

Sostituzione/riduzione nella produzione ed utilizzo dei PFAS in chiave prospettica: valutazione dei polimeri fluorurati nel contesto del loro ciclo di vita

Gianfranco Brambilla

Istituto Superiore di Sanità, Dipartimento Alimentazione, Nutrizione e Sanità Pubblica Veterinaria, Reparto malattie trasmissibili con gli alimenti – One Health

SOSTITUZIONE/RIDUZIONE NELLA PRODUZIONE ED UTILIZZO DEI PFAS IN CHIAVE PROSPETTICA

I polimeri fluorurati: definizione e contesto

Per polimeri fluorurati, si intende una classe di composti formati da almeno un tipo di unità monomerica fluorurata o che riconoscano la presenza di catene laterali fluorurate attaccate ad una struttura idrocarboniosa.

Non tutti i polimeri fluorurati rientrano nella definizione che l'Organizzazione per la Cooperazione e Sviluppo Economico OCSE/OECD ha fornito nel 2021 – per le sostanze Per- e Poli-Fluoro alchiliche – PFAS (OECD, 2021).

“I PFAS sono definiti come sostanze fluorurate che contengono almeno un atomo di carbonio metilico o metilenico completamente fluorurato (senza alcun atomo di H/Cl/Br/I ad esso attaccato), vale a dire, con alcune eccezioni, qualsiasi sostanza chimica con almeno un gruppo metilico perfluorurato ($-CF_3$) o un gruppo metilenico perfluorurato ($-CF_2-$) è un PFAS”.

Questo è il caso del politerafluoroetilene – PTFE, con gruppi ripetuti $-CF_2CF_2-$ e $-CF_2CH_2-$ nella struttura. Non è il caso, ad esempio del fluoruro di polivinile – PVF $[(CH_2CHF)_n-]$ per la non completa sostituzione degli atomi di idrogeno con atomi di fluoro della catena carboniosa.

In questo lavoro si considerano i fluoropolimeri come sostanze appartenenti ai PFAS (PFAS polimerici), facendo riferimento alla definizione generale ed univoca dei PFAS proposta dall'OCSE/OECD, che è alla base dei quadri normativi esistenti nel settore ambientale e alimentare, in via di progressiva armonizzazione tra i vari settori acqua, aria, suolo, biota di interesse alimentare e no (Sigmund *et al.*, 2025).

Tra le sostanze per- e poli-fluoroalchiliche i fluoropolimeri rappresentano una classe ben definita, che per i molteplici campi di applicazione, copre una frazione di 24-40% dei PFAS totali (polimerici e non) immessi sul mercato, a livello europeo (Eionet, 2021;

EEA, 2025) (Figura 1) (Tabella 1).

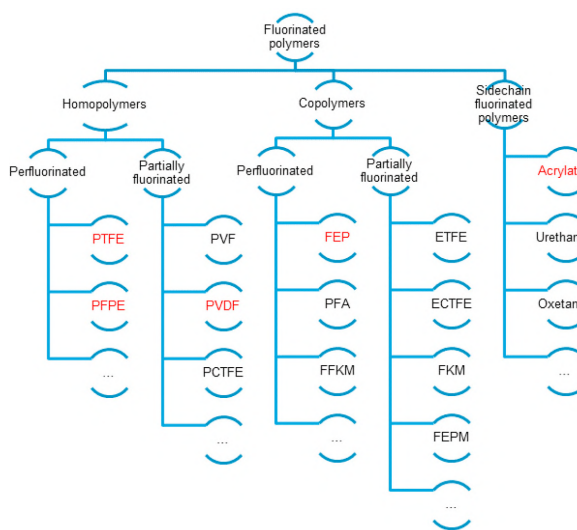


Figura 1. Principali PFAS polimerici, in base alla loro composizione da un solo o differenti monomeri (omo- vs co-polimeri), alla sostituzione completa degli atomi di idrogeno con atomi di fluoro (per- vs poli-fluorurati) o alla presenza di catene laterali fluorurate su una struttura idrocarboniosa ("sidechain"). Figura tratta dal rapporto Eionet, 2021. In rosso, evidenziate le molecole maggiormente attenzionate, per volumi di produzione.

Nel *dossier* aggiornato al 14 ottobre 2025 relativo alla proposta di riduzione/sostituzione dei PFAS avanzata da 5 Stati dell'Unione Europea, si stima che nel 2020 siano state introdotte nello Spazio economico europeo circa 190.000-340.000 t di PFAS, dove i PFAS polimerici (principalmente fluoropolimeri) coprono una quota da 84.000 a 199.000 t, rispetto alle 92.000-102.000 t dei gas fluorurati e le 11.000-41.000 tonnellate da PFAS non polimerici. In mancanza di restrizioni, si stima che la quantità totale di PFAS in un periodo di 30 anni (2022-2055) sarà di 27,1 milioni di t con emissioni corrispondenti di 4,7 milioni di tonnellate, nell'area economica europea (<https://echa.europa.eu/it/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>).

In campo regolamentare internazionale ed anche europeo delle sostanze chimiche (REACH), le sostanze polimeriche, inclusi i polimeri fluorurati, fino ad ora non sono state considerate di rilevanza ai fini della registrazione, valutazione e autorizzazione, in quanto si è considerata fondamentalmente la loro stabilità ambientale e prevalentemente, ma non esclusivamente, la pressoché assente biodisponibilità, dati i pesi medi molecolari elevati, che di fatto ne impediscono

Tabella 1. Abbreviazioni convenzionali per i PFAS polimerici riportati in Figura 1.

Abbreviazione	Nome commerciale (es.)	Monomeri
PTFE	Teflon	politetrafluoroetilene
PCTFE	Neoflon	policlorotrifluoroetilene
PVF	Tedlar	polivinilfluoruro
PVDF		polivinilidenefluoruro
FEP	Dyneon FEP	poli(tetrafluoroetilene-co-esafuoropropilene)
ETFE	Neoflon	poli(etilene-co-tetrafluoroetilene)
ECTFE	Halar ECTFE	poli(etilene-co-clorotrifluoroetilene)
PFA		poli(tetrafluoroetilene co-perfluoropropilviniletere)
PFPE	Fomblin	per- e poli-fluoropolietteri
FKM, FFKM, FEPM	Viton, Kalrez, Silastic	fluoroelastomeri

l'assorbimento negli organismi viventi: "I polimeri sono esenti dall'obbligo di registrazione sancito dal Titolo II di REACH (articolo 2, paragrafo 9). Al fabbricante o all'importatore di un polimero quindi solitamente non incombe l'obbligo di fornire all'Agenzia alcuna informazione concernente le proprietà intrinseche del polimero stesso, eccezione fatta per la sua classificazione e l'etichettatura, se del caso (si veda la sezione 3.2.4)".

Tuttavia, ai sensi dell'articolo 6, paragrafo 3, ogni fabbricante o importatore di un polimero deve presentare una registrazione all'Agenzia per la o le sostanze monomeriche o per qualsiasi altra sostanza non ancora registrata da un attore a monte della catena d'approvvigionamento, se sono soddisfatte le due seguenti condizioni:

(a) il polimero contiene il 2% o più in peso/ peso di tali sostanze monomeriche o altre sostanze in forma di unità monomeriche e sostanze chimicamente legate;

(b) il quantitativo totale di tali sostanze monomeriche o altre sostanze è pari ad almeno 1 tonnellata all'anno (il quantitativo totale in tale contesto è la quantità totale delle sostanze monomeriche o di altro tipo che confluiscono in un legame chimico con il polimero stesso) (ECHA, 2023).

Tuttavia, per quanto rappresentato sopra, la Commissione Europea sta considerando una revisione di tale esclusione dall'obbligo di registrazione per alcune categorie di polimeri (polimeri che richiedono registrazione – PPR), tra cui i PFAS polimerici, per il loro potenziale impatto del loro ciclo produttivo, di utilizzo e di smaltimento/recupero sull'ambiente e sulla salute degli organismi viventi, in base alle più recenti evidenze scientifiche.

Nel quadro delle politiche di riduzione e sostituzione dei PFAS, anche i

fluoropolimeri sono stati inclusi tra le possibili restrizioni alla produzione, laddove non se ne ravveda la sostenibilità socio-economica alla loro sostituzione, per mancanza di alternative non fluorurate di equivalente prestazione, nello specifico campo manifatturiero di applicazione. Dagli ultimi aggiornamenti della Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche (ECHA), in ambito dei Comitati di Valutazione del Rischio (RAC) e di Sostenibilità Socio-Economica (SEAC), saranno considerati preliminarmente 14 dei 22 settori individuati di impiego dei PFAS (tessile, materiali a contatto con gli alimenti, cromature e lavorazione di metalli, anti-appannanti, cosmetici, scioline, gas refrigeranti, dispositivi medico-chirurgici, trasporti, elettronica e semiconduttori, energia, materiali da costruzione, lubrificanti, industria estrattiva, sigillanti, stampa, industria meccanica, esplosivi, industria militare, altre applicazioni mediche, tessuti tecnici, altri impieghi industriali), settori che comunque dovrebbero coprire il 90% dei volumi di produzione e delle emissioni.

I fluoropolimeri o PFAS polimerici potranno essere quindi valutati e proposti per la classificazione in 3 differenti categorie (R01, R02, e R03) in base alla presenza di valide alternative, ovverossia alla dimostrazione di uso essenziale o considerando l'applicazione di misure strettissime atte a limitare il loro rilascio durante il ciclo di produzione. Di seguito le specifiche:

R01: Un divieto assoluto, che entra in vigore entro 18 mesi dall'approvazione del Regolamento;

R02: Un divieto, con deroghe per settori specifici da 5 a 12 anni;

R03: Un'autorizzazione ad alcune applicazioni, sotto stringenti requisiti di controllo delle emissioni, basate sul ciclo di vita (Figura 2).

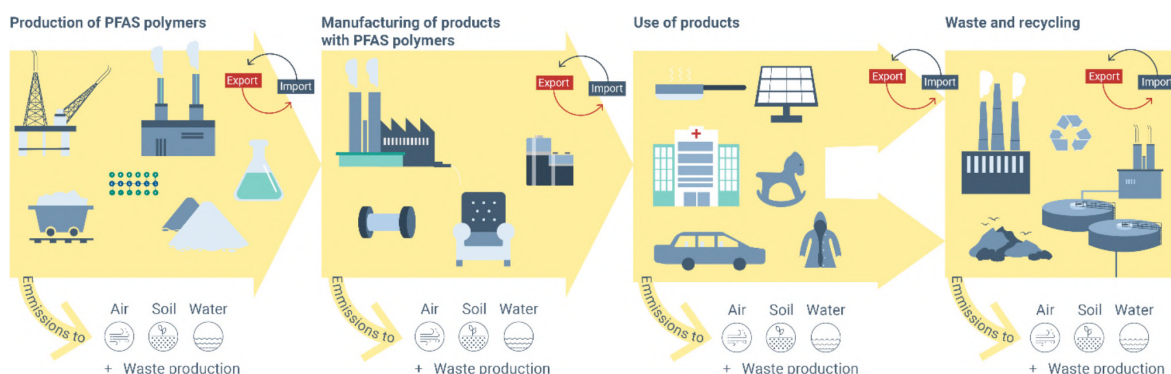


Figura 2. Il ciclo di vita dei PFAS polimerici dalla fase di sintesi, alla produzione di prodotti e loro utilizzo, fino al loro smaltimento o recupero. Figura tratta dalla Agenzia Europea per l'ambiente, Briefing 04/2025, "PFAS polymers in focus: supporting Europe's zero pollution, low-carbon and circular economy ambitions" (EEA, 2025).

Il report congiunto SEAC + RAC a supporto delle politiche di sostituzione e riduzione della produzione di PFAS nel loro complesso, inclusi i fluoro-polimeri, è atteso nel 2026, anche se non conclusivo (<https://echa.europa.eu/-/echa-announces-timeline-for-pfas-restriction-evaluation>).

Le evidenze per una valutazione chimico-tossicologica legata al ciclo di vita dei fluoropolimeri

In tutte le fasi del ciclo di vita di un fluoropolimero possiamo avere emissioni di PFAS in forma non polimerica e quindi biodisponibili nell'ambiente, fatta salva l'emissione di micro- e nano-fluoro plastiche (Figura 2).

La valutazione che si estende dal prodotto, all'intero processo di produzione, partendo dai reagenti utilizzati per la sintesi dei monomeri, passando per i composti sintetizzati, inclusi gli intermedi di reazione e prodotti secondari, giungendo al fine-vita del prodotto contenente il polimero e al suo riciclo, ovvero al suo smaltimento, costituisce una sfida analitica e tossicologica.

Tale valutazione implica un monitoraggio

delle tendenze temporali per quanto riguarda il rilascio di PFAS nell'ambiente, e quindi il loro impatto diretto e indiretto sugli organismi viventi. Il monitoraggio, in ultimo, rappresenta l'indicatore della efficacia delle misure regolamentari adottate per ridurre le emissioni di PFAS, ovvero, della opportunità di apporre dei correttivi alla gestione del rischio.

Per inquadrare il ciclo di vita dei fluoropolimeri nell'ambito di un'ampia valutazione chimico-tossicologica, in primis si devono potere acquisire informazioni e dati.

Una banca dati ufficiale è costituita dal Registro Europeo delle emissioni industriali e trasferimento di sostanze inquinanti (E-PRTR), un database online accessibile al pubblico (<https://industry.eea.europa.eu/#/home>) che contiene dati sulle emissioni di inquinanti nell'aria, nell'acqua e nel suolo da parte di grandi complessi industriali in Europa. Per quanto riguarda i siti di sintesi e produzione di fluoropolimeri, tale registro è stato valutato contenere in alcuni casi informazioni molto più dettagliate quali/quantitative riguardo i PFAS utilizzati nella sintesi polimerica e le stime di rilascio nell'ambiente rispetto a quanto presente nelle Autorizzazioni Integrate Ambientali riferite a specifici impianti presenti in Europa (Dalmijn *et al.*, 2024).

Recentemente, in Italia, il Tribunale Amministrativo Regionale (TAR)

ha riconosciuto il diritto da parte di Organizzazioni non Governative di accedere in modo completo alle informazioni sulle emissioni di un impianto di fluoropolimeri, informazioni che a giudizio del TAR non possono essere considerate riservate a tutela del segreto industriale (https://www.lastampa.it/alessandria/2025/11/03/news/solvay_syensqo_sentenza_tar_dati_emissioni_spinetta_marengo_legambiente-15379874/). Altre evidenze riguardanti le emissioni di PFAS da impianti di produzione vengono fornite dai dati di letteratura scientifica per quanto riguarda analisi compiute in Spettrometria di Massa ad Alta Risoluzione (HRMS) in modalità *Suspect Screening/Untarget* in matrici ambientali (acque e terreni e biota) in vicinanza di impianti di sintesi di monomeri e di produzione di fluoropolimeri (Strynar *et al.*, 2023; Megson *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025), laddove sono stati usati nuovi additivi fluoro-surfattanti, quali Cl-PFECAs (ADV), cC6O4, Adona, Gen X, che progressivamente hanno sostituito il PFOA ed il PFNA nelle sintesi fluoropolimeriche.

Alcune aziende che producono fluoro-polimeri si sono impegnate a sostituire tali additivi fluorurati, con alternative non fluorurate. Tuttavia, tale sostituzione nella sintesi fluoro-polimerica sembra dia origine alla formazione e probabile emissione di un maggiore numero di prodotti polifluorurati intermedi, che richiedono una caratterizzazione chimico-tossicologica propedeutica all'abbattimento delle loro emissioni e della riduzione dell'impatto sugli organismi viventi (Sworen *et al.*, 2024).

Che i prodotti intermedi che originano dalla sintesi dei fluoropolimeri siano bio-disponibili risulta evidente dai dati di biomonitoraggio riferiti a persone professionalmente esposte e al biota sotto diretto impatto delle emissioni

dell'impianto, condotte con tecniche di spettrometria di massa ad alta risoluzione, capaci di rilevare e caratterizzare la presenza anche di nuovi composti PFAS di neoformazione: nel siero di lavoratori di un impianto di fluoropolimeri nella Repubblica Popolare Cinese sono stati identificate ben 64 differenti classi di PFAS tra cui 15 nuove come gli acidi perfluoroalchilsolfonici sostituiti con etere pentafluorosolfato, le perfluoroalchilammine sostituite con idrogeno e gli esteri dei gruppi fenolici contenuti nelle perfluoroalchilsolfonilaldeidi (Liu *et al.*, 2025). Uno spunto per analisi chimico-tossicologiche ad ampio spettro, estese anche a composti non coperti dalla disponibilità di *standard* analitici, ma comunque identificabili seguendo i criteri indicati da Charbonnet *et al.*, (2022).

Per quanto riguarda le emissioni di PFAS durante l'utilizzo di fluoropolimeri nei beni di consumo, le evidenze che i polimeri e monomeri fluorurati non siano del tutto inerti, ma che rilascino PFAS, vengono dalle analisi di *routine* in cromatografia liquida dove i fluoro-polimeri utilizzati nel "*tubing*" e nei filtri e guarnizioni possono rilasciare PFAS a corta e media catena in fasi acquose, rendendo così obbligatorio inserire in ogni sessione analitica un bianco procedurale e opportune mini-colonne in grado di separare cromatograficamente i PFAS naturalmente presenti nella matrice oggetto di analisi da quelli rilasciati dai materiali fluorurati presenti nell'apparecchiatura analitica (Joudan *et al.*, 2024).

Per quanto riguarda il fine vita dei materiali contenenti fluoropolimeri, dal recupero alla distruzione, l'attenzione va posta oggi sui settori industriali ad alta integrazione che si stanno dotando di procedure con tecnologie per recuperare e riciclare i fluoropolimeri in maniera differenziata, diminuendo così la necessità delle sintesi

de novo e quindi di fatto riducendo le emissioni al livello di impianti di sintesi.

Questo tuttavia, al momento attuale, non sembra essere il caso dei fluoropolimeri contenuti nei beni di largo consumo (ad esempio i materiali a contatto con gli alimenti) e dei fluoropolimeri utilizzati nei dispositivi medici (dalle lenti a contatto, ai cateteri, ai deflussori, ai dispositivi di protezione personale), anche per l'eterogeneità del rifiuto e quindi della sua difficile caratterizzazione.

Non sempre per tali categorie di rifiuti risulta implementato un circuito di recupero e riutilizzo o smaltimento selettivo. In prospettiva, l'applicazione di tecniche spettrofotometriche già disponibili, ad esempio quelle basate sulla Spettroscopia nel vicino infrarosso (NIR) o sulla fluorescenza atte ad identificare e selezionare il tipo di plastica e fluoro-plastica presente nel rifiuto, potranno essere di aiuto (Ryan and Hutton, 2022). Ad esempio, questo è il caso dei rifiuti ospedalieri, che dopo adeguato trattamento termico in grado di garantire la bio-sicurezza, oggi sono equiparati in Italia al residuo secco (leggi rifiuto urbano indifferenziato) e come tali possono essere smaltiti in discarica o nel termovalorizzatore.

Per quanto riguarda le temperature di esercizio dei termovalorizzatori, al fine dello smaltimento dei rifiuti fluoropolimerici, laddove ben caratterizzati per composizione omogenea, valori superiori ai +900 °C, comportano di fatto la produzione di acido trifluoroacetico (TFA), che può essere intercettato e rimosso dalle emissioni attraverso l'aggiunta di "chemicals", quali il bicarbonato, al processo di combustione. Tuttavia, nel suo lavoro sulla distruzione dei PFAS dall'incenerimento di rifiuti pericolosi, US-EPA non è stata in grado di verificare

la presenza di composti organici polari fluorurati, quale il TFA, per la mancanza di metodi analitici standardizzati, ravvisando la necessità di futuri sviluppi in tale direzione (US-EPA, 2025). Tuttavia, la presenza di fluoropolimeri, nel rifiuto recuperato per la rigenerazione termica delle plastiche, a temperature di solito comprese tra +150 °C, fino ai +550 °C in assenza di ossigeno (pirolisi), può comunque determinare l'emissione di PFAS a catena medio-corta (Dolatabad *et al.*, 2025).

Per quanto riguarda lo smaltimento dei materiali a base di fluoropolimeri in discarica, il percolato risulta la materia più contaminata e richiede una adeguata gestione (Meng *et al.*, 2025).

La valutazione tossicologica dei PFAS come miscela

Le evidenze scientifiche portano quindi ad estendere la valutazione tossicologica della famiglia dei PFAS a composti di neo-formazione/degradazione di cui non si dispone ancora degli *standard* analitici, in modo associato, come miscela. La questione è estremamente dibattuta e pone in maniera interessante e differenziale un discorso sulla tossicità regolamentare (*regulatory toxicology*) dei PFAS, che fino ad ora si è basata su una lista positiva di molecole conosciute (*legacy*) per cui sono disponibili *standard* analitici, non considerando gli "*unknown*" ed "*emerging*" PFAS che si originano anche come intermedi di processo e che, in base alla forma ionica o neutra, possono principalmente essere associati alla fase particolata, oppure alla fase gassosa delle emissioni rispettivamente. I differenti destini ambientali portano quindi ad esporre il biota in maniera differenziale ad esempio tramite l'inalazione (miscele di PFAS con composti neutri prevalenti), piuttosto che tramite l'assunzione di acqua (PFAS ionici prevalenti).

Di fronte a tale complessità dei PFAS, come miscele, si vanno ad aggiungere

i fattori di rischio nell'esposizione del biota e dell'uomo e dei conseguenti effetti sulla salute, che possono variare nella composizione in base al rischio occupazionale, abitudini alimentari, luogo di residenza, differente vulnerabilità in base alla finestra di esposizione (es. prenatale, perinatale), allo stato di salute, con attenzione all'omeostasi ossidativa (capacità dell'organismo di compensare il danno ossidativo causato da specie radicaliche).

Attualmente, nella tossicità regolamentare, l'approccio più seguito è quello di fare riferimento ad un modello di addittività della dose (*dose-addiction*), che, analogamente a quanto già in essere per Policlorodibenzo-diossine, e -furani (PCDD/Fs) e Policlorobifenili diossina simili (DL-PCBs), si basa su dei fattori di equivalenza di Tossicità (TEF) o Fattori di Potenza Relativi (RPF), per quei PFAS caratterizzabili analiticamente e tossicologicamente (Bil *et al.*, 2025). La addittività della dose viene preferita in quanto generalmente più conservativa e si basa sulle evidenze che i composti riconoscano analoghe vie tossicologiche e provochino uno stesso effetto avverso sulla salute, con curve dose-risposta riconducibili ad una proporzionalità diretta. In questo, la tossicità epatica e la immunotossicità dovuta alla minore capacità del fegato di sintetizzare immunoglobuline sono in via generale riconosciuti come gli *end-points* più sensibili, su base di studi epidemiologici in popolazioni esposte soprattutto a PFOA, evidenze rinforzate da studi *in vitro* e *in vivo* in animali da esperimento.

Tuttavia, l'approccio *dose-addiction*, ovvero sia l'indipendenza di ogni PFAS nel causare l'effetto avverso in modo proporzionale alla dose, volendo comunque riconoscere un meccanismo di tossicità comune a tutti i PFAS che risultino biodisponibili, potrebbe non essere

completamente adeguato a spiegare la tossicità su base cellulare, in particolare per la perturbazione omeostatica della membrana cellulare esterna e delle membrane intracellulari. Questo, perché i vari PFAS hanno proprietà surfattanti differenti, in grado di interagire, competere e sostituirsi tramite mimesi ai fosfolipidi di membrana, e quindi concorrere in modo sinergico a perturbarne le proprietà omeostatiche, secondo il modello della membrana fluida o a mosaico (Zheng *et al.*, 2025).

Questo effetto di tossicità non specifica di membrana (indipendente da legami recettoriali e/o accettoriali), basato sulle proprietà surfattanti dei PFAS, di fatto viene a considerare il ruolo tossicologico dei cosiddetti PFAS a corta catena (numero di atomi di carbonio <6), ritenuti generalmente di minore rilevanza in quanto non bioaccumulano, ma tuttavia presenti, ad esempio nell'acqua, a più elevate concentrazioni rispetto ai congeneri a medio-lunga catena.

Il fatto che i PFAS siano molecole fortemente alogenate, di fatto induce la produzione di intermedi radicalici interni alla cellula, anche attraverso una pregiudicata funzionalità delle membrane mitocondriali e dei vacuoli autofagici incaricate della compartimentalizzazione di tali agenti ossidanti. Tutto questo si traduce in un danno ossidativo che comporta un invecchiamento precoce cellulare, dove alcuni Autori propongono l'aumento della proteina C reattiva (Zhao *et al.*, 2024) e l'accumulo di lipofuscine come *marker* di effetto (Thompson *et al.*, 2023; Stevenson *et al.*, 2025), e dove il danno ossidativo può arrivare anche agli acidi nucleici, con effetti sulla tossicità riproduttiva e cancerogenesi, laddove non compensato da meccanismi anti-ossidanti e di riparazione del danno (Li *et al.*, 2025) (Figura 3).

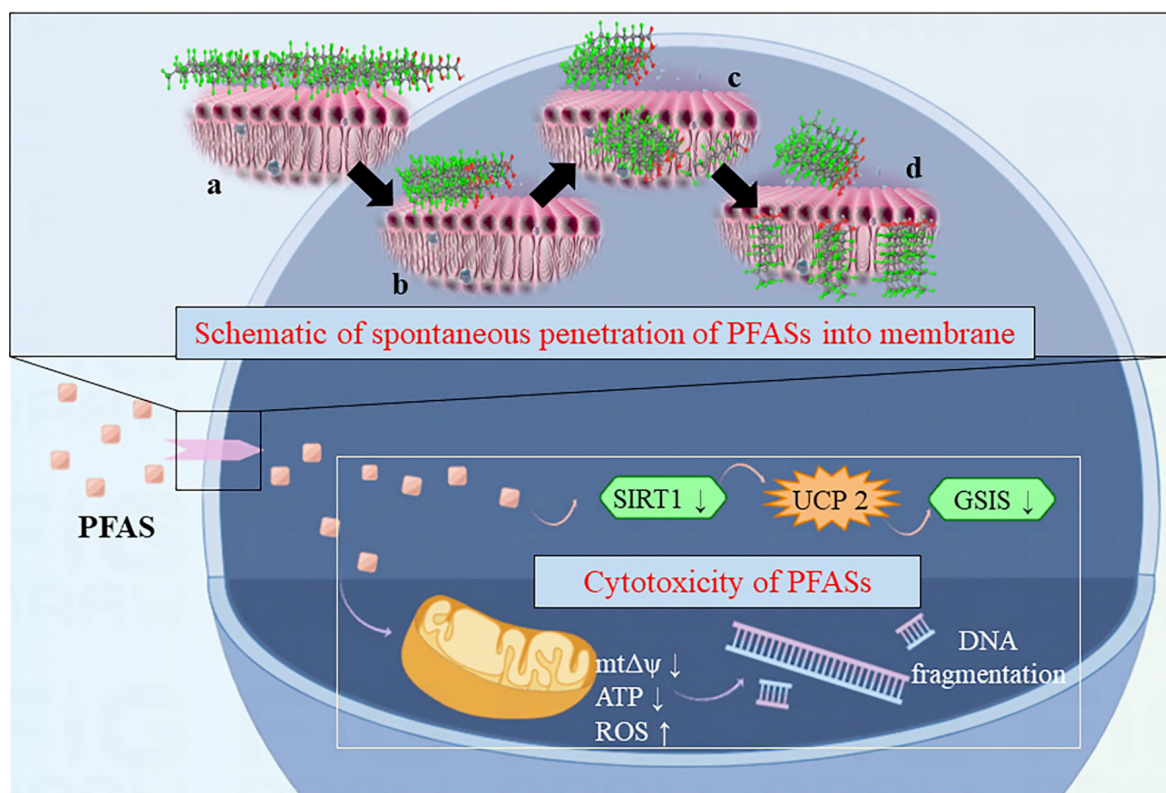


Figura 3. Meccanismo di alterata funzionalità delle membrane cellulari da parte dei PFAS, sulla base di una tossicità non specifica, con conseguente danno ossidativo. Figura tratta da Zhao et al., 2023 sotto licenza CC BY-NC-ND 4.0.

Si può quindi considerare una tossicità di membrana, che si traduce in tossicità di organo o di sistema in base alla via di esposizione, la miscela di PFAS, la differente composizione fosfolipidica delle cellule in base alla loro specializzazione funzionale (si prendano ad esempio l'epitelio delle vie respiratorie per quanto riguarda le miscele di PFAS neutri, presenti nell'aria, e le mucose intestinali per quanto riguarda le miscele di PFAS polari di solito più rappresentati nell'acqua e negli alimenti), la loro funzione di barriera selettiva e, non da ultimo, per quanto riguarda l'invecchiamento cellulare, il tasso mitotico. A tale proposito, interessante osservare come recenti studi tossicodinamici approfondiscano la presenza selettiva di PFAS in differenti aree funzionali del sistema nervoso centrale per valutarne la neurotossicità (Bharal et al., 2024).

In base al sopracitato meccanismo di mimesi fosfolipidica, gli studi *in vitro* di alterata permeabilità e funzionalità in sistemi di colture cellulari, anche "complessi" e quindi in grado di riprodurre funzionalmente epiteli e mucose, oggi si ritengono i più promettenti per una valutazione tossicologica dei PFAS come miscele, in maniera olistica, considerando appunto la "tossicità non specifica" di membrana (Quin et al., 2024; Fosella et al., 2025), e pongono le basi per lo sviluppo di saggi bio-tossicologici inquadrati in ben definiti disegni di studio e piani di monitoraggio dei PFAS come miscele.

Conclusioni

I PFAS polimerici oggi risultano impiegati in numerosi settori manifatturieri e possono essere responsabili fino al 40% dei PFAS totali immessi sul mercato. Nel quadro della promozione di cicli di produzione sicuri e sostenibili per concezione (*safe and sustainable by design*) è necessario approfondire le conoscenze chimico-

tossicologiche dei PFAS rilasciati durante tutte le fasi del ciclo di vita di tali prodotti, caratterizzando l'associazione di più composti, le vie di rilascio ambientale, i meccanismi di degradazione e le vie di esposizione del biota vegetale e animale. Affrontare queste sfide richiede un monitoraggio più approfondito dei PFAS come miscele, monitoraggio oggi percorribile attraverso tecniche di spettrometria di massa ad alta risoluzione, con approcci *suspect screening* e *untarget*. Parimenti, lo sviluppo di saggi tossicologici implementabili anche in condizioni di campo può aiutare a comprendere meglio gli impatti a lungo termine sulla biodiversità e sulla salute umana e animale.

Bibliografia:

1. Bharal, B., Ruchitha, C., Kumar, P., et al., (2024). Neurotoxicity of per- and polyfluoroalkyl substances: Evidence and future directions. *Science of The Total Environment*, 955, 176941. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176941>.
2. Bil, W., Hartmann, J., Bakker, M., Bokkers, B. (2025). Mixture risk assessment approaches to evaluate oral exposure to PFAS: Outputs and recommendations of an expert workshop. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 162, 105907. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2025.105907>.
3. Charbonnet, J.A., McDonough, C.A., Xiao, F., et al. (2022). Communicating Confidence of Per- and Polyfluoroalkyl Substance Identification via High-Resolution Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology Letters* 9, 473-481. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00206>.
4. Dalmijn, J., Glüge, J., Scheringer, M., and Cousins, I.T. (2024). Emission inventory of PFASs and other fluorinated organic substances for the fluoropolymer production industry in Europe. *Environ. Sci.: Processes Impacts* 26, 269. <https://doi.org/10.1039/d3em00426k>.
5. Dolatabad, A.A., Zhang, X., Mai, J., et al. (2025). Thermal decomposition of fluoropolymers: Stability, decomposition products, and possible PFAS release. *Journal of Hazardous Materials* 496, 139322. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139322>.
6. ECHA - Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche - (2023). *Guidance for monomers and polymers* DOI: 10.2823/933. Disponibile a: <https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-reach>.
7. EEA - Agenzia Europea dell'ambiente (2025). *Fluoropolymers in Focus: supporting Europe's zero pollution, low-carbon and circular economy ambitions*. Disponibile a: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>.
8. Eionet (2021). *ETC/WMGE 2021/9 Fluorinated polymers in a low carbon, circular and toxic-free economy - Technical report*. Disponibile a: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/fluorinated-polymers-in-a-low-carbon-circular-and-toxic-free-economy>.
9. Fosella, J., Ceja-Vega, J., Rabadi, A., et al. (2025). Biophysical Consequences for Exposure of Model Cell Membranes to Perfluoroalkyl Substances. *The Journal of Physical Chemistry B* 129, 7951-7963. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5c02472.
10. Joudan, S., Gauthier, J., Mabury, S.A., and Young, C.A. (2024). Aqueous Leaching of Ultrashort-Chain PFAS from (Fluoro)polymers: Targeted and Nontargeted Analysis. *Environmental Science & Technology Letters* DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00797.
11. Li, S., Oliva, P., Zhang, L. et al. (2025). Associations between per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and county-level cancer incidence between 2016 and 2021 and incident cancer burden attributable to PFAS in drinking water in the United States. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 35, 425-436. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00742-2>.
12. Li, X., Li, W., Wang, Z., et al., (2025). Atmospheric Emission of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from a Fluoropolymer Manufacturing Facility: Focus on Emerging PFAS and the Potential Contribution of Condensable PFAS on their Atmospheric Partitioning. *Environ. Sci. Technol.* 59, 9709-9720. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c03486>.
13. Liu, Y., Guo, Y., Lv, M., et al. (2025). Unraveling the Exposure Spectrum of PFAS in Fluorochemical Occupational Workers: Structural Diversity, Temporal Trends, and Risk Prioritization. *Environ Sci Technol* 59, 6247-6260. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c13281>.
14. Megson, D., Niepsch, D., Spencer, J., et al. (2024). Non-targeted analysis reveals hundreds of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in UK freshwater in the vicinity of a fluorochemical plant *Chemosphere* 367, 143645. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143645>.

15. Meng, L., Wan, R., Hu, H., et al. (2024). Leaching Behavior and Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Typical Fluoropolymers *ACS ES&T Water*, 4, 2352-2360 DOI: 10.1021/acsestwater.3c00681.
16. OECD/OCSE (2021). *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: 116 Recommendations and Practical Guidance*; OECD Environment, Health and Safety 117 Publications Series on Risk Management No. 61; 2021. 118.
17. Qin, W., Henneberger, L., Glüge, J., et al. (2024). Baseline Toxicity Model to Identify the Specific and Nonspecific Effects of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Cell-Based Bioassays. *Environ Sci Technol.* 58, 5727-5738. doi: 10.1021/acs.est.3c09950.
18. Ryan, L. and Hatton, F. (2022). *Enabling the Polymer Circular Economy: Innovations in Photoluminescent Labeling of Plastic Waste for Enhanced Sorting*. Loughborough University.
19. <https://hdl.handle.net/2134/21997466.v1>.
20. Sigmund, G., Venier, M., Ågerstrand, M., et al. (2025). Scientists' Statement on the Chemical Definition of PFASs. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 12, 1104-1106. [https://doi.org/ 10.1021/acs.estlett.5c00478](https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5c00478).
21. Stevenson, C.K., Jiang, W., Chunying, D. (2025). *Pfos-Induced Black Liver and Premature Hepatic Aging in Mice: A New Paradigm in Environmental Hepatotoxicology*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5345869> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5345869>.
22. Strynar, M., McCord, J., Newton, S., et al. (2023). Practical application guide for the discovery of novel PFAS in environmental samples using high resolution mass spectrometry. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 33, 575-588. doi: 10.1038/s41370-023-00578-2.
23. Sworen, J.C., Morken, P.A., Smith, A.P., et al. (2024). Interrogation of a fluoropolymer dispersion manufactured with a non-fluorinated polymerization aid for targeted and non-targeted fluorinated residuals by liquid chromatography high resolution mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1736, 465369. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.465369>.
24. Thompson, C.M., Heintz, M.M., Wolf, J.C., et al., (2023). Assessment of Mouse Liver Histopathology Following Exposure to HFPO-DA With Emphasis on Understanding Mechanisms of Hepatocellular Death. *Toxicologic Pathology* 51, 4-14. doi:10.1177/01926233231159078.
25. USEPA (2025). *PFAS Destruction by a Hazardous Waste Incinerator: Testing Results*. EPA 600/R-25/172, September 2025, consultabile al sito: www.epa.gov/research
26. Zhao, Z., Zhou, J., Shi, A., et al., (2024). Per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) accelerate biological aging mediated by increased C-reactive protein. *Journal of Hazardous Materials* 480, 136090. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136090>.
27. Zheng, S., Sarker, P., Gursoy, D., et al. (2025). Molecular Mechanisms of Perfluoroalkyl Substances Integration into Phospholipid Membranes. *Langmuir* 41, 9369-9376. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5c00124.