificada, entre d'altres, per la **Directiva 2013/39/UE** [12], la qual va actualitzar la llista de substàncies prioritàries i va fixar-ne els llindars mitjançant les Normes de Qualitat Ambiental (NQA; en anglès, *Environmental Quality Standards*, EQS). A l'Estat espanyol, aquests llindars de qualitat química es van recollir en el **Reial decret 817/2015**, que estableix els criteris de seguiment i avaluació de l'estat de les aigües superficials, així com les NQA per a les substàncies prioritàries.

Pel que fa als PFAS, històricament el PFOS ha estat l'únic compost d'aquesta família inclòs com a substància prioritària en aigües superficials, ateses les seves propietats de persistència, bioacumulació i toxicitat (substància PBT). Per al PFOS, la Directiva 2013/39/UE estableix un llindar de 0,65 ng/L de NQA-MA (mitjana anual) i de 36 µg/L de concentració màxima (NQA-CMA).

No obstant això, el panorama normatiu ha canviat recentment amb l'adopció de la **Directiva (UE) 2026/805** del Parlament Europeu i del Consell, de 30 de març de 2026, que modifica la DMA i les directives de protecció d'aigües subterrànies i de normes de qualitat ambiental [13]. La nova directiva reconeix que, a més del PFOS, altres substàncies de la família dels PFAS també representen un risc significatiu per al medi aquàtic, i estableix la incorporació d'un subgrup de PFAS a la llista de substàncies prioritàries. A més, s'introdueix una NQA basada en la **suma de 25 PFAS** en aigües

superficials amb l'objectiu de captar els efectes combinats d'aquestes substàncies. Entre els compostos inclosos en aquesta nova llista de 25 (vegeu Taula 3), n'hi ha 9 que no es contemplaven en el sumatori de 20 PFAS de la normativa d'aigües de consum, destacant especialment el PFAS de cadena ultracurta TFA (àcid trifluoroacètic) per la seva elevada persistència.

El càlcul del risc agregat de PFAS es basa en **factors de potència relativa** (RPF, de l'anglès *Relative Potency Factor*), que permeten expressar la toxicitat de diferents compostos en relació amb una substància de referència. En el nou marc, el paràmetre regulat consisteix en un sumatori de 25 PFAS expressat en equivalents de PFOA, que es compara amb un llindar de 4,4 ng/L de mitjana anual (NQA-MA) per a aigües continentals. Els compostos amb valors de RPF més elevats corresponen principalment als àcids perfluorocarboxílics de cadena llarga (vegeu Taula 3). El PFNA, per exemple, presenta un RPF de 10, fet que implica que es considera deu vegades més potent toxicològicament que el PFOA.

Taula 3. Llista de compostos a incloure en el càlcul de la suma de 25 PFAS que estableix la Directiva (UE) 2026/805. Els compostos es mostren ordenats segons el corresponent factor de potència relativa (RPF), expressat en equivalents de PFOA. En gris es destaquen els compostos no contemplats en la "Suma de PFAS" de la normativa d'aigües de consum.

Compost	#CAS	RPF	Compost	#CAS	RPF
PFOA	335-67-1	1	HFPO-DA (GenX)	13252-13-6	0,06
PFNA	375-95-1	10	C6O4	1190931-41-9	0,06
PFDA	335-76-2	7	PFBA	375-22-4	0,05
PFUnDA	2058-94-8	4	8:2 FTOH	678-39-7	0,04
PFDODA	307-55-1	3	PFPeA	2706-90-3	0,03
PFOS	1763-23-1	2	ADONA	919005-14-4	0,03
PFDS	335-77-3	2	PFHxDA	67905-19-5	0,02
PFTTrDA	72629-94-8	1,65	PFODA	16517-11-6	0,02
PFHpS	375-92-8	1,3	6:2 FTOH	647-42-7	0,02
PFHxS	355-46-4	0,6	PFHxA	307-24-4	0,01
PFHpA	375-85-9	0,505	TFA	76-05-1	0,002
PFPeS	2706-91-4	0,3005	PFBS	375-73-5	0,001
PFTeDA	376-06-7	0,3			

2.3.2 Normativa sobre aigües subterrànies

La **Directiva 2006/118/CE** constitueix el marc normatiu europeu per a la protecció de les aigües subterrànies contra la contaminació i el deteriorament. A l'Estat espanyol, aquesta directiva es va transposar mitjançant el **Reial decret 1514/2009**. En la seva versió original, la directiva no establí límits específics per als PFAS, tot i que obligava els estats membres a prevenir o limitar l'entrada de contaminants a les masses d'aigua subterrània i a fixar valors llindar per a les substàncies rellevants.

Aquest marc s'ha actualitzat amb la **Directiva (UE) 2026/805** del Parlament Europeu i del Consell, de 30 de març de 2026 [13], que modifica la Directiva 2006/118/CE per incloure els PFAS dins el sistema harmonitzat de control a tota la Unió Europea. La nova normativa estableix dos estàndards de qualitat clau per a les aigües subterrànies:

- **Suma de 4 PFAS (Σ4PFAS):** inclou el PFOA, PFOS, PFNA i PFHxS, amb un valor límit de 4,4 ng/L, en coherència amb el criteri toxicològic derivat de l'Autoritat Europea de Seguretat Alimentària (EFSA) sobre la ingesta setmanal tolerable.
- **Suma de 20 PFAS (Σ20PFAS):** amb un valor de 100 ng/L, corresponent a la llista de substàncies definides en la normativa d'aigua destinada al consum humà.

Aquest doble enfocament assegura que la protecció de les masses d'aigua subterrània estigui totalment alineada amb els criteris de salut pública més recents.

En l'àmbit català, el Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2022-2027 (PGDCFC) ja incorporava els PFAS dins els programes de seguiment de les aigües subterrànies. En particular, l'Annex X [14], dedicat a la derivació de nivells de referència i valors llindar per a la valoració qualitativa de les masses d'aigua subterrànies, inclou aquests compostos entre els contaminants emergents susceptibles de generar episodis de contaminació. En concret, el pla de gestió estableix el paràmetre "PFAS total" amb un valor llindar de 0,5 µg/L en algunes masses d'aigua, en consonància amb el valor paramètric de la Directiva (UE) 2020/2184 relativa a l'aigua de consum humà. Aquest criteri s'utilitza com a referència per al seguiment de les masses d'aigua subterrànies, especialment en aquelles on es detecten pressions potencials de contaminació, amb l'objectiu d'identificar possibles episodis i orientar les mesures de gestió i protecció del recurs. Amb l'entrada en vigor de la nova Directiva (UE) 2026/805, els futurs cicles de planificació hauran d'ajustar els valors llindar per integrar les noves exigències de la Σ4PFAS (4,4 ng/L), que representen un increment substancial en el nivell de protecció exigida per a les masses d'aigua subterrànies de Catalunya.

2.3.3 Normativa sobre reutilització de l'aigua

El **Reial decret 1085/2024** estableix el règim jurídic de la reutilització de l'aigua a l'Estat espanyol i desenvolupa l'aplicació del **Reglament 2020/741/UE**, que fixa requisits mínims harmonitzats per a la reutilització segura d'aigües residuals urbanes tractades destinades principalment al reg agrícola.

Tot i que ni el reglament europeu ni el Reial decret estableixen límits específics per als PFAS, sí que requereixen l'elaboració d'un pla de gestió del risc per a cada projecte de reutilització. Aquest pla ha d'incloure una avaluació cas per cas dels possibles perills químics, microbiològics i dels altres contaminants presents en l'aigua regenerada o en el sistema de reutilització. En aquest context, es poden identificar microcontaminants emergents, entre ells els PFAS, i establir mesures addicionals de control o requisits de qualitat complementaris quan es consideri necessari per garantir la seguretat sanitària i ambiental de l'ús de l'aigua regenerada.

2.3.4 Normativa sobre el tractament d'aigües residuals urbanes

La **Directiva (UE) 2024/3019** sobre el tractament d'aigües residuals urbanes (DARU), revisada i vigent des de gener de 2025, encara no havia estat transposada a l'ordenament jurídic espanyol en el moment de l'elaboració d'aquesta guia (els estats membres disposen de termini fins al 2027 per fer-ho). Aquesta directiva reforça el control dels microcontaminants en els efluents de les estacions depuradores d'aigües residuals urbanes i introdueix requisits de monitoratge de determinats compostos, entre els quals els PFAS, especialment en les aglomeracions de més de 10.000 habitants equivalents que aboquen en zones de captació d'aigua.

La normativa estableix que la Comissió Europea ha d'adoptar, abans del 2 de gener de 2027, actes d'execució que defineixin les metodologies oficials per mesurar els paràmetres "PFAS total" i "Suma de PFAS" en les aigües residuals urbanes. Tot i que en aquesta fase inicial la Directiva no fixa límits d'abocament numèrics específics per als PFAS, sí que introdueix obligacions de monitoratge de microcontaminants i estableix la implantació progressiva d'un tractament quaternari en les depuradores de major mida, amb l'objectiu de reduir la presència de microcontaminants persistents, entre els quals es troben els PFAS. Finalment, la directiva introdueix el principi de Responsabilitat Ampliada del Productor, mitjançant el qual els fabricants de determinats productes que generen microcontaminants (principalment productes farmacèutics i cosmètics) hauran de contribuir al finançament del tractament quaternari necessari per eliminar aquestes substàncies en les plantes de tractament d'aigües residuals.

2.3.5 Normativa sobre fangs d'estació depuradora

La **Directiva 86/278/CEE** regula la protecció del medi ambient i de la salut humana en relació amb l'ús agrícola dels llots o fangs procedents d'estacions depuradores d'aigües residuals. Aquesta normativa estableix requisits per a la seva aplicació al sòl i fixa llindars per a determinats metalls pesants amb l'objectiu d'evitar l'acumulació de contaminants en els sòls agrícoles.

A l'Estat espanyol, aquesta directiva s'ha transposat principalment mitjançant el **Reial decret 1310/1990**, mentre que altres disposicions, com l'**Ordre AAA/1072/2013** i el **Reial decret 1051/2022**, estableixen requisits addicionals sobre la gestió, el registre i la comercialització de materials fertilitzants derivats de llots.

Actualment, la normativa europea sobre fangs de depuradora no inclou els PFAS entre els contaminants regulats, i els límits establerts se centren principalment en metalls pesants. Tanmateix, la possible presència de PFAS en els llots està generant un interès creixent en l'àmbit científic i regulador.

2.3.6 El reglament REACH

El **Reglament (CE) núm. 1907/2006**, conegut com a "Reglament REACH", constitueix el pilar fonamental de la seguretat química a la UE. Estableix que els fabricants i importadors han de demostrar que les substàncies químiques es fabriquen, comercialitzen i utilitzen de manera segura al llarg de tot el seu cicle de vida. L'Annex XVII de REACH inclou diverses restriccions específiques a la fabricació i ús de substàncies que presenten un risc inacceptable, com és el cas de diversos grups de la família de PFAS:

- Els **àcids perfluorocarboxílics (PFCA) de cadena llarga (C9–C14)**, el **TDFA** i les substàncies relacionades: restringits a causa de la seva persistència i potencial de bioacumulació.
- El **PFHxA**, les seves sals i substàncies relacionades: aquesta restricció estableix llindars de concentració de 25 ppb per al PFHxA i les seves sals, i de 1.000 ppb per a substàncies relacionades en materials homogenis. La seva aplicació és progressiva en diversos productes de consum, com tèxtils, cuir, materials en contacte amb aliments i cosmètics, amb terminis de compliment compresos entre octubre de 2026 i octubre de 2029, segons la categoria de producte.

- **PFAS en escumes d'extinció d'incendis:** identificades com una de les principals fonts d'emissió ambiental d'aquestes substàncies. La restricció corresponent va ser adoptada pel **Reglament (UE) 2025/1988**, que modifica l'Annex XVII de REACH i estableix limitacions progressives a l'ús d'aquestes escumes en diferents aplicacions.

2.3.7 El reglament POP

El **Reglament (UE) 2019/1021**, relatiu als contaminants orgànics persistents (conegut com a “Reglament POP”), aplica dins la UE les disposicions del **Conveni d’Estocolm**. Aquesta normativa regula la producció, l’ús i l’eliminació de substàncies persistents, bioacumulatives i tòxiques. A diferència del Reglament REACH, basat en la gestió del risc, el Reglament POP adopta un enfocament d’eliminació del perill. Això implica que, un cop una substància es classifica com a POP, la seva producció, ús i comercialització queden prohibits gairebé totalment, amb excepcions molt limitades i temporals només per a usos essencials. Diversos PFAS ja estan inclosos en aquest reglament:

- PFOS i derivats: des del 2009.
- PFOA, les seves sals i substàncies afins: des del 2020.
- PFHxS, les seves sals i substàncies afins: des del 2023.

Aquesta normativa és especialment rellevant per a la gestió de residus. El Reglament POP estableix llindars estrictes (valors de concentració límit de POP) que determinen si un residu ha de ser destruït o pot ser gestionat mitjançant operacions de recuperació. Qualsevol material que superi aquests llindars de PFAS no es pot reciclar i ha de ser sotmès a processos d'eliminació irreversibles.

Taula 4. Principals normatives sobre els PFAS en l'àmbit de l'aigua.

Normativa	Tipus regulació	PFAS inclosos	Llindar	Observacions
Aigua de consum (Dir. (UE) 2020/2184) RD 3/2023	Valors paramètrics obligatoris	a) Σ20PFAS (vegeu Taula 1) b) PFAS total (no inclòs al RD 3/2023)	a) 100 ng/L b) 500 ng/L (no inclòs al RD 3/2023)	Obligatori per als estats membres a partir de gener de 2026. No utilitza RPF.
Aigües superficials (Dir. (UE) 2026/805 que modifica DMA i NQA) RD 817/2015	Substàncies prioritàries	Suma de 25 PFAS (vegeu Taula 3)	NQA-MA: 4,4 ng/L (equivalents PFOA)	Substitueix l'antic límit individual del PFOS (0,65 ng/L). Aplica RPF segons la toxicitat.
Aigües subterrànies (Dir. (UE) 2026/805 que modifica 2006/118/CE) RD 1514/2009	Estàndards de qualitat harmonitzats	a) Σ4PFAS b) Σ20PFAS	a) 4,4 ng/L b) 100 ng/L	Alineat amb els criteris de salut de l'EFSA per a la Σ4PFAS.
Reutilització d'aigua (Reg. 2020/741/UE) RD 1085/2024	Gestió del risc en la reutilització	Microcontaminants	Sense límits específics	Els PFAS s'han de considerar en els plans de seguretat de l'aigua regenerada (principalment reg agrícola).
Aigües residuals urbanes (Dir. (UE) 2024/3019)	Monitoratge	PFAS generals / microcontaminants	Sense límits específics	Introdueix la responsabilitat ampliada del productor per finançar el tractament de microcontaminants.
Fangs d'EDAR (Dir. 86/278/CEE) RD 1051/2022	Control de sòls i fertilització	No esmentats explicitament	Sense límits específics	Actualment regula metalls, però la revisió de la Directiva preveu incloure el control de PFAS en fangs.

2.4 Desenvolupaments reguladors recents i perspectives

2.4.1 Pla d'Acció Contaminació Zero

L'estratègia a mitjà termini de la UE s'alinea amb el Pla d'Acció Contaminació Zero, amb l'objectiu de garantir, abans del 2050, un entorn amb nivells de contaminació que no siguin nocius per a la salut humana ni per als ecosistemes. La reducció i eliminació progressiva dels usos no essencials de PFAS constitueix una línia d'actuació prioritària.

Aquest objectiu es reforça no només mitjançant restriccions legislatives sinó també via iniciatives de recerca, xarxes de monitoratge de contaminants (com la xarxa NORMAN) i programes de finançament com *Horizon Europe*, que donen suport a l'avanç en metodologies analítiques, avaluació de riscos i desenvolupament d'alternatives als PFAS. En paral·lel, organitzacions com l'OCDE proporcionen orientacions internacionals que la UE pot utilitzar per implementar el seu pla amb estàndards internacionals.

2.4.2 Revisió de la Directiva Marc de l'Aigua i directives relacionades

El març de 2026, el Parlament Europeu i el Consell van adoptar la Directiva (UE) 2026/805, que modifica la Directiva Marc de l'Aigua (2000/60/CE), la Directiva d'aigües subterrànies (2006/118/CE) i la Directiva de normes de qualitat ambiental (2008/105/CE). La reforma actualitza la regulació dels contaminants químics a les masses d'aigua de la UE per adaptar-la a l'evidència científica més recent i als objectius del Pla d'Acció Contaminació Zero.

Entre les principals novetats destaca l'actualització de la llista de substàncies prioritàries, on s'incorporen oficialment diversos compostos de la família PFAS i el seu producte de degradació TFA, així com el bisfenol A, determinats plaguicides i productes farmacèutics. La revisió introdueix normes de qualitat ambiental (NQA) basades en mètodes d'agregació de toxicitat (com els equivalents de PFOA per als PFAS) i reforça significativament els requisits de monitoratge, notificació i transparència per part dels estats membres.

Pel que fa al calendari d'aplicació, la normativa estableix el 2039 com a termini general per assolir el bon estat químic de les masses d'aigua respecte a aquestes noves substàncies, amb la possibilitat d'estendre el termini fins al 2045 en casos degudament justificats on les condicions naturals o tècniques no permetin una recuperació més ràpida. Aquest nou marc obliga els estats membres a integrar aquests estàndards en els seus plans de gestió de conca de forma immediata per garantir una protecció efectiva del medi aquàtic i la salut humana.

2.4.3 Llista d'observació de contaminants emergents

La Directiva (UE) 2020/2184 sobre la qualitat de l'aigua destinada a consum humà introdueix la llista d'observació (*Watch List*) com un instrument per al seguiment de contaminants emergents. Aquest mecanisme permet a les autoritats anticipar-se a possibles riscos per a la salut pública mitjançant el monitoratge preventiu de substàncies que encara no estan formalment regulades però que generen preocupació científica, com és el cas de determinats disruptors endocrins o nous grups de PFAS.

Quan una substància s'inclou en aquesta llista, els estats membres han de dur a terme campanyes de monitoratge coordinades per obtenir dades comparables sobre la seva presència a l'aigua potable. En l'àmbit de les Conques Internes de Catalunya, l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) ja ha incorporat aquest enfocament en el seu Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya. En particular, es preveu el seguiment d'aquests contaminants en masses d'aigua on s'ha identificat una pressió antròpica significativa o on s'han detectat episodis previs de contaminació.

2.4.4 Valors guia de l'OMS per a PFAS en aigua de consum

L'Organització Mundial de la Salut (OMS) ha iniciat un procés sistemàtic de recopilació i revisió de l'evidència científica sobre PFAS amb l'objectiu de donar suport a l'establiment de valors normatius internacionals per a l'any 2027 [15]. Aquest procés s'emmarca en les avaluacions del Comitè Mixt FAO/OMS d'Experts en Additius Alimentaris i del Grup d'Experts de l'OMS sobre les guies per a la qualitat de l'aigua de consum. La iniciativa respon a la necessitat de disposar de valors sanitaris harmonitzats per als principals PFAS ingerits, incloent-hi l'exposició a través de l'aigua de consum i dels aliments, així com l'avaluació de possibles efectes combinats en mescles.

La revisió prioritzada per l'OMS inclou 18 PFAS i 6 categories d'efectes sobre la salut: cardiometabòlics, hepàtics, immunològics, del desenvolupament, reproductius i càncer. Els 18 compostos prioritzats són: PFOS, PFUnDA, PFHpA, PFOA, PFHpS, PFBA, PFTrDA, PFHxA, PFTeDA, PFBS, PFHxS, PFPeA, PFDoDA, PFNA, PFDA, PFDS, HFPO-DA (GenX) i TFA. En comparació amb la llista de 20 PFAS regulats al RD 3/2023 per al paràmetre "Suma de PFAS", la llista prioritzada per l'OMS coincideix amb 15 compostos: PFBA, PFBS, PFPeA, PFHxA, PFHxS, PFHpA, PFHpS, PFOA, PFOS, PFNA, PFDA, PFDS, PFUnDA, PFDoDA i PFTrDA. En canvi, cinc compostos inclosos al RD 3/2023 no formen part de la llista prioritzada per l'OMS: PFPeS, PFNS, PFUnDS, PFDoDS i PFTrDS.

La principal novetat respecte del RD 3/2023 és que l'OMS incorpora tres substàncies que no formen part de la "Suma de PFAS" regulada en aigua de consum a Espanya: PFTeDA, HFPO-DA (GenX) i TFA. Aquest fet és especialment rellevant perquè aquests tres compostos també s'han incorporat formalment al conjunt de 25 PFAS de la Directiva (UE) 2026/805.

La convergència entre l'OMS i la nova regulació ambiental europea indica una clara tendència cap a l'ampliació del focus regulador més enllà dels 20 PFAS del RD 3/2023, especialment per incloure compostos de cadena ultracurta, com el TFA, i PFAS de substitució, com HFPO-DA. Per tant, encara que aquests tres compostos no estiguin inclosos actualment en el paràmetre "Suma de PFAS" aplicable a l'aigua de consum a Espanya, és recomanable considerar-los en estratègies de vigilància prospectiva i control de conca. Aquesta recomanació és coherent amb l'enfocament preventiu de la guia i amb la necessitat d'adaptar progressivament el seguiment analític a l'evolució del coneixement científic i normatiu.

2.4.5 Proposta i revisió de restricció global de PFAS en el Reglament REACH

El 2023, cinc països europeus —Alemanya, Països Baixos, Dinamarca, Suècia i Noruega— van presentar una proposta conjunta de “restricció global” de PFAS a l'Agència Europea de Substàncies Químiques (ECHA). L'objectiu era restringir, mitjançant la modificació de l'Annex XVII del Reglament REACH, la fabricació, comercialització i ús de més de 10.000 compostos PFAS a l'Espai Econòmic Europeu. Aquesta proposta, actualment en procés de revisió, representa una de les regulacions químiques més ambiciosos de la història de la UE. Si s'adopta, prohibirà la majoria dels usos de PFAS, amb excepcions limitades i temporals per a aplicacions essencials com ara la medicina i els semiconductors.

A causa de l'enorme diversitat de compostos i aplicacions dels PFAS, la Comissió Europea està considerant ajustos tant en l'abast com en el calendari d'aplicació de la proposta de restricció global de PFAS, així com en les possibles excepcions temporals per a usos essencials sense alternatives tècniques o econòmiques viables. Aquestes excepcions afectarien sectors industrials específics, tecnologies mèdiques i sectors estratègics com els semiconductors o les energies renovables.

En perspectiva, és probable que l'evolució reguladora se centri cada vegada més a evitar l'entrada de PFAS al medi ambient, mitjançant restriccions en la producció, l'ús i les emissions industrials. Aquest enfocament preventiu es considera més eficaç que la gestió posterior de la contaminació, atesa la gran persistència i mobilitat ambiental d'aquestes substàncies.

3. Origen de la contaminació per PFAS: detecció i prevenció

3.1 Fonts d'aigua potable a Catalunya

La producció d'aigua a les estacions de tractament d'aigua potable (ETAP) de Catalunya s'estima que va ser, el 2020, d'uns 624 hm³ anuals per al conjunt del territori, que equival a uns 221 litres d'aigua potable per habitant i dia (IDESCAT [16]). L'aigua captada i potabilitzada per a cobrir aquesta demanda prové principalment de tres tipus de fonts: aigües superficials, aigües subterrànies i fonts no convencionals.

Les aigües superficials inclouen principalment rius i embassaments i, en alguns casos, captacions en canals i altres infraestructures. La capacitat total d'emmagatzematge dels embassaments de les conques internes de Catalunya és d'uns 700 hm³, principalment associada al sistema Ter-Llobregat [17]. En el cas dels embassaments de la conca de l'Ebre situats a Catalunya, aquesta capacitat és de 1.850 hm³, compartida amb altres comunitats autònomes. Actualment, l'aigua superficial és la principal font d'abastament a Catalunya, tot i que és un recurs condicionat per la variabilitat hidrològica (pluviometria, demanda, etc.). Aproximadament el 70 % de l'aigua destinada a usos domèstics prové de recursos superficials, mentre que el 30 % restant correspon a aigües subterrànies.

L'abastament a partir d'aigües subterrànies prové principalment de pous i mines. Tot i que el seu pes en el conjunt del sistema d'abastament de Catalunya és menor, tenen una importància clau en molts municipis de l'interior, que s'abasteixen gairebé de manera exclusiva d'aquest tipus de recursos. A més, constitueixen una reserva estratègica, ja que poden contribuir a reforçar els recursos superficials, especialment durant períodes de sequera.

Les fonts d'aigua no convencionals inclouen l'aigua dessalada, i, per a usos no potables, l'aigua regenerada, les aigües grises i les aigües pluvials. La dessalinització de l'aigua de mar, així com la reutilització indirecta d'aigua regenerada, constitueixen fonts de vital importància en períodes de sequera severa (per ex., període 2022-2025). Pel que fa a l'aprofitament d'aigües pluvials i grises, tot i que encara és minoritari, existeixen exemples de municipis que disposen d'ordenances d'estalvi d'aigua que regulen l'ús d'aigües pluvials i grises i promouen la seva captació i aprofitament.

3.2 Origen de la contaminació per PFAS i transport en el medi

Es poden distingir dos tipus principals de fonts de contaminació per PFAS: puntuals i difuses [2], [18]. La contaminació d'origen puntual fa referència a fonts identificables i localitzables, com ara un abocament concret, una fuga industrial o accidental, o un punt concret de descàrrega. En canvi, la contaminació difusa prové de fonts disperses, múltiples i no sempre fàcilment localitzables que, tot i tenir emissions individuals relativament baixes, contribueixen de manera significativa a la presència generalitzada d'aquests compostos al medi ambient.

La distinció entre fonts puntuals i difuses ajuda a definir les estratègies de gestió: mentre que en el cas d'una font puntual és possible intervenir mitjançant la localització i el tractament específic de la zona afectada, en el cas de la contaminació difusa cal adoptar mesures més globals, com ara la reducció d'usos, el control de fonts potencials i l'aplicació de polítiques de prevenció.

Entre les activitats susceptibles d'emetre o reemetre contaminació per PFAS de forma puntual destaquen:

- **Plantes que fabriquen o processen PFAS i fluoropolímers.** Inclouen indústries químiques que produeixen PFAS o els utilitzen com a agents de processament, per exemple en la fabricació de PTFE, FEP o PVDF, així com instal·lacions que elaboren o processen productes fluorats (recobriments, lubricants...).
- **Indústries metal·lúrgiques i de recobriment de metalls.** Històricament, els PFAS (especialment el PFOS) s'han utilitzat com a agents supressors de vapor en processos d'electrodeposició (crom, níquel i zinc).
- **Indústria de semiconductors i fabricació de xips.**
- **Indústries tèxtils, de cuir, paper i embalatge.** Aquestes indústries poden utilitzar PFAS per conferir als seus productes propietats repel·lents a l'aigua, l'oli o les taques.
- **Zones d'entrenament i instal·lacions amb ús d'escumes antiincendis (AFFF).** Aquestes escumes que contenen PFAS són utilitzades per a l'extinció d'incendis de combustibles líquids, especialment en aeroports, bases militars i indústries petroquímiques. Tot i que la utilització d'AFFF està fortament restringida, no està totalment prohibida i encara poden emprar-se en casos considerats essencials.
- **Plantes de tractament d'aigües residuals (EDAR).** Tant les EDAR que tracten aigües d'origen domèstic com les d'origen industrial reben PFAS provinents d'aquestes fonts. A causa de la baixa biodegradabilitat d'aquests compostos, l'aigua depurada i els fangs de depuradora poden contenir PFAS [19]. Tot i que les EDAR no en són la font primària, quan els efluent s'alliberen al medi poden esdevenir fonts puntuals de reemissió de PFAS (és a dir, fonts secundàries).
- **Abocadors i instal·lacions de gestió de residus sòlids.** Tant els abocadors municipals com els industrials reben productes que contenen PFAS, fet pel qual els lixiviats d'abocador poden presentar concentracions elevades d'aquests compostos. Com en el cas de les EDAR, s'haurien de considerar possibles fonts de reemissió de PFAS.
- **Instal·lacions específiques,** com ara rentadores industrials, tintoreries i estacions de servei, que utilitzen productes impermeabilitzants, ceres, desgreixants i detergents que poden contenir PFAS.

Entre les possibles fonts de contaminació difusa destaquen:

- **Deposició atmosfèrica** de PFAS volàtils o semivolàtils, com el TFA, els fluorotelòmers i algunes sulfonamides.
- **Emissió des de productes de consum d'àmbit domèstic** que contenen PFAS (utensilis de cuina antiadherents, ceres, cosmètics, tèxtils impermeables, envasos alimentaris) i que poden alliberar petites quantitats de PFAS de manera continuada en el temps.
- **Aplicació agrícola d'esmenes orgàniques** com ara biosòlids o fangs de depuradora, que poden contenir PFAS i alliberar-se en petites quantitats al sòl.

Els PFAS poden transportar-se a distàncies més o menys grans de la font en funció de les característiques del medi (aigua, aire, sòl, sediments o biota) i de les propietats fisicoquímiques de cada compost. La longitud de la cadena de carbonis és un dels factors més rellevants en la seva dispersió: els PFAS de cadena curta mostren una major mobilitat en l'aigua, mentre que els de cadena llarga tenen més afinitat per la matèria orgànica i tendeixen a adsorbir-se amb més facilitat en sòls i sediments.

Les principals **vies de transport** de PFAS en el medi (vegeu Figura 3) inclouen: l'escorrentia urbana i industrial, el transport d'aigua superficial a través de la xarxa fluvial i de canalitzacions, les descàrregues industrials i d'efluents d'EDAR, el transport atmosfèric, la precipitació i la deposició seca, i, finalment, la infiltració i lixiviació a través del sòl. Un cas especial és la infiltració i lixiviació en abocadors quan el sistema de segellat o recollida de lixiviats és defectuós, cosa que permet que aquests contaminants s'infiltrin.

Els PFAS presents en sòls i sediments es veuen afectats per dinàmiques d'adsorció-desorció i de sedimentació-resuspensió que condicionen el seu transport. El tipus de terreny, la geologia, el nivell freàtic o les condicions redox són factors que determinen la velocitat del transport dels PFAS a través de l'aqüífer [20], la qual cosa fa que el compartiment es comporti com a font, reservori o punt de transformació d'aquests compostos.

Després de dècades d'ús extensiu de PFAS, es considera que existeix un nivell ambiental de fons d'aquests compostos a gairebé tot arreu.

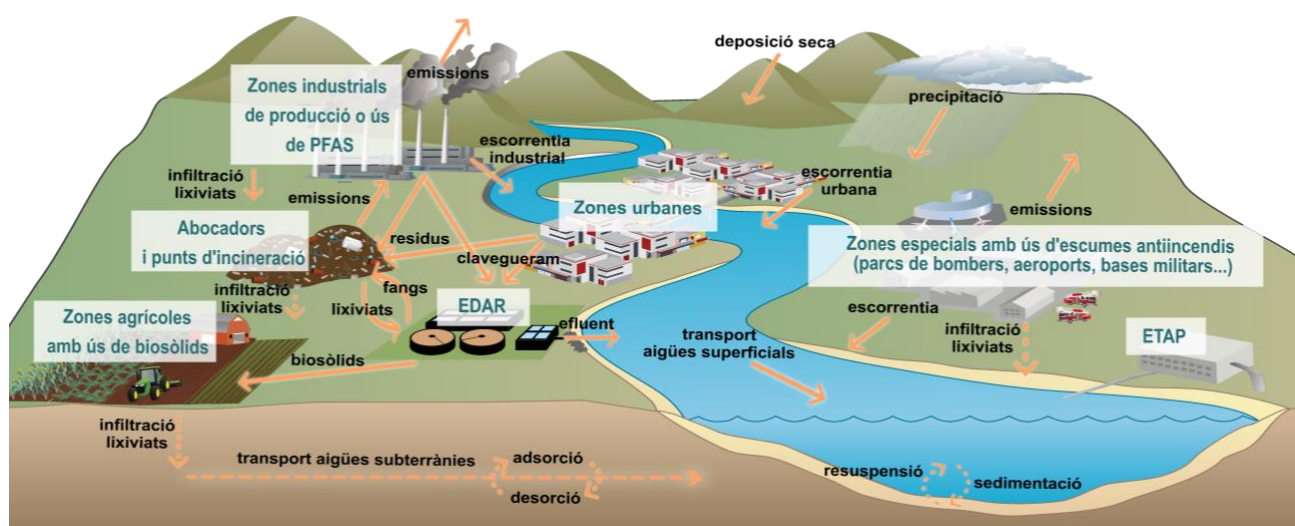


Figura 3. Principals vies d'emissió, reemissió i transport de PFAS en el medi.

3.3 Concentracions de PFAS en el medi hídic a Catalunya

Catalunya no és una de les regions europees més afectades per la contaminació per PFAS, que se sol concentrar en àrees amb una forta presència d'activitat productora i processadora d'aquests compostos, com ara Bèlgica, els Països Baixos, Alemanya, Dinamarca o el nord d'Itàlia [21]. Malgrat això, les concentracions de PFAS en el medi poden ser localment elevades per la proximitat a instal·lacions amb ús intensiu d'escumes antiincendis o en l'entorn de fàbriques que usen PFAS [22], [23]. A més, les zones urbanes més densament poblades tendeixen a presentar concentracions de PFAS a l'aigua superiors a les de zones menys poblades [24].

A Catalunya, els casos de contaminació greu per PFAS en aigües superficials són minoritaris. Per exemple, en una recopilació de dades recents de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) corresponents al període 2023–2025, en aigües superficials (majoritàriament rius, però també embassaments i estanys), només una de les 144 mostres analitzades presenta un valor del paràmetre Suma de PFAS superior al límit establert de 100 ng/L pel RD 3/2023 (vegeu Figura 4). A més, tres de cada quatre mostres presenten nivells per sota del límit de quantificació en tots els 20 compostos analitzats i, per tant, la corresponent Suma de PFAS és igual a zero.

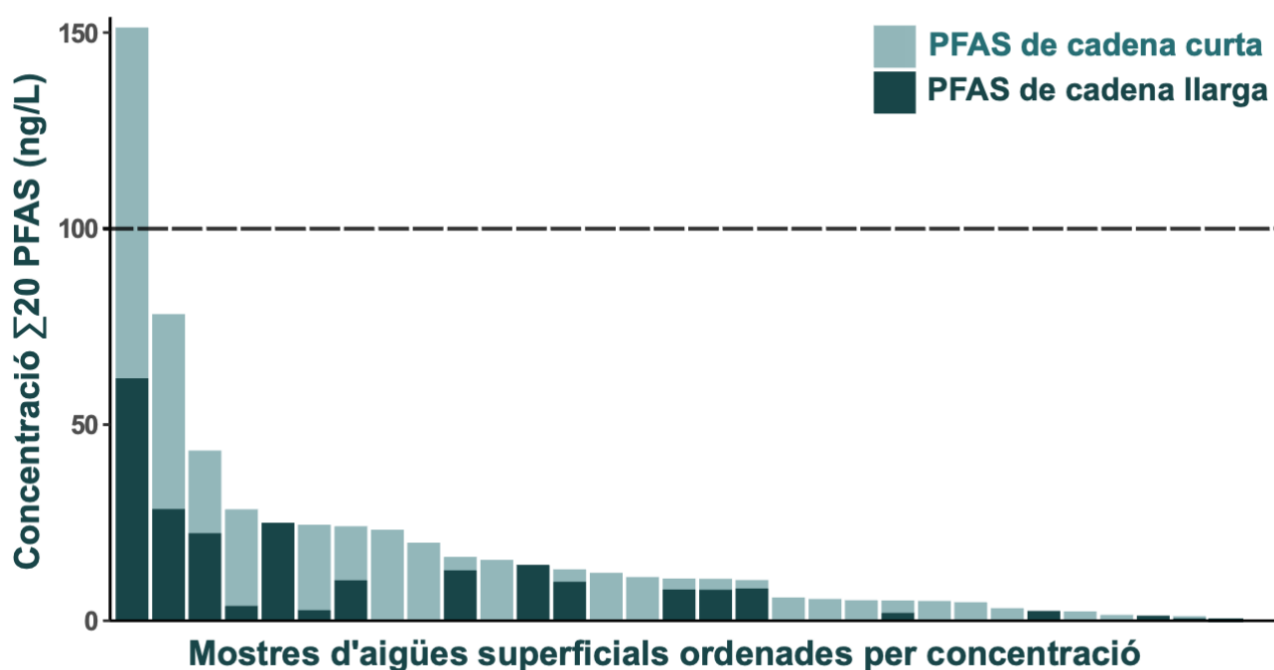


Figura 4. Paràmetre $\Sigma 20$ PFAS en mostres d'aigües superficials de Catalunya. De la base de dades completa amb 144 mostres, es mostren les 32 que presenten almenys un compost PFAS per sobre del límit de quantificació. Només una mostra de la base de dades presenta un valor del sumatori per sobre del llindar de 100 ng/L.

Altres estudis també reporten nivells baixos de PFAS en captacions d'aigua superficial a Catalunya, que donen lloc a concentracions igualment baixes a les estacions de tractament d'aigua potable i a la xarxa d'abastament [25], [26].

Els nivells de PFAS en aigües superficials poden presentar variacions estacionals, atribuïbles principalment a processos de concentració (habitualment a l'estiu) i de dilució (habitualment a l'hivern), més que no pas a canvis en les fonts d'emissió [24]. A escala temporal, s'espera que les proporcions dels diferents PFAS en les mostres d'aigua vagin canviant en el futur. Concretament, els compostos de cadena llarga que han estat prohibits i substituïts progressivament (per exemple, PFOA, PFNA o PFOS) tendeixen a disminuir, tot i que encara contribueixen de manera significativa a les concentracions totals de PFAS [26]. En canvi, els compostos de cadena més curta desenvolupats per la indústria com a substituïts (per exemple, PFHxA, PFPeA i PFBS) podrien esdevenir més predominants. De fet, aquests tres últims compostos, juntament amb el PFHpA i el PFOA, són els que es detecten amb més freqüència i a concentracions més elevades en les dades de l'ACA sobre aigües superficials (vegeu Figura 5).

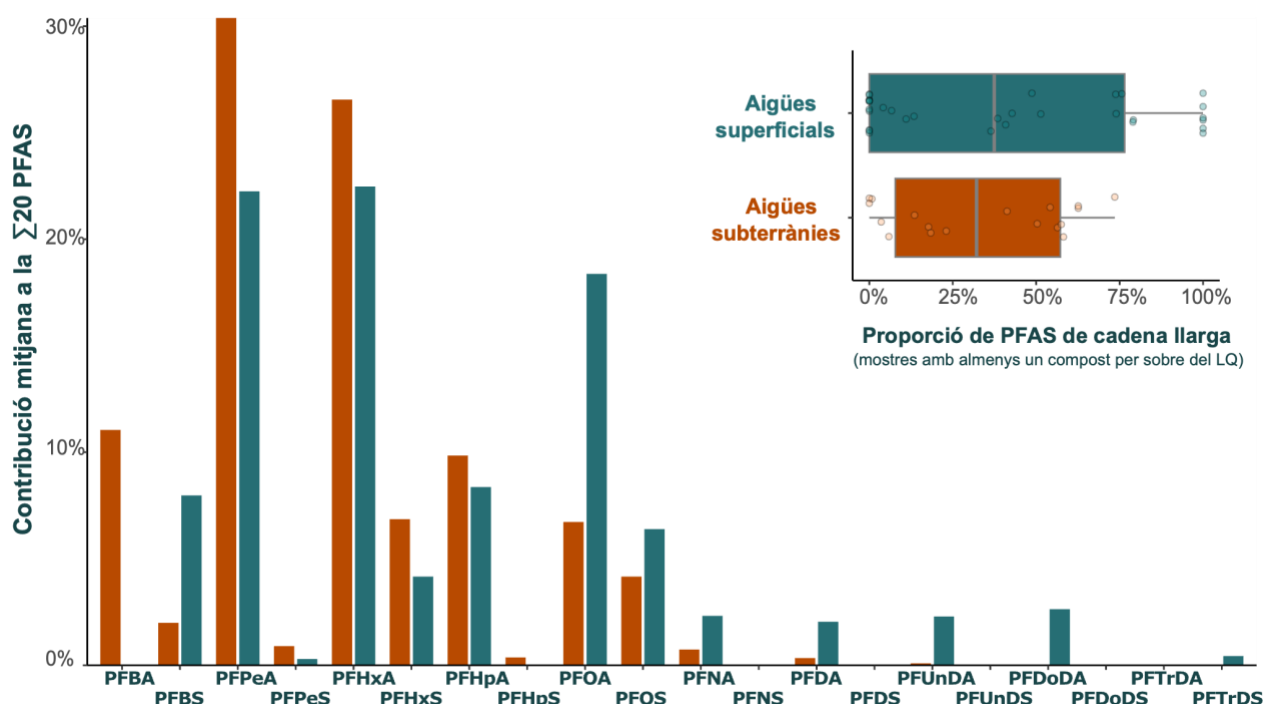


Figura 5. Contribució de cadascun dels 20 PFAS del RD 3/2023 a la $\Sigma 20$ PFAS per a aigües superficials (turquesa) i aigües subterrànies (taronja). Els diagrames de caixes mostren la proporció de compostos de cadena llarga a la $\Sigma 20$ PFAS, en les mostres amb almenys un compost per sobre del LQ (n = 32 en aigües superficials, i n = 18 en aigües subterrànies).

En aigües superficials, la proporció de compostos de cadena llarga presenta una elevada variabilitat entre mostres, amb percentatges que oscil·len entre el 0 i el 100 %, i una mediana del 38 % (vegeu Figura 5). Pel que fa a les aigües subterrànies, amb dades també de l'ACA per al període 2023-2025, la proporció de compostos de cadena llarga és lleugerament inferior, amb una mediana del 32 %, i no s'observa cap mostra amb una contribució del 100 % dels PFAS de cadena llarga a la Suma de PFAS. Els compostos de 8 carbonis o més (com ara el PFOA o el PFOS) presenten menor mobilitat i es troben en menor proporció a les aigües subterrànies, mentre que d'altres de cadena curta, com el PFBA, el PFPeA o el PFHxA, s'hi troben en major proporció. Aquestes dades són coherents amb altres estudis que observen concentracions elevades de compostos de cadena curta i ultracurta en un aquífer proper a Barcelona [20].

En casos locals i específics de contaminació associada a l'ús d'escumes antiincendis, fins i tot compostos de cadena llarga com el PFOS poden trobar-se en aigües subterrànies a concentracions elevades [23]. En situacions d'aquest tipus de contaminació greu, la presència de PFAS sol anar associada a altres compostos químics i pot ser monitoritzada mitjançant paràmetres de qualitat general com ara la conductivitat.

3.4 Actuacions per a la reducció de la contaminació en origen

Es proposa un full de ruta per orientar els municipis que hagin detectat concentracions de PFAS a la xarxa o en alguna captació que superin, o estiguin en risc de superar, el valor paramètric corresponent.

Cal tenir present que, en cas de detectar un incompliment del valor paramètric de PFAS establert al RD 3/2023 a l'aigua d'abastament, cal seguir el que s'indica a la secció 4 del capítol II d'aquesta normativa (relativa a les actuacions davant d'incidències), les indicacions establertes al Pla Sanitari de l'Aigua (PSA) de la zona d'abastament corresponent, així com tots els possibles requeriments que es realitzin des de l'autoritat sanitària competent. D'altra banda, en cas que aquesta situació no estigui prevista al PSA, cal que s'hi incorpori i s'incloguin les mesures oportunes a adoptar al respecte.

Tal com es descriu al capítol 2 de Normativa de la present guia, amb l'entrada en vigor del RD 3/2023 és obligatori a partir de l'any 2025 afegir la determinació dels 20 PFAS especificats a la Taula 1 d'aquesta guia en les analítiques completes. En conseqüència, el nombre d'anàlisis efectuades de PFAS en les aigües de consum pot ser relativament important, atenent la freqüència amb la qual la legislació demana realitzar aquest tipus d'anàlisi.

L'objecte d'aquest full de ruta és, doncs, orientar els municipis que han detectat PFAS a la xarxa o en alguna captació, per tal d'iniciar una anàlisi per identificar l'origen de la contaminació, i valorar si és factible dur a terme actuacions per evitar l'afectació a les captacions a mitjà i llarg termini.

En cas de superació (o risc de superació) del valor paramètric, cal adoptar mesures per confirmar la contaminació per PFAS i caracteritzar-ne l'abast i la tipologia:

- **Validació analítica:** revisar els procediments de presa de mostra (vegeu l'Annex A) i, sempre que sigui possible, assegurar que els assaigs estiguin acreditats d'acord amb la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 per garantir la fiabilitat dels resultats. Repetir les anàlisis en cas d'incertesa sobre la fiabilitat dels resultats.
- **Obtenció de dades temporals:** incrementar la freqüència de seguiment de la qualitat de l'aigua i analitzar les dades disponibles per determinar si la contaminació és puntual, estacional o persistent.
- **Obtenció de dades espacials:** augmentar la resolució espacial de la informació mitjançant el mostreig de les diferents captacions i analitzar les dades disponibles per determinar l'abast geogràfic de la contaminació.
- **Perfil químic de la contaminació:** identificar els compostos responsables de la contaminació (cadena llarga vs. curta, dominància d'un compost vs. barreja de múltiples compostos).

Alhora, es recomana comunicar la situació a l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), com a administració hidràulica competent, per facilitar l'obtenció de dades i la gestió coordinada de la conca. Això permet disposar d'un coneixement actualitzat de la presència de PFAS en els àmbits de captació i planificar les actuacions necessàries per garantir el bon estat de les masses d'aigua i dels abastaments.

Un cop rebuda la comunicació, l'ACA, en coordinació amb els municipis, pot emprendre actuacions per identificar les fonts potencials de PFAS i traçar l'origen de la contaminació, com ara:

1. Identificar i delimitar les àrees de recàrrega i caracteritzar el moviment de l'aigua, és a dir, els fluxos superficials i subterranis que alimenten les captacions de l'abastament.
2. Identificar les activitats presents al territori definides com a fonts potencials segons l'apartat 3.2 d'aquesta guia: activitats industrials, aeroports, parcs de bombers, EDAR urbanes i industrials, zones d'aplicació de llots de depuradora, abocadors i gestors de lixiviats.
3. Planificar i dur a terme mostrejos que permetin traçar o confirmar l'origen de la contaminació i determinar si es tracta d'un episodi puntual o continuat en el temps:
 - Punts del medi i captacions (aigües superficials i subterrànies).
 - Efluents d'EDAR i d'ERA.
 - Punts rellevants de la xarxa de col·lectors.
 - Altres punts estratègics amb sospita de contaminació puntual segons les activitats identificades.
4. Establir mecanismes de coordinació amb altres ens locals i supramunicipals per facilitar la identificació dels possibles orígens de la contaminació.

En cas que s'identifiqui clarament la font de contaminació, existeix normativa que permet iniciar expedients per requerir actuacions en relació amb les aportacions de contaminant al medi. Per exemple, en el cas d'aigües subterrànies, el RD 665/2023 estableix, en la secció 1a relativa a la protecció davant la contaminació puntual, les actuacions que cal seguir.

Algunes accions que poden dur a terme les activitats emissores de PFAS per reduir la contaminació inclouen la millora de la monitorització i la gestió de residus i lixiviats, la identificació dels productes utilitzats en processos industrials o altres instal·lacions que puguin contribuir a la presència de PFAS, així com la promoció de la seva substitució o reducció de l'ús.

4. Technologies de tractament de PFAS

4.1 Tecnologies de tractament de PFAS existents en el mercat

Les línies de tractament d'aigua potable més habituals, que inclouen processos de coagulació, floculació, oxidació, cloració i filtració ràpida amb sorra, resulten insuficients per a l'eliminació dels PFAS [27]. Les seves propietats fisicoquímiques úniques, com l'elevada solubilitat, el caràcter simultàniament hidrofílic i hidrofòbic, la baixa volatilitat i la presència d'enllaços C-F extremadament resistents, fan necessària la incorporació de tecnologies específiques en els trens de tractament.

Aquest capítol ofereix una visió integral de les tecnologies emprades a escala real per a l'eliminació de PFAS de l'aigua destinada al consum humà. S'hi analitzen la capacitat de remoció i l'eficiència de cada tractament en funció de la concentració i la tipologia de PFAS, les característiques de l'aigua a tractar, els costos d'inversió i d'operació, així com els avantatges, inconvenients i requeriments d'espai de cada alternativa. Finalment, s'examina la integració d'aquestes tecnologies en els trens de tractament convencionals i la possibilitat de combinar-ne més d'una per oferir una solució més eficient. Les principals tecnologies considerades són:

- **Carbó actiu en pols (CAP) i granular (CAG)**
- **Resines d'intercanvi iònic (IX)**
- Tractaments de membranes: **nanofiltració (NF)** i **osmosi inversa (OI)**

Cal destacar que les tecnologies presentades en aquest capítol permeten separar els PFAS i concentrar-los en materials o corrents de rebuig -amb eficiències més o menys properes al 100 %-, però no els destrueixen definitivament. Tot i que aquestes tecnologies desplacen el contaminant sense resoldre completament el problema ambiental, davant les noves exigències normatives resulta imprescindible implementar-les a les captacions o a les instal·lacions de potabilització quan les concentracions superen els llindars establerts.

Més enllà de les tecnologies analitzades en aquest capítol, s'estan desenvolupant altres tecnologies, com ara nous materials adsorbents o diversos processos destructius que, tot i ser prometedors, encara no han estat prou validats per al tractament d'aigua potable a escala real (aquestes alternatives es descriuen amb detall a l'Annex B de la guia).

4.2 Carbó actiu

El tractament amb carbó actiu es basa en la capacitat d'aquest material per adsorbir els PFAS presents a l'aigua. El procés d'adsorció consisteix en un mecanisme de transferència de massa mitjançant el qual una substància de la fase líquida queda retinguda sobre una fase sòlida, fet que en permet la separació. En general, un temps de contacte més prolongat afavoreix una adsorció més eficient. En el cas dels PFAS, els principals mecanismes d'adsorció són les interaccions hidrofòbiques i electrostàtiques entre les dues fases. A més de l'eliminació de PFAS, el carbó actiu pot retenir altres compostos, alguns dels quals són responsables de gustos i olors, així com contaminants i precursors de contaminants.

Es distingeixen dues configuracions principals: el carbó actiu en pols (CAP), utilitzat preferentment en actuacions puntuals o situacions d'emergència, i el carbó actiu granular (CAG), emprat habitualment en sistemes de filtració contínua. A més, segons el seu origen, es diferencien els carbons actius bituminosos i no bituminosos, que poden presentar eficiències d'eliminació diferents. En termes generals, els carbons d'origen bituminós solen mostrar una major afinitat per als PFAS, especialment pels de cadena llarga, tot i que l'eficiència d'eliminació depèn en gran mesura de les propietats específiques del carbó, de la tipologia de PFAS i de les condicions operatives de la planta [28].

4.2.1 Carbó actiu en pols (CAP)

El carbó actiu en pols (CAP) està constituït pel mateix material que el CAG, però presenta una granulometria molt més fina, generalment inferior a 0,075 mm. Tot i que el principi d'adsorció és el mateix, el CAP es dosifica directament a l'aigua en forma de suspensió i s'utilitza habitualment com a tractament puntual i temporal, amb l'objectiu de reduir costos d'inversió i operació [29]. Un exemple habitual d'ús del CAP és el control d'episodis de gustos i olors en aigües superficials durant els mesos càlids.

L'eliminació de PFAS mitjançant CAP requereix agitació intensa i una mescla homogènia per afavorir una transferència de massa eficient. L'èxit del tractament depèn de la dosi aplicada, la mida de partícula, el temps de contacte disponible i la competència amb la matèria orgànica. Igual que en el cas del CAG, els PFAS de cadena llarga presenten una adsorció més eficient que els compostos de cadena curta i ultracurta [30], [31], i els àcids perfluorosulfònics (PFSA) generalment s'adsorbeixen més fàcilment que els àcids perfluorocarboxílics (PFCA).

Pel que fa a la implementació, el CAP s'afegeix normalment en les primeres etapes del tren de tractament. Com que es dosifica directament en el corrent d'aigua, cal separar-lo posteriorment mitjançant processos de decantació o filtració abans del subministrament d'aigua potable. La dosi de CAP necessària per eliminar PFAS és aproximadament el doble de la utilitzada per al control de gustos i olors [32]. Aquesta elevada càrrega de sòlids pot saturar els decantadors o filtres i generar dificultats operatives a la planta per retirar el CAP dosificat.

El principal avantatge del CAP és que es pot implementar ràpidament i amb un cost d'inversió inferior al d'altres tecnologies. A més, existeix la possibilitat de llogar o adquirir unitats prefabricades de dosificació, fet que permet donar resposta a episodis puntuals sense necessitat de construir infraestructures permanents de CAG o membranes.

Com a principal inconvenient destaca l'increment significatiu de fangs residuals. El CAP dificulta la deshidratació dels fangs i els converteix en un residu que conté PFAS. En alguns casos, els residus del tractament d'aigua potable han estat valoritzats o reintroduïts al medi mitjançant diferents vies de gestió, una pràctica que genera preocupació pública i planteja reptes reguladors i de responsabilitat a mitjà termini.

4.2.2 Carbó actiu granular (CAG)

En el tractament amb carbó actiu granular (CAG), l'aigua flueix a través de llits o columnes de carbó actiu, i els contaminants es van adsorbint a la superfície porosa del material. El CAG presenta una mida de partícula significativament superior a la del CAP -habitualment en el rang de 0,5 a 3 mm-, fet que en permet l'ús en filtres per gravetat o en dipòsits a pressió. L'elecció entre ambdues configuracions s'ha d'avaluar per a cada instal·lació, tot i que, generalment, els filtres a pressió impliquen costos d'inversió més elevats.

Actualment, el CAG és la tecnologia més estesa per a l'eliminació de PFAS i de la qual es disposa de més dades d'operació [33]. Els filtres de CAG s'integren amb facilitat a les plantes existents, ja sigui substituint els medis filtrants tradicionals, com la sorra, o com a etapa de filtració addicional al final de la línia. A més, els sistemes de filtració amb CAG es poden llogar com a solucions temporals, per exemple en forma de filtres en columna, cosa que permet donar una resposta ràpida a episodis de contaminació o dur a terme assajos a escala real.

Per a diversos tipus de PFAS, el CAG pot assolir eficiències d'eliminació properes al 100 % [34]. Tanmateix, el rendiment d'eliminació en cada instal·lació depèn de múltiples factors: la tipologia i concentració dels PFAS, la presència d'altres substàncies que competeixen pels llocs d'adsorció, les propietats del carbó utilitzat, el cabal i el temps de contacte en llit filtrant buit (conegut com EBCT, de l'anglès *Empty Bed Contact Time*). Per a aquest paràmetre, es recomana habitualment un valor d'entre 10 i 20 minuts.

Pel que fa a la tipologia de PFAS, el CAG és altament eficient per a l'eliminació de compostos de cadena llarga, però presenta limitacions importants per als de cadena curta, com el PFBA i el PFBS, i és pràcticament ineficaç per als d'ultracurta, com el TFA [31], atesa la seva menor afinitat pel carbó actiu.

La matèria orgànica natural de l'aigua competeix amb els PFAS pels llocs d'adsorció i pot reduir significativament l'eficiència del tractament. Per aquest motiu, sovint és necessari un pretractament que en redueixi la concentració abans del pas pel filtre de CAG. Fins i tot amb un bon pretractament, el rendiment del CAG disminueix progressivament amb el temps fins a arribar al punt de ruptura del llit adsorbent, conegut com a *breakthrough*, moment en què l'eliminació del contaminant deixa de ser efectiva i aquest apareix a l'efluent. Aquest punt es produeix en moments diferents segons el compost específic i la seva afinitat pel carbó actiu.

Un fenomen rellevant a tenir en compte és el desplaçament o picatge cromatogràfic, que es produeix quan substàncies amb major afinitat pel carbó desplacen compostos amb menor afinitat prèviament retinguts. Aquest fenomen pot provocar que, puntualment, la concentració a la sortida del filtre sigui superior a la d'entrada. Per minimitzar aquest risc, cal conèixer bé les característiques de l'aigua tractada i dur a terme un seguiment acurat dels contaminants i del rendiment del tractament.

Quan el CAG s'exhaureix, s'ha de reemplaçar o regenerar. La reactivació tèrmica és el procés més usat per a la regeneració del CAG i es realitza en instal·lacions especialitzades, habitualment operades pels mateixos fabricants de carbó actiu. Tot i que les altes temperatures del procés en principi destrueixen els PFAS retinguts al carbó,

calen més estudis per garantir l'absència d'emissions de PFAS a l'atmosfera. D'altra banda, en cada cicle de regeneració es perd entre un 5 i un 10 % del material [35], i la seva capacitat adsorbent pot disminuir progressivament. La regeneració del CAG és un camp en evolució, amb investigacions en curs sobre mètodes alternatius, com la regeneració electroquímica o mitjançant microones [36], [37].

Finalment, cal considerar que, si el control de PFAS exigeix substitucions molt freqüents del CAG, els costos operatius i la petjada ambiental poden augmentar significativament en comparació amb els usos convencionals del carbó actiu, com ara l'eliminació de matèria orgànica natural o de contaminants orgànics comuns.

4.3 Resines d'intercanvi iònic (IX)

L'intercanvi iònic (IX) és un procés que elimina contaminants de l'aigua mitjançant l'intercanvi d'ions entre la fase líquida i una fase sòlida (resines sintètiques). Com que els PFAS són majoritàriament aniònics, s'utilitzen resines d'intercanvi aniònic, que retenen aquests compostos i, habitualment, alliberen ions clorur a l'aigua.

El tractament consisteix a fer passar l'aigua a través de columnes o contenidors a pressió que contenen les resines. Aquestes retenen els PFAS principalment mitjançant interaccions electrostàtiques, amb una cinètica més ràpida que la del CAG. Això permet operar amb temps de contacte menors, fet que redueix els requeriments d'espai i els costos de bombament. D'entre els diversos tipus de resines disponibles, les més utilitzades actualment són les funcionalitzades amb amines quaternàries o d'amoni dimetiletanol en gels poliacrílics [38].

Aquesta tecnologia és altament efectiva per a una àmplia gamma de PFAS. Un dels seus principals avantatges és el rendiment superior al CAG en l'eliminació de PFAS de cadena curta, gràcies a la fortalesa de les interaccions electrostàtiques. No obstant això, la seva eficiència és molt limitada per als compostos de cadena ultracurta a causa de la competència amb altres anions presents a l'aigua [39], [40]. Un altre avantatge rellevant és la seva elevada selectivitat cap als PFAS, fins i tot en presència de matèria orgànica natural.

El rendiment de les resines disminueix progressivament amb l'ús fins a arribar al punt de ruptura (*breakthrough*), a partir del qual la retenció del contaminant deixa de ser efectiva. Aquest punt varia en funció del compost i de la seva afinitat per la resina. A diferència del CAG, en la majoria d'aplicacions per a PFAS les resines no es regeneren de manera rutinària, ja que els mètodes de regeneració convencionals no permeten deslligar els PFAS de forma segura i eficient. En conseqüència, un cop exhaurida la capacitat d'intercanvi, les resines s'han de substituir. Tot i que s'estan investigant nous mètodes de regeneració, aquests encara no són aplicables a escala real. Aquesta limitació fa que l'IX sigui, en general, una opció més costosa econòmicament que el CAG. Actualment, les resines exhaurides es gestionen principalment mitjançant incineració o dipòsit en abocadors controlats. Igual que en el cas del CAG i el CAP, la normativa sobre la gestió d'aquests residus no és del tot clara i podria esdevenir més restrictiva en un futur.

De manera similar al CAG, l'IX pot experimentar fenòmens de desplaçament, en què compostos aniònics amb més afinitat expulsen els prèviament retinguts, provocant

increments puntuals de concentració a la sortida (picatge cromatogràfic). Per aquest motiu, és necessari un seguiment acurat del procés. A més, l'IX pot alterar el pH de l'aigua, a causa de la modificació de l'equilibri carbonat i de l'intercanvi iònic, tot i que aquest efecte es pot corregir amb un tractament posterior.

També és important assegurar que l'aigua d'entrada a les resines estigui lliure d'oxidants (com el clor o l'ozó), per evitar-ne la degradació química. La integració de les resines d'IX en les estacions de tractament d'aigua potable és similar a la del CAG, ja que requereixen un pretractament adequat per garantir-ne l'eficiència, incloent-hi, si escau, un ajust del pH. La combinació de CAG i resines d'IX pot ser especialment beneficiosa, utilitzant les resines com a segon pas, ja que tenen un cost més elevat i convé protegir-les de la saturació prematura.

Malgrat l'eficàcia provada en països com els Estats Units, la seva implementació a Espanya i en altres països europeus és encara limitada. Segons el Ministeri de Sanitat, les resines d'IX utilitzades com a medi filtrant han de complir les normes UNE-EN corresponents o estàndards equivalents, i els fabricants han de proporcionar a l'operador una declaració responsable que n'acrediti el compliment normatiu (vegeu capítol 2).

4.4 Membranes de nanofiltració (NF) i d'osmosi inversa (OI)

La filtració mitjançant membranes d'osmosi inversa (OI) o de nanofiltració (NF) es basa a fer passar l'aigua a pressió a través de membranes semipermeables, un procés que genera dos efluents diferenciats: el permeat (aigua tractada) i el concentrat, un corrent de rebuig que pot contenir concentracions elevades de PFAS i altres contaminants, fet que requereix una gestió específica i adequada.

En aquestes tecnologies, els mecanismes d'eliminació de contaminants són l'exclusió per mida, la repulsió electrostàtica i l'adsorció sobre la superfície de la membrana [41]. L'exclusió per mida és el mecanisme predominant en l'OI, mentre que en la NF, segons les característiques de la membrana i la composició de l'aigua d'entrada, els altres mecanismes també poden ser rellevants. En tot cas, un paràmetre clau del rendiment d'aquestes tecnologies és la mida del porus de membrana, associada al punt de tall de pes molecular (MWCO; de l'anglès *Molecular Weight Cut-Off*): com més petit és el porus, més compostos i de menor pes molecular són retinguts i, per tant, l'eficiència d'eliminació augmenta.

Les membranes d'OI tenen la mida de porus més petita (generalment $< 0,001 \mu\text{m}$) i un MWCO d'entre 50 i 200 Da, mentre que les de NF presenten porus lleugerament superiors ($0,001 - 0,01 \mu\text{m}$) i un MWCO d'entre 200 i 1.000 Da. Per aquest motiu, l'OI sol presentar millors rendiments d'eliminació de contaminants que la NF. Cal tenir present, però, que al mercat existeix una gran varietat de membranes de NF, i que les més "estretes", tot i ser més costoses energèticament que les "amples", poden assolir rendiments d'eliminació similars als de l'OI. En concret, les membranes de NF estretes i les d'OI actuals poden assolir rendiments d'eliminació de PFAS superiors al 99 %, superant el carbó actiu i l'intercanvi iònic, especialment en el cas dels PFAS de cadena curta i ultracurta [42], [43], [44]. A més, les membranes presenten una vida útil més llarga que la del CAG o les resines d'IX; per contra, però, és una tecnologia que comporta uns costos energètics i econòmics més elevats.

Les membranes d'OI consumeixen més energia que les de NF perquè operen a pressions més elevades. Des del punt de vista econòmic, l'OI comporta costos d'inversió i d'operació superiors, mentre que la NF pot ser una alternativa més assequible quan no és necessari eliminar compostos de molt baix pes molecular (com determinades sals dissoltes). Les dues tecnologies requereixen un pretractament per prevenir l'embrutiment (*fouling*) de les membranes, així com un posttractament per estabilitzar l'aigua i evitar la corrosió a la xarxa de distribució.

Un aspecte clau en la viabilitat de les instal·lacions de NF i OI és la gestió del corrent de rebuig. En general, aquestes tecnologies permeten recuperar un 80-90 % de l'aigua d'alimentació com a permeat [45], mentre que el 10-20 % restant es concentra en un corrent de rebuig amb elevades concentracions de contaminants (PFAS, sals, etc.) que no es pot abocar directament al medi. Els operadors i els ens locals han de valorar conjuntament les solucions disponibles per a la seva gestió: en absència d'una solució tècnica i legal per al corrent de rebuig, la implementació de membranes pot resultar inviable. Per tant, és imprescindible avaluar aquesta qüestió de manera prioritària durant la fase de selecció de la tecnologia, abans de desenvolupar qualsevol projecte o inversió.

En municipis de l'interior aquest aspecte és especialment crític. En aquests casos, i com a última opció, es pot valorar la possibilitat de connectar aquest rebuig a la xarxa de sanejament, ja sigui en baixa (clavegueram) o en alta (col·lectors). Aquesta opció, però, està condicionada per la capacitat hidràulica de l'EDAR d'assumir aquest cabal addicional i per les elevades concentracions salines d'aquest. D'altra banda, caldrà verificar el compliment dels límits establerts per la normativa vigent en relació a abocaments a la xarxa de sanejament, i avaluar la possible incorporació d'una instal·lació de laminació dels corrents de rebuig a l'ETAP per minimitzar l'impacte sobre l'operativa de la depuradora. Cal destacar, a més, que la gestió d'aquest rebuig per part del sistema de sanejament suposa un cost addicional d'operació.

En municipis costaners es proposa estudiar, en coordinació amb el gestor del sistema de sanejament, la possible derivació del rebuig cap a l'emissari marí més proper. Si aquesta opció no és viable es podria avaluar una possible connexió a la xarxa de clavegueram en termes similars als municipis d'interior.

En qualsevol cas, totes les propostes han de ser analitzades i validades per l'administració actuant del sistema de sanejament i han de comptar amb els permisos corresponents abans d'iniciar qualsevol inversió.

4.5 Combinacions de tecnologies

Ateses les limitacions de les tecnologies actuals per a l'eliminació de PFAS, la combinació de diferents mètodes ofereix una oportunitat per millorar-ne els rendiments i optimitzar-ne els costos. Un sistema integrat que combini dues o més tècniques de manera seqüencial pot superar les limitacions de cada mètode aplicat de manera aïllada. En aquests treus de tractament, és habitual incorporar una segona etapa com a poliment (*polishing*), fet que permet millorar la qualitat de l'efluent final i el rendiment global del sistema. D'altra banda, certes opcions com el CAP poden utilitzar-se com a solució temporal per fer front a episodis puntuals de contaminació mentre s'implementa una alternativa permanent.

Algunes de les combinacions més utilitzades són:

- **CAG + IX**: Cobertura completa de PFAS de cadena llarga i curta
- **CAG + NF/OI**: Màxima eliminació amb protecció de les membranes per part del CAG
- **CAP** (emergència) + **CAG/IX** (permanent): Resposta ràpida combinada amb una solució a mitjà termini

4.6 Resum dels tractaments i fitxes descriptives

En aquesta secció es presenta, en primer lloc, una visió de conjunt de les principals tecnologies de tractament mitjançant una taula resum (Taula 5) que recull els seus avantatges i limitacions més rellevants. A continuació, cada tecnologia s'analitza amb més detall a través de fitxes descriptives específiques, que permeten aprofundir en el seu funcionament, aplicabilitat i principals consideracions tècniques.

Les fitxes tècniques inclouen també unes estimacions orientatives dels costos d'operació de cada tecnologia que provenen de dades reals obtingudes pels redactors de la guia. Cal tenir en compte que els costos presentats s'han estimat a partir d'instal·lacions de gran escala i que, en el cas de municipis o sistemes amb cabals més reduïts, els costos reals poden ser superiors a causa dels efectes d'escala. Malgrat això, s'ha optat per aquesta aproximació perquè es considera més realista i útil que l'ús de valors de cost extrets de la literatura científica, que sovint mostren rangs molt amplis i responen a realitats molt diferents de les dels sistemes locals.

Taula 5. Característiques de les tecnologies disponibles per al tractament de PFAS (modificat a partir de [46]), incloent-hi l'eficiència d'eliminació, l'espai requerit, els costos d'inversió i d'operació, l'operativitat i el context recomanat. A les columnes de l'esquerra es mostra una categorització amb 5 nivells: ↓↓ molt baix, ↓ baix, → mitjà, ↑ alt, ↑↑ molt alt. Els PFAS ultracurts estan regulats a la normativa de qualitat ambiental, però encara no a la normativa d'aigua de consum (RD 3/2023).

Tecnologia	Elimin. PFAS llargs	Elimin. PFAS curts	Elimin. PFAS ultracurts	Espai	Cost inversió	Cost operació	Operativitat	Context recomanat
Carbó actiu en pols (CAP)	↑	↓	↓↓	↓↓	↓	→	Possibilitat d'implementació gairebé immediata mitjançant addició directa al corrent d'aigua. Augmenta la producció de fangs residuals, que són més complexos de gestionar que els habituals.	Solució temporal o d'emergència per evitar inversions elevades i/o afrontar episodis de contaminació transitoris, especialment de PFAS de cadena llarga.
Carbó actiu granular (CAG)	↑	→	↓↓	→	→	→	Tecnologia madura i fàcil d'implementar. Les columnes de CAG eliminen bé els PFAS de cadena llarga quan hi ha baixa presència de matèria orgànica. Cal fer un seguiment del seu rendiment, i, quan estiguin saturades, substituir-les per unes de noves o regenerades.	Solució adequada per a la majoria de casos en abastaments petits i mitjans per la seva ràpida implementació i bona relació cost-benefici. Les limitacions en el tractament de PFAS curts es poden compensar amb combinacions amb altres tecnologies.
Resines d'intercanvi iònic (IX)	↑	↑	→	→	↑	→	Implementació més complexa que el CAG. Les resines d'IX eliminen eficaçment PFAS llargs i curts (especialment en aigües amb nivells baixos d'anions competidors com sulfats o nitrats). Requereixen seguiment i substitució un cop exhaurides. Cal verificar el compliment dels requisits normatius de les resines.	Solució menys estesa que el CAG, en part per les limitacions en la regeneració de les resines, que n'incrementa el cost. Adequada com a tecnologia individual o combinada amb CAG, especialment amb elevada presència de PFAS de cadena curta, o quan les tecnologies de membrana no es poden aplicar.
Membranes de nanofiltració (NF)	↑↑	↑↑	↑	↑	↑	↑	Les membranes de NF generen un corrent de rebuig de gestió complexa. Presenten costos elevats, especialment les membranes de porus més petit, però ofereixen alta eficiència en l'eliminació de PFAS llargs i curts. Requereixen pretractament i manteniment per evitar l'embrutiment.	Solució per a casos greus i previsiblement persistents de contaminació, especialment amb presència elevada de PFAS curts i matèria orgànica. Adequada per a abastaments mitjans o grans amb capacitat d'assumir costos d'inversió i operació elevats.
Membranes d'osmosi inversa (OI)	↑↑	↑↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑	Les membranes d'OI generen un corrent de rebuig de gestió complexa. És la tecnologia amb costos més elevats, però permet una eliminació gairebé completa de PFAS. Requereix pretractament i manteniment per evitar l'embrutiment.	Solució per a casos greus i previsiblement duradors de contaminació, amb alta presència de PFAS curts i concentracions altes de matèria orgànica. Solució per a abastaments grans que puguin afrontar costos d'inversió superiors als de la NF. Pot ser una solució més adequada que la NF en condicions d'alta salinitat.

CARBÓ ACTIU EN POLS



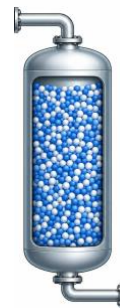
Eficiència d'eliminació per tipus de compost	• Eficients per als PFAS de cadena llarga. Baixa eficiència per als PFAS de cadena curta. No eliminen PFAS de cadena ultracurta • Menys eficient que el CAG per tots els tipus de PFAS
Cost d'inversió	• Baix
Cost d'operació	• Mitjà: 0,01-0,10 €/m³ d'aigua tractada (depenent de la dosi i freqüència d'aplicació)
Vida útil dels consumibles	• Ús puntual o temporal (estimació de vida útil no aplicable)
Avantatges	• Tractament eficient sobretot per als PFAS de cadena llarga • Baix cost d'inversió i molt fàcil d'implementar en trens de tractament existents • Adequat com a solució per problemes intermitents o puntuals de contaminació de PFAS • Elimina altres contaminants de l'aigua com precursors de DBP, compostos causants de gustos i olors o carboni orgànic total • Disponibilitat d'unitats prefabricades mòbils per a emergències
Inconvenients	• Menys eficient que el CAG per a PFAS de cadena curta • Augment significatiu del residu sòlid a la planta de tractament que pot afectar la capacitat dels decantadors i dels filtres • Impacte negatiu en la deshidratació dels fangs residuals
Requeriment d'espai	• Baix (el menor de totes les tecnologies per la possibilitat d'adquisició d'unitats prefabricades)
Integració en el tren de tractament	• Molt fàcil. Es pot incorporar abans del tractament (coagulació/floculació) i eliminar el sòlid durant la decantació i filtració
Gestió del residu	• Actualment eliminat en la decantació i assecat amb el fang • En el futur pot ser que aquesta gestió es complogui degut a un augment de regulació sobre com es disposen els fangs contaminats amb PFAS

CARBÓ ACTIU GRANULAR



Eficiència d'eliminació per tipus de compost	• Eficients per als PFAS de cadena llarga. Menys eficiència per als PFAS de cadena curta (però millor que el CAP). No eliminen PFAS de cadena ultracurta • L'eficiència depèn del tipus de carbó i també del temps de contacte
Cost d'inversió	• Mitjà
Cost d'operació	• Mitjà-alt: 0,02-0,10 €/m³ d'aigua tractada (depenent de la freqüència de regeneració/substitució)
Vida útil dels consumibles	• Mesos
Avantatges	• Alta eliminació dels PFAS de cadena llarga i eliminació moderada dels compostos de cadena curta • Més fàcil d'operar que les altres tecnologies • Possibilitat de convertir filtres de sorra convencionals en sistemes de CAG • Pot instal·lar-se temporalment per a aplicacions de tractament de PFAS a curt termini • Elimina altres contaminants de l'aigua com precursors de DBP, compostos de gust i olor o carboni orgànic total • Regeneració tèrmica possible (tot i que amb pèrdua de material del 5-10%)
Inconvenients	• La competència en l'adsorció (especialment amb la matèria orgànica) pot reduir l'eficiència d'eliminació de PFAS • Els costos d'operació i manteniment poden ser elevats si el CAG s'ha de substituir o reactivar amb freqüència, per exemple en aigües amb alt contingut de matèria orgànica o si l'objectiu és eliminar PFAS de cadena curta • El medi de CAG s'haurà de reactivar o eliminar, i els requisits normatius futurs sobre les emissions atmosfèriques associades a la reactivació o eliminació encara són incerts
Requeriment d'espai	• Baix-mitjà
Integració en el tren de tractament	• Fàcil. Els sistemes de filtració poden substituir els filtres de medi tradicionals o bé funcionar com a sistemes posteriors al filtre
Gestió del residu	• La columna de CAG esgotada es pot incinerar, abocar de forma controlada o reactivar tèrmicament (amb pèrdua de material i capacitat) • Els PFAS en principi són destruïts en el procés de reactivació del CAG amb altes temperatures

RESINES D'INTERCANVI IÒNIC



Eficiència d'eliminació per tipus de compost	- Bona eficiència d'eliminació de PFAS de cadena llarga. Major eficiència d'eliminació de PFAS de cadena curta que el carbó actiu. Eficiència limitada per als PFAS de cadena ultracurta - Possibilitat d'eliminar PFAS selectivament. Alta selectivitat fins i tot en presència de matèria orgànica natural, però cal vigilar la competència amb altres anions (sulfats, nitrats)
Cost d'inversió	Alt
Cost d'operació	Mitjà-alt: 0,03-0,09 €/m³ d'aigua tractada (depenent de la freqüència de substitució)
Vida útil dels consumibles	Mesos-anys
Avantatges	- Alta selectivitat per eliminar PFAS de cadena llarga i curta, fins i tot en presència de matèria orgànica - Sistemes més compactes que el CAG (menor temps de contacte necessari) - Pot instal·lar-se temporalment per a aplicacions de tractament de PFAS a curt termini - Pot eliminar altres contaminants aniònics - La resina no s'ha de canviar tan sovint com el CAG si el tractament està gestionat adequadament - Potencialment combinable amb CAG per eliminar PFAS de cadena curta després de CAG - Menor consum energètic que les tecnologies de membrana (NF/OI)
Inconvenients	- La competència en l'adsorció amb altres anions pot reduir l'eficàcia d'eliminació dels PFAS - Els costos d'operació i manteniment són elevats - Pot incrementar la corrosivitat de l'aigua a causa de canvis en la seva composició iònica, fet que pot requerir un posttractament adequat - Les resines no es regeneren i esdevenen un residu quan s'exhaureixen
Requeriment d'espai	Baix
Integració en el tren de tractament	- Fàcil. S'integra en el tractament després de la filtració - Pretractament necessari: eliminació d'oxidants i possible ajust de pH - Posttractament: control de corrosivitat
Gestió del residu	Substitució de la resina i incineració o abocament controlat

MEMBRANES DE NANOFILTRACIÓ



Eficiència d'eliminació per tipus de compost	- Elevada eficiència d'eliminació de PFAS llargs. Eficiència més moderada i variable per a PFAS curts i ultracurts - Eficiència d'eliminació variable segons tipus de membrana (especialment mida del porus) i condicions de tractament
Cost d'inversió	Alt
Cost d'operació	Alt: 0,10-0,30 €/m³ d'aigua tractada
Vida útil dels consumibles	Anys
Avantatges	- Bona eliminació de PFAS de cadena llarga (superiors al 99%) - Vida útil llarga de les membranes (5-10 anys) - Menys intensiva energèticament que l'OI - Pot eliminar altres contaminants (duresa, matèria orgànica, alguns pesticides) - Menor cost d'inversió i operació que l'OI
Inconvenients	- La gestió del corrent de rebuig concentrat pot ser complexa - Pretractament rigorós necessari per evitar embrutiment (filtració, ajust de pH, desinfecció, antiincrustants) - Posttractament necessari per estabilitzar l'aigua (remineralització, ajust de pH, desinfecció) - Tecnologia energèticament intensiva (tot i que menys que l'OI) - Risc d'embrutiment de les membranes (fouling) químic i biològic, i necessitat de neteja química periòdica (cada 3-6 mesos) - Costos d'operació i manteniment elevats. Alt nivell de tecnificació i necessitat de personal expert per a la seva operació
Requeriment d'espai	Mitjà-alt (menor que l'OI)
Integració en el tren de tractament	- Complex, ja que requereix un pretractament i un posttractament intensiu - Pretractament necessari: filtració (5-10 µm), ajust de pH, dosificació d'antiincrustant, desinfecció, eliminació de clor - Posttractament necessari: remineralització, ajust de pH, desinfecció final
Gestió del residu	- Gestió del corrent de rebuig concentrat (10-20% de l'aigua d'alimentació) amb alta concentració de PFAS, possiblement elevada salinitat i reactius afegits (p. ex., antiincrustant) - Efluent generats durant les neteges químiques - Quan les membranes s'exhaureixen, cal gestionar-les com a residu potencialment perillós

MEMBRANES D'OSMOSI INVERSA



Eficiència d'eliminació per tipus de compost	• Elevada eficiència d'eliminació de PFAS llargs, curts i, fins i tot, ultracurts • El principal mecanisme d'eliminació és l'exclusió per mida
Cost d'inversió	• Molt alt
Cost d'operació	• Molt alt: 0,15-0,50 €/m³ d'aigua tractada
Vida útil dels consumibles	• Anys
Avantatges	• És la tecnologia que millor separa tots els tipus de PFAS, amb percentatges d'eliminació superiors al 99% en molts casos • Vida útil llarga de les membranes (5-10 anys) • Pot eliminar pràcticament tots els contaminants dissolts • Tecnologia madura i àmpliament implementada
Inconvenients	• La gestió del corrent de rebuig concentrat pot ser complexa • Pretractament molt rigorós necessari per evitar l'embrutiment de les membranes o fouling (filtració, ajust de pH, antiincrustants) • Posttractament necessari per estabilitzar l'aigua i evitar corrosió (remineralització, ajust de pH, desinfecció) • És la tecnologia energèticament més intensiva • Costos d'inversió, operació i manteniment molt elevats. Alt nivell de tecnificació i necessitat de personal expert per a la seva operació
Requeriment d'espai	• Alt
Integració en el tren de tractament	• Com a pas final del tractament per minimitzar els problemes de <i>fouling</i> • Pretractament rigorós necessari per evitar embrutiment (filtració, ajust de pH, desinfecció, antiincrustants) • Posttractament necessari per estabilitzar l'aigua (remineralització, ajust de pH, desinfecció)
Gestió del residu	• Gestió del corrent de rebuig (10-20% de l'aigua d'alimentació) amb alta concentració de PFAS, possiblement elevada salinitat i reactius afegits (p. ex., antiincrustant) • Efluent generats durant les neteges químiques • Quan les membranes s'exhaureixen, cal gestionar-les com a residu potencialment perillós

5. Aplicació de la guia a escenaris tipus

5.1 Objectiu

Aquest capítol aplica els conceptes i criteris desenvolupats en els capítols anteriors a un conjunt d'escenaris tipus i hipotètics, construïts a partir de situacions representatives de presència de PFAS en fonts de subministrament d'aigua destinada al consum humà en municipis petits i mitjans. L'objectiu principal és establir un marc d'anàlisi i de suport a la presa de decisions que permeti caracteritzar diferents situacions de contaminació, identificar les actuacions prioritàries per garantir la protecció de la salut pública i orientar la selecció de mesures adequades, tant pel que fa a la gestió i protecció de la font com al tractament de l'aigua, d'acord amb la normativa vigent i els possibles requeriments futurs.

A partir dels conceptes i criteris desenvolupats als capítols 1 a 4 d'aquesta guia, es proposa una tipificació d'escenaris representatius i s'exemplifica com aplicar aquests coneixements a situacions plausibles mitjançant una metodologia comuna d'anàlisi. Aquest enfocament permet sistematitzar la presa de decisions, facilitar la comparació entre casos i adaptar les tecnologies disponibles a les característiques específiques de cada sistema d'abastament. El resultat és una eina pràctica adreçada a ajuntaments, operadors i gestors dels serveis d'abastament, que ofereix orientacions per definir actuacions a curt i mitjà termini tenint en compte, entre d'altres, els costos, les necessitats d'operació i la gestió del rebuig generat.

5.2 Metodologia aplicada

Per a cadascun dels sis escenaris es defineix, en primer lloc, una situació inicial basada en les característiques de les fonts de subministrament, el perfil de contaminació per PFAS, la qualitat de l'aigua, el cabal que cal tractar i les infraestructures disponibles. A partir d'aquesta diagnosi, es proposen actuacions i recomanacions adaptades a cada context.

5.2.1 Definició de la situació inicial

Els sis escenaris tipus d'aquest capítol representen situacions corresponents a municipis amb dimensions, fonts de subministrament i sistemes de tractament diversos. Per caracteritzar cada escenari s'han considerat les preguntes següents:

a) Quin és el perfil de PFAS?

Els PFAS poden presentar-se en forma de compostos amb característiques fisicoquímiques diferents, inclosos compostos de cadena llarga, com el PFOS i el PFOA, i compostos de cadena curta, com el PFBS, el PFHxA o el PFPeA. Aquesta diferenciació és rellevant per entendre'n el comportament en el medi, la mobilitat, la persistència i la capacitat de ser retinguts pels diferents tractaments. En general, els PFAS de cadena curta presenten una mobilitat més elevada i una menor afinitat pels processos d'adsorció amb carbó actiu que els de cadena llarga.

b) Quines característiques té l'aigua que es vol tractar?

La composició de l'aigua és un factor clau, ja que condiciona l'eficiència i la vida útil dels tractaments específics per a la retirada de PFAS. Les concentracions elevades de matèria orgànica dissolta poden competir amb els PFAS pels llocs d'adsorció del carbó actiu i

accelerar l'exhauriment del CAG. De manera similar, la presència d'anions competidors pot reduir la capacitat o la selectivitat de determinades resines d'intercanvi iònic i condicionar-ne la vida útil. En les captacions superficials, la terbolesa, les partícules i la variabilitat de la matèria orgànica poden afectar negativament els processos d'adsorció i de membrana, de manera que pot ser necessari disposar d'un pretractament adequat. A més, les variacions estacionals del cabal, de la qualitat de l'aigua i de les concentracions de PFAS poden modificar significativament les condicions d'entrada al tractament i, per tant, el rendiment, les necessitats de manteniment i la freqüència de substitució o regeneració dels medis.

c) Quines són les fonts de subministrament d'aigua?

La contaminació per PFAS pot afectar diferents tipus de fonts de subministrament, com ara pous al·luvials, aqüífers de poca profunditat, captacions superficials en rieres o rius, fonts, connexions a xarxes supramunicipals i sistemes mixtos. Cadascuna d'aquestes fonts presenta característiques específiques pel que fa a la vulnerabilitat davant la contaminació, la variabilitat de la qualitat de l'aigua, la presència de matèria orgànica o altres substàncies que poden interferir en els tractaments. Aquestes característiques condicionen la selecció i el dimensionament de les tecnologies, el seu rendiment i les possibilitats de gestió operativa de l'abastament. La disponibilitat de diverses fonts pot permetre aplicar mesures alternatives o complementàries al tractament, com ara l'aturada temporal de les captacions més afectades, la modificació del règim d'explotació o la barreja controlada amb aigua procedent de fonts no afectades.

d) Quina infraestructura de tractament hi ha disponible?

Les infraestructures existents determinen el punt de partida tecnològic i condicionen la manera d'afrontar els episodis de contaminació. Els sistemes de potabilització poden incloure des d'instal·lacions bàsiques amb una única etapa de desinfecció fins a ETAP amb processos de coagulació, floculació, decantació i filtració, instal·lacions destinades principalment a l'eliminació d'altres contaminants, com els nitrats, o plantes que ja disposen de tractaments amb CAG o altres tecnologies avançades. La configuració existent condiona la possibilitat d'incorporar noves etapes, els requeriments de pretractament, l'espai disponible, la complexitat operativa i els costos d'inversió i d'explotació.

e) Quina és la dimensió del municipi?

La dimensió del municipi pot influir en la seva capacitat econòmica, en la disponibilitat de personal tècnic qualificat i en les possibilitats d'operar i mantenir instal·lacions de tractament complexes. Aquestes circumstàncies condicionen la selecció de la solució tècnica, el grau d'automatització necessari, la conveniència d'externalitzar determinades tasques i la sostenibilitat econòmica i operativa del sistema al llarg del temps. En la definició dels escenaris s'han considerat municipis de dimensions diverses, des de menys de 1.000 habitants fins a 50.000 habitants.

5.2.2 Propostes d'actuació i recomanacions tècniques

En aquest apartat es presenten possibles actuacions i recomanacions per garantir un subministrament d'aigua segur davant la presència de PFAS, considerant tant mesures a curt termini per afrontar l'episodi de contaminació com solucions més estructurals a mitjà termini.

a) Actuacions a curt termini

Es consideren actuacions orientades a donar compliment al RD 3/2023 i a reduir l'exposició de la població als PFAS. S'inclouen mesures de gestió i adaptació de l'operativa del sistema d'abastament i de les diferents captacions, l'ús de subministraments alternatius -com cisternes mòbils o la compra d'aigua a altres xarxes-, l'aplicació temporal de CAP, i l'optimització dels tractaments de potabilització existents.

Paral·lelament, es proposen actuacions per caracteritzar millor la problemàtica i identificar l'origen de la contaminació. Entre les mesures específiques destaca el reforç del monitoratge, amb una freqüència més elevada de mostreig i l'anàlisi del perfil de PFAS als punts de captació, a la sortida de l'ETAP i a la xarxa de distribució.

b) Solucions estructurals a mitjà termini

Quan hi ha evidències que la contaminació de la font pot ser recurrent o permanent i la gestió operativa del recurs es demostra insuficient, cal adoptar mesures més estructurals per garantir la seguretat del subministrament. En molts casos, aquestes actuacions consisteixen en la implantació de noves tecnologies de tractament, tot i que en determinades situacions pot ser més adequat executar noves captacions, sempre després d'avaluar-ne la viabilitat hidrogeològica i el risc de contaminació.

Les tecnologies de tractament disponibles actualment -carbó actiu, resines d'intercanvi iònic i membranes- no destrueixen molecularment els PFAS, sinó que els retiren o separen de l'aigua destinada al consum i els concentren en un medi adsorbent o en un corrent de rebuig. La selecció de la tecnologia més adequada es valora en funció de diversos factors, com el perfil de PFAS, les característiques de l'aigua d'entrada, el cabal que cal tractar, la infraestructura existent, la gestió dels residus i els objectius de qualitat establerts en la normativa.

c) Consideracions específiques

Diversos factors condicionen l'operativitat i l'eficiència de les alternatives tecnològiques seleccionades. Per aquest motiu s'inclouen, per a cada escenari, consideracions específiques i aspectes rellevants que cal tenir en compte. Entre aquests destaquen l'optimització dels processos de tractament existents o la incorporació de noves etapes de pretractament, i el control de l'eficiència del tractament proposat per anticipar la saturació dels medis adsorbents o l'embrutiment de les membranes.

d) Gestió del rebuig

La gestió dels residus i dels corrents concentrats és un aspecte clau que pot condicionar la viabilitat de la implantació de noves tecnologies. Per a cada cas s'indiquen les actuacions necessàries per gestionar el rebuig associat al tractament proposat. En general, els medis adsorbents exhaurits s'han de caracteritzar i lliurar a un gestor autoritzat, mentre que la gestió dels corrents de rebuig generats pels tractaments de membranes és un aspecte clau per garantir la viabilitat d'implantar aquesta tecnologia.

e) Estimació de costos

Per a cada escenari es presenten categories de cost qualitatives i relatives respecte de la resta d'escenaris. Aquestes categories consideren la inversió inicial, el consum energètic, el control analític, les necessitats de personal d'operació, la reposició o regeneració dels medis adsorbents i la gestió dels residus o corrents concentrats generats. Les estimacions de cost són orientatives i poden variar en funció de l'escala del sistema, de les seves característiques específiques i de les condicions d'implantació.

5.3 Escenaris de referència

Es presenten sis escenaris que permeten exemplificar l'aplicació de la informació proporcionada en aquesta guia a situacions concretes:

- Escenari 1: Pous al·luvials amb PFAS i elevada càrrega orgànica
- Escenari 2: Pous amb presència predominant de PFOS
- Escenari 3: Únic pou amb PFAS en un municipi molt petit
- Escenari 4: Captació superficial amb PFAS i elevada càrrega orgànica
- Escenari 5: Presència de PFAS de cadena curta en alguns pous
- Escenari 6: Adaptació del sistema a futurs límits més estrictes de PFAS

5.3.1 Escenari 1: Pous al·luvials amb PFAS i elevada càrrega orgànica

Aquest escenari correspon a un municipi de mida mitjana o gran que capta l'aigua mitjançant diversos pous situats en un mateix al·luvial. L'aigua presenta una mescla de PFAS de cadena llarga i curta, així com concentracions elevades de matèria orgànica dissolta, fet que pot reduir l'eficiència i la vida útil dels tractaments d'adsorció. Tot i que el municipi disposa d'una ETAP completa, la instal·lació no incorpora cap tractament específic per a la retirada de PFAS.

Taula 6. Característiques de l'escenari 1.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Mescla de PFAS de cadena llarga i curta	Concentració elevada de matèria orgànica dissolta	Diversos pous situats en un mateix al·luvial	ETAP amb coagulació, floculació, decantació i filtres de sorra	20.000-50.000 habitants

A curt termini, es recomana reforçar el monitoratge de PFAS per obtenir una caracterització més robusta de les concentracions i del perfil de PFAS de cada pou. Cal valorar l'aturada o la reducció de l'aportació dels pous més afectats i ajustar el règim d'explotació de la resta en funció de les concentracions detectades. També es pot considerar la compra d'aigua a altres xarxes de subministrament, si es disposa de les connexions necessàries. Es pot valorar l'ús temporal de CAP a l'ETAP, especialment quan predominin els PFAS de cadena llarga, així com optimitzar els processos de coagulació i floculació existents amb l'objectiu de reduir el contingut de matèria orgànica dissolta, la qual cosa permet millorar l'eficiència del tractament.

A mitjà termini, es proposa incorporar una etapa de CAG després dels filtres de sorra existents. En funció del perfil de PFAS aquesta etapa es pot complementar amb un tractament posterior de resines d'IX per millorar la retirada dels PFAS de cadena curta. Els principals punts crítics associats a aquesta solució són la necessitat de disposar d'un pretractament robust i la possible saturació accelerada del CAG a causa de la matèria orgànica dissolta. En aquest cas pot ser necessari incrementar la freqüència de regeneració o substitució del CAG, amb el consegüent augment dels costos d'operació i manteniment. En cas que el CAG i les resines presentessin una vida útil excessivament curta, es podria plantejar la instal·lació d'alternatives més costoses com són les membranes.

Taula 7. Recomanacions per a l'escenari 1. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Reforç del monitoratge. Ajust de les aportacions de cada pou i aturada dels més afectats. Compra d'aigua a altres xarxes, si és possible. Optimització del pretractament i ús temporal de CAP, si se'n confirma l'eficàcia	Instal·lació de CAG o combinació CAG+IX	La matèria orgànica pot accelerar l'exhauriment del CAG. La incorporació d'IX permetria retenir PFAS curts, però abans caldria caracteritzar els anions competidors per seleccionar i dimensionar les resines	Cal gestionar el rebuig amb gestors autoritzats. El CAG exhaurit habitualment es pot regenerar abans de procedir a substituir-lo. Les resines s'han de substituir.	Mitjà – elevat. Als costos de regeneració del CAG cal sumar-hi costos associats a l'optimització del pretractament per reduir la concentració de matèria orgànica. La incorporació d'IX augmentaria el cost

5.3.2 Escenari 2: Pous amb presència predominant de PFOS

Aquest escenari correspon a un municipi de mida petita o mitjana, amb una població compresa entre 5.000 i 20.000 habitants, que s'abasteix principalment mitjançant diversos pous. S'hi detecten diferents PFAS, amb un predomini clar del PFOS, que representa més del 80 % del total de la $\Sigma 20$ PFAS, i concentracions d'aquest paràmetre superiors a 120ng/L. Les concentracions de matèria orgànica dissolta són baixes i el sistema disposa d'una ETAP i d'una connexió a una xarxa supramunicipal.

Taula 8. Característiques de l'escenari 2.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Diversos PFAS, però el PFOS és el predominant	Concentració baixa de matèria orgànica	Diversos pous i connexió a xarxa supramunicipal	ETAP	5.000-20.000 habitants

A curt termini, cal revisar les concentracions de PFOS de cada pou i ajustar-ne les aportacions, fet que pot comportar la reducció del cabal o l'aturada temporal dels pous més afectats. També cal analitzar la viabilitat d'augmentar els volums de compra d'aigua a la xarxa supramunicipal. Es pot valorar l'ús temporal de CAP, sempre que les proves confirmen una reducció suficient i que es pugui garantir la separació i gestió posterior del carbó i dels fangs generats.

A mitjà termini, es proposa incorporar filtres de CAG com a etapa final del tractament, disposats en una o dues etapes en sèrie, en funció de la configuració de la planta i dels objectius de qualitat establerts. El predomini del PFOS, que és un PFAS de cadena llarga, i les baixes concentracions de matèria orgànica són condicions favorables per al CAG. Els principals punts crítics associats a aquesta solució són el manteniment de nivells baixos de matèria orgànica a l'aigua d'entrada, per garantir el rendiment del CAG, així com la correcta gestió del medi adsorbent, que haurà de ser regenerat o gestionat externament mitjançant gestors autoritzats.

Taula 9. Recomanacions per a l'escenari 2. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Reforç del monitoratge. Ajust de les aportacions i aturada o reducció dels pous més afectats. Increment de la compra d'aigua a la xarxa supramunicipal. Ús temporal de CAP, si se'n confirma l'eficàcia	Instal·lació de CAG	Cal controlar la matèria orgànica per garantir el rendiment del CAG	El CAG exhaurit s'ha de substituir o enviar a regeneració o reactivació tèrmica mitjançant un gestor autoritzat	Mitjà. El CAG s'integraria com a etapa final de l'ETAP, amb costos moderats d'operació

5.3.3 Escenari 3: Únic pou amb PFAS en un municipi molt petit

Aquest escenari correspon a un municipi de menys de 1.000 habitants que s'abasteix mitjançant un únic pou en el qual es detecta una mescla de PFAS de cadena llarga i curta. Les concentracions de matèria orgànica dissolta són baixes i el tractament existent es limita a una etapa de cloració, sense una ETAP pròpiament dita. La dependència d'una única captació limita considerablement les opcions de gestió operativa i augmenta la vulnerabilitat del subministrament.

Taula 10. Característiques de l'escenari 3.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Mescla de PFAS de cadena llarga i curta	Concentració baixa de matèria orgànica	Un únic pou	No hi ha ETAP, només cloració	< 1.000 habitants

A curt termini, cal reforçar el monitoratge de PFAS per caracteritzar les concentracions i el perfil de PFAS de la captació. Com que no hi ha cap font alternativa pròpia, pot ser necessari aturar temporalment el pou i garantir el subministrament mitjançant cisternes o la compra d'aigua a altres xarxes, si existeixen connexions disponibles. També es pot considerar la instal·lació d'un sistema compacte de CAG com a solució provisional.

A mitjà termini, es recomana estudiar una solució compacta i modular, basada principalment en CAG i situada abans de l'etapa de desinfecció. En cas de presència significativa de PFAS de cadena curta, es pot valorar la combinació amb una etapa d'IX, sempre que el municipi pugui assumir-ne el cost i les necessitats d'operació. També cal avaluar la possibilitat d'executar una nova captació, una opció que ha d'anar precedida d'un estudi que en confirmi la viabilitat tant en relació a la disponibilitat del recurs, com a la possible presència de PFAS.

Els principals punts crítics de l'escenari estan relacionats amb la reduïda dimensió del municipi, fet que condiciona la seva capacitat per assumir l'increment dels costos de producció de l'aigua derivats del tractament de PFAS, així com la disponibilitat de personal tècnic per garantir-ne la correcta operació. Per aquest motiu, cal valorar la contractació de suport extern per l'operació, el manteniment i la gestió dels medis esgotats.

Taula 11. Recomanacions per a l'escenari 3. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Reforç del monitoratge. Provisió temporal mitjançant cisternes o compra d'aigua a altres xarxes. Instal·lació provisional d'un sistema compacte de CAG.	Instal·lació de CAG o combinació CAG+IX, o execució d'una nova captació després d'un estudi de viabilitat	Cal garantir la correcta operació i el manteniment del tractament instal·lat, pel que cal valorar la contractació de suport tècnic extern. En cas d'incorporar IX caldria caracteritzar prèviament els anions competidors per seleccionar i dimensionar les resines	Cal gestionar el rebuig amb gestors autoritzats. El CAG exhaurit habitualment es pot regenerar abans de procedir a substituir-lo. Les resines s'han de substituir.	Mitjà–elevat. Pot ser especialment rellevant per habitant i pot incloure la contractació d'assistència tècnica externa. La incorporació d'IX augmentaria el cost

5.3.4 Escenari 4: Captació superficial amb PFAS i elevada càrrega orgànica

Aquest escenari correspon a un municipi de 1.000-5.000 habitants que s'abasteix mitjançant diverses fonts i una captació superficial en una riera. La captació de la riera presenta una mescla de PFAS de cadena llarga i curta i concentracions elevades de matèria orgànica dissolta. La infraestructura existent consisteix en una ETAP amb coagulació, floculació, decantació i filtració amb sorra, però sense cap etapa específica per a la retirada de PFAS.

Taula 12. Característiques de l'escenari 4.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Mescla de PFAS de cadena llarga i curta	Concentració alta de matèria orgànica	Captació superficial (fonts i riera)	ETAP completa i filtració amb sorra	1.000-5.000 habitants

En aquest escenari, la captació de la riera és l'única que presenta concentracions de PFAS superiors al valor paramètric. Cal analitzar si la contaminació pot estar relacionada amb abocaments o activitats situades aigües amunt, per la qual cosa és necessari posar el cas en coneixement de l'ACA. A curt termini cal reforçar el monitoratge per caracteritzar les concentracions i el perfil de PFAS, i analitzar la variació de la terbolesa i de la matèria orgànica dissolta durant els diferents períodes hidrològics i episodis de pluja. A més, cal adoptar solucions per garantir el subministrament d'aigua apta, com augmentar l'aportació de les fonts no afectades -si és tècnicament viable-, per compensar l'aturada temporal o la reducció de l'aigua captada de la riera. Si aquesta mesura no és suficient, es pot valorar l'ús temporal de CAP, especialment quan predominin els PFAS de cadena llarga, així com optimitzar els processos de coagulació i floculació existents per reduir el contingut de matèria orgànica dissolta.

A mitjà termini, es proposa incorporar una etapa de CAG després dels filtres de sorra. Si hi ha una presència significativa de PFAS de cadena curta i el CAG no permet assolir els objectius de qualitat, es pot valorar una etapa posterior d'IX. El principal punt crític associat a aquest escenari és la variabilitat de la qualitat de l'aigua i els episodis torrencials, que poden incrementar la terbolesa i la matèria orgànica dissolta, i afectar el rendiment i la vida útil del CAG. Per tant, cal establir criteris d'operació que permetin modificar o aturar la captació de la riera (i augmentar la de les fonts) en situacions desfavorables. Cal fer un seguiment més intensiu del sistema i preveure la regeneració o substitució del CAG quan sigui necessari, així com de les resines d'IX si s'han instal·lat.

Taula 13. Recomanacions per a l'escenari 4. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Reforç del monitoratge. Increment de l'aportació de les fonts no afectades. Reducció o aturada de la captació superficial. Optimització del pretractament i possible ús temporal de CAP	Instal·lació de CAG o combinació CAG+IX	La variabilitat de la terbolesa, les partícules i la matèria orgànica pot reduir el rendiment i la vida útil dels medis adsorbents	Cal gestionar el rebuig amb gestors autoritzats. El CAG exhaurit habitualment es pot regenerar abans de procedir a substituir-lo. Les resines s'han de substituir.	Mitjà-elevat. Als costos de regeneració del CAG cal sumar-hi costos associats a l'optimització del pretractament i una possible freqüència més elevada de reposició de medis. La incorporació d'IX augmentaria el cost

5.3.5 Escenari 5: Presència de PFAS de cadena curta en alguns pous

Aquest escenari correspon a un sistema de subministrament amb quatre pous, dos dels quals presenten una contaminació persistent per PFAS de cadena curta. Les concentracions de matèria orgànica dissolta són baixes, fet que és favorable per als tractaments d'adsorció i de membrana. La infraestructura existent es limita a una etapa de cloració, sense ETAP, en un municipi amb una població compresa entre 1.000 i 5.000 habitants. El perfil químic dominat per PFAS de cadena curta redueix l'eficiència i la vida útil esperable del CAP i del CAG en comparació amb els compostos de cadena llarga.

Taula 14. Característiques de l'escenari 5.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Predomini de PFAS de cadena curta	Concentració baixa de matèria orgànica	4 pous, 2 dels quals afectats per PFAS	Sense ETAP, només cloració	1.000-5.000 habitants

A curt termini, és prioritari reforçar el monitoratge i maximitzar l'ús dels pous no afectats per compensar l'aturada temporal o la reducció de les aportacions dels dos pous contaminats. Aquesta estratègia permet limitar l'exposició sense implantar immediatament un tractament complex, tot mantenint un control analític que garanteixi el compliment dels valors paramètrics.

A mitjà termini, es pot valorar el tancament definitiu dels pous afectats, l'execució de noves captacions o el tractament selectiu de l'aigua procedent dels dos pous contaminats. Les opcions de tractament poden incloure resines d'IX o membranes de NF (l'OI podria comportar costos massa elevats per a un municipi d'aquesta dimensió). Per a la instal·lació de membranes de NF caldria analitzar prèviament la viabilitat de la gestió dels corrents de rebuig concentrats amb PFAS amb el gestor del sistema de sanejament, i estudiar la necessitat d'incorporar un pretractament abans de l'entrada de l'aigua a les membranes. Les resines d'IX serien una opció en principi menys costosa que les membranes de NF, especialment si operen en bones condicions i s'evita una saturació massa ràpida de les resines. La capacitat del municipi per assumir l'increment dels costos de producció de l'aigua (que poden incloure la contractació de personal tècnic especialitzat) és un punt crític a l'hora de valorar les diferents opcions disponibles a mitjà termini.

Taula 15. Recomanacions per a l'escenari 5. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Reforç del monitoratge. Aturada o reducció dels pous afectats i increment de l'ús dels pous no afectats	Execució de noves captacions o tractament de l'aigua dels pous afectats mitjançant IX o NF	El tractament amb carbó actiu és generalment poc eficaç en l'adsorció de PFAS de cadena curta i la ruptura és ràpida. Cal comparar IX i membranes i realitzar un estudi de viabilitat de cadascun	Les resines exhaurides s'han de gestionar mitjançant un gestor autoritzat. Les membranes generen un corrent líquid concentrat que requereix una via de gestió prèviament definida i autoritzada	Elevat, en relació a la mida del municipi. El tractament selectiu només dels pous afectats pot reduir el cost global

5.3.6 Escenari 6: ETAP amb CAG davant d'una hipotètica regulació més estricta de PFAS

Aquest escenari analitza les implicacions d'una possible evolució del marc normatiu cap a valors paramètrics més exigents a mitjà o llarg termini. Es considera un municipi de mida mitjana, amb una població compresa entre 5.000 i 20.000 habitants, que s'abasteix mitjançant diversos pous situats en un mateix aquífer. La contaminació per PFAS és persistent i no puntual, i l'ETAP disposa de coagulació, floculació, decantació i CAG.

Taula 16. Característiques de l'escenari 6.

Perfil químic dels PFAS	Característiques de l'aigua	Fonts de subministrament	Infraestructura de tractament existent	Dimensió del municipi
Mescla de PFAS de cadena llarga i curta	Concentració baixa de matèria orgànica	Diversos pous en un mateix aquífer	ETAP amb coagulació, floculació, decantació i CAG	5.000-20.000 habitants

Encara que l'ETAP ja disposa d'un tractament de CAG que retira PFAS, aquest sistema podria ser insuficient davant d'eventuals límits més exigents o si es requerís una retirada més elevada dels compostos de cadena curta. En primer lloc, cal revisar el rendiment del CAG existent a l'ETAP mitjançant l'anàlisi de les concentracions de PFAS a l'entrada, entre les diferents unitats i a la sortida del tractament. També cal comprovar si hi ha marge per optimitzar el temps de contacte, el règim d'operació, la configuració de les columnes o la freqüència de substitució del carbó.

Si el tractament fos insuficient, es podria incorporar una etapa posterior d'IX, NF o OI. La combinació CAG+IX presenta una bona cobertura per PFAS de cadena llarga i curta, mentre que les combinacions CAG+NF i CAG+OI presenten millors cobertures però a un cost superior (en tots els casos es recomana mantenir el CAG existent). Per a la instal·lació de membranes caldria analitzar prèviament la viabilitat de la gestió dels corrents concentrats amb el gestor del sistema de sanejament. En cas que fos possible instal·lar tractaments de membrana, l'eficiència d'eliminació de PFAS de l'OI sol ser millor, però també presenta costos superiors als de la NF.

Taula 17. Recomanacions per a l'escenari 6. Es mostra una estimació de costos orientativa que pot variar en funció de les característiques del sistema i de la seva implantació.

Actuacions a curt termini	Solució estructural a mitjà termini	Consideracions específiques	Rebuig de la nova tecnologia	Cost de la nova tecnologia
Revisió del rendiment i de les possibilitats d'optimització del CAG	Incorporació d'IX, NF o OI després del CAG	Les membranes poden assolir retencions elevades de PFAS de cadena curta, però requereixen pretractament i presenten consums energètics més elevats que les resines d'IX. També cal estudiar la disponibilitat d'espai a l'ETAP existent.	Les resines d'IX s'han de substituir i cal gestionar el rebuig amb gestors autoritzats. Les membranes generen un corrent líquid concentrat que requereix una via de gestió prèviament definida i autoritzada	Elevat o molt elevat. Inclou la inversió, l'energia, el control analític, la reposició dels medis i la gestió dels residus o concentrats

5.4 Recomanacions transversals

A curt termini: vigilància, caracterització i gestió de la contaminació

La detecció d'una concentració de PFAS en aigua de consum superior al valor paramètric requereix l'aplicació d'actuacions per restablir la qualitat de l'aigua subministrada, donant compliment al que estableix el RD3/2023, i seguint les indicacions establertes al PSA per aquestes situacions, en cas que estiguin definides (Figura 6).

Cal caracteritzar els compostos presents a l'aigua, ja que el perfil de PFAS pot aportar informació sobre l'origen de la contaminació i condicionar la selecció del tractament. Cal incrementar la freqüència de mostreig a les captacions, repetir les analítiques, i relacionar els resultats amb factors temporals com els episodis de pluja o la sequera, amb l'objectiu de determinar si es tracta d'una contaminació puntual o persistent. La situació s'ha de comunicar a l'ACA, per tal de valorar possibles actuacions orientades a determinar-ne l'abast geogràfic, així com a prevenir o reduir la contaminació a futur.

Paral·lelament, cal gestionar l'abastament per restablir la qualitat de l'aigua subministrada. Mentre no es disposi d'un tractament específic per a l'eliminació de PFAS, en aquells casos on es disposi de captacions on no hi hagi presència de PFAS, es pot complementar l'aigua de les fonts existents amb presència de PFAS amb les altres fonts disponibles exemptes d'aquesta contaminació, per assolir una dilució que permeti el compliment de la normativa sanitària d'aplicació. Així mateix es pot optar també de forma temporal per l'aportació d'aigua potable mitjançant cisternes mòbils. Per tal de garantir que les concentracions de PFAS a l'aigua potable siguin estables i per sota del valor paramètric amb la dilució proposada, caldrà realitzar analítiques dels PFAS detectats amb la periodicitat que s'estimi oportuna en cada cas a l'aigua distribuïda i, si escau, a les captacions.

Cal tenir en compte que davant d'una incidència per incompliment del valor paramètric, cal que l'operador ho comuniqui a l'autoritat sanitària indicant les mesures que adoptarà per solucionar la incidència. Així mateix, cal comunicar a l'autoritat sanitària quan es produeix un canvi en el sistema d'abastament.

Importància del pretractament i reducció de la matèria orgànica

La presència de concentracions elevades de matèria orgànica a l'aigua pot reduir l'eficiència i la vida útil dels tractaments específics per a PFAS. En el cas del carbó actiu, la matèria orgànica accelera l'exhauriment del medi adsorbent. En la NF i l'OI, les partícules, la matèria orgànica, la duresa i altres components poden afavorir l'embrutiment o la incrustació de les membranes. En les resines d'IX, determinats anions i altres components de la matriu poden competir amb els PFAS i reduir l'eficiència del medi.

Per tant, quan sigui necessari, cal optimitzar els processos existents o incorporar un pretractament que redueixi la terbolesa i/o la matèria orgànica susceptible de ser eliminada.

Adequació de la tecnologia al perfil de PFAS

Tal com s'ha exposat en el capítol 4, els PFAS de cadena llarga presenten una elevada afinitat pels processos d'adsorció, de manera que el CAG constitueix habitualment una solució eficaç per a la seva eliminació. En canvi, els PFAS de cadena curta presenten una menor eficiència d'eliminació mitjançant CAG, i poden requerir la implementació de tecnologies alternatives, com resines d'IX o processos de membrana, per assolir nivells de retenció adequats. També cal avaluar la possibilitat de combinar diferents tecnologies per superar les limitacions de cada mètode per separat. És recomanable sol·licitar als proveïdors dels medis filtrants la realització de proves específiques per valorar-ne el rendiment considerant les característiques de l'aigua a tractar. En escenaris especialment complexos, pot ser recomanable la realització de proves pilot per validar l'efectivitat de les solucions seleccionades, o comparar diferents alternatives.

Solucions adaptades a la dimensió del municipi

En municipis molt petits (<1.000 habitants), les solucions més adequades són configuracions compactes i modulars basades en CAG, fàcilment externalitzables i amb requeriments operatius reduïts. En municipis petits i mitjans (1.000–20.000 habitants) es poden integrar etapes de CAG amb la possibilitat d'implantar solucions híbrides que combinin diverses tecnologies per millorar el rendiment. En municipis més grans (>20.000 habitants), la disponibilitat d'infraestructures més desenvolupades permet optimitzar el pretractament i incorporar sistemes combinats. Aquestes diferències es deuen principalment als costos d'inversió, operació i disponibilitat de personal tècnic qualificat.

Gestió del rebuig associat al tractament dels PFAS

La gestió del rebuig és un aspecte crític que pot condicionar la viabilitat tècnica, econòmica i ambiental del tractament. Els medis adsorbents exhaurits s'han de caracteritzar i lliurar a un gestor autoritzat, que en determinarà la via de tractament en funció de l'estat físic del residu, el perfil i la concentració de PFAS, la presència d'altres contaminants i la normativa aplicable. En el cas de les tecnologies de membranes, com l'OI o la NF, la gestió del corrent de rebuig generat és un factor determinant per a la viabilitat de la instal·lació i ha de ser considerada en les primeres fases de selecció tecnològica. Entre les alternatives disponibles, es pot valorar la connexió al sistema de sanejament, condicionada per la capacitat hidràulica, els límits normatius i l'impacte operatiu, així com, en entorns costaners, la derivació a emissaris marins. En tots els casos, cal la validació prèvia de l'administració competent.

Vigilància activa dels canvis normatius i dels avenços tecnològics

El marc normatiu aplicable als PFAS pot evolucionar cap a la regulació de nous compostos i amb valors llindar més exigents, especialment per als compostos de major toxicitat. Per aquest motiu, és fonamental que els gestors dels sistemes d'abastament mantinguin una vigilància activa dels canvis normatius per poder anticipar adaptacions tècniques i operatives. D'altra banda, és previsible que les recomanacions de tractament evolucionin a futur, com a resultat dels avenços tecnològics relacionats amb la separació i destrucció dels PFAS. La recerca actual se centra en el desenvolupament de solucions capaces d'eliminar un espectre més ampli de PFAS, especialment els de cadena curta, amb major eficiència, menor cost i una reducció dels residus generats.

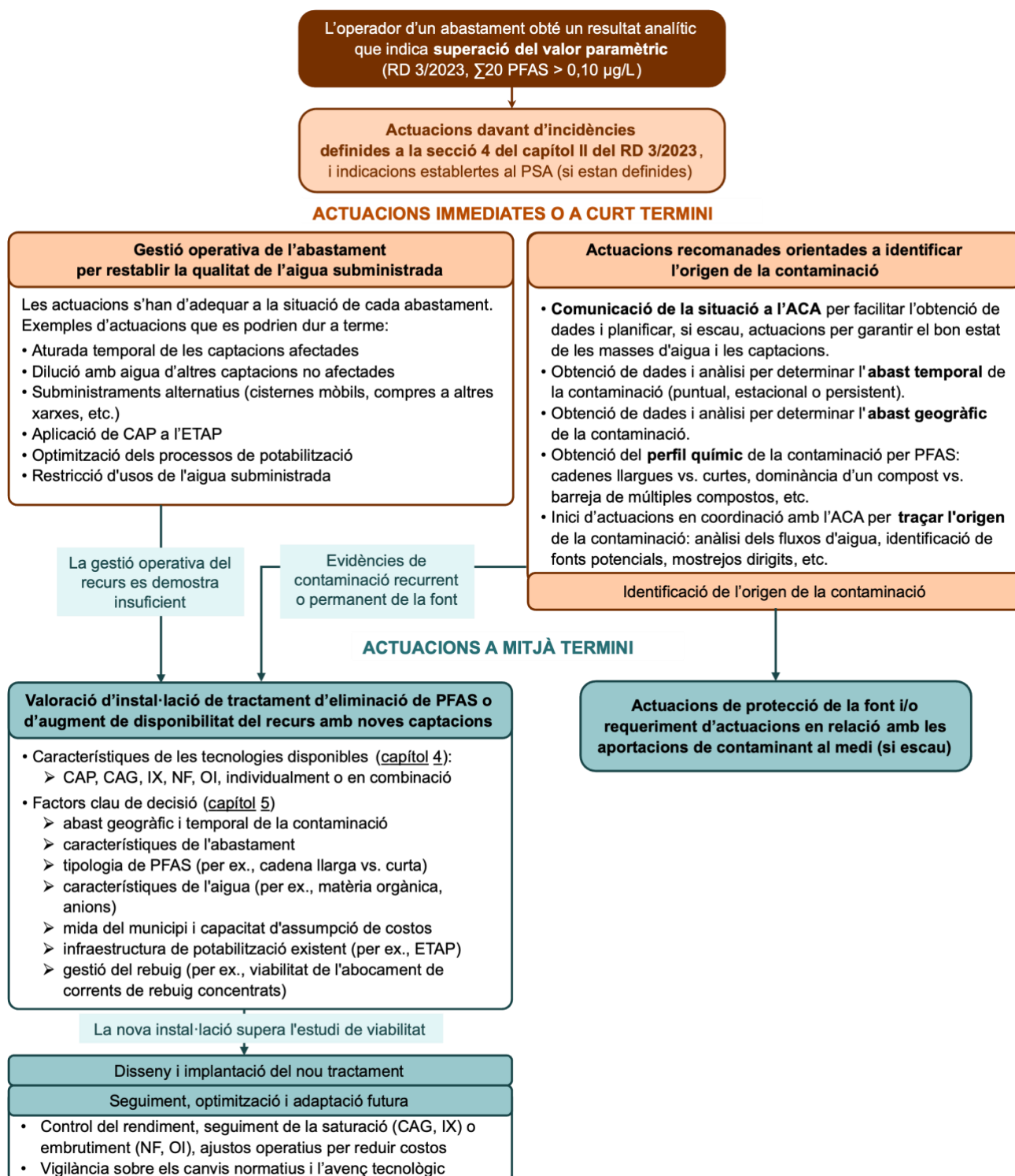


Figura 6. Esquema d'actuacions recomanades davant d'un resultat analític que indica superació del valor paramètric ($\Sigma 20$ PFAS > 0,10 µg/L) segons el RD 3/2023 en un abastament d'aigua. El diagrama mostra les actuacions presentades al llarg de la guia.

Annex A.

Metodologies d'anàlisi de PFAS

A.1 Introducció sobre l'anàlisi i quantificació de PFAS

En la majoria dels casos, les administracions i els operadors responsables dels sistemes d'abastament remetran les mostres a laboratoris externs degudament acreditats per a la seva anàlisi. En aquest escenari, el laboratori responsable facilitarà les instruccions sobre la presa de mostres, proporcionarà el material de mostreig adequat i assumirà la responsabilitat tant dels processos de concentració com de l'anàlisi instrumental.

Aquest capítol té com a objectiu presentar les bones pràctiques en l'anàlisi de PFAS i proporcionar al lector les bases per a comprendre les tasques que es duen a terme en un laboratori especialitzat. Així, la descripció de mètodes d'aquest annex pot ser útil a l'hora d'interpretar adequadament els resultats obtinguts.

A.2 Presa i preservació de les mostres

La presència ubiqua de PFAS en tot tipus de materials fa que sigui imprescindible seguir una sèrie de recomanacions per minimitzar la contaminació creuada durant el procés de presa i preservació de mostres:

- Evitar l'ús de roba que pugui contenir PFAS (p. ex., Gore-Tex® i teixits impermeabilitzats) i evitar (o minimitzar) el contacte amb les mans, emprant guants d'un sol ús de làtex o de nitril.
- Els envasos indicats per emmagatzemar i preservar les mostres són ampolles o recipients de polietilè (PE) d'alta densitat, de polietilè tereftalat (PET) o bé de polipropilè (PP). Els envasos de vidre estan contraindicats, donat que els PFAS poden adsorbir-se en la seva superfície. Pel que fa al protocol de neteja dels recipients es recomana: a) netejar amb metanol (puresa del 98 % o superior) i posteriorment amb acetona (puresa del 98 % o superior) i deixar assecar, i b) esbandir el recipient amb la mateixa aigua que s'ha de mostrejar i agitar de forma vigorosa (en cas que no contingui cap reactiu de preservació ni patrons marcats isotòpicament per a traçabilitat).
- Emplenar l'ampolla deixant un espai d'aire, en previsió de poder-la preservar al congelador sense risc de trencar l'envàs. En cas de no ser necessari congelar la mostra és millor no deixar espai d'aire.
- Les mostres d'aigua es conservaran en refrigeració a 4 ± 3 °C fins al seu tractament, durant un període que no hauria de superar els 60 dies, d'acord amb la norma UNE corresponent. En cas que es prevegi un temps de conservació superior, es recomana preservar les mostres en congelació a -20 °C. Per tal de monitoritzar la possible contaminació creuada és necessari dur una ampolla addicional emplenada amb aigua ultrapura (qualitat HPLC o equivalent) i mantenir-la oberta durant el temps del mostreig. Per tal d'assegurar-ne la validesa, cal que aquesta mostra control ("blanc de camp") sigui emmagatzemada, tractada i analitzada en paral·lel amb la resta de mostres. És recomanable realitzar un blanc de camp cada dia de mostreig.

A.3 Tractament de les mostres

La **Guia tècnica C/2024/4910** de la Unió Europea [47], referent als mètodes d'anàlisi per monitoritzar PFAS en aigua destinada a consum humà, contempla dues metodologies per a determinar les concentracions de PFAS: l'anàlisi per injecció directa (EN 17892:2024 part A) i la injecció d'un extracte enriquit mitjançant extracció en fase sòlida (EN 17892:2024 part B). Adoptar una metodologia o una altra és una decisió que cal prendre tenint en compte la sensibilitat de la instrumentació analítica i la capacitat del laboratori de mantenir uns nivells de blanc estables (vegeu Taula 18).

Taula 18. Mètodes d'anàlisi recomanats a la Guia tècnica C/2024/4910 amb els seus avantatges i desavantatges. Els dos mètodes permeten determinar la "Suma de PFAS" del RD 3/2023.

	Avantatges	Desavantatges
Anàlisi per injecció directa (EN 17892:2024 part A)	Poca manipulació de la mostra i temps d'anàlisi curt	LQ més elevats i més risc de no assolir els mínims LQ recomanats
Extracció en fase sòlida (SPE) (EN 17892:2024 part B)	LQ baixos	Major manipulació de la mostra i risc de contaminació

D'acord amb la guia C/2024/4910, l'anàlisi dels 20 PFAS s'ha de realitzar amb un mètode que ofereixi **límits de quantificació (LQ) $\leq 1,5 \text{ ng/L}$** per a cada compost individual, i, si és possible, un LQ encara millor per a PFHxS, PFOS, PFOA i PFNA. També es recomana prescindir de filtració prèvia, ja que podria introduir contaminació creuada a través del filtre i podria esbiaixar la lectura final per la retenció de PFAS al filtre, especialment d'aquells compostos amb cadenes de més de 8 carbonis.

La Taula 19 recull un exemple de pretractament de la mostra per a l'anàlisi mitjançant injecció directa, així com un mètode d'extracció per SPE en cas de ser necessària una preconcentració per assolir els LQ requerits. El procediment és vàlid per als 20 compostos diana del RD 3/2023 i és extensible a altres substàncies amb cadenes d'entre 2 i 18 carbonis, incloent-hi nous contaminants emergents com són el TFA, l'ADONA i el GenX.

La possible contaminació creuada durant el procés d'extracció es monitoritza mitjançant blancs d'aigua ultrapura de grau HPLC, que s'analitzen conjuntament amb les mostres en cada tanda d'extracció amb SPE.

Taula 19. Exemples de procés de pretractament i d'extracció per a aigües de consum humà adaptat de la EN 17892:2024 part A i part B.

Pretractament per anàlisi per injecció directa segons EN 17892:2024 part A	
Pretractament per injecció directa	• Fer una dilució d'una alíquota de, per exemple, 5 mL de la mostra amb 4 ml de metanol d'alta puresa, i seguidament agitar. • A continuació, transferir 900 µL de la dilució a un vial de LC i, amb microxeringa, addicionar 100 µL de la mescla de compostos marcats isotòpicament en metanol a una concentració que permeti obtenir una concentració final situada en el punt intermedi de la corba de calibratge. • Aquest procediment permet conservar les mostres fins a 28 dies abans de la seva anàlisi. • En canvi, si es requereix una injecció directa de grans volums que comporti un percentatge final de metanol inferior al 50 %, es recomana realitzar l'anàlisi en les 24 h següents.
Preconcentració mitjançant SPE segons EN 17892:2024 part B	
Procés previ a l'extracció	Les mostres d'aigua es deixen temperar a temperatura ambient i posteriorment s'addicionen els patrons de recuperació marcats isotòpicament. Un exemple de procediment és el següent: • Addicionar 5,0 µL, amb una microxeringa, d'una mescla de patrons marcats isotòpicament en metanol, amb una concentració d'entre 1 i 2 ng/µL. • Agitar vigorosament durant 1 min. • Deixar reposar 1 hora a temperatura ambient.
Extracció en fase sòlida (SPE)	Fase estacionària C18 modificada per afavorir l'intercanvi aniónic. • Condicionar el cartutx segons les seves especificacions (en condicions de gravetat). • Extraure la mostra succionant-la a través de tubs de PEEK o metàl·lics a una velocitat de 1 mL/min (en condicions de buit). • Assecar els cartutxos com a mínim durant 30 minuts al buit. • Eluir amb 2 × 2,5 mL de NH₄OH al 0,1 % en metanol), recollint els eluats en tubs de PP (en condicions de gravetat).
Procés post-extracció	• Evaporar els eluats sota un corrent de nitrogen fins a aproximadament 200 µL, agitar amb vòrtex i transferir a un vial de cromatografia líquida (LC) equipat amb insert de PP, on s'evapora fins a sequedat. • Netejar el tub dels eluats amb 200 µL de metanol i repetir el procediment de transferència al vial de LC i evaporació dues vegades més.
Reconstituïció	• Per compostos persistents: reconstituir els extractes evaporats amb 100 µL de metanol:aigua (1:9). Conservar els vials al congelador (-20 °C) fins a l'anàlisi. • Per compostos altament mòbils: reconstituir amb 100 µL de metanol:aigua (4:6). Conservar els vials al congelador (-20 °C) fins a l'anàlisi.

A.4 Anàlisi de les mostres

a) Anàlisi instrumental

L'anàlisi instrumental dels PFAS es realitza mitjançant **cromatografia de líquids acoblada a espectrometria de masses triple quadrupol en tàndem (LC-MS/MS)** equipada amb una font d'ionització per electroesprai (ESI) en mode negatiu [48]. La separació cromatogràfica s'efectua amb una columna LC de base C18, i es recomana que tingui grups funcionals modificats per tal de millorar la separació entre isòmers funcionals.

La Taula 20 i la Taula 21 recullen configuracions i paràmetres de l'espectròmetre de masses per a l'anàlisi de PFAS persistents i emergents d'alta mobilitat.

Taula 20. Característiques de l'anàlisi instrumental.

Anàlisi de compostos objectiu / diana	
Columna cromatogràfica	- Compostos persistents: C18 modificada - Compostos considerats nous contaminants altament mòbils: Columna de mode mixt [49].
Gradient cromatogràfic	Compostos persistents: La fase mòbil emprada per al gradient cromatogràfic consta de (A) aigua 10-20 mM acetat d'amoni; i (B) metanol pur o metanol 10-20 mM acetat d'amoni per millorar la ionització (la quantitat de sal depèn de la font d'ionització). El gradient és el següent: Iniciar amb 90 % (A) durant 1 min, disminuir (A) a 10 % amb gradient durant 7 min, mantenir 10 % (A) durant 2 min, i, finalment, augmentar 90 % (A) en 1 min i mantenir isocràtic 1 min més.
Volum d'injecció i flux	<u>Volum per injecció directa</u>: entre 20 i 300 µL, depenent de les capacitats de l'equip. <u>Volum per mostres amb SPE</u>: entre 5 i 20 µL, depenent de les capacitats de l'equip. <u>Flux</u>: determinat pel diàmetre i la mida de porus de la columna, habitualment entre 0,2 i 0,5 mL/min.
Font ionització	ESI negatiu (p. ex. -2,5 kV)
Espectròmetre de masses	Triple quadrupol (QqQ) Per a cada compost és necessari disposar de dues transicions de m/z a excepció dels de 2-5 carbonis, que no en tenen. L'energia de col·lisió òptima per als fragments ve donada per cada tipus de QqQ i la seva configuració, de manera que cal optimitzar-la en cada cas.
Anàlisi de compostos sospitosos	
Espectròmetre de masses i analitzador	Alta resolució tipus Orbitrap, QToF. L'adquisició es fa en mode <i>Full scan</i> entre 100 i 1.000 Da, amb una resolució mínima de 50.000-70.000 FWHM. Quan l'equip és híbrid i disposa d'un quadrupol es recomana, en paral·lel, realitzar un <i>Data dependent scan</i> de les masses més intenses, amb una resolució mínima de 35.000 m/z FWHM.

És habitual que l'anàlisi LC-MS/MS de PFAS en mostres reals evidenciï la presència de mescles complexes d'isòmers de PFAS, en què el compost lineal (típicament majoritari) apareix conjuntament amb isòmers ramificats, de difícil resolució cromatogràfica. La nota tècnica C/2024/4910 estableix clarament que les concentracions màssiques reportades en el marc de la Directiva (UE) 2020/2184 han d'incloure la suma de tots els isòmers.

b) Prevenció de la contaminació

La contaminació provinent del procés d'anàlisi o del sistema analític es pot monitoritzar mitjançant la injecció de blancs de control formats per una mescla d'aigua:metanol (9:1). Els resultats finals s'informen després d'eliminar la contribució del sistema en cas que hi fos present.

Els principals procediments per minimitzar la contaminació del sistema analític inclouen:

- Col·locar una columna de retenció de PFAS abans del sistema d'injecció cromatogràfica. Aquestes columnes, de base C8 o C18, permeten introduir un petit retard temporal entre els PFAS procedents de la mostra (injectada a través del sistema) i els PFAS procedents del propi sistema cromatogràfic (normalment deguts a la presència de compostos al sistema de desgasificació situat abans de la injecció).
- Substituir tubs cromatogràfics i fases mòbils que continguin polímers de base fluorada (p. ex., PVDF) per tubs PEEK o metàl·lics.

Taula 21. Exemples de ió precursor i producte en funció del compost (adaptat de [48], [49])

Compost	Altament mòbil	Ió precursor (m/z)	Ió producte * (m/z)
20 PFAS del RD 3/2023			
Àcid perfluorobutanoic (PFBA)	No	213	169
Àcid perfluoropentanoic (PFPeA)	No	263	219
Àcid perfluorohexanoic (PFHxA)	No	313	269, 219
Àcid perfluoroheptanoic (PFHpA)	No	363	319, 269
Àcid perfluorooctanoic (PFOA)	No	413	369, 319
Àcid perfluorononanoic (PFNA)	No	463	419, 369
Àcid perfluorodecanoic (PFDA)	No	513	469, 419
Àcid perfluoroundecanoic (PFUnDA)	No	563	519, 469
Àcid perfluorododecanoic (PFDoDA)	No	613	569, 519
Àcid perfluorotridecanoic (PFTrDA)	No	663	619, 569
Àcid perfluorobutanosulfònic (PFBS)	No	299	80, 99
Àcid perfluoropentanosulfònic (PFPeS)	No	349	80, 99
Àcid perfluorohexanosulfònic (PFHxS)	No	399	80, 99
Àcid perfluoroheptanosulfònic (PFHpS)	No	449	80, 99
Àcid perfluorooctanosulfònic (PFOS)	No	499	80, 99
Àcid perfluorononanosulfònic (PFNS)	No	549	80, 99
Àcid perfluorodecanosulfònic (PFDS)	No	599	80, 99
Àcid perfluoroundecanosulfònic (PFUnDS)	No	649	80, 99
Àcid perfluorododecanosulfònic (PFDoDS)	No	699	80, 99
Àcid perfluorotridecanosulfònic (PFTrDS)	No	749	80, 99
Altres PFAS d'interès			
Àcid 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorohexanosulfònic (4:2 FTS)	No	327	307
Àcid 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctanosulfònic (6:2 FTS)	No	427	407
Àcid 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecanosulfònic (8:2 FTS)	No	527	507
HFPO-DA (GenX) **	Sí	329	285, 185, 169
Àcid trifluoroacètic (TFA) **	Sí	113	69
Àcid perfluoropropiònic (PFPrA) **	Sí	163	119
Àcid perfluorometanosulfònic (PFMS) **	Sí	149	119
Àcid perfluoroetanosulfònic (PFEtS) **	Sí	199	169
Àcid perfluoropropanosulfònic (PFPrS) **	Sí	249	169
Àcid 4,8-dioxa-3H-perfluorononanoic (ADONA) **	Sí	377	251

*Cal optimitzar per cada espectròmetre de masses. **Compostos altament mòbils que no es poden analitzar amb la mateixa metodologia que els persistents.

c) Quantificació de les mostres

La quantificació es realitza mitjançant recta de calibratge fortificada amb patrons interns o mitjançant dilució isotòpica, utilitzant el patró intern de recuperació en cada mostra. En ambdós casos, la normalització dels resultats es fa respecte del patró intern de recuperació marcat isotòpicament. Pel que fa als isòmers ramificats, tot i que existeixen alguns patrons isomèricament purs, s'accepta que la seva quantificació es dugui a terme a partir de la recta de calibratge de l'isòmer lineal, assumint que tots els isòmers tenen una fragmentació i un factor de resposta instrumental equiparables. A l'hora de calcular la $\Sigma 20$ PFAS requerida en el RD 3/2023, s'ha de tenir en compte que els valors que queden per sota del límit de quantificació computen com a zero en el sumatori.

d) Anàlisi de compostos sospitosos

L'anàlisi de compostos sospitosos es fa mitjançant cribratge amb cromatografia de líquids acoblada a espectrometria de masses d'alta resolució (LC-HRMS) (vegeu alguns detalls de configuració a la Taula 20). Les dades obtingudes es processen amb programari especialitzat.

A.5 Determinació del PFAS total

El paràmetre “PFAS total” mesura la totalitat de totes les substàncies per- i polifluorades presents en una mostra, incloent-hi els perfluorats de cadena ultracurta, com el TFA. El resultat de la determinació de PFAS total és, per tant, superior al paràmetre $\Sigma 20$ PFAS.

Aquest paràmetre està recollit a la Directiva (UE) 2020/2184 però no ha estat transposat a la legislació espanyola (RD 3/2023), que opta pel sumatori de 20 PFAS com a paràmetre indicador. Per tant, actualment no és obligatori monitoritzar “PFAS total” a l'aigua de consum.

En cas que se'n decideixi la determinació, la guia tècnica C/2024/4910 recomana reportar-lo a partir de la suma de dues anàlisis diferenciades:

1. Anàlisi dirigida del TFA.
2. Anàlisi inespecífica de substàncies orgàniques fluorades mitjançant un dels tres mètodes no dirigits següents:
 - i. Anàlisi del total de precursors de perfluorats oxidables (*TOP assay*).
 - ii. Extracció de molècules orgàniques fluorades seguides de cromatografia iònica amb combustió.
 - iii. Anàlisi semiquantitativa de sospitosos fluorats mitjançant espectrometria de masses d'alta resolució.

Finalment, es recomana la determinació específica del trifluoroacetat (TFA) mitjançant mètodes dirigits, atesa la seva elevada ubiqüitat en el medi. Cal tenir en compte, però, que cap dels procediments analítics no dirigits esmentats garanteix una quantificació robusta del TFA, de manera que els resultats obtinguts amb aquests mètodes s'han d'interpretar amb cautela i no poden considerar-se com a referència quantitativa. En aquest context, la comparació entre mètodes pot ser útil a efectes qualitatius o de coherència general, però la quantificació fiable del TFA requereix l'ús de mètodes dirigits. Cadascuna de les metodologies disponibles presenta avantatges i limitacions en termes de robustesa, reproductibilitat i risc d'infraestimació o sobreestimació dels resultats.

Annex B.

Tecnologies innovadores en desenvolupament

B.1 El desenvolupament d'alternatives tecnològiques

La creixent evidència sobre la persistència ambiental dels PFAS i els seus efectes adversos en els ecosistemes i la salut humana ha impulsat la recerca de tecnologies de tractament que donin resposta a la problemàtica actual. Mentre que el capítol 4 es dedica a les tecnologies amb capacitat d'implementació a gran escala, existeix un conjunt de solucions en fase d'estudi que encara no disposen del **nivell de maduresa tecnològica** (TRL, de l'anglès "Technology Readiness Level") suficient per a l'ús industrial. En aquest capítol es repassen les tendències emergents i les metodologies d'eliminació de PFAS més prometedores.

La recerca actual se centra a desenvolupar sistemes capaços de tractar un ventall més ampli de PFAS -els compostos de cadena curta són especialment difícils d'eliminar-, que siguin més eficients i econòmics, i que generin menys residus. Entre les vies de desenvolupament en el tractament de PFAS per a la potabilització de l'aigua, es distingeixen dos grans grups de tecnologies: les de separació (o concentració) i les de destrucció (vegeu Taula 22).

Taula 22. Principals tècniques d'eliminació de PFAS de l'aigua, distingint les tecnologies de separació de les de destrucció, i les tecnologies consolidades a escala industrial (Nivell de Maduresa Tecnològica -o TRL- alt, en turquesa, detallades en el capítol 4) de les tecnologies en desenvolupament (TRL mitjà, en taronja). Adaptat de [50].

Tecnologies de separació L'objectiu és la retenció dels PFAS en una fase sòlida o la concentració en un corrent reduït	• Adsorció amb carbó actiu (CAG, CAP) • Intercanvi iònic (IX) • Membranes de nanofiltració (NF) i d'osmosi inversa (OI) • Adsorció avançada, nanomaterials i nous separadors: grafè, estructures polimèriques funcionals, estructures metal-orgàniques, fraccionament d'escumes, etc.
Tecnologies de destrucció L'objectiu és la degradació química dels PFAS mitjançant la ruptura de l'enllaç carboni-fluor	• Oxidació electroquímica (ELOX): degradació mitjançant oxidació indirecta, en què les espècies reactives d'oxigen generades reaccionen amb els PFAS o per oxidació anòdica directa. • Tractament hidrotermal alcalí (HALT): degradació en condicions d'aigua subcrítica, amb alta pressió, alta temperatura i pH elevat, i mitjançant l'ús d'un àlcali (per ex. NaOH). • Oxidació en aigua supercrítica (SCWO): degradació en condicions d'aigua supercrítica i en presència d'un agent oxidant, amb diversos processos involucrats (oxidació, piròlisi, polimerització, deshidratació, isomerització, hidròlisi i catàlisi). • Oxidació sonoquímica: degradació per reacció amb espècies reactives d'oxigen, generades pel procés de cavitació acústica, conjuntament amb altes temperatures i pressions. • Plasma: degradació mitjançant electrons energitzats que actuen com a espècies oxidants i reductores. • Altres

Entre les **tecnologies de separació** es troben les principals solucions comercials disponibles actualment per al tractament de PFAS en aigua potable, tot i que presenten certs desavantatges. Els processos de membrana d'alta pressió són efectius per separar una gran varietat de PFAS [51], però generen corrents concentrats difícils de tractar. D'altra banda, l'adsorció amb carbó actiu i l'intercanvi iònic poden presentar limitacions en l'eliminació de PFAS de cadena curta [52]. En els últims anys, el disseny de nous adsorbents d'alta eficiència, alguns dels quals permeten la regeneració i reutilització, ha experimentat un progrés notable [53]. Aquests materials es caracteritzen, en general, per una estructura porosa i una elevada afinitat química per als PFAS. Els materials polimèrics funcionals destaquen especialment per la seva afinitat d'adsorció i elevat rendiment, mentre que els adsorbents d'origen natural, com ara zeolites i argiles, ofereixen una solució robusta, amb bona capacitat de retenció i atractiva des del punt de vista de la sostenibilitat.

El repte associat a la gestió dels residus i dels corrents concentrats ha impulsat la recerca en tecnologies capaces de destruir de manera efectiva aquests compostos. Malgrat això, actualment no existeix cap **tecnologia de destrucció** amb un grau de maduresa suficient que permeti aplicar la desfluoració de PFAS directament en el corrent principal d'aigua potable. No obstant això, les tecnologies destructives sí que es podrien utilitzar per tractar altres tipus d'aigües contaminades amb PFAS (com ara aigües residuals industrials) i, especialment, concentrats provinents de processos de separació convencionals, com membranes o resines d'intercanvi iònic (Figura 7).

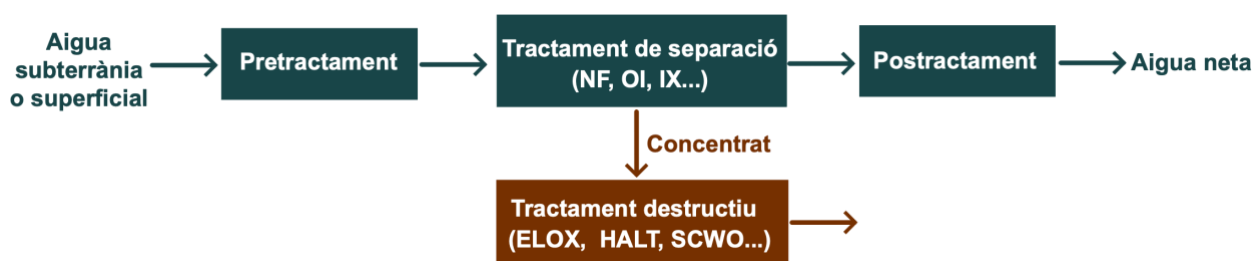


Figura 7. Tren de tractament que combina separació i destrucció del concentrat.

D'entre les tecnologies amb un TRL mitjà-alt que semblen més prometedores per a la potabilització de l'aigua en un futur destaquen l'oxidació electroquímica (ELOX), el tractament hidrotermal alcalí (HALT) i l'oxidació en aigua supercrítica (SCWO). Aquestes tecnologies s'analitzen en profunditat a les seccions B.2-B.4. Altres tecnologies destructives presenten nivells de maduresa tecnològica més baixos, com ara l'oxidació sonoquímica, el plasma, l'oxidació fotoquímica i diversos processos avançats de reducció (p. ex., UV + persulfat o la fotòlisi directa de l'aigua mitjançant radiació ultraviolada). La Taula 23 recull els avantatges i inconvenients de les principals tecnologies de destrucció a partir dels estudis publicats.

Taula 23. Avantatges i inconvenients de diversos mètodes de tractament emergents per a l'eliminació de PFAS i principals referències bibliogràfiques. S'han exclòs altres tecnologies innovadores atès el seu baix grau de maduresa tecnològica, el seu ús encara incipient o la manca d'assajos verificables a escala pilot.

	Avantatges	Inconvenients
Degradació tèrmica i incineració [54]	• Eliminació dels PFAS de cadena llarga (~100 %). • Instal·lacions potencials àmpliament disponibles i ja utilitzades.	• Possible formació de productes de degradació tòxics i emissions de gasos tòxics en cas d'incineració incompleta (p. ex. a temperatura baixa). • Alt consum energètic.
Oxidació electroquímica (ELOX) [55], [56], [57], [58]	• Alta eficàcia de destrucció de PFAS de cadena llarga (>99 %). • Eficient tant en corrents concentrats com diluïts. • Operació en unitats modulars i alta escalabilitat del sistema.	• Eliminació menys eficient de PFAS de cadena curta (30-65 %). • Alt cost dels elèctrodes. • Possible formació de subproductes tòxics en presència de clorur. • Possible formació de PFAS de cadena curta.
Tractament hidrotermal alcalí (HALT) [50], [59], [60], [61], [62]	• Alta eficàcia de destrucció de PFAS de cadena llarga, curta i ultracurta (80-99 %). • Alta taxa de desfluoració. • Possible operació en condicions d'alta salinitat.	• Corrosió del reactor per les dures condicions. • Necessitat de neutralització del pH després del tractament, i, en alguns casos, també de dessalinització. • Alt consum d'energia. • Necessitat d'eliminació de subproductes secundaris.
Oxidació en aigua supercrítica (SCWO) [63], [64], [65], [66]	• Alta eficàcia de destrucció de PFAS de cadena llarga i curta (~100 %). • Temps de tractament curts.	• No viable econòmicament per a grans volums. • Alt consum d'energia. • Principalment en mode discontinu. • Acidifica l'aigua tractada. • Corrosió del reactor. • Precipitació de sals.
Degradació sonoquímica (o sonolítica) [67], [68], [69]	• Eficàcia de destrucció de PFAS de cadena llarga i curta (57-100 %). • Aplicable en sòls i líquids. • Eficaz amb concentracions elevades de PFAS. • No calen reactius químics.	• Alt consum d'energia. • L'ampliació a gran escala és un repte. • El mecanisme no es coneix bé.
Plasma no tèrmic [70], [71], [72]	• Eficàcia de destrucció de PFAS de cadena llarga i curta (70-100 %) • No calen reactius químics.	• Acidifica l'aigua tractada. • Possible formació de PFAS de cadena curta. • Calen temps de tractament més llargs per a PFAS de cadena curta. • El mecanisme no es coneix bé.

B.2 Oxidació electroquímica (ELOX)

L'oxidació electroquímica (ELOX) és un procés en què els contaminants orgànics s'oxiden a l'ànode mitjançant l'aplicació d'un corrent o potencial elèctric. Paral·lelament, al càtode té lloc una reacció de reducció que permet tancar el circuit elèctric. L'ELOX pot incloure processos d'oxidació anòdica tant directes com indirectes [73].

En l'**electròlisi directa**, els contaminants s'adsorbeixen o electroadsorbeixen a la superfície de l'elèctrode per ser degradats posteriorment. Aquest procés oxida els contaminants orgànics, provoca la ruptura de cadenes moleculars i en redueix ràpidament la massa molecular. L'oxidació directa presenta dues característiques clau: a) està limitada per la difusió, ja que depèn de l'arribada dels contaminants a la superfície de l'ànode i b) la velocitat d'oxidació depèn de l'activitat electrocatalítica del material anòdic i de la densitat de corrent aplicada.

D'altra banda, l'**electròlisi indirecta** consisteix en la degradació dels contaminants en la fase aquosa mitjançant agents oxidants generats electroquímicament. Sota un corrent extern, a la superfície de l'ànode es formen espècies altament reactives derivades de l'electròlisi de l'aigua [74], com radicals hidroxil ($\text{OH}\cdot$), ozó (O_3), peròxid d'hidrogen (H_2O_2) i altres oxidants. En presència de SO_4^{2-} i Cl^- a l'aigua, també es poden formar oxidants addicionals, com el persulfat ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) i clor lliure ($\text{Cl}_2/\text{HClO}/\text{OCl}^-$) [74]. Aquestes espècies reaccionen amb els contaminants orgànics mitjançant mecanismes de transferència d'electrons, addició a dobles enllaços o obertura d'anells, promovent-ne la degradació.

En el cas dels PFAS altament persistents, el principal mecanisme de degradació electroquímica és l'electròlisi directa. Aquest procés presenta limitacions de transferència de massa, ja que la majoria de materials d'ànode disponibles són bidimensionals (2D), amb geometria de placa, i habitualment operen en reactors de flux paral·lel [75]. Entre els materials més destacats s'inclouen el diamant dopat amb bor (BDD), els ànodes MMO basats en SnO_2 i els elèctrodes de fase Magnéli.

Recentment, s'han desenvolupat elèctrodes basats en grafè [76], [77], amb estructura tridimensional (3D) i operats en mode de flux continu, que han demostrat bons resultats a escala de laboratori en corrents reals. Actualment, aquests sistemes es troben en fase de desenvolupament per assolir nivells de maduresa tecnològica més elevats.

L'ELOX també s'ha estudiat per al tractament del concentrat generat per processos de membrana. Alguns models d'optimització indiquen que una estratègia combinada d'OI per a la preconcentració i ELOX del concentrat pot reduir el cost total del tractament [78]. No obstant això, calen estudis addicionals per validar aquests resultats a escala pilot i industrial, així com per optimitzar els consums energètics i els costos d'inversió.

B.3 Oxidació en aigua supercrítica (SCWO)

L'estat d'aigua supercrítica s'assoleix quan se superen els 374 °C i els 22,1 MPa de pressió. En aquest punt, l'aigua adquireix propietats de dissolvent no polar, amb una capacitat excepcional per dissoldre gasos i substàncies orgàniques [79]. En aquest estat, la constant dielèctrica disminueix significativament i es redueix l'estabilitat dels enllaços

d'hidrogen. L'aigua supercrítica es comporta, doncs, com un dissolvent orgànic, fet que n'afavoreix la solubilitat completa i permet que les reaccions químiques tinguin lloc en una única fase, evitant les limitacions del transport de massa. A prop del punt crític, el producte iònic de l'aigua (K_w) augmenta fins a tres ordres de magnitud, incrementant notablement les concentracions de H^+ i OH^- [79]. Aquest conjunt de propietats la converteix en un medi excel·lent per a la destrucció de compostos altament persistents [80].

El tractament de PFAS mitjançant SCWO ha demostrat eficiències de degradació de fins al 100% [64], [65], [81], especialment si es manté la temperatura per sobre dels 580 °C [64], [81]. Cal destacar, però, que moltes d'aquestes eficiències s'han obtingut en estudis amb concentracions inicials elevades, superiors a les trobades habitualment en aigües ambientals, però representatives de concentrats industrials o rebuigs d'osmosi inversa. Per exemple, en una prova de concepte amb aigües impactades per escumes antiincendis (AFFF) es va observar una reducció de sis ordres de magnitud en la concentració de PFAS [65]. Un altre estudi pilot amb AFFF diluït va assolir una degradació $\geq 99,999\%$ i un 63% de recuperació de fluor [66]. En aquest cas, la degradació dels PFAS de cadena curta fou lleugerament inferior, tot i mantenir-se per sobre del 90%. A més, una comparativa de tres sistemes comercials SCWO va mostrar degradacions $> 99\%$ [63]. En un d'aquests sistemes es va recuperar més del 300% del fluor, fet que apunta a la presència de PFAS no identificats en l'aigua d'entrada.

Tot i els seus avantatges, l'SCWO presenta una adopció limitada a causa de tres factors crítics [82]. En primer lloc, la corrosió severa del reactor provocada pels àcids formats durant la desfluoració (com l'àcid fluorhídric, HF), així com per la presència de sofre (reduït a HS^-) o fòsfor (oxidat a H_3PO_4). En segon lloc, el risc d'obstrucció greu del reactor a causa de la precipitació de sals a temperatures supercrítiques i densitats baixes, un problema rellevant en corrents amb alta salinitat com els concentrats de membranes. Finalment, la manca de dades experimentals exhaustives dificulta les avaluacions econòmiques de costos i d'escalabilitat. Els costos d'inversió i operatius serien significativament més elevats que els d'altres tecnologies, especialment perquè requereix personal especialitzat que dissenyi i operi un reactor complex i per l'elevat consum elèctric per a l'arrencada del procés.

B.4 Tractament hidrotermal alcalí (HALT)

Sota condicions d'alta alcalinitat, els ions hidròxid (OH^-) poden atacar les cadenes organofluorades i provocar-ne la fragmentació, però la cinètica d'aquesta reacció és molt lenta en condicions estàndard. El procés HALT supera aquesta limitació cinètica mitjançant l'aplicació de temperatures i pressions elevades que acceleren notablement la velocitat de reacció. Aquesta tecnologia opera a pressions d'entre 50 i 200 bar i temperatures compreses entre 250 i 400 °C, utilitzant un medi fortament alcalí. L'elevada temperatura i pressió, combinades amb la presència d'ions hidròxid, afebleixen i trenquen els enllaços C–F. Els ions OH^- actuen com a nucleòfils, atacant els àtoms de carboni i provocant el desplaçament del fluor. A mesura que aquests enllaços es trenquen, les molècules de PFAS es fragmenten en compostos més petits i de cadena més curta, mentre que els àtoms de fluor alliberats es converteixen en ions fluorur (F^-). Aquestes transformacions químiques donen lloc principalment a àcids orgànics simples, CO_2 i ions fluorur. Els productes finals són molt menys perillosos que els PFAS originals, i el fluor

tendeix a formar sals solubles en el medi alcalí. Tot i això, el requisit d'un pH molt elevat implica una demanda química considerable (sovint amb l'ús de NaOH o KOH), a més de generar preocupacions sobre la corrosió dels materials del reactor a causa de la severitat de les condicions.

El procés HALT s'ha aplicat en projectes de demostració de camp per a la destrucció de PFAS en concentrats d'escuma procedents del tractament d'aigües subterrànies impactades per AFFF [83]. Els resultats van mostrar una degradació generalment eficient de PFAS catiónics, aniónics i zwitteriònics, amb reduccions fins a nivells no detectables en 90 minuts (utilitzant NaOH 5 M a 350 °C). Tot i això, alguns compostos (principalment els PFSA de cadena curta) es van mostrar més recalcitrants a aquest tractament.

B.5 Conclusions i perspectives

Els PFAS de cadena llarga, com l'àcid perfluorooctanosulfònic (PFOS) i l'àcid perfluorooctanoic (PFOA), estan classificats com a substàncies perilloses i el seu ús està severament restringit o prohibit. En conseqüència, la indústria ha desplaçat la producció cap als PFAS de cadena curta com a alternativa. No obstant això, aquests compostos representen un repte significatiu per a les tecnologies actuals, tant de separació com de destrucció.

L'aplicabilitat pràctica de les tecnologies de tractament d'aigua depèn de la seva capacitat tècnica i de la seva viabilitat econòmica en implementacions a gran escala. Avui dia, no existeix cap tecnologia de destrucció de PFAS plenament madura per al tractament d'aigua potable a escala real. Malgrat el potencial de mètodes com l'ELOX, l'SCWO o el HALT, aquests encara presenten consums d'energia o de reactius excessius, o bé no són viables per a processos de tractament en continu amb els cabals habituals d'una ETAP. A més, cal considerar que els rendiments obtinguts en estudis de laboratori no sempre es tradueixen directament a escenaris reals, ja que la presència de matèria orgànica natural i d'altres components inorgànics en l'aigua pot interferir negativament en l'eficiència dels sistemes de destrucció.

En aquest context, les oportunitats de mercat han impulsat no només la recerca acadèmica, sinó també l'aparició d'un teixit dinàmic d'empreses emergents, sovint finançades amb capital de risc. Aquestes iniciatives solen proposar solucions basades en tecnologies sota patent (o de propietat industrial exclusiva) o en combinacions complexes de diverses etapes de tractament. Tot i que aquest ecosistema d'innovació és positiu i necessari, cal mantenir una actitud prudent i crítica davant de propostes que prometen eficiències molt elevades sense disposar d'una validació tècnica sòlida, independent i a escala pilot o industrial.

Referències

- [1] R. C. Buck *et al.*, «Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins», *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 7, núm. 4, pp. 513-541, oct. 2011, <https://doi.org/10.1002/ieam.258>.
- [2] Interstate Technology & Regulatory Council, «PFAS: Technical and regulatory guidance document», ITRC, 2023. [En línia]. Disponible a: <https://pfas-1.itrcweb.org>
- [3] M. Z. Niegowska, P. Pretto, R. E. Porcel, D. Marinov, L. Ceriani, i T. Lettieri, «Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) of possible concern in the aquatic environment», JRC Publications Repository. Consulta: 14 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125254>
- [4] J. L. Domingo i M. Nadal, «Human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) through drinking water: A review of the recent scientific literature», *Environ. Res.*, vol. 177, p. 108648, oct. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108648>.
- [5] HBM4EU, «PFAS substance report», European Human Biomonitoring Initiative (HBM4EU), 2022. Consulta: 14 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2022/07/PFAS_Substance-report.pdf
- [6] E. M. Sunderland, X. C. Hu, C. Dassuncao, A. K. Tokranov, C. C. Wagner, i J. G. Allen, «A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects», *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 29, núm. 2, pp. 131-147, març 2019, <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>.
- [7] World Health Organization (WHO), «PFOS and PFOA in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Version for public review.», Geneva, 2022.
- [8] S. Zahm *et al.*, «Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid», *Lancet Oncol.*, vol. 25, núm. 1, pp. 16-17, gen. 2024, [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8).
- [9] Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance), vol. 435. 2020. Consulta: 17 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>
- [10] 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. 2023. [En línia]. Disponible a: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2023/BOE-A-2023-628-consolidado.pdf>
- [11] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, vol. 327. 2000. Consulta: 17 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>
- [12] Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de agosto de 2013, por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas Texto pertinente a efectos del EEE, vol. 226. 2013. Consulta: 17 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/39/oj>
- [13] Directiva (UE) 2026/805 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de marzo de 2026, por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, la Directiva 2006/118/CE relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro y la Directiva 2008/105/CE relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas (Texto pertinente a efectos del EEE). [En línia]. Disponible a: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202600805
- [14] Agència Catalana de l'Aigua (ACA), «Annex 10 del Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya. 2022-2027». [En línia]. Disponible a: https://info.aca.gencat.cat/ca/aca/informacio/geco/plans-programes/PDG/CA/01-10_Annex10_Valors_Llindars_MASubt.pdf
- [15] World Health Organization, «Request for data on PFAS». Consulta: 30 de abril de 2026. [En línia]. Disponible a: <https://www.who.int/news-room/articles-detail/request-for-data-on-pfas>
- [16] Institut d'Estadística de Catalunya (Idescat), «Indicadors bàsics de Catalunya. Subministrament d'aigua potable.» 2025. [En línia]. Disponible a: <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=basics&n=10540>
- [17] «Estat de les reserves d'aigua als embassaments», Agència Catalana de l'Aigua. Consulta: 12 de febrer de 2026. [En línia]. Disponible a: <http://aca.gencat.cat/ca/laigua/estat-del-medi-hidric/recursos-disponibles/estat-de-les-reserves-daigua-als-embassaments/>
- [18] Environment Agency, «Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS): sources, pathways and environmental data», 2021.

- [19] J. Liu i J. A. Charbonnet, «A Critical Review of PFAS Analysis, Occurrence, and Fate in Wastewater Treatment Plants», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 59, núm. 48, pp. 25492-25517, des. 2025, <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c09949>.
- [20] C. Sáez *et al.*, «Occurrence and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in an urban aquifer located at the Besòs River Delta (Spain)», *Environ. Pollut.*, vol. 358, p. 124468, oct. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124468>.
- [21] A. Cordner *et al.*, «PFAS Contamination in Europe: Generating Knowledge and Mapping Known and Likely Contamination with “Expert-Reviewed” Journalism», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, núm. 15, pp. 6616-6627, abr. 2024, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09746>.
- [22] X. C. Hu *et al.*, «Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 3, núm. 10, pp. 344-350, oct. 2016, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00260>.
- [23] M. López de Alda *et al.*, «PROMISCES D2.2 – Characterization of PFAS and chlorinated solvent contamination in two aquifers in Spain», feb. 2023, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15282237>.
- [24] J. L. Roscales *et al.*, «Levels and trends of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in water (2013–2020) and fish from selected riverine basins in Spain», *Chemosphere*, vol. 286, p. 131940, gen. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131940>.
- [25] J. Martínez, M. Picardo, A. Peñalver, J. Fabregas, C. Aguilar, i F. Borrull, «Occurrence and health risk assessment of PFAS and possible precursors: a case study in a drinking water treatment plant and bottled water (south Catalonia, Spain)», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, núm. 45, pp. 56536-56549, set. 2024, <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34805-6>.
- [26] D. Cserbik *et al.*, «Human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and other emerging contaminants in drinking water», *Npj Clean Water*, vol. 6, núm. 1, p. 16, març 2023, <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00236-y>.
- [27] O. Quiñones i S. A. Snyder, «Occurrence of Perfluoroalkyl Carboxylates and Sulfonates in Drinking Water Utilities and Related Waters from the United States», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, núm. 24, pp. 9089-9095, des. 2009, <https://doi.org/10.1021/es9024707>.
- [28] M. W. Pannu, J. Chang, R. Medina, S. A. Grieco, M. Hwang, i M. H. Plumlee, «Comparing PFAS removal across multiple groundwaters for eight GACs and alternative adsorbent», *AWWA Water Sci.*, vol. 5, núm. 3, p. e1345, 2023, <https://doi.org/10.1002/aws2.1345>.
- [29] M. Alameddine, Z. Liu, S. Sauvé, i B. Barbeau, «Comparative Assessment of Powdered versus Granular Activated Carbon for PFAS Removal in Drinking Water Treatment Plants», *ACS EST Water*, vol. 5, núm. 2, pp. 851-861, feb. 2025, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00901>.
- [30] US EPA, «Drinking Water Treatability Database (TDB)». Consulta: 15 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <https://www.epa.gov/water-research/drinking-water-treatability-database-tdb>
- [31] M. Scheurer *et al.*, «Small, mobile, persistent: Trifluoroacetate in the water cycle – Overlooked sources, pathways, and consequences for drinking water supply», *Water Res.*, vol. 126, pp. 460-471, des. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.045>.
- [32] AWWA, «Drinking Water Treatment for PFAS Selection Guide. Technical Support on Per-and Polyfluoroalkyl Substances Policy.»
- [33] M. M. Mian, J. Zhu, X. Jiang, i S. Deng, «Recent advances in activated carbon driven PFAS removal: structure-adsorption relationship and new adsorption mechanisms», *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 19, núm. 6, p. 78, abr. 2025, <https://doi.org/10.1007/s11783-025-1998-3>.
- [34] J. D. McNamara, R. Franco, R. Mimna, i L. Zappa, «Comparison of Activated Carbons for Removal of Perfluorinated Compounds From Drinking Water», *J. AWWA*, vol. 110, núm. 1, pp. E2-E14, 2018, <https://doi.org/10.5942/jawwa.2018.110.0003>.
- [35] A. Larasati, G. D. Fowler, i N. J. D. Graham, «Chemical regeneration of granular activated carbon: preliminary evaluation of alternative regenerant solutions», *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 6, núm. 8, pp. 2043-2056, jul. 2020, <https://doi.org/10.1039/D0EW00328J>.
- [36] E. Gagliano, P. P. Falciglia, Y. Zaker, T. Karanfil, i P. Roccaro, «Microwave regeneration of granular activated carbon saturated with PFAS», *Water Res.*, vol. 198, p. 117121, juny 2021, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117121>.
- [37] N. C. Birben *et al.*, «The effects of granular activated carbon heating rate and moisture content on defluorination of per- and polyfluoroalkyl substances during microwave regeneration», *Water Res.*, vol. 282, p. 123618, ago. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123618>.
- [38] M. F. Rahman, S. Peldszus, i W. B. Anderson, «Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review», *Water Res.*, vol. 50, pp. 318-340, març 2014, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.045>.
- [39] J. Zhou, N. Saeidi, L. Y. Wick, Y. Xie, F.-D. Kopinke, i A. Georgi, «Efficient removal of trifluoroacetic acid from water using surface-modified activated carbon and electro-assisted desorption», *J. Hazard. Mater.*, vol. 436, p. 129051, ago. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129051>.

- [40] T. H. Boyer *et al.*, «Anion exchange resin removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from impacted water: A critical review», *Water Res.*, vol. 200, p. 117244, jul. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117244>.
- [41] D. Banks, B.-M. Jun, J. Heo, N. Her, C. M. Park, i Y. Yoon, «Selected advanced water treatment technologies for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances: A review», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 231, p. 115929, gen. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115929>.
- [42] P. Lipp, F. Sacher, i G. Baldauf, «Removal of organic micro-pollutants during drinking water treatment by nanofiltration and reverse osmosis», *Desalination Water Treat.*, vol. 13, núm. 1, pp. 226-237, gen. 2010, <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1063>.
- [43] E. Steinle-Darling i M. Reinhard, «Nanofiltration for Trace Organic Contaminant Removal: Structure, Solution, and Membrane Fouling Effects on the Rejection of Perfluorochemicals», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, núm. 14, pp. 5292-5297, jul. 2008, <https://doi.org/10.1021/es703207s>.
- [44] H. Dickenson, E.R.V C., «Treatment Mitigation Strategies for Poly- and Perfluorinated Chemicals», Water Research Foundation, Report #4322., 2016. Consulta: 15 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <https://www.waterrf.org/research/projects/treatment-mitigation-strategies-poly-and-perfluorinated-chemicals>
- [45] LG Water Solutions Business, «PFAS Overview». [En línia]. Disponible a: <https://www.usbr.gov/research/bgndrf/win2019/LGChem-WIN-2019.pdf>
- [46] Miquel Paraira i Maria José Farré, «La problemàtica dels PFAS a les aigües. Guia per millorar la gestió als abastaments de Catalunya», Agrupació de Serveis d'Aigua de Catalunya (ASAC), 2025. [En línia]. Disponible a: https://www.asac.es/wp-content/uploads/2025/10/ASAC_PFAS.pdf
- [47] C/2024/4910, «Commission Notice – Technical guidelines regarding methods of analysis for monitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water intended for human consumption». 7 de agost de 2024. Consulta: 15 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <http://data.europa.eu/eli/C/2024/4910/oj>
- [48] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN 17892:2025 Calidad del agua. Determinación de sustancia...* Consulta: 15 de desembre de 2025. [En línia]. Disponible a: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0074233>
- [49] A. Bautista *et al.*, «Determination of persistent and mobile organic compounds in the river–groundwater interface of the Besòs river delta, Spain, using a wide extraction approach», *Chemosphere*, vol. 368, p. 143673, nov. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143673>.
- [50] C. S. Tshangana *et al.*, «Technology status to treat PFAS-contaminated water and limiting factors for their effective full-scale application», *Npj Clean Water*, vol. 8, núm. 1, p. 41, maig 2025, <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00457-3>.
- [51] R. Hasan, J. Chen, P. Mojahednia, S. H.-A. Samaei, i J. Xue, «Comparative Analysis of Commercial and Novel High-Pressure Membranes for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Removal», *Water Environ. Res.*, vol. 97, núm. 8, p. e70157, 2025, <https://doi.org/10.1002/wer.70157>.
- [52] P. McCleaf, S. Englund, A. Östlund, K. Lindegren, K. Wiberg, i L. Ahrens, «Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests», *Water Res.*, vol. 120, pp. 77-87, set. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.057>.
- [53] F. Liu, J. J. Pignatello, R. Sun, X. Guan, i F. Xiao, «A Comprehensive Review of Novel Adsorbents for Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Water», *ACS EST Water*, vol. 4, núm. 4, pp. 1191-1205, abr. 2024, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00569>.
- [54] F. Xiao *et al.*, «Thermal Stability and Decomposition of Perfluoroalkyl Substances on Spent Granular Activated Carbon», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 7, núm. 5, pp. 343-350, maig 2020, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00114>.
- [55] S. J. Smith *et al.*, «Electrochemical Oxidation for Treatment of PFAS in Contaminated Water and Fractionated Foam—A Pilot-Scale Study», *ACS EST Water*, vol. 3, núm. 4, pp. 1201-1211, abr. 2023, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00660>.
- [56] Y. Wang, R. “David” Pierce, H. Shi, C. Li, i Q. Huang, «Electrochemical degradation of perfluoroalkyl acids by titanium suboxide anodes», *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 6, núm. 1, pp. 144-152, des. 2019, <https://doi.org/10.1039/C9EW00759H>.
- [57] L. Wang, J. Lu, L. Li, Y. Wang, i Q. Huang, «Effects of chloride on electrochemical degradation of perfluorooctanesulfonate by Magnéli phase Ti4O7 and boron doped diamond anodes», *Water Res.*, vol. 170, p. 115254, març 2020, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115254>.
- [58] Q. Zhuo *et al.*, «Degradation of perfluorinated compounds on a boron-doped diamond electrode», *Electrochimica Acta*, vol. 77, pp. 17-22, ago. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.04.145>.
- [59] S. Hao, Y. J. Choi, R. A. Deeb, T. J. Strathmann, i C. P. Higgins, «Application of Hydrothermal Alkaline Treatment for Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Contaminated Groundwater and Soil», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, núm. 10, pp. 6647-6657, maig 2022, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00654>.

- [60] S. Hao, Y.-J. Choi, B. Wu, C. P. Higgins, R. Deeb, i T. J. Strathmann, «Hydrothermal Alkaline Treatment for Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Aqueous Film-Forming Foam», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, núm. 5, pp. 3283-3295, març 2021, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06906>.
- [61] C. Austin, A. L. Purohit, C. Thomsen, B. R. Pinkard, T. J. Strathmann, i I. V. Novosselov, «Hydrothermal Destruction and Defluorination of Trifluoroacetic Acid (TFA)», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, núm. 18, pp. 8076-8085, maig 2024, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09404>.
- [62] B. R. Pinkard, C. Austin, A. L. Purohit, J. Li, i I. V. Novosselov, «Destruction of PFAS in AFFF-impacted fire training pit water, with a continuous hydrothermal alkaline treatment reactor», *Chemosphere*, vol. 314, p. 137681, feb. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137681>.
- [63] M. J. Krause *et al.*, «Supercritical Water Oxidation as an Innovative Technology for PFAS Destruction», *J. Environ. Eng. N. Y.*, vol. 148, núm. 2, pp. 1-8, nov. 2021, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001957](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001957).
- [64] C. Austin, J. Li, S. Moore, A. Purohit, B. R. Pinkard, i I. V. Novosselov, «Destruction and defluorination of PFAS matrix in continuous-flow supercritical water oxidation reactor: Effect of operating temperature», *Chemosphere*, vol. 327, p. 138358, juny 2023, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138358>.
- [65] C. G. Scheitlin *et al.*, «Application of Supercritical Water Oxidation to Effectively Destroy Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Aqueous Matrices», *ACS EST Water*, vol. 3, núm. 8, pp. 2053-2062, ago. 2023, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00548>.
- [66] J. T. McDonough *et al.*, «Validation of supercritical water oxidation to destroy perfluoroalkyl acids», *Remediat. J.*, vol. 32, núm. 1-2, pp. 75-90, 2022, <https://doi.org/10.1002/rem.21711>.
- [67] R. James Wood, T. Sidnell, I. Ross, J. McDonough, J. Lee, i M. J. Bussemaker, «Ultrasonic degradation of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) correlated with sonochemical and sonoluminescence characterisation», *Ultrason. Sonochem.*, vol. 68, p. 105196, nov. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105196>.
- [68] P. R. Kulkarni *et al.*, «Field Demonstration of a Sonolysis Reactor for Treatment of PFAS-Contaminated Groundwater», *J. Environ. Eng.*, vol. 148, núm. 11, p. 06022005, nov. 2022, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002064).
- [69] N. A. Fernandez, L. Rodriguez-Freire, M. Keswani, i R. Sierra-Alvarez, «Effect of chemical structure on the sonochemical degradation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs)», *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 2, núm. 6, pp. 975-983, nov. 2016, <https://doi.org/10.1039/C6EW00150E>.
- [70] C. Nau-Hix *et al.*, «Field Demonstration of a Pilot-Scale Plasma Reactor for the Rapid Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Groundwater», *ACS EST Water*, vol. 1, núm. 3, pp. 680-687, març 2021, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00170>.
- [71] R. K. Singh *et al.*, «Rapid Removal of Poly- and Perfluorinated Compounds from Investigation-Derived Waste (IDW) in a Pilot-Scale Plasma Reactor», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, núm. 19, pp. 11375-11382, oct. 2019, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02964>.
- [72] B. R. Pinkard, S. Shetty, D. Stritzinger, C. Bellona, i I. V. Novosselov, «Destruction of perfluorooctanesulfonate (PFOS) in a batch supercritical water oxidation reactor», *Chemosphere*, vol. 279, p. 130834, set. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130834>.
- [73] A. M. Trautmann, H. Schell, K. R. Schmidt, K.-M. Mangold, i A. Tiehm, «Electrochemical degradation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater», *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.*, vol. 71, núm. 10, pp. 1569-1575, 2015, <https://doi.org/10.2166/wst.2015.143>.
- [74] J. Radjenovic i D. L. Sedlak, «Challenges and Opportunities for Electrochemical Processes as Next-Generation Technologies for the Treatment of Contaminated Water», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, núm. 19, pp. 11292-11302, oct. 2015, <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02414>.
- [75] J. Radjenovic, N. Duinslaeger, S. S. Avval, i B. P. Chaplin, «Facing the Challenge of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Water: Is Electrochemical Oxidation the Answer?», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, núm. 23, pp. 14815-14829, des. 2020, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06212>.
- [76] N. Duinslaeger, A. Doni, i J. Radjenovic, «Impact of supporting electrolyte on electrochemical performance of borophene-functionalized graphene sponge anode and degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)», *Water Res.*, vol. 242, p. 120232, ago. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120232>.
- [77] N. Duinslaeger i J. Radjenovic, «Electrochemical degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) using low-cost graphene sponge electrodes», *Water Res.*, vol. 213, p. 118148, abr. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118148>.
- [78] A. Soriano, C. Schaefer, i A. Urtiaga, «Enhanced treatment of perfluoroalkyl acids in groundwater by membrane separation and electrochemical oxidation», *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 4, p. 100042, des. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100042>.
- [79] P. E. Savage, «Organic Chemical Reactions in Supercritical Water», *Chem. Rev.*, vol. 99, núm. 2, pp. 603-622, feb. 1999, <https://doi.org/10.1021/cr9700989>.

- [80] K. D. Prasetya, S.-J. You, A. C. Ni'am, i Y.-F. Wang, «Water-based matrices thermal treatment for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A critical review on transformation mechanisms, role of radicals, and perspective towards», *J. Hazard. Mater.*, vol. 495, p. 138969, set. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138969>.
- [81] J. Li, C. Austin, S. Moore, B. R. Pinkard, i I. V. Novosselov, «PFOS destruction in a continuous supercritical water oxidation reactor», *Chem. Eng. J.*, vol. 451, p. 139063, gen. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139063>.
- [82] P. Kritzer i E. Dinjus, «An assessment of supercritical water oxidation (SCWO): Existing problems, possible solutions and new reactor concepts», *Chem. Eng. J.*, vol. 83, núm. 3, pp. 207-214, ago. 2001, [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00255-2).
- [83] S. Hao *et al.*, «Hydrothermal Alkaline Treatment (HALT) of Foam Fractionation Concentrate Derived from PFAS-Contaminated Groundwater», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, núm. 44, pp. 17154-17165, nov. 2023, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05140>.

