



PUBBLICAZIONE/pdf NR 09
27 gennaio 2022

A cura del Comitato di Redazione PFAS.land
Organo di informazione dei gruppi-comitati-associazioni
che vivono nelle terre contaminate da PFAS del Veneto



ANTERSASS CASA EDITRICE
Montecchio Maggiore | VICENZA | Italy

Viviamo in un mondo perfluorurato

di **Vitalia Murgia**

[Medico Chirurgo, Specialista in pediatria - Docente al Master inter-ateneo in Clinical Pharmacy Università Milano, Cagliari e Granada -
Docente al Master in Nutrizione e Nutraceutica dell'età evolutiva Università degli Studi di Pavia - ISDE Nazionale]

Viviamo in un mondo perfluorurato

Le PFAS si nascondono nelle nostre fonti di approvvigionamento idrico, si sono fatte strada nelle falde acquifere, nell'acqua potabile, nei terreni e nei prodotti dell'agricoltura, nei pesci, nell'aria che respiriamo e nei nostri corpi. Come possiamo trattare questo problema e metterci al sicuro dalla tossicità di queste sostanze?

Non c'è dubbio che la contaminazione da PFAS rappresenti una delle più grandi "tragedie ambientali" causate dall'industria chimica e dall'inerzia delle Agenzie che avrebbero dovuto regolare con maggiore rigore il commercio e la diffusione di questa classe di sostanze. Nell'aprile 2019, il prof. William Dichtel, un eminente chimico della Northwestern University dell'Illinois, durante la sessione di apertura della riunione dell'*American Chemical Society* in un auditorium gremito di chimici a Orlando (Texas), ha addossato all'intera impresa chimica mondiale la responsabilità di consentire l'inquinamento delle risorse idriche planetarie con queste sostanze chimiche. Le sue dichiarazioni facevano eco agli appelli di molti scienziati, politici e sostenitori dell'ambiente per una maggiore regolamentazione delle PFAS in tutto il mondo. Dichtel ha affermato che sulle PFAS le industrie produttrici, i nostri regolatori e l'intera impresa chimica globalmente avrebbero potuto comportarsi meglio. "Abbiamo inquinato il mondo con questa roba", ha detto Dichtel, "Quando il mondo si è reso conto del fatto che PFOA e PFOS sono tossici, non abbiamo regolamentato questi composti come una classe", ha detto Dichtel ma "Ci siamo limitati a sostituire PFOA e PFAS con molecole a catena più corta con quasi la stessa struttura: ciò è quasi criminale".¹ Purtroppo, PFOA e PFOS, i più noti e i più accusati tra le PFAS per la loro tossicità, sono "solo la punta dell'iceberg" di un inquinamento planetario che pone problemi serissimi di decontaminazione. I nuovi PFAS a catena corta, infatti, sono altamente mobili nel suolo e nell'acqua e sono estremamente persistenti nell'ambiente, cosa che potrebbe comportare una più rapida distribuzione nelle risorse idriche e una più rapida contaminazione dell'acqua potabile. La ricerca suggerisce anche che i PFAS a catena corta sono in realtà più resistenti al trattamento dell'acqua rispetto ai loro omologhi tanto che chimici autorevoli sostengono che "I composti a catena corta rimarranno nell'ambiente altrettanto a lungo di quelli a catena lunga e sarebbero più mobili in termini di trasporto in acqua", come riporta Chris Higgins, ingegnere civile e ambientale presso la Colorado School of Mines.² "Per questo motivo, sarebbe più difficile trattarli nelle forniture di acqua potabile". Higgins osserva inoltre, che i PFAS a catena corta sono più bioaccumulabili nelle piante, il che può portare a "ulteriori problemi di esposizione" degli esseri umani. Questo è tristemente confermato anche da quanto emerge dall'analisi dei dati del monitoraggio di campioni di alimenti (vegetali, uova, carne) dell'area rossa del Veneto, dove oltre a PFOA e PFOS (le uniche due molecole oggetto dell'indagine resa pubblica da ISS nel 2019), sono state rinvenute altre molecole sia a catena lunga che a catena corta.³ (<https://www.mammenopfas.org/pfas/pfas-negli-alimenti>).

PFAS: UNA VOLTA NELL'AMBIENTE CI STANNO PER SEMPRE

Le stesse qualità che hanno reso le PFAS utilizzatissime le rendono anche estremamente problematiche per l'ambiente e la salute umana. Proprietà fisico-chimiche particolari conferiscono alle PFAS caratteristiche come la repellenza a olio, grasso e acqua, nonché resistenza alla temperatura e riduzione dell'attrito. Possono quindi aiutare a realizzare prodotti antiaderenti che

¹ Tragger R. 2019. A persistent perfluorinated problem.

<https://www.chemistryworld.com/features/a-persistent-perfluorinated-problem/3010817.article>

² Fields J. Fighting forever chemicals. Colorado School of Mines Research. 2019-2020.

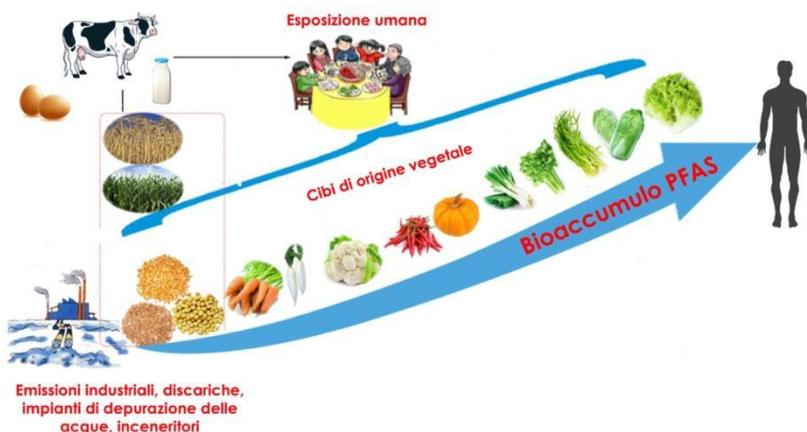
<https://issuu.com/minespr/docs/researchmagazine2019-interactive-pages>

³ PFAS negli alimenti dell'area rossa del Veneto. Mamme NO PFAS e Greenpeace.

<https://www.mammenopfas.org/pfas/pfas-negli-alimenti>

respingono molte sostanze e resistono alle macchie. Per questi motivi, le PFAS sono state utilizzate per molti decenni in capi di abbigliamento idrorepellenti, rivestimenti per mobili (moquette, tappezzeria), indumenti medici, pentole antiaderenti, imballaggi per alimenti e molti altri articoli domestici comuni (compresi carta da forno, sacchetti per popcorn per microonde, carta a contatto con alimenti, filo interdentale), oltre che in cosmetici e detergenti. Sono anche estremamente efficaci nell'estinzione degli incendi alimentati da idrocarburi e per questo sono state una componente di importanza fondamentale nelle schiume antincendio utilizzate nelle basi militari e negli aeroporti per oltre 50 anni.

In conseguenza del rilascio durante la fabbricazione, l'uso e lo smaltimento dei prodotti che li contengono, PFOA e PFOS possono persistere nel suolo, nell'aria e nell'acqua; sono in grado di rimanere nell'aria per giorni e di essere trasportati a grandi distanze prima di cadere sul suolo.⁴ Possono penetrare nel sottosuolo, percorrere lunghe distanze e contaminare le falde acquifere, sono state ritrovate anche nell'artico.⁵ Alcune PFAS sono state rilevate in tutto il mondo nella fauna selvatica e nell'uomo. Le PFAS possono accumularsi nell'organismo umano e di altri animali e nei vegetali. La loro persistenza nell'ambiente crea bioaccumulo nella catena alimentare con rischi per tutti gli ecosistemi, per chi ci vive e per l'uomo. Il bioaccumulo di PFAS è stato studiato in un estuario tropicale nel nord-est del Brasile. Sono stati analizzati campioni di 44 organismi (21 taxa), insieme a biofilm, foglie, sedimenti e particolato sospeso in acqua marina. I PFAS sono stati rilevati in tutti gli organismi analizzati (tra cui bivalvi, crostacei, policheti e pesci) e nelle matrici come il particolato sospeso e i sedimenti.⁶ Anche il bioaccumulo nei vegetali e l'esposizione umana al PFOA attraverso il consumo di colture contaminate rappresenta un rischio per la salute dei residenti locali, in particolare per i bambini o per chi ha una dieta ricca di verdure.⁷ Le fonti alimentari sinora studiate di potenziale bioaccumulo nel corpo umano sono rappresentate nella figura sottostante.



⁴ Scher DP, Kelly JE, Huset CA, Barry KM, Hoffbeck RW, Yingling VL, Messing RB. Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFAS) in garden produce at homes with a history of PFAS-contaminated drinking water. *Chemosphere*. 2018 Apr;196:548-555.

⁵ Prevedouros K, Cousins IT, Buck RC, Korzeniowski SH. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. *Environ Sci Technol*. 2006 Jan 1;40(1):32-44.

⁶ Miranda DA, Benskin JP, Awad R, Lepoint G, Leonel J, Hatje V. Bioaccumulation of Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a tropical estuarine food web. *Sci Total Environ*. 2021 Feb 1;754:142146.

⁷ Liu Z, Lu Y, Song X, Jones K, Sweetman AJ, Johnson AC, Zhang M, Lu X, Su C. Multiple crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl substances around a mega fluorochemical industrial park, China: Implication for planting optimization and food safety. *Environ Int*. 2019 Jun;127:671-684.

Fonti di bioaccumulo lungo la catena alimentare.

Le PFAS sono considerate Inquinanti organici persistenti (POP) e sono così pericolose che la Convenzione di Stoccolma sugli inquinanti organici persistenti ha sancito la limitazione della produzione di acido perfluorooftalico (PFOS) e vietato la produzione di acido perfluorooftalico (PFOA).

Insomma, la “distrazione” delle società scientifiche della chimica e l’inazione “quasi criminale” di industrie e governi ci hanno fatto precipitare in una condizione di inquinamento planetario che coinvolge tutte le matrici ambientali e tutto ciò che vive nel pianeta. Con eccessi dolorosi come quelli dell’area Veneta, la più contaminata d’Europa.

Nell’insieme le PFAS sono considerate uno dei più grandi pericoli per l’ambiente e per l’uomo. La ricerca scientifica è concentrata nel trovare sistemi di rimozione di queste sostanze dall’ambiente e pertanto è importante comprendere appieno le implicazioni delle opzioni di trattamento possibili in considerazione anche delle proprietà uniche di questi composti.

Fonti principali di rilascio di PFAS nell’ambiente

I rilasci di PFAS possono verificarsi durante la loro produzione (fonti dirette) e durante la produzione, l’uso e lo smaltimento di prodotti che le contengono, o per la trasformazione nell’ambiente di alcune di queste molecole in altre PFAS (fonti indirette).⁸

Le PFAS possono essere presenti in vari prodotti industriali e di consumo in quattro forme, vale a dire come ingredienti principali, come residui, come sottoprodotti di reazione indesiderati (impurezza) o come contaminanti incrociati lungo la produzione e le catene di approvvigionamento.⁹

Le fonti principali di rilascio di PFAS con potenziale impatto ambientale significativo, in base anche al tipo e all’entità del rilascio, e ai tipi e alle concentrazioni di PFAS associati a tale rilascio includono:

1. impianti industriali che producono PFAS o trattano PFAS, o impianti che utilizzano prodotti chimici che contengono PFAS o utilizzano PFAS in fase di produzione di beni di consumo;
2. strutture per la gestione dei rifiuti, come le discariche;
3. residui di trattamento delle acque reflue e aree di produzione e applicazione di fanghi, con impatti più significativi associati agli scarichi di acque reflue industriali;
4. aree in cui sono immagazzinate, utilizzate o rilasciate schiume antincendio contenenti fluoro.

Si sanno molte cose ma non tutto è chiaro sull’entità e il tipo di fonti da cui originano le PFAS che poi finiscono nell’ambiente. Ad esempio, l’inventario aggiornato delle emissioni globali degli omologhi C4–C14 PFAS non spiega i livelli sorprendentemente elevati di alcuni omologhi PFAS (soprattutto a catena corta) monitorati nelle acque superficiali dell’oceano aperto.¹⁰

La produzione mondiale storica totale di POSF è stata stimata in 96.000 tonnellate (o 122.500 t, compresi i rifiuti inutilizzabili) tra il 1970 e il 2002, con un rilascio globale stimato di 45.250 t nell’aria e nell’acqua tra il 1970 e il 2012 da fonti dirette (produzione, uso e prodotti di consumo) e

⁸ Prevedouros K, Cousins IT, Buck RC, Korzeniowski SH. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. Environ Sci Technol. 2006 Jan 1;40(1):32-44.

⁹ WORKING TOWARDS A GLOBAL EMISSION INVENTORY OF PFAS: FOCUS ON PFCAS - STATUS QUO AND THE WAY FORWARD. OECD 2015.

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/Working%20Towards%20a%20Global%20Emission%20Inventory%20of%20PFAS%20S.pdf>

¹⁰ Wang Z, Cousins IT, Scheringer M, Buck RC, Hungerbühler K. Global emission inventories for C4-C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, part II: the remaining pieces of the puzzle. Environ Int. 2014 Aug;69:166-76.

fonti indirette (precursori e/o impurezze di PFOS).¹¹ E si tratta del carico di una sola sostanza sulle circa 4.700 esistenti.¹²

Secondo un'altra fonte lo sversamento atteso di PFAS nell'ambiente dal 2016 al 2030 potrebbe andare da un minimo di 20 tonnellate a un massimo di 6.420.¹³ Analizzando solo lo scenario a consumo più elevato si ipotizza che le emissioni del 2015 possano rimanere costanti fino al 2030. Nonostante la loro "incertezza" questi dati fanno capire l'enormità del grado di immissione nell'ambiente di queste sostanze in circa 70 anni. E le stime risentono del fatto che molte delle fonti di inquinamento non sono quantificabili e che quindi sfuggono al conteggio! Vista la loro lunga vita, la difficoltà di estrarle dai terreni, dall'acqua (anche marina) e dall'aria e di distruggerle, è molto evidente l'impressionante scenario di accumulo nell'ambiente che ci si trova a fronteggiare.

Il circolo vizioso dello smaltimento delle PFAS

L'immagine riportata sotto illustra il circolo vizioso di contaminazione che si innesca quando si producono o utilizzano le PFAS per inserirle in svariate tipologie di prodotti.

Attualmente sono disponibili tre approcci per smaltire i rifiuti PFAS: lo smaltimento in discarica, il trattamento acque reflue (sui terreni contaminati si interviene meno e con maggiori difficoltà) e l'incenerimento. I tre approcci sono interconnessi, e facilitano la trasmissione di PFAS, prodotti di degradazione PFAS, e, nel caso di incenerimento, anche prodotti di combustione incompleta, da un sito all'altro. In pratica ciascuno di questi approcci può reinserire nell'ambiente le PFAS originali o i loro prodotti di degradazione rendendo lo smaltimento di queste sostanze un problema ciclico.¹⁴

Il conferimento in discarica e il trattamento delle acque reflue non distruggono le PFAS ma più semplicemente spostano i carichi di PFAS da un sito all'altro. La decomposizione dei materiali a base di PFAS nei rifiuti solidi urbani (RSU) rappresenta una fonte di esposizione ambientale a lungo termine di queste sostanze.¹⁵ Nelle discariche, infatti, con il tempo le PFAS fuoriescono dai prodotti di consumo e dai vari materiali che le contengono e filtrano attraverso lo strato di rifiuti andando a finire nel percolato, cioè nel liquame che si forma sul fondo della discarica stessa. Il percolato di discarica viene comunemente inviato agli impianti di trattamento delle acque reflue, dove si lavorano anche le acque contaminate da aziende. Dagli impianti di trattamento delle acque reflue, le PFAS vengono trasferite a fanghi ed effluenti. A loro volta i fanghi di depurazione possono essere collocati in discarica, inceneriti o applicati su campi agricoli e le PFAS da fanghi trattati contaminano il suolo, l'acqua e le colture.¹⁶ Molte istituzioni hanno definito un livello massimo di PFAS nei fanghi perché possano essere applicati sul terreno per evitare una più aggravata contaminazione di colture o animali. Ma si tratta comunque di un inquinamento dei terreni che dovrebbe essere considerato inaccettabile, anche perché queste sostanze sono tossiche in quantità infinitesimali.

¹¹ Paul AG, Jones KC, Sweetman AJ. A first global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate. *Environ Sci Technol.* 2009 Jan 15;43(2):386-92.

¹² Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Toward a New Comprehensive Global Database of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): Summary Report on Updating the OECD 2007 List Of per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)*. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en).

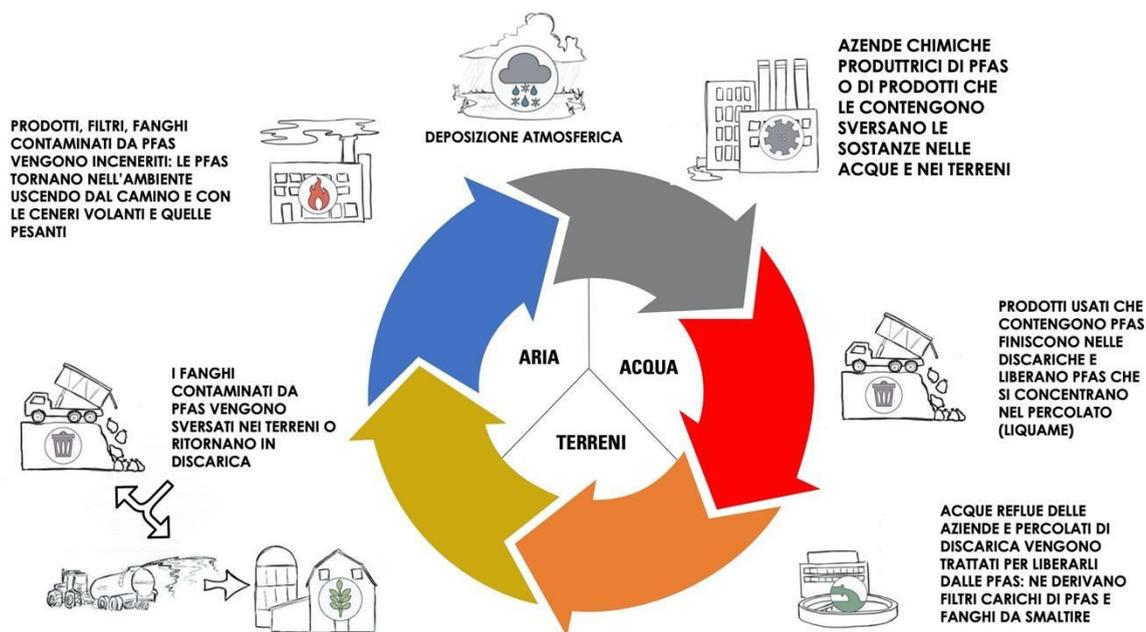
¹³ Wang Z, Cousins IT, Scheringer M, Buck RC, Hungerbühler K. Global emission inventories for C4-C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, part II: the remaining pieces of the puzzle. *Environ Int.* 2014 Aug;69:166-76.

¹⁴ Stoiber T, Evans S, Naidenko OV. Disposal of products and materials containing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A cyclical problem. *Chemosphere.* 2020 Dec;260:127659.

¹⁵ Lang JR, Allred BM, Peaslee GF, Field JA, Barlaz MA. Release of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) from Carpet and Clothing in Model Anaerobic Landfill Reactors. *Environ Sci Technol.* 2016 May 17;50(10):5024-32.

¹⁶ The Environmental Working Group. *Feeding the Waste Cycle: How PFAS 'Disposal' Perpetuates Contamination*. <https://www.ewg.org/news-and-analysis/2020/08/feeding-waste-cycle-how-pfas-disposal-perpetuates-contamination>

Nel percolato di discarica sono stati rilevati globalmente insieme ad acidi perfluoroalchilici (PFAA) come i C4 – C10, anche grandi quantità di intermedi fluorotelomeri a concentrazioni fino a centinaia di µg/l, in cui sono stati spesso rilevati a livelli dominanti acidi perfluoroalchilici a catena corta e PFOA.¹⁷ Uno studio ha rilevato concentrazioni totali di PFAS da 5 a 30 volte maggiori nelle discariche rispetto ai siti di riferimento di fondo.¹⁸ I tassi di rilascio di PFAS variano nel tempo per una determinata massa di rifiuti; il clima (ad esempio le precipitazioni) sembra essere il fattore più importante nel causare queste variazioni. Nel 2013 negli USA, un'analisi su 18 dei 1540 siti di discarica, ha stimato un rilascio di circa 600 kg PFAS/per anno nel percolato di discarica; occorre anche tenere conto che il rilascio è lento e può continuare per oltre 10 anni.¹⁹ Non si è certi della sicurezza a lungo termine dello smaltimento in discarica, poiché i polimeri PFAS si possono scomporre nel tempo in specie più piccole e più mobili. Ci sono anche preoccupazioni per la stabilità delle discariche nei potenziali scenari futuri di maggiori precipitazioni annuali e tempeste più forti dovute ai cambiamenti climatici.²⁰



Anche l'aria può essere contaminata da PFAS che vengono emessi sia dalle discariche sia dagli impianti di trattamento delle acque reflue. Le discariche possono rilasciare nell'aria anche fluorotelomeri (FTOH) e perfluorobutanoato (PFBA). Le emissioni nell'atmosfera da impianti di depurazione di acque reflue e discariche sono importanti nel contribuire ai carichi atmosferici di

¹⁷ Hamid H, Li LY, Grace JR. Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environ Pollut.* 2018 Apr;235:74-84.

¹⁸ ITRC. 2.6 PFAS Releases to the Environment. <https://pfas-1.itrcweb.org/2-6-pfas-releases-to-the-environment/> Updated May 2021.

¹⁹ Lang JR, Allred BM, Field JA, Levis JW, Barlaz MA. National Estimate of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) Release to U.S. Municipal Landfill Leachate. *Environ Sci Technol.* 2017 Feb 21;51(4):2197-2205.

²⁰ EPA 2014. Climate Change Adaptation Technical Fact Sheet: Landfills and Containment as an Element of Site Remediation. <https://semspub.epa.gov/work/11/175853.pdf>

PFAS, in particolare per gli FTOH, che hanno un ruolo di precursori nel trasporto atmosferico a lungo raggio degli acidi perfluorocarbossilici.²¹

Le discariche più moderne dovrebbero disporre di sistemi di raccolta dei gas emanati e questo potrebbe contribuire a ridurre le possibili emissioni di PFAS nell'atmosfera.

La contaminazione dell'aria da PFAS è aggravata dal fatto che le particelle del particolato (PM_{2,5} e PM₁₀) sono in grado di adsorbire sulla loro superficie queste sostanze insieme ad altre con proprietà tossiche, quali solfati, nitrati, metalli, composti organici volatili.

Le concentrazioni di PFAS sul PM_{2,5}, (particolato fino) sono state analizzate su 41 campioni raccolti da 5 stazioni del network di monitoraggio della regione di Valencia (Spagna). Otto dei dodici PFAS ricercati, (PFBA, PFPeA, PFHxS, 6:2 FTS, PFOA, PFNA, PFOS e PFDA), sono stati trovati in almeno un campione. Le concentrazioni misurate variavano da 1,4 a 34,3 pg/m³. La distribuzione del PFAS tra la fase gassosa e particellare dell'aria è influenzata da fattori ambientali, in particolare temperatura, umidità, natura e **concentrazione del particolato sospeso**. Perciò più è elevata la concentrazione di particolato, maggiore sembra essere la potenzialità di legare queste sostanze. Viste le condizioni di inquinamento caratteristiche di molte aree del Veneto, è probabile che il particolato funga da "carrier" cioè da trasportatore di PFAS nelle vie respiratorie e che grazie al PM_{2,5}, le PFAS possano raggiungere gli alveoli polmonari e da lì diffondersi nell'organismo amplificando il danno legato al solo particolato. I risultati di studi in varie parti del mondo depongono per l'esistenza di una contaminazione "di fondo" da PFAS che può essere più o meno intensa a seconda delle aree interessate. I livelli di concentrazioni medi osservati erano sempre più elevati nei centri urbani rispetto alle aree rurali; ciò potrebbe essere legato alla netta differenza nelle concentrazioni di particolato tra le due aree.²²

Come si possono eliminare le PFAS dall'ambiente e dagli ecosistemi

Tecnologie di trattamento possibili

Le tecnologie di trattamento per le PFAS in acque e suolo sono ancora in evoluzione ed è prudente usare cautela nell'attuazione di rimedi a lungo termine. Le azioni correttive dovrebbero mirare prioritariamente alla protezione delle forniture di acqua potabile e della salute umana e alla decontaminazione dei terreni più profondamente contaminati. L'aspetto più drammatico è che sicuramente le PFAS non si possono eliminare dal corpo umano in cui hanno bioaccumulato! Le uniche soluzioni per limitare il danno umano e degli ecosistemi sono: smettere di immettere PFAS nell'ambiente, rimuovere la maggiore quantità possibile dalle matrici contaminate e ricercare soluzioni innovative di smaltimento che non le re-immettano nell'ambiente.

In alcuni siti fortemente contaminati potrebbe essere ragionevole intraprendere azioni di stabilizzazione del sito a breve termine con l'intento di applicare tecnologie più robuste ed economiche man mano che queste vengono sviluppate.

Le tecnologie di trattamento disponibili possono essere impiegate sia ex situ (es. acque sotterranee estratte tramite pompaggio da pozzi e trattate) che in situ (es. quando i materiali di trattamento vengono iniettati nel sottosuolo per immobilizzare i contaminanti nelle acque sotterranee). La maggior parte delle tecnologie di trattamento esistenti sono generalmente inadeguate a eliminare le PFAS; perciò, si continua a cercare nuove tecnologie o combinazioni innovative di tecnologie esistenti.

Il trattamento su vasta scala di liquidi o solidi contaminati da PFAS attualmente è limitato alle tecnologie di sequestro che rimuovono o legano le PFAS ma non le distruggono.

²¹ Ahrens L, Shoeib M, Harner T, Lee SC, Guo R, Reiner EJ. Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere. Environ Sci Technol. 2011 Oct 1;45(19):8098-105.

²² Sasaki K, Harada K, Saito N, Tsutsui T, Nakanishi S, Tsuzuki H, Koizumi A. Impact of airborne perfluorooctane sulfonate on the human body burden and the ecological system. Bull Environ Contam Toxicol. 2003 Aug;71(2):408-13.

Tra i metodi di adsorbimento uno dei più consolidati è quello al Carbone attivo granulare (GAC). La capacità di rimozione del GAC è maggiore per le PFAS a catena lunga (PFOS meglio di PFOA) mentre, in generale, per le PFAS a catena più corta i GAC hanno capacità di carico inferiori ed è necessaria una maggiore frequenza di sostituzione dei filtri. *L'Interstate Technology and Regulatory Council* USA sostiene che sono necessari ulteriori studi per confermare l'efficacia del trattamento GAC per PFAS a catena più corta o per identificare tecnologie/materiali complementari per integrare la capacità di rimozione del GAC. I GAC esauriti (cioè incapaci di adsorbire ancora PFAS) devono poi essere smaltiti in qualche modo e possono essere riattivati o distrutti. L'EPA sostiene che esistono vari aspetti a cui bisogna dare risposta in merito alla riattivazione dei GAC esauriti: quale percentuale dei PFAS adsorbiti viene rilasciata dal carbone e quanta rimane dopo la riattivazione? quali sono le condizioni ottimali per la riattivazione (temperatura, tempo, configurazione del reattore)? che impatto ha la riattivazione sulle prestazioni del trattamento di incenerimento dei gas di scarico? I PFAS vengono rilasciati dopo la riattivazione con il trattamento dei gas di scarico dell'incenerimento?²³ Sulla riattivazione dei GAC si può leggere un approfondito contributo del Dr. Stefano Polesello ricercatore CNR-IRSA su PFAS.land [>> [LINK DIRETTO](#), ndr].

Cosa rispondere a chi afferma: non ci resta che incenerirle

I legami carbonio-fluoro nelle PFAS sono tra le strutture chimiche più forti inventate dall'uomo e riversate nel pianeta e rendono queste sostanze incredibilmente difficili da distruggere anche con il calore. I radicali fluorurati quando si formano nelle fiamme, interrompono rapidamente le reazioni di ramificazione della catena agendo in maniera estremamente efficiente come ritardanti di fiamma, e inibiscono perciò la propagazione della fiamma stessa.

La combustione, inoltre, potrebbe provocare la distruzione del composto PFAS e contemporaneamente portare a prodotti da incompleta combustione (PIC) non misurabili e non quantificabili, spesso altrettanto tossici rispetto alla sostanza di partenza. I PIC possono essere più grandi o più piccoli del composto fluorurato originale. I frammenti carbonio-fluoro (C-F) prodotti durante la combustione possono ricombinarsi per produrre un'ampia varietà di PIC fluorurati non misurabili perché non esiste alcun metodo analitico o standard di calibrazione per farlo. Il punto principale di rilascio nell'aria da un sistema di incenerimento è il gas di combustione emesso dal camino, dove eventuali PFAS o sottoprodotti non degradati dal processo di incenerimento verrebbero rilasciati direttamente nell'ambiente.^{24, 25}

Studi su scala di laboratorio hanno dimostrato che, in fase di incenerimento, i PFAS possono decomporsi in sostanze chimiche tossiche e volatili come il tetrafluoruro di carbonio e l'esfluoroetano, o l'acido trifluoroacetico e l'acido fluoridrico (HF).

Visto l'elevato grado di energia richieste per la scissione del legame carbonio-fluoro (C-F), temperature più basse del necessario, possono portare alla produzione di prodotti intermedi fluorurati stabili, come il tetrafluorometano (CF₄). Una volta emesso o formatosi nell'atmosfera, il CF₄, è un potente gas a effetto serra, che persiste essenzialmente per sempre, visto che ha un tempo di esaurimento atmosferico praticamente nullo e una vita atmosferica stimata in 50.000 anni. Il CF₄ possiede inoltre un significativo potenziale di riscaldamento globale (GWP) di ~ 6600 su un orizzonte temporale di 100 anni.²⁶ Gli inceneritori di rifiuti pericolosi e i forni da cemento

²³ Ryan, J. PFAS Incineration: EPA Activities and Research. State/USEPA Region 5 Air Toxics Risk Assessment Meeting, Chicago, Illinois, November 12 - 13, 2019.

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=CEMM&dirEntryId=348232

²⁴ Phelps L. PFAS Emissions Measurement and Incineration Research. October 15, 2020.

https://www.4cleanair.org/wp-content/uploads/Phelps-National_Assoc_Clean_Air_Agencies_10152020.pdf

²⁵ Winchell LJ, Ross JJ, Wells MJM, Fonoll X, Norton JW Jr, Bell KY. Per- and polyfluoroalkyl substances thermal destruction at water resource recovery facilities: A state of the science review. *Water Environ Res.* 2020 Nov 15.

²⁶ Jubb, A. M., M. R. McGillen, R. W. Portmann, J. S. Daniel, and J. B. Burkholder (2015), An atmospheric photochemical source of the persistent greenhouse gas CF₄, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9505–9511

potrebbero essere efficaci nel distruggere le PFAS, anche se non ci sono prove certe; non si sa, invece, cosa accada negli inceneritori di rifiuti urbani e negli inceneritori di fanghi di depurazione, che lavorano a un regime di temperatura più basso.

È stato calcolato che per distruggere al 99% il CF₄, (composto organofluorurato) in >1 s via degradazione unimolecolare, potrebbero essere necessarie temperature a 1.400° C. In altri studi la distruzione del CF₄ ha richiesto temperature che variavano da 1,200 a 1,400° C.^{27, 28,}

Sebbene la maggior parte delle sostanze chimiche organiche venga distrutta durante l'incenerimento ad alte temperature, alcuni residui di PFAS rimangono nelle ceneri. Pertanto, anche le ceneri leggere e le ceneri pesanti provenienti dagli impianti di incenerimento dei rifiuti solidi urbani sono importanti vettori di PFAS nell'ambiente. Essi vengono smaltiti e contribuiscono a riportare in discarica un carico importante di PFAS re-immettendo nell'ambiente una quota importante di PFAS,²⁹ cosa che perpetuerà il circolo vizioso già descritto.

Una indagine ha valutato la presenza delle PFAS nel percolato di discarica, tre di questi percolati provenivano da discariche contenenti prevalentemente ceneri di incenerimento di rifiuti solidi urbani (RSU). È stata osservata una correlazione statisticamente significativa tra la concentrazione di PFAS nel percolato delle discariche, quella della cenere e l'intervallo di temperatura di esercizio dell'inceneritore ($R^2 = 0,92$, $p = 0,008$). Le concentrazioni totali di PFAS più basse (<3.400 ng/l) sono state trovate quando gli inceneritori operavano tra 930 e 980 °C, mentre le concentrazioni di PFAS più elevate (12.300–13.500 ng/l) sono state misurate nell'inceneritore con le temperature di esercizio più basse (760–870 °C).³⁰ Di recente, sono state determinate le concentrazioni delle PFAS nell'aria in impianti di incenerimento dei rifiuti solidi urbani (RSU) nella struttura e sopravvento. Le concentrazioni più elevate sono state trovate nelle strutture.³¹

In conclusione, sull'incenerimento delle PFAS rimangono ancora numerosi quesiti senza risposta e tra questi troviamo:

Quali sono i metodi disponibili e appropriati per quantificare la PFAS presenti nell'ambiente?

Che tipo di metodi di misurazione delle PFAS sono necessari? Si devono cercare solo le PFAS già regolamentate o anche le altre?

Ci sono metodi per misurare i composti PFAS volatili / semivolatili / non volatili e polari / non polari?

Quali PFAS si devono misurare? I cosiddetti "composti legacy" (cioè quelli ereditati e presenti nell'ambiente); o anche le PFAS componenti dei rifiuti (ad esempio, schiumogeni AFFF)?

Quali sono i prodotti di combustione incompleta (PIC)? Di che qualità sono i dati attuali di misurazione? E si potrebbe ancora continuare.

Nulla di chiaro e rassicurante

Insomma, da quanto detto si capisce che c'è poco di chiaro e rassicurante sull'incenerimento di RSU e fanghi da percolati di acque reflue o da scarichi industriali. Tuttavia, alcune certezze che invitano alla prudenza emergono chiaramente. È evidente che la distruzione incompleta delle PFAS

²⁷ Beu, L. S. (2005). Reduction of Perfluorocompound (PFC) Emissions: 2005 State-of- the-Technology Report. International Sematech Manufacturing Initiative.

https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/final_tt_report.pdf

²⁸ EPA Technical Brief. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Incineration to Manage PFAS Waste Streams [https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-](https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/technical_brief_pfas_incineration_ioaa_approved_final_july_2019.pdf)

[09/documents/technical_brief_pfas_incineration_ioaa_approved_final_july_2019.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/technical_brief_pfas_incineration_ioaa_approved_final_july_2019.pdf)

²⁹ Liu S, Zhao S, Liang Z, Wang F, Sun F, Chen D. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in leachate, fly ash, and bottom ash from waste incineration plants: Implications for the environmental release of PFAS. *Sci Total Environ.* 2021 Nov 15;795:148468.

³⁰ Solo-Gabriele HM, Jones AS, Lindstrom AB, Lang JR. Waste type, incineration, and aeration are associated with per- and polyfluoroalkyl levels in landfill leachates. *Waste Manag.* 2020 Apr 15;107:191-200.

³¹ Winchell LJ, Ross JJ, Wells MJM, Fonoll X, Norton JW Jr, Bell KY. Per- and polyfluoroalkyl substances thermal destruction at water resource recovery facilities: A state of the science review. *Water Environ Res.* 2020 Nov 15.

comporta la formazione di molecole di dimensioni ridotte e prodotti di degradazione tossici che sono dannosi per la salute umana.^{32,33} L'incenerimento è una pratica che porta all'emissione di aria contaminata da inquinanti, come gas fluorurati ad effetto serra e prodotti di combustione incompleta delle PFAS; inoltre, le PFAS possono rimanere nelle ceneri leggere e in quelle pesanti del processo di incenerimento. Le ceneri leggere (residuano dai filtri e dai processi di abbattimento dei fumi) sono estremamente tossiche, perché oltre alle PFAS vi si trovano notevoli quantitativi di metalli pesanti, quali cromo, piombo, zinco, oltreché residui di combustione che purtroppo possono contenere diossine e furani. È chiaro che ciò le rende non smaltibili in discariche comuni e richiedono il conferimento a discariche speciali o alla "tombazione" in miniere dismesse.³⁴ Qualunque residuo di incenerimento delle PFAS perpetua il ciclo ambientale perverso di queste sostanze.

Gli studi attualmente pubblicati non permettono di garantire quali siano i livelli di distruzione effettiva dei PFAS e quali altri contaminanti vengano creati nel processo. Un documento tecnico dell'EPA sull'incenerimento dei PFAS, pubblicato nel febbraio 2020, ha rilevato che "l'efficacia dell'incenerimento per distruggere i PFAS ... non è ben compresa".³⁵ García et al.³⁶ hanno osservato emissioni di PFAS significative, circa il 22% del composto originario su base di carbonio, dalla degradazione termica del politetrafluoroetilene (PTFE) in condizioni di ossigeno sub-stechiometrico a temperature variabili, in studi su scala di laboratorio.

È importante anche tenere presente che gli inceneritori emettono PFAS "non identificabili" e non tracciabili con i mezzi tecnici attualmente disponibili, oltre a numerose altre sostanze chimiche tossiche che contribuiscono a contaminare l'aria, il suolo e l'acqua attorno all'inceneritore, e anche a distanza di molti chilometri. Le ricerche mostrano che l'aero-trasporto delle PFAS permette a queste sostanze di viaggiare per diversi chilometri a partire dalle strutture che li emettono, come siti industriali di produzione, impianti di decontaminazione delle acque e inceneritori.³⁷ Alla fine, i PFAS aerotrasportati si depositano nel suolo e nell'acqua delle comunità vicine, aumentando l'esposizione per le persone che vivono in quell'area geografica e sommandosi al carico di contaminanti chimici già presenti. Un gruppo di ricercatori della Bennington University, nel Vermont, ha trovato livelli elevati di PFAS in campioni di suolo e acqua prelevati dai quartieri vicino all'inceneritore Norlite a Cohoes, New York. Il Team del Bennington College sostiene che, lungi dal distruggere le tossine, l'impianto di Norlite sembra essere una fonte locale - potenzialmente regionale - di significativa contaminazione da PFAS.³⁸

³² California Department of Toxic Substances Control. 2019. Product - Chemical Profile for Carpets and Rugs Containing Perfluoroalkyl or Polyfluoroalkyl Substances. https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2020/02/Final_Product-Chemical_Profile_Carpets_Rugs_PFASs_a.pdf

³³ Feng, M., Qu, R., Wei, Z., Wang, L., Sun, P., and Wang, Z. (2015). Characterization of the thermolysis products of Nafion membrane: A potential source of perfluorinated compounds in the environment. *Sci Rep*, 5, 9859. <https://doi.org/10.1038/srep09859>

³⁴ Direttivo di Medicina Democratica Onlus. 2016. Il dogma dell'incenerimento e la realtà dei fatti. <https://comunivirtuosi.org/il-dogma-dellincenerimento-e-la-realta-dei-fatti/>

³⁵ United States Environmental Protection Agency. February 2020. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Incineration to Manage PFAS Waste Streams. Technical BRIEF: Innovative Research for a Sustainable Future, Issue. https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/technical_brief_pfas_incineration_ioaa_approved_final_july_2019.pdf

³⁶ García, A. N., Viciano, N., & Font, R. (2007). Products obtained in the fuel-rich combustion of PTFE at high temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(1), 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.01.004>

³⁷ Galloway, J.E., Moreno, A.V.P., Lindstrom, A.B., Strynar, M.J., Newton, S., May, A.A., and Weavers, L.K. (2020). Evidence of Air Dispersion: HFPO-DA and PFOA in Ohio and West Virginia Surface Water and Soil near a Fluoropolymer Production Facility. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7175-7184. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07384>

³⁸ Bennington University. Vermont USA. Center for the Advancement of Public Action.

<https://www.bennington.edu/center-advancement-of-public-action/environment-and-public-action/understanding-pfoa>

Concludendo, è importante rimarcare che il destino delle PFAS nelle attuali condizioni operative degli inceneritori commerciali è in gran parte sconosciuto. Infatti, le PFAS registrate e potenzialmente presenti sul mercato, secondo OECD³⁹ sono almeno 4700, calcolandole secondo i numeri CAS (Chemical Abstracts Service) associati a un'ampia varietà di PFAS che potrebbero essere presenti sul mercato globale e nell'ambiente. In realtà, secondo il *Global Chemicals Outlook II*, manca ancora un resoconto completo sul numero reale di PFAS presenti nel mercato e nell'ambiente, a causa dell'assenza di informazioni trasparenti sulle quantità delle PFAS prodotte e usate, e per la mancanza di standard analitici di dominio pubblico.⁴⁰

È ipotizzabile, pertanto, che il percolato prodotto da RSU possa contenere molte migliaia di PFAS in più rispetto a quelle che siamo in grado di monitorare o alle pochissime di cui sono stati normati i livelli massimi ipoteticamente tollerabili. A riprova di queste lacune di conoscenza si riporta il dato che circa 70 singole PFAS sono state monitorate nel percolato di discarica in letteratura scientifica⁴¹ e che alcune alternative emergenti di PFOS e PFOA, come i *Chlorinated polyfluorinated ether sulfonates* (Cl-PFAESs), che sono stati rilevati in varie matrici ambientali, non sono stati ancora monitorati nel percolato da strutture di smaltimento dei rifiuti solidi urbani.

Inoltre, i PFCA a catena ultracorta, l'acido trifluoroacetico (TFA, C2) e l'acido perfluoropropionico (PFPrA, C3), sono stati frequentemente trovati con livelli dominanti rispetto ai PFAA a catena più lunga nell'aria, nella deposizione secca, nel suolo, nelle foglie delle piante, nell'acqua del fiume, acque sotterranee poco profonde, acqua potabile, sedimenti e fanghi.⁴²

Pertanto, per salvaguardare al meglio l'ambiente e la salute delle popolazioni residenti, prima di autorizzare la pratica dell'incenerimento di rifiuti contenenti PFAS o fanghi di discarica o di raccolta di acque reflue contaminate dovrebbe essere affrontato il problema di questa lacuna di dati. È indispensabile che le istituzioni finanzino ricerche, non affidate alle parti economicamente interessate, sul reale livello di distruzione delle PFAS in differenti sistemi di incenerimento prima di autorizzare la loro combustione in impianti di cui non si conoscono le effettive prestazioni.

In conclusione, i PFAS sono ovunque e hanno un forte impatto sulla salute delle persone, inoltre molti dei loro effetti a lungo termine sulla salute umana sono ancora sconosciuti.⁴³

Per difenderci da queste sostanze fortemente tossiche per la salute dobbiamo attuare misure di prevenzione primaria e cioè: ridurre drasticamente il numero e la quantità di sostanze prodotte e diffuse nell'ambiente; smettere di utilizzare quelle più tossiche; proibire sostanze nuove della stessa classe che non abbiano informazioni di sicurezza; bonificare i siti contaminati; evitare di incenerire i rifiuti e i fanghi che li contengono. I governanti devono applicare sempre il principio di precauzione quando fanno scelte che potrebbero aumentare la contaminazione ambientale da PFAS!

³⁹ Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). Toward a New Comprehensive Global Database of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): Summary Report on Updating the OECD 2007 List Of per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs).. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en).

⁴⁰ UNEP. Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions. 2019

<https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions>

⁴¹ Hamid H, Li LY, Grace JR. Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environ Pollut*. 2018 Apr;235:74-84.

⁴² Wang B, Yao Y, Chen H, Chang S, Tian Y, Sun H. Per- and polyfluoroalkyl substances and the contribution of unknown precursors and short-chain (C2-C3) perfluoroalkyl carboxylic acids at solid waste disposal facilities. *Sci Total Environ*. 2020 Feb 25;705:135832.

⁴³ European Environment Agency (EEA). Emerging chemical risks in Europe — 'PFAS'.

<https://www.eea.europa.eu/themes/human/chemicals/emerging-chemical-risks-in-europe>