

AOF - Adsorbable Organic Fluorine e PFAS

Introduzione

L'analisi dei composti perfluorurati (PFAS) è diventata di primaria importanza a causa delle problematiche ambientali e sanitarie legate a questi contaminanti. I PFAS sono composti chimici persistenti che si trovano in molti prodotti industriali e beni di consumo, ma il loro impatto a lungo termine sull'ambiente e sulla salute umana è ancora oggetto di studio.

Nel corso degli ultimi anni sono stati realizzati numerosi studi e pubblicazioni accademiche finalizzate alla verifica delle contaminazioni da PFAS mediante la verifica delle singole molecole chimiche ma un notevole cambiamento nella conoscenza delle possibili contaminazioni potrebbe derivare dal monitoraggio del parametro chimico **AOF (Adsorbable Organic Fluorine)**, che permette di determinare la presenza complessiva di composti organici fluorurati, incluse numerose sostanze chimiche associate alla famiglia dei PFAS o loro precursori.

Cosa sono i PFAS

I PFAS (Per- and PolyfluoroAlkyl Substances) rappresentano una vasta famiglia di composti chimici sintetici contenenti almeno un atomo di carbonio completamente o parzialmente fluorurato. La presenza di uno o più legami C-F conferisce a queste molecole proprietà uniche, quali:

- o Elevata resistenza chimica (inattaccabilità da acidi, basi e agenti ossidanti),
- o Idro- e oleo repellenza,
- o Stabilità termica,
- o Tensione superficiale molto bassa.

Tali caratteristiche hanno favorito il loro impiego in svariati ambiti industriali e commerciali, tra cui:

- Produzione di schiume antincendio (AFFF),
- Trattamenti idrorepellenti per tessuti e tappeti,
- Rivestimenti antiaderenti (es. teflon nelle padelle),
- Imballaggi alimentari (carta antiunto),
- Galvanoplastica e circuiti elettronici,
- Cosmesi,
- Prodotti per l'igiene personale,
- Sostanze chimiche (farmaci e pesticidi).

All'interno dei PFAS troviamo tre grandi sottogruppi:

PFAS Perfluorurati (Fully Fluorinated Compounds)

- Sono composti in cui tutti gli atomi di idrogeno nella catena carboniosa sono sostituiti da fluoro.
- Sono completamente fluorurati: nessun idrogeno rimane sulla catena principale.

Esempi classici:

- **PFOA** (acido perfluorooctanoico)
- **PFOS** (acido perfluorooctano solfonico)

Caratteristiche:

- Estremamente stabili
- Più persistenti e bioaccumulabili rispetto ai polifluorurati: nel dicembre 2023 il PFOA è stato classificato come sostanza cancerogena per l'uomo dall' Agenzia Internazionale sul Cancro (IARC).

PFAS Polifluorurati (Partially Fluorinated Compounds)

- Sono composti in cui non tutti gli atomi di idrogeno nella catena carboniosa sono sostituiti da fluoro.
- La catena può contenere sia atomi di fluoro che di idrogeno.

Alcuni polifluorurati possono trasformarsi in perfluorurati nell'ambiente o nel corpo.

Esempi:

- Precursori dei perfluorurati
- Alcuni fluorotelomeri (FTOH)

Caratteristiche:

- Più reattivi dei perfluorurati
- Alcuni sono meno persistenti, ma molti si degradano lentamente in composti perfluorurati più stabili

AFFFs - Aqueous Film-Forming Foam (Schiuma Formante Film Acquoso)

- Sono schiume antincendio usate soprattutto per spegnere incendi di liquidi infiammabili (come benzina, kerosene, oli industriali).
- Gli AFFF contengono PFAS perché questi composti sono fondamentali per:
 - Creare un film sottile sopra il liquido infiammabile
 - Soffocare rapidamente l'incendio impedendo il contatto tra il combustibile e l'ossigeno

Relazione AFFF–PFAS

Gli AFFF storicamente sono stati formulati con perfluorurati tipo PFOS o PFOA.

Oggi, molte AFFF usano ancora PFAS di nuova generazione (come i fluorotelomeri) anche se si cerca di ridurre l'uso.

Problema:

Gli AFFF sono stati una **fonte primaria di contaminazione ambientale da PFAS**, soprattutto nelle basi militari, aeroporti e impianti industriali.

I PFAS rilasciati da AFFF sono **estremamente persistenti e difficili da rimuovere** dalle acque e dal suolo.

Il **TFA** (acido trifluoroacetico) è un composto fluorurato, **chimicamente stabile**, usato:

- come reagente in chimica organica,
- come sottoprodotto nella degradazione di **gas fluorurati refrigeranti** e di alcuni **PFAS** stessi.

È molto solubile in acqua e **non biodegradabile**, per cui può **accumularsi nei corpi idrici e nelle falde**. A differenza dei PFAS classici, il TFA è **più piccolo** ma ugualmente preoccupante per l'ambiente a causa della sua **mobilità e persistenza**.

Collegamento tra TFA e PFAS

- Alcuni PFAS, come i refrigeranti fluorurati, pesticidi e farmaci possono **degradarsi in TFA** nell'ambiente.
- Il TFA è **considerato un "PFAS emergente"** perché condivide con i PFAS classici le caratteristiche di **resistenza alla degradazione** e **potenziale rischio ecotossicologico**.

AOF – Adsorbable Organic Fluorine

L'**AOF (Adsorbable Organic Fluorine)** è un parametro analitico sviluppato per quantificare la quantità totale di fluoro organico assorbibile presente in un campione, tipicamente acquoso.



A differenza delle analisi target tradizionali che misurano singoli PFAS noti (come PFOA, PFOS, PFHxS, ecc.), l'AOF consente di rilevare anche composti non noti o non quantificabili individualmente, offrendo una visione più ampia della contaminazione da sostanze organo fluorurate.

Il metodo si basa su una sequenza di fasi principali:

1. Adsorbimento su carbone attivo (PAC o GAC).
2. Combustione a temperature elevate (> 1000 °C) per distruggere i composti organici fluorurati.
3. Cattura e quantificazione del fluoro rilasciato tramite cromatografia ionica (strumentazione CIC)

Il risultato viene espresso in µg/L di fluoro totale assorbibile. Questo parametro riflette la somma del fluoro proveniente da composti organici fluorurati adsorbiti sul carbone attivo, inclusi sia PFAS noti che precursori non identificati.

Importanza del parametro AOF

L'AOF (Adsorbable Organic Fluorine) è emerso come un parametro cruciale per il monitoraggio globale dei PFAS e di altre sostanze organo fluorurate nell'ambiente. Sebbene non possa sostituire le analisi specifiche per i singoli PFAS, la sua utilità risiede nella capacità di fornire una visione complessiva della contaminazione da fluorurati organici. In particolare, l'AOF è utile per:

- o Valutare la contaminazione globale da PFAS,
- o Rilevare i precursori dei PFAS, composti che possono trasformarsi in sostanze più tossiche nel tempo,
- o Effettuare screening rapidi di acque potabili, reflui industriali e acque superficiali,
- o Migliorare la gestione delle risorse idriche monitorando i livelli di contaminazione in tempo reale.



Questa metodologia si rivela particolarmente utile nelle aree ad alta intensità di contaminazione, in cui i PFAS non sono sempre identificabili tramite tecniche analitiche mirate.

Normativa e regolamentazione

Il crescente impatto ambientale e sanitario dei PFAS ha portato a una serie di iniziative normative a livello internazionale, europeo e nazionale. La difficoltà di gestire un'ampia classe di composti chimici, di cui molti non sono ancora completamente identificati, ha spinto le autorità a sviluppare linee guida e regolamenti che comprendano non solo i composti noti, ma anche la totalità del carico di fluoruri organici.

L'AOF gioca un ruolo fondamentale nel monitoraggio delle contaminazioni da PFAS, con particolare attenzione alla protezione delle risorse idriche.

Studio delle acque potabili italiane

Nel periodo fra settembre e novembre 2024, Greenpeace Italia ha realizzato un piano di campionamento di oltre 200 campioni di acque potabili da numerosi comuni italiani al fine di verificarne la possibile contaminazione ed avere una prima fotografia dello stato di salute del sistema di gestione delle acque italiane in preparazione all'attuazione del Decreto Legislativo 18/2023 che entrerà in vigore a gennaio 2026.

Tale regolamento impone una soglia limite pari a 100 ng/L come somma di 24 singole molecole PFAS e un limite di 500 ng/L come "PFAS totali".

Sebbene l'AOF non sia indicato fra le tecniche disponibili per la misurazione del parametro "PFAS totali", Test & Innovation Lab ha realizzato internamento uno studio parallelo all'inchiesta "Acque Senza Veleni" al fine di appurare la capacità



identificativa della tecnica di riscontrare possibili contaminazioni da PFAS in acqua potabile.

L'analisi è stata eseguita in conformità ai requisiti della norma EPA 1621 - Determination of Adsorbable Organic Fluorine (AOF) in Aqueous Matrices by Combustion Ion Chromatography (CIC) impiegando un sistema CIC prodotto da Metrohm.

Il limite di quantificazione adottato è pari a 0,5 µg/l di fluoro: la tecnica di analisi non permette di raggiungere i limiti di quantificazione paragonabili all'analisi target tradizionale ma risulta altrettanto fruibile per poter intercettare possibili fonti di contaminazione da PFAS.

Risultati dello studio

La mappa di distribuzione dei risultati è riportata nel successivo grafico: solamente il 13% dei campioni esaminati evidenzia una presenza di AOF superiore al limite di quantificazione utilizzato nello studio – tutti i dati sono riportati nella successiva tabella.



Mapa di distribuzione dei comuni monitorati per la presenza di AOF nelle acque potabili.

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Bardonecchia	1,79	5,1	<50,0
Ascoli Piceno	1,71	1,1	<50,0
Airola	1,60	<1,0	<50,0
Bergamo	1,50	1,3	53,4
Viterbo	1,39	<1,0	<50,0
Bassano del Grappa	1,31	9,1	105,7
Pesaro	1,29	3,9	<50,0
Siena	1,20	<1,0	<50,0
Ferrara	1,19	43,6	375,5
Altamura	1,07	<1,0	<50,0
Rovigo	1,03	22,4	159,6
Rimini	1,01	4,5	<50,0
Milano	0,97	90,5	87,4
Nuoro	0,90	12,7	197,4
Riva del Garda	0,89	<1,0	89,6
Montoro Superiore	0,81	3,0	<50,0
Bassano del Grappa	0,81	<1,0	55,4
Francavilla Fontana	0,78	<1,0	<50,0
Ceccano	0,75	29,8	<50,0
Conegliano	0,72	<1,0	77,8
Tarquinia	0,71	5,0	<50,0
Chiusi	0,70	7,4	62,9
Montemurlo	0,69	<1,0	55,1
Cantù	0,69	8,1	<50,0
Frosinone	0,68	12,3	59,8
Crotone	0,62	1,5	<50,0
Milano	0,62	58,6	78,4
Imperia	0,61	25,6	<50,0
Vercelli	0,60	1,9	<50,0
Cava de' Tirreni	0,60	<1,0	<50,0
Pontedera	0,60	9,3	<50,0
Palmi	0,57	<1,0	158,1
Africo	0,54	2,1	<50,0
Aprilia	0,54	<1,0	<50,0
Roseto degli Abruzzi	0,52	1,5	58,2
Sant'Ambrogio di Torino	0,50	6,7	93,8
Roma	<0,50	2,0	<50,0
Napoli	<0,50	2,1	<50,0
Padova	<0,50	34,8	<50,0

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Rosignano Marittimo	<0,50	6,4	<50,0
Trebisacce	<0,50	2,2	<50,0
Potenza	<0,50	15,0	<50,0
Termoli	<0,50	<1,0	<50,0
Parma	<0,50	<1,0	52,4
Fossano	<0,50	16,3	<50,0
Tortona	<0,50	39,8	88,3
Piacenza	<0,50	2,4	<50,0
Latina	<0,50	<1,0	<50,0
Mestre	<0,50	13,9	157,3
Aversa	<0,50	2,4	<50,0
Policoro	<0,50	2,7	56,0
Montecchio Maggiore	<0,50	<1,0	<50,0
Rieti	<0,50	2,1	<50,0
Chieti	<0,50	<1,0	<50,0
Acireale	<0,50	15,2	<50,0
Bologna	<0,50	1,6	87,5
Torino	<0,50	18,6	138,2
Chioggia	<0,50	27,9	66,9
Orbetello	<0,50	1,1	<50,0
Biella	<0,50	1,8	<50,0
Napoli	<0,50	6,3	<50,0
Comiso	<0,50	<1,0	<50,0
Olbia	<0,50	48,0	105,4
Palazzolo sull'Oglio	<0,50	25,1	63,3
Brugherio	<0,50	25,0	110,4
Livorno	<0,50	<1,0	<50,0
Palermo	<0,50	12,6	77,4
Torino	<0,50	21,1	96,5
Empoli	<0,50	9,5	<50,0
Grosseto	<0,50	<1,0	<50,0
Pescara	<0,50	<1,0	256,4
Faenza	<0,50	9,8	159,1
Trapani	<0,50	<1,0	<50,0
Caserta	<0,50	<1,0	56,2
Verona	<0,50	12,0	<50,0
Falconara Marittima	<0,50	<1,0	<50,0
Ragusa	<0,50	1,6	<50,0
Ancona	<0,50	8,3	<50,0

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Nizza Monferrato	<0,50	<1,0	<50,0
Jesolo	<0,50	11,7	<50,0
Cuneo	<0,50	11,7	242,1
Massa Marittima	<0,50	11,1	<50,0
Firenze	<0,50	1,8	127,2
Arzignano	<0,50	56,2	58,4
Agrigento	<0,50	8,2	<50,0
Salerno	<0,50	<1,0	<50,0
Augusta	<0,50	10,0	<50,0
Colorno	<0,50	<1,0	<50,0
Montevarchi	<0,50	8,0	<50,0
Agliana	<0,50	7,4	<50,0
Campobasso	<0,50	3,9	<50,0
Alessandria	<0,50	12,0	68,9
Reggio Calabria	<0,50	<1,0	71,6
Cefalù	<0,50	<1,0	<50,0
Gravere	<0,50	<1,0	60,3
Catania	<0,50	<1,0	<50,0
Follonica	<0,50	6,6	<50,0
Nicotera	<0,50	8,5	<50,0
Montale	<0,50	18,8	<50,0
Quartu Sant'Elena	<0,50	1,8	157,1
Guidonia Montecelio	<0,50	<1,0	<50,0
Pozzilli	<0,50	2,4	<50,0
Alghero	<0,50	<1,0	<50,0
Figline Valdarno	<0,50	9,6	115,6
Lecce	<0,50	2,9	<50,0
Forlì	<0,50	2,2	<50,0
Isola di Capo Rizzuto	<0,50	9,3	<50,0
Marsala	<0,50	10,4	<50,0
Varese	<0,50	12,2	56,9
Manzano	<0,50	5,3	81,1
Cremona	<0,50	1,0	<50,0
Asti	<0,50	<1,0	<50,0
Civitanova Marche	<0,50	15,2	<50,0
Cossato	<0,50	3,4	56,1
Viareggio	<0,50	13,5	<50,0
Cerveteri	<0,50	18,9	<50,0
Livorno	<0,50	6,5	<50,0
Asciano	<0,50	10,8	<50,0

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Pisa	<0,50	1,6	<50,0
Massa Marittima	<0,50	10,0	52,2
Savona	<0,50	9,0	76,9
Aulla	<0,50	<1,0	<50,0
Carrara	<0,50	10,7	<50,0
Albenga	<0,50	26,6	<50,0
La Spezia	<0,50	4,7	115,9
Sarzana	<0,50	26,4	<50,0
Genoa	<0,50	9,7	114,4
Genoa	<0,50	14,7	126,4
Rapallo	<0,50	28,9	104,4
Bussoleno	<0,50	35,9	69,7
Torino	<0,50	16,7	208,6
Torino	<0,50	<1,0	94,9
Châtillon	<0,50	3,2	70,9
Aosta	<0,50	15,0	<50,0
Novara	<0,50	<1,0	372,6
Galliate	<0,50	2,0	54,3
Casale Monferrato	<0,50	<1,0	206,5
Acqui Terme	<0,50	<1,0	147,6
Ovada	<0,50	2,9	110,9
Morbello	<0,50	<1,0	<50,0
Valenza	<0,50	1,7	148,9
Spinetta Marengo	<0,50	7,3	69,6
Castellazzo Bormida	<0,50	12,4	539,4
Voghera	<0,50	3,7	180,5
Crema	<0,50	12,2	129,6
Fiorenzuola d'Arda	<0,50	10,4	194,9
Pavia	<0,50	<1,0	<50,0
Cinisello Balsamo	<0,50	9,8	<50,0
Crespiatica	<0,50	1,3	<50,0
Lodi	<0,50	12,8	<50,0
Busto Arsizio	<0,50	<1,0	<50,0
Laives	<0,50	1,4	137,7
Mandello del Lario	<0,50	<1,0	<50,0
Lecco	<0,50	<1,0	72,1
Desenzano del Garda	<0,50	<1,0	<50,0
Como	<0,50	<1,0	<50,0
Trecale	<0,50	4,6	<50,0
Bolzano	<0,50	5,9	<50,0

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Sondrio	<0,50	<1,0	<50,0
Brescia	<0,50	9,4	<50,0
Milan	<0,50	20,2	<50,0
Treviglio	<0,50	17,5	112,9
Monza	<0,50	31,0	<50,0
Trento	<0,50	1,4	111,8
Modena	<0,50	25,1	<50,0
Poggio a Caiano	<0,50	<1,0	<50,0
Vicenza	<0,50	42,3	<50,0
San Giovanni Lupatoto	<0,50	8,7	<50,0
Lonigo	<0,50	25,2	135,5
San Bonifacio	<0,50	30,3	<50,0
Prato	<0,50	16,6	77,4
Chiomonte	<0,50	<1,0	<50,0
Pistoia	<0,50	7,4	<50,0
Sant'Ambrogio di Torino	<0,50	<1,0	<50,0
Suzzara	<0,50	11,7	<50,0
Mantova	<0,50	<1,0	<50,0
Guastalla	<0,50	<1,0	<50,0
Arezzo	<0,50	104,3	53,4
Verbania	<0,50	21,3	71,4
Carpi	<0,50	5,2	<50,0
Reggio Emilia	<0,50	44,7	<50,0
Scarlino	<0,50	2,7	<50,0
Belluno	<0,50	<1,0	68,2
Narni	<0,50	1,2	<50,0
Duino	<0,50	<1,0	<50,0
Trieste	<0,50	<1,0	<50,0
Piazza Armerina	<0,50	<1,0	<50,0
Udine	<0,50	3,6	58,4
Venezia	<0,50	2,5	85,1
Trieste	<0,50	5,3	57,6
Feltre	<0,50	4,8	109,1
Porcia	<0,50	19,0	<50,0
Monfalcone	<0,50	12,6	54,4
Lucca	<0,50	23,3	70,0
Abano Terme	<0,50	3,1	<50,0
Lamezia Terme	<0,50	12,0	61,5
Enna	<0,50	13,4	<50,0

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Perugia	<0,50	57,0	58,3
Gorizia	<0,50	20,0	55,6
Terni	<0,50	<1,0	<50,0
Cosenza	<0,50	<1,0	<50,0
Vibo Valentia	<0,50	8,2	60,3
Iglesias	<0,50	6,0	<50,0
Porto Torres	<0,50	<1,0	<50,0
Pordenone	<0,50	<1,0	<50,0
Sassari	<0,50	6,0	215,0
Isernia	<0,50	<1,0	64,3
Siniscola	<0,50	16,3	165,9
Palermo	<0,50	<1,0	<50,0
Gela	<0,50	<1,0	<50,0
Terralba	<0,50	<1,0	<50,0
Giugliano in Campania	<0,50	1,3	<50,0
L'Aquila	<0,50	<1,0	<50,0
Fermo	<0,50	14,3	<50,0
Macerata	<0,50	<1,0	65,8
Bari	<0,50	<1,0	<50,0
Matera	<0,50	<1,0	56,5
Bari	<0,50	<1,0	57,9
Messina	<0,50	<1,0	57,6
Carbonia	<0,50	3,4	167,6
Cagliari	<0,50	<1,0	208,2
Oristano	<0,50	2,9	58,4
L'Aquila	<0,50	<1,0	<50,0
Campobasso	<0,50	3,0	<50,0
Cagliari	<0,50	21,0	100,4
Roma	<0,50	<1,0	<50,0
Foligno	<0,50	1,6	<50,0
Siracusa	<0,50	<1,0	<50,0
Benevento	<0,50	<1,0	<50,0
Avellino	<0,50	<1,0	<50,0
Catanzaro	<0,50	<1,0	55,7
Andria	<0,50	17,4	<50,0
Foggia	<0,50	5,4	67,9
Melfi	<0,50	<1,0	<50,0
Barletta	<0,50	1,3	70,6
Fabriano	<0,50	2,8	75,4
Siderno	<0,50	1,8	60,1

Città	AOF (µg/L)	Somma PFAS (24 molecole D.Lgs 18/2023) (ng/L)	Acido Trifluoroacetico - TFA (ng/L)
Bari	<0,50	8,2	<50,0
Fermo	<0,50	<1,0	<50,0
Firenze	<0,50	<1,0	<50,0
Ancona	<0,50	3,4	<50,0
Brindisi	<0,50	<1,0	<50,0
Andria	<0,50	1,6	<50,0
Fano	<0,50	7,2	71,3
Capannori	<0,50	3,1	59,6
Grottammare	<0,50	2,3	<50,0
Riccione	<0,50	10,6	<50,0
Reggio Calabria	<0,50	11,4	72,6
Cesena	<0,50	2,9	59,1
Nardò	<0,50	3,4	<50,0
Ravenna	<0,50	25,4	61,4
Potenza	<0,50	6,3	<50,0
Montesilvano	<0,50	4,5	<50,0
Vasto	<0,50	<1,0	<50,0
Imola	<0,50	4,4	<50,0
Milazzo	<0,50	<1,0	<50,0
Taranto	<0,50	<1,0	<50,0
Grottaglie	<0,50	<1,0	<50,0
Teramo	<0,50	7,8	<50,0
Comacchio	<0,50	49,5	109,6
Dozza	<0,50	4,6	<50,0

Conclusioni

Lo studio effettuato è da considerarsi solamente come una fotografia e non essere considerato esaustivo e rappresentativo della situazione delle acque potabili distribuite nel territorio italiano.

La verifica dell'AOF non rappresenta una tecnica di indagine alternativa alle attuali tecniche di verifica di PFAS adottate dai laboratori italiani ma può essere utilizzata come una valida risorsa complementare per intercettare possibili fonti di inquinamento di PFAS nei materiali esaminati: qualora l'analisi fornisca un riscontro positivo è opportuno attivare tutte le risorse disponibili per accertare possibili fonti di inquinamento dei corpi idrici analizzati.