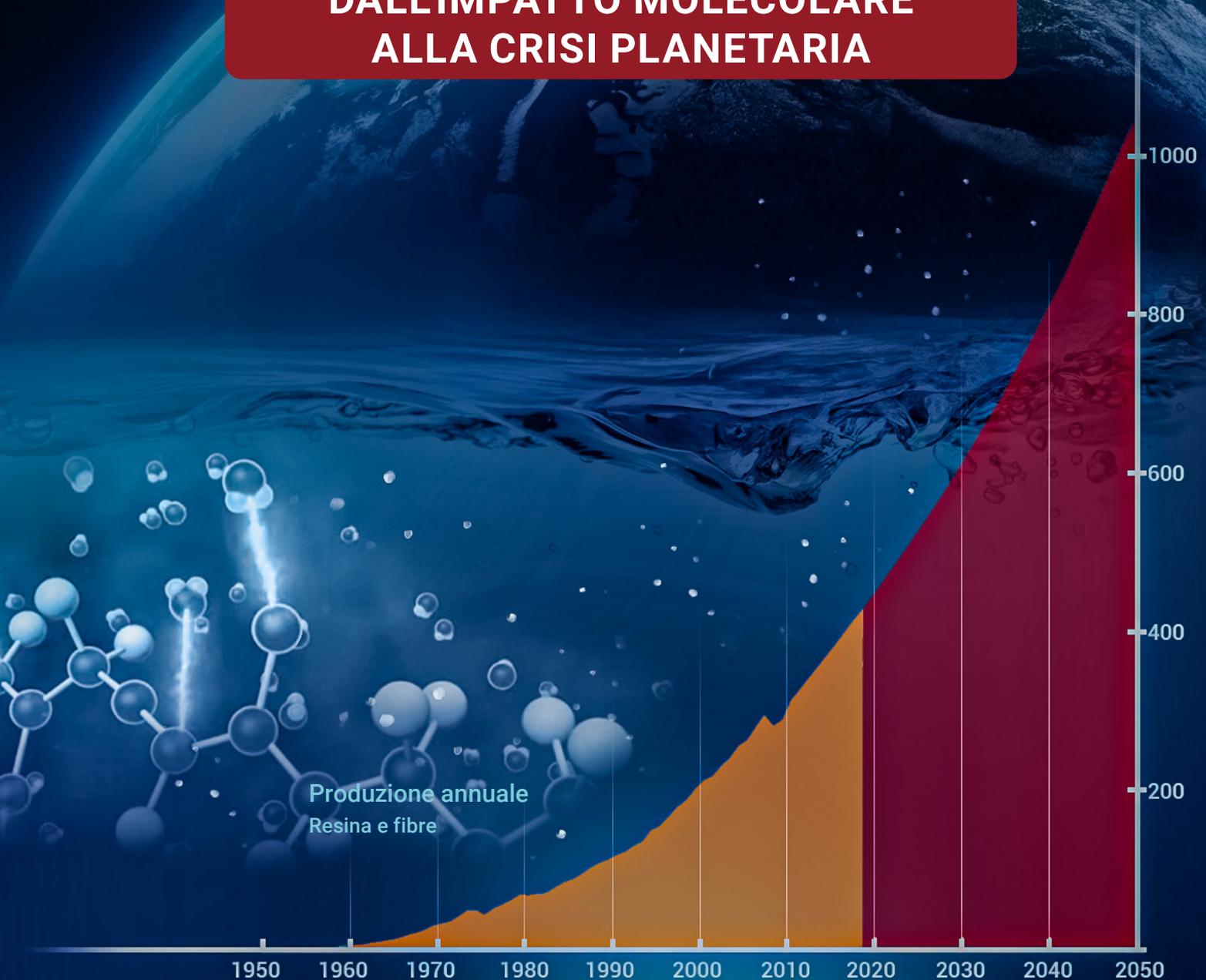


RELAZIONE

MICROPLASTICHE
E NANOPLASTICHE

NANOPLASTICA NELLA BIOSFERA

DALL'IMPATTO MOLECOLARE
ALLA CRISI PLANETARIA



RELAZIONE

NANOPLASTICA NELLA BIOSFERA

DALL'IMPATTO MOLECOLARE
ALLA CRISI PLANETARIA

AUTORI

LIBERTÀ  DEMOCRAZIA
ALLATRA

Movimento Internazionale Sociale "ALLATRA"

In collaborazione con:



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Università Cattolica Boliviana "San Pablo" (UCB)
Facoltà di Ingegneria Ambientale e Ricerca Scientifica
Revisore, rappresentante dell'università



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Università Autonoma "Juan Misael Saracho" (UAJMS)
Dipartimento di Ricerca, Scienza e Tecnologia
Revisore, rappresentante dell'università



**CREATIVE
SOCIETY**

Progetto Internazionale "Società Creativa"
Collaboratore scientifico

CONTENUTI

Prologo	5
Le conseguenze dell'inquinamento da plastica: micro- e nanoplastiche (MNP) come nuovo fattore della crisi globale	7
Valutazioni quantitative e tendenze della produzione globale di rifiuti di plastica.....	7
La grande chiazza di immondizia del Pacifico.....	10
Processi di formazione delle micro- e nanoparticelle di plastica.....	12
Diffusione delle MNP nell'ambiente.....	18
Conseguenze ecologiche e climatiche dell'inquinamento da micro- e nanoplastiche	23
In che modo le MNP danneggiano gli ecosistemi a livello molecolare.....	23
Impatto delle micro- e nanoplastiche sul clima	46
Impatto delle micro- e nanoplastiche sulla salute umana	71
MNP come nuovo fattore di rischio nello sviluppo delle epidemie del XXI secolo.....	71
Meccanismi molecolari della tossicità delle MNP: danni al DNA, ai mitocondri e alle membrane cellulari.....	72
Coinvolgimento delle MNP nei meccanismi dell'invecchiamento precoce e dell'oncogenesi.....	84
Destabilizzazione del sistema ormonale per effetto delle MNP.....	87
La carica elettrostatica delle nanoplastiche come fattore chiave della loro elevata tossicità per l'organismo umano.....	93
Impatto sistemico delle MNP sugli organi e sui sistemi funzionali dell'uomo.....	100
Meccanismi di danno all'apparato respiratorio per inalazione di MNP.....	101
Azione neurotossica delle MNP: danni al sistema nervoso centrale e periferico.....	102
Coinvolgimento delle MNP nella patogenesi delle malattie cardiovascolari.....	114
Alterazione delle funzioni gastrointestinali causata dalle MNP.....	116
Effetti delle MNP sul sistema immunitario.....	118
Azione cancerogena delle MNP: meccanismi di mutazione e sviluppo delle metastasi.....	120
Influenza delle MNP sul metabolismo del calcio e sulla struttura ossea.....	121
Disturbi riproduttivi associati all'esposizione alle MNP: infertilità e disfunzione erettile.....	122
Penetrazione delle MNP attraverso la barriera placentare ed impatto sul corpo in via di sviluppo.....	126
Conseguenze dell'esposizione postnatale alle MNP e correlazioni con malformazioni congenite.....	130
Conclusioni e prospettive: è possibile ridurre l'impatto delle MNP sulla salute umana?.....	133
Analisi degli approcci attuali alla riduzione dell'inquinamento da plastica	134
Tecnologie di rimozione della plastica di grandi dimensioni dagli ecosistemi acquatici.....	134
Metodi attuali per la rimozione di micro- e nanoplastiche.....	139
Approcci della comunità scientifica "ALLATRA" alla lotta contro l'epidemia di nanoplastiche	142
Tecnologie di generazione di acqua atmosferica (GAA) per la bonifica ambientale dell'oceano.....	142
Un approccio scientifico innovativo per ridurre la tossicità delle micro- e nanoplastiche.....	148
Il Fattore X. Influenza delle micro- e nanoplastiche sulla dinamica del ciclo dei cataclismi naturali	150
Conclusioni. Le nanoplastiche sono una sfida che non può essere ignorata	170
Fonti	172

PROLOGO

“Se la Terra tenesse un diario, l'ultimo secolo sarebbe scritto in nero con il titolo: ‘L’Era della Plastica’”. Dalle particelle microscopiche che infiltrano le cellule degli organismi viventi alle enormi isole di rifiuti che vagano negli oceani, la plastica è ormai incisa nel registro geologico del pianeta. Ma a quale prezzo?

Ogni anno, il mondo genera oltre 400 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica, di cui si stima che 11 milioni finiscono negli oceani. Ad oggi, più di 200 milioni di tonnellate si sono accumulate negli ambienti marini. I campioni di acqua superficiale rivelano che la plastica supera ormai lo zooplancton con un rapporto di sei a uno. Se le tendenze attuali continueranno, entro il 2050 la massa di plastica negli oceani supererà quella di tutti i pesci.

Sebbene la plastica impieghi centinaia o addirittura migliaia di anni a degradarsi, essa si frammenta sotto l'effetto delle onde, dell'acqua salata e della radiazione ultravioletta in minuscole particelle note come micro- e nanoplastiche. Queste particelle possono percorrere migliaia di chilometri attraverso le correnti di aria marina e le precipitazioni, attraversando confini, continenti e oceani. Si accumulano nelle foreste, si trovano nel nostro cibo e nell'acqua potabile. Le microplastiche sono state rilevate nei luoghi più remoti della Terra, dalla Fossa delle Marianne alla cima dell'Everest.

Questo rapporto presenta una valutazione analitica approfondita dell'impatto dell'inquinamento da plastica sull'ambiente, sulla salute umana e sulla resilienza dei sistemi critici della società. Esamina il comportamento delle micro- e nanoplastiche che trasportano cariche statiche e composti chimici tossici, e i loro effetti sugli ecosistemi. Particolare attenzione è rivolta al loro ruolo nell'acidificazione degli oceani, nella destabilizzazione delle catene alimentari e nelle minacce alla biodiversità. Il rapporto propone un'ipotesi che collega le micro- e nanoplastiche ai cambiamenti nelle proprietà dell'acqua, che potrebbero accelerare il riscaldamento oceanico e intensificare i disastri naturali.

Uno dei problemi più urgenti e allarmanti trattati nel rapporto è l'impatto delle micro- e nanoplastiche (MNP) sulla salute umana. Grazie alle loro dimensioni ridotte, le particelle di plastica sono in grado di superare le barriere biologiche, provocando stress ossidativo, danni al DNA, reazioni infiammatorie e disfunzioni cellulari. Particolare attenzione è rivolta alla potenziale correlazione tra l'esposizione alle MNP e l'aumento della diffusione di malattie neurodegenerative e neuropsichiatriche. Il rapporto mostra che l'esposizione alle MNP durante i periodi prenatale e postnatale può compromettere le funzioni cognitive e la salute mentale dei bambini, rappresentando una grave minaccia per il futuro dell'umanità.

L'aumento delle patologie legate all'esposizione alle MNP sta già oggi deteriorando sensibilmente la qualità della vita della popolazione, in particolare nelle regioni con un elevato livello di inquinamento da plastica. Il rapporto identifica le aree già classificate come zone ad alto rischio, così come quelle che, per ora, rimangono relativamente sicure. Il peggioramento della situazione, unito alla mancanza di efficaci strumenti di protezione, potrebbe costringere le persone ad abbandonare le aree contaminate in cerca di condizioni di vita più sicure. Ciò potrebbe creare le premesse per una migrazione di massa incontrollata, con un conseguente aumento della tensione sociale, un sovraccarico delle infrastrutture urbane e una destabilizzazione economica.

Pertanto, il problema ambientale dell'inquinamento da plastica si trasformerà gradualmente in una questione macroeconomica e geopolitica.

Il rapporto pone l'accento sulla necessità di affrontare il problema delle MNP, offrendo una nuova prospettiva sulla sua diffusione e sulle sue conseguenze.

L'unicità del lavoro risiede nell'approccio interdisciplinare che unisce dati relativi agli aspetti fisici, chimici e biologici dell'inquinamento da plastica.

Ciò rende il rapporto rilevante per scienziati di diverse discipline, interessati a sviluppare soluzioni sostenibili per un futuro sicuro dell'umanità e del pianeta.

LE CONSEGUENZE DELL'INQUINAMENTO DA PLASTICA: MICRO- E NANOPLASTICHE (MNP) COME NUOVO FATTORE DELLA CRISI GLOBALE

La plastica è diventata una parte integrante della vita moderna. Imballaggi e stoviglie, abbigliamento e calzature, articoli per l'igiene e medicina, trasporti e comunicazioni: la maggior parte degli oggetti che circondano l'uomo sono realizzati in plastica. Tuttavia, essa non esiste solo sotto forma di oggetti di grandi dimensioni, ma anche come particelle microscopiche che si liberano da questi prodotti: le micro- e nanoplastiche. Le microplastiche sono particelle inferiori a 5 millimetri, visibili talvolta anche a occhio nudo. Le nanoplastiche, invece, hanno dimensioni inferiori a un milionesimo di metro (un micrometro), e la maggior parte di esse non può essere osservata neppure con un microscopio standard.

I materiali di plastica comprendono molti tipi diversi, ma tutti sono costituiti da polimeri – sostanze naturali o sintetiche composte da grandi molecole legate tra loro. I polimeri possiedono proprietà chimiche uniche che li rendono durevoli e resistenti agli agenti esterni.

Proprio grazie alla loro resistenza, versatilità e basso costo, la plastica è diventata il materiale principale per la produzione di massa, compresi gli articoli monouso¹. Tuttavia, una gestione scorretta dei rifiuti ha reso la plastica il più grande inquinante del mondo in termini di massa.

Valutazioni quantitative e tendenze della produzione globale di rifiuti di plastica

Dagli anni '50, nel mondo sono state prodotte circa 9.2 miliardi di tonnellate di plastica. Di queste, 2.9 miliardi di tonnellate sono attualmente in uso, tra cui 2.7 miliardi di tonnellate di plastica vergine e circa 200 milioni di tonnellate di materiale riciclato. 5.3 miliardi di tonnellate sono finite in discarica, mentre 1 miliardo di tonnellate sono state incenerite. Si stima inoltre che da 1.75 a 2.5 miliardi di tonnellate siano considerate "mal gestite", ovvero con un alto rischio di dispersione non controllata nell'ambiente (Fig. 1).

Ad oggi, circa 640 milioni di tonnellate di additivi chimici supplementari sono stati incorporati nei prodotti di plastica². Secondo i dati dell'UNEP³, ogni anno nel mondo vengono generati oltre 400 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica.

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php

²Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

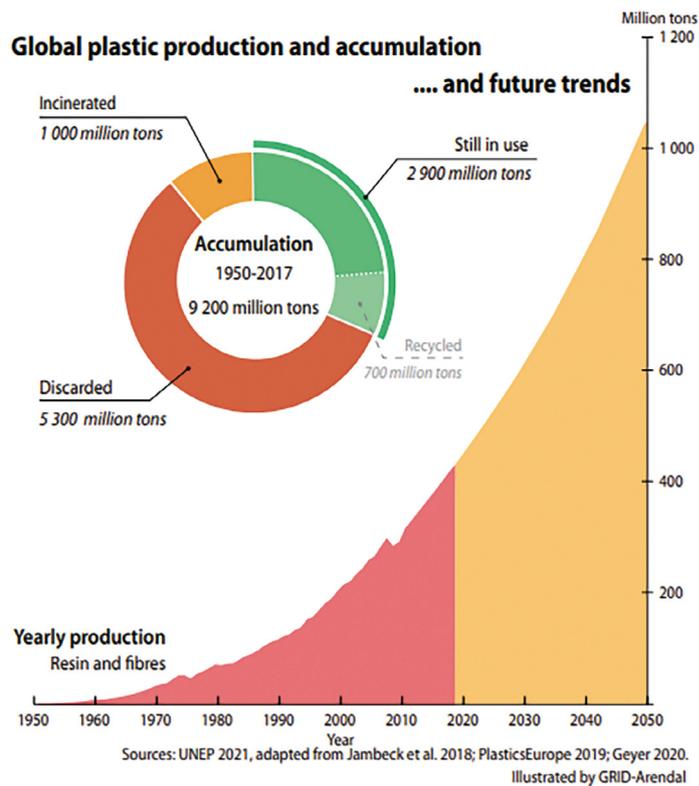


Figura 1: Produzione globale di plastica, accumulo e tendenze future
Fonte: UNEP 2021, adapted from Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020.
Illustrated by GRID-Arendal

https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Solo il 9% dei rifiuti viene riciclato, il 19% viene incenerito, mentre tutto il resto rimane nell'ambiente, comprese le discariche e gli oceani⁴ (Fig. 2).

Quota dei metodi di smaltimento	A livello mondiale, 2023
Riciclaggio	9%
Incenerimento	19%
Smaltimento improprio	22%
Seppellimento	49%

Figura 2: Rifiuti di plastica annuali per metodo di smaltimento, 2000–2023
Fonte: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Ogni anno, circa 11 milioni di tonnellate di plastica finiscono negli oceani del mondo⁵, l'equivalente di più di un camion della spazzatura pieno di plastica scaricato in mare ogni minuto.

⁴How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled>

⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Attualmente, negli oceani si sono già accumulate oltre 200 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica di grandi dimensioni e 35.540 tonnellate di microplastiche⁶. La quantità annuale di rifiuti di plastica rilasciati nell'ambiente da fonti terrestri varia a seconda del metodo di analisi utilizzato. Secondo uno scenario "business-as-usual" (BAU) e in assenza di misure efficaci, i rifiuti di plastica che entrano negli ecosistemi acquatici potrebbero quasi triplicare: da circa 9–14 milioni di tonnellate all'anno nel 2016 a 23–37 milioni di tonnellate all'anno entro il 2040.

Secondo un altro metodo di analisi, la quantità potrebbe raddoppiare: da 19–23 milioni di tonnellate all'anno nel 2016 a circa 53 milioni di tonnellate all'anno entro il 2030⁷.

Secondo le ricerche, se le attuali tendenze continueranno, entro il 2050 ci saranno fino a 12 miliardi di tonnellate di plastica negli oceani⁸, una quantità che equivale al peso totale di tutta la fauna ittica marina, stimata in circa 10 miliardi di tonnellate⁹.

A seconda del tipo, la plastica impiega da 100 a 1.000 anni per degradarsi (Fig. 3). Negli oceani, la plastica si degrada molto più lentamente, e in condizioni di freddo e buio come quelle delle profondità marine, la velocità di degradazione è ulteriormente ridotta¹⁰.



Figura 3: Tempi approssimativi di decomposizione di alcuni tipi di rifiuti di plastica gettati in mare

⁶Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Ad eccezione dei materiali che sono stati inceneriti, tutte le plastiche convenzionali che sono finite nell'ambiente non si sono ancora degradate, rimanendo sotto forma di oggetti interi o frammenti¹¹. Questi rifiuti praticamente non scompaiono, ma continuano ad accumularsi. Una tale situazione può essere paragonata a un contenitore della spazzatura in cui vengono costantemente aggiunti rifiuti, ma che non viene mai svuotato. La domanda su cosa succederebbe a tale contenitore dopo un mese rende bene l'idea sulla portata del problema dell'accumulo dei rifiuti di plastica a livello globale.

La grande chiazza di immondizia del Pacifico

I rifiuti di plastica presenti nella colonna d'acqua e sulla superficie dell'oceano vengono catturati dalle correnti oceaniche, trasportati verso le regioni centrali dell'oceano dove formano enormi accumuli, comunemente chiamati "isole di plastica".

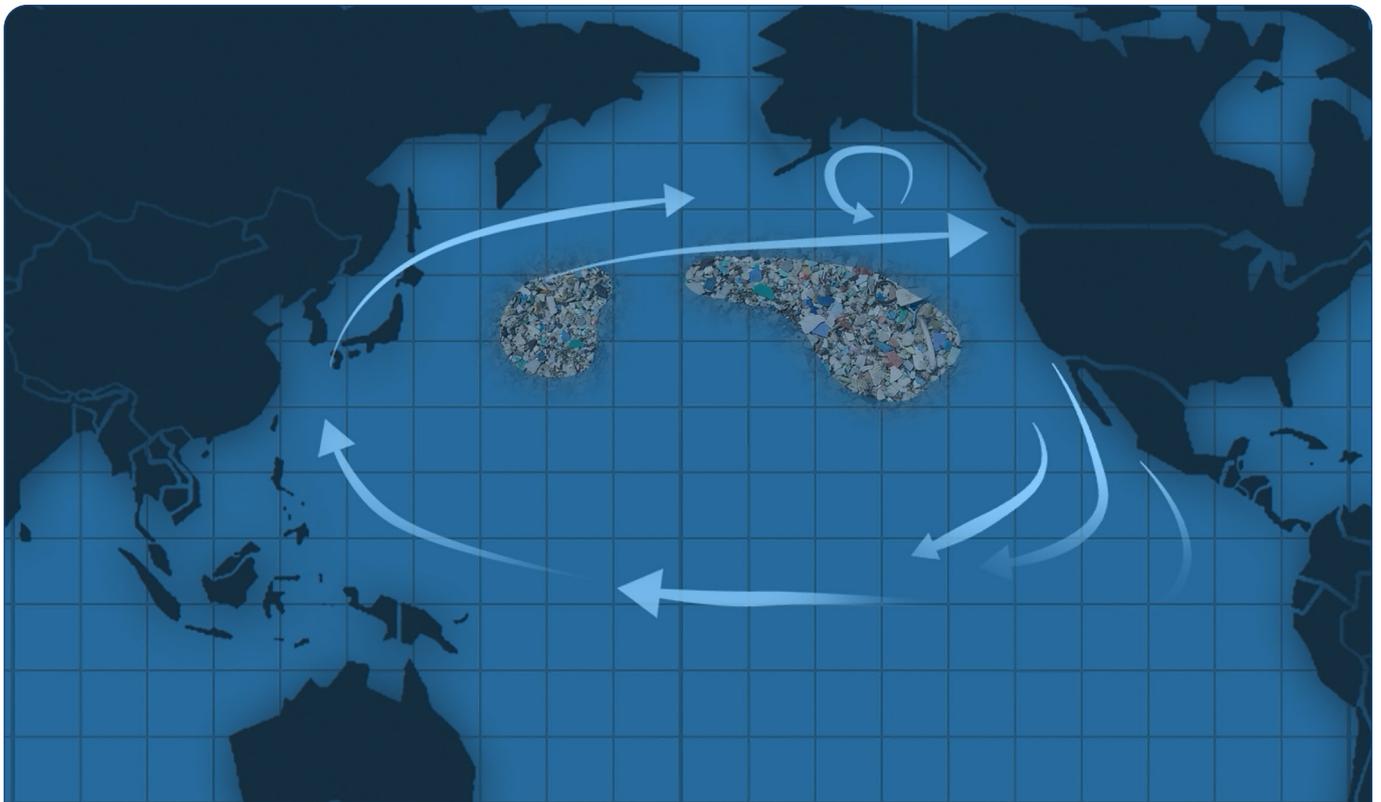


Figura 4: Schema del processo di formazione di un accumulo di rifiuti nel Pacifico

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

La “grande chiazza di immondizia del Pacifico” rappresenta la più grande concentrazione di plastica del pianeta, con una crescita costante (Fig. 4). Questo accumulo si estende su un’ampia area tra l’America del Nord e il Giappone. Le osservazioni indicano che nel 2018 la sua superficie era di circa 1,6 milioni di chilometri quadrati¹², anche se questa misura può variare.

Gli studi dimostrano che fino all’80%¹³ della massa delle chiazze di rifiuti è composta da plastica¹⁴. La chiazza contiene almeno 80.000 tonnellate di rifiuti¹⁵, ma questa è solo la parte visibile del problema. Fino al 94% della plastica che entra nell’oceano si deposita sul fondo marino¹⁶, dove si accumula rimanendo celata.

Il volume esatto della grande chiazza di immondizia del Pacifico rimane sconosciuto, poiché il vortice subtropicale del Nord Pacifico è troppo vasto per essere studiato completamente con le tecnologie attuali.

Dinamica dell'accumulo di plastica negli oceani

Le misurazioni strumentali mostrano un aumento esponenziale del volume della grande chiazza di immondizia del Pacifico. Tra il 2015 e il 2022, la massa media dei rifiuti di plastica in quest’area è aumentata di 5 volte¹⁷. Particolarmente preoccupante è il fatto che, nello stesso periodo, la quantità di frammenti di plastica di piccole dimensioni è aumentata di 10 volte, il che indica un processo intensivo di frammentazione dei grandi oggetti plastici.

La grande chiazza di immondizia costituisce di fatto il settimo “continente” del nostro pianeta. Tuttavia, è importante sottolineare che non si tratta di un fenomeno isolato. Attualmente, la comunità scientifica ha identificato 5 grandi accumuli di rifiuti negli oceani del mondo¹⁸: due nell’Oceano Atlantico, due nel Pacifico e uno nell’Oceano Indiano¹⁹ (Fig. 5).

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>

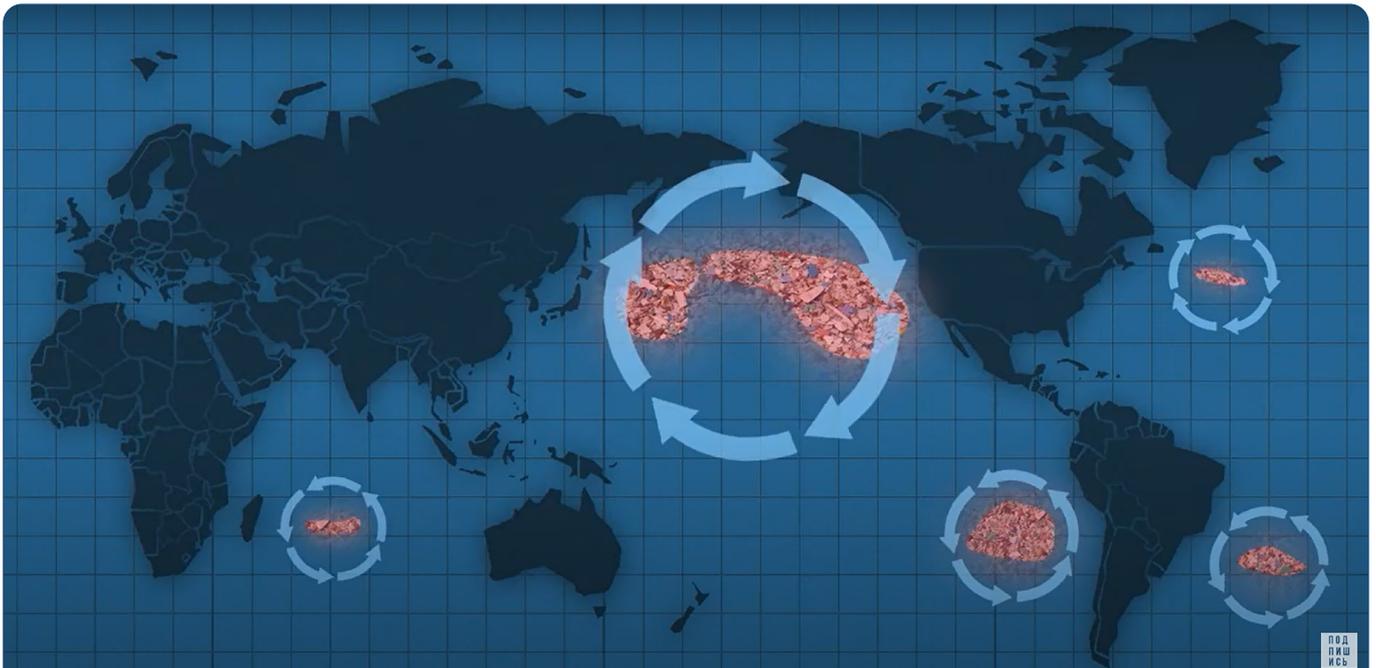


Figura 5: Rappresentazione schematica dei 5 principali accumuli di rifiuti negli oceani del mondo: due nell'Oceano Atlantico, due nell'Oceano Pacifico e uno nell'Oceano Indiano.

Negli oceani circolano milioni di tonnellate di plastica e altri rifiuti di origine antropica. Le chiazze di rifiuti stanno crescendo a un ritmo catastrofico.

Processi di formazione delle micro- e nanoparticelle di plastica

I rifiuti di plastica sono estremamente resistenti alla biodegradazione, ma sotto l'effetto delle onde, dell'acqua salata e della radiazione solare si frammentano in particelle più piccole, le micro- e nanoplastiche²⁰, spesso invisibili a occhio nudo. Queste particelle mantengono la loro struttura polimerica²¹, e il processo di frammentazione continua fino al livello nano (Fig. 6,7). Di conseguenza, superando i meccanismi naturali di degradazione, i rifiuti di plastica diventano componenti permanenti dell'ecosistema del pianeta.

Inoltre, le micro- e nanoplastiche contengono sostanze chimiche pericolose, aggiunte durante il processo di produzione della plastica.

“La plastica contiene circa 16.000 sostanze chimiche. Di queste, oltre 4.200 sono note per essere persistenti nell'ambiente, bioaccumulabili, trasportabili su lunghe distanze o potenzialmente pericolose”—afferma la professoressa Annika Jahnke, autrice e chimica ambientale del Centro Helmholtz per la ricerca ambientale²².

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024

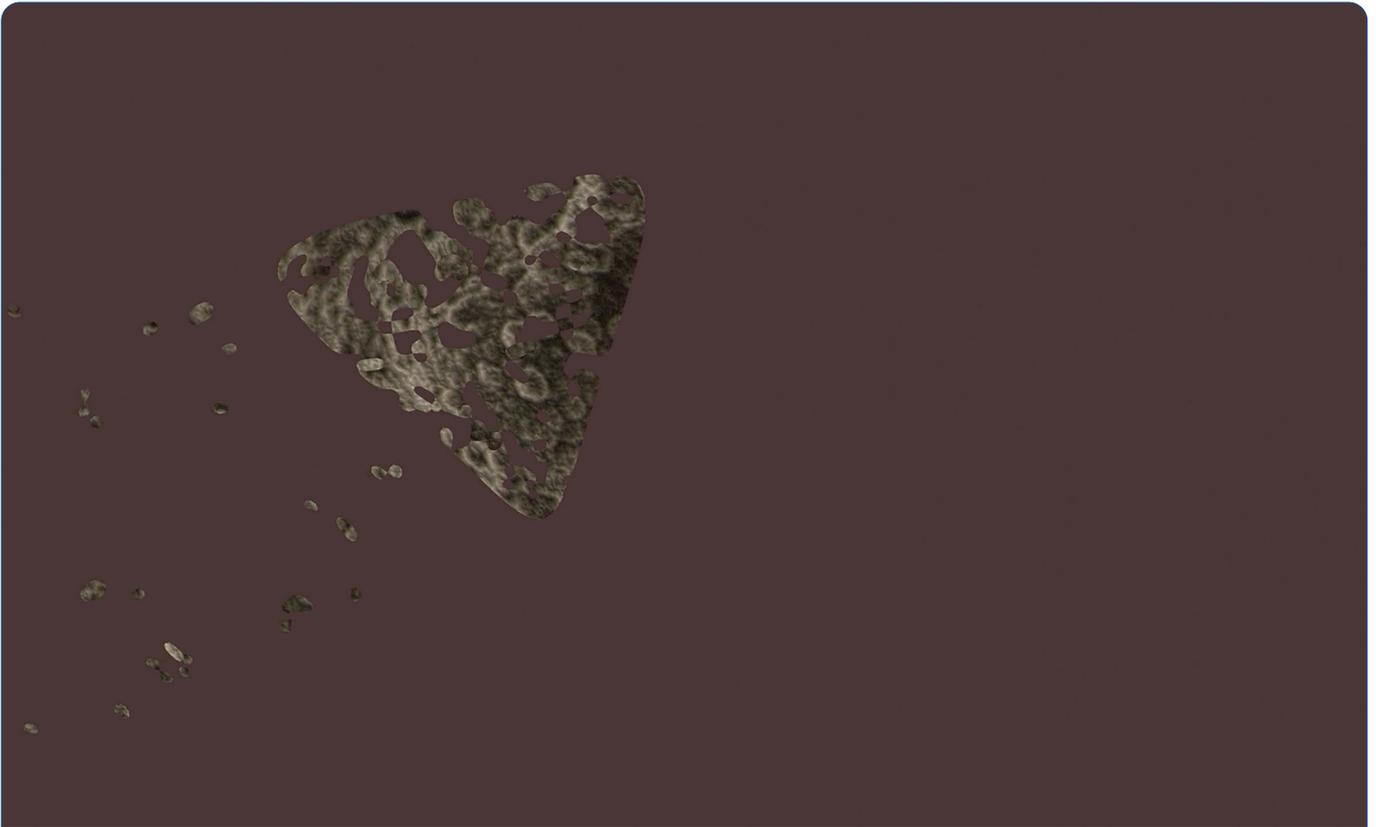
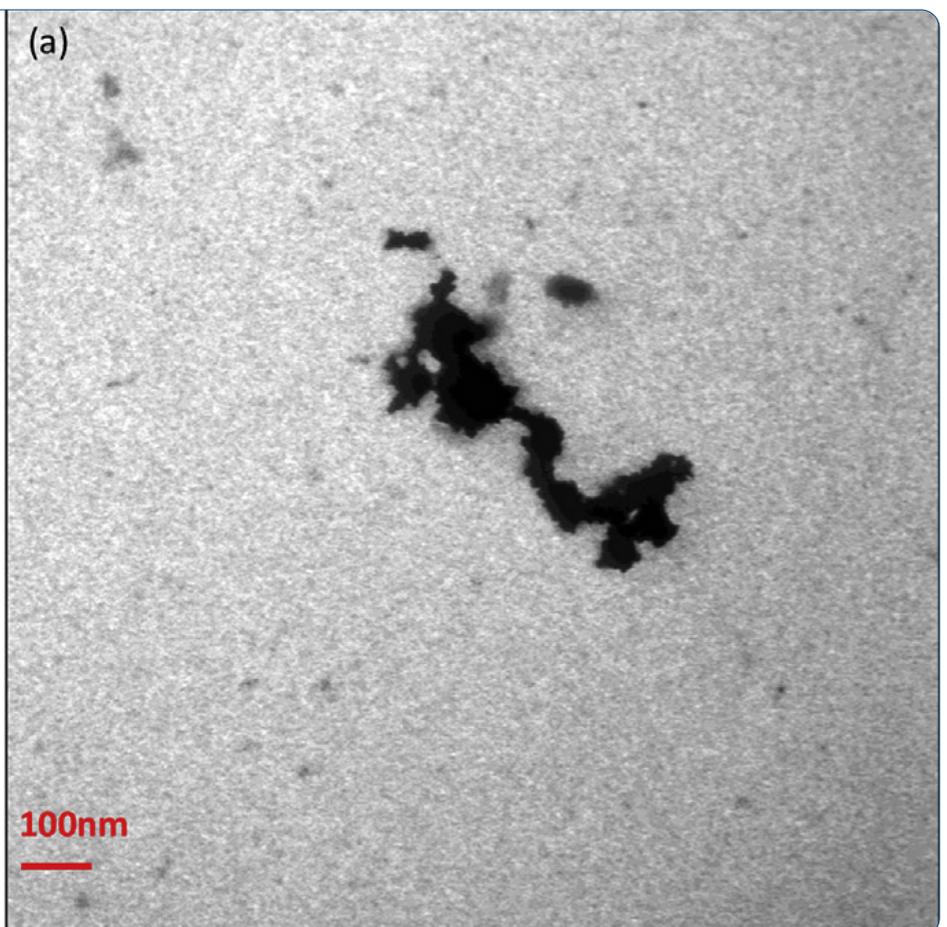


Figura 6: Rappresentazione schematica del processo di frammentazione delle particelle di plastica fino al livello nanometrico con conservazione della struttura polimerica

Figura 7: Microscopia elettronica a trasmissione di nanoplastiche di polietilene rilevanti per l'ambiente, degradate dai raggi UV, provenienti da microplastiche invecchiate, campionate nell'Oceano Atlantico settentrionale.

Fonte: Gigault, J. et al. *Current opinion: What is a nanoplastic?* Environmental Pollution 235, 1030–1034 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>



Diffusione di MNP negli oceani

La maggiore concentrazione di plastica si osserva nelle zone delle chiazze di rifiuti. Queste discariche oceaniche funzionano come veri e propri impianti industriali, dove avviene la formazione continua di micro- e nanoplastiche. Proprio come un virus che si diffonde nell'organismo attraverso il sangue, la microplastica viene trasportata dalle correnti oceaniche in tutti gli oceani del mondo, evidenziando così la portata planetaria del problema.

Nonostante le difficoltà tecniche nel rilevare le microplastiche, che rendono difficile stimarne con precisione la quantità presente negli oceani, i modelli teorici consentono di valutare l'entità del fenomeno.

La microplastica è stata rilevata in quasi tutti i campioni di acqua oceanica, con concentrazioni che in alcune regioni superano di decine di volte la media globale.

I vortici oceanici favoriscono la diffusione globale delle microplastiche, raggiungendo perfino regioni remote come l'Artico. Studi su carote di ghiaccio hanno mostrato che il livello di contaminazione da microplastiche nell'Oceano Artico è 100 volte superiore rispetto a quello registrato nelle acque a nord della Scozia o nel vortice subtropicale del Nord Pacifico²³. Ciò evidenzia la portata e il carattere transfrontaliero del problema.

La maggior parte degli studi globali sull'inquinamento da plastica si concentra sul livello superficiale dell'oceano. Secondo le stime, nel 2019 lo strato superficiale dell'oceano conteneva tra 82 e 358 trilioni di particelle di plastica²⁴.

Tuttavia, crescono le prove che nelle profondità oceaniche e nei sedimenti di fondo si accumulano trilioni incalcolabili di microplastiche²⁵.

La plastica leggera tende a galleggiare, mentre quella più densa o colonizzata da organismi marini affonda sul fondo marino²⁶. Si stima che circa il 50% della plastica proveniente dai rifiuti urbani abbia una densità superiore a quella dell'acqua marina, favorendone la rapida sedimentazione. Una volta sul fondo, la plastica viene trasportata dalle correnti profonde e si accumula nelle fosse e nelle depressioni oceaniche. La microplastica è stata persino trovata nel punto più profondo del oceano: il fondale della Fossa delle Marianne²⁷ (Figg. 8,9).

²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

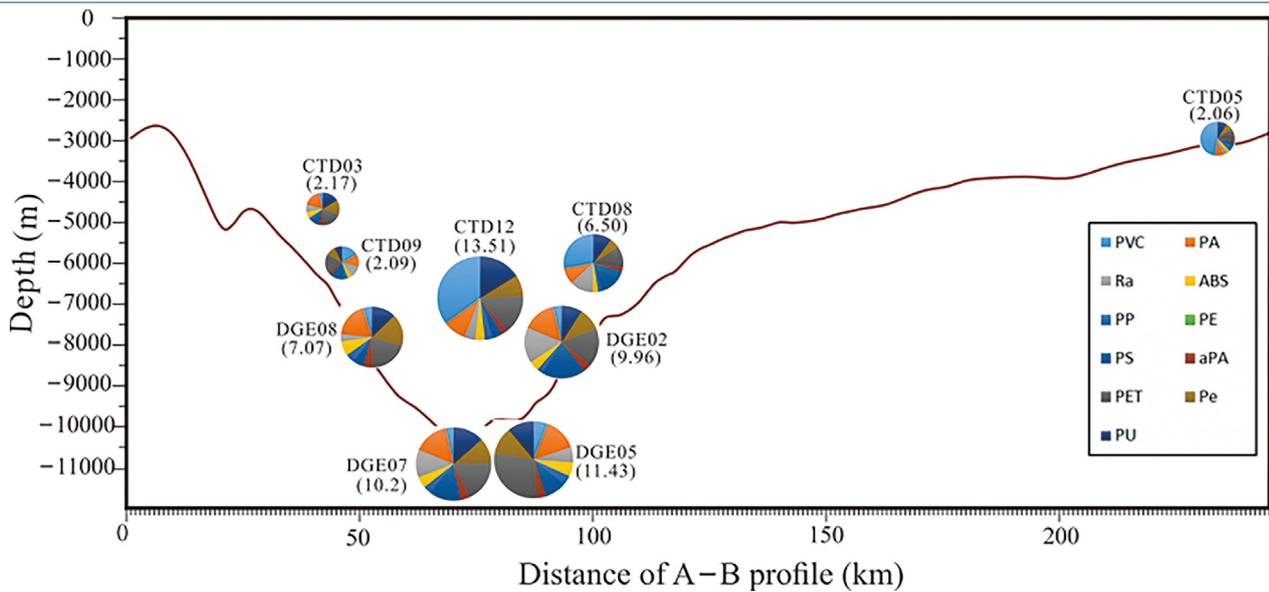


Figura 8: Profilo della diffusione e della composizione delle microplastiche nei campioni d'acqua della Fossa delle Marianne. I grafici a torta rappresentano la composizione delle microplastiche, mentre i numeri tra parentesi indicano la loro diffusione in unità di particelle per litro. PVC (cloruro di polivinile), PA (poliammide), Ra (viscosa), ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), PP (polipropilene), PE (polietilene), PS (polistirene), PAA (poliammide aromatica), PET (polietilentereftalato), PES (poliestere), PU (poliuretano). L'asse X corrisponde alla linea trasversale dal punto A (12°N, 142,5°E) al punto B (9,8°N, 141,43°E).

Fonte: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

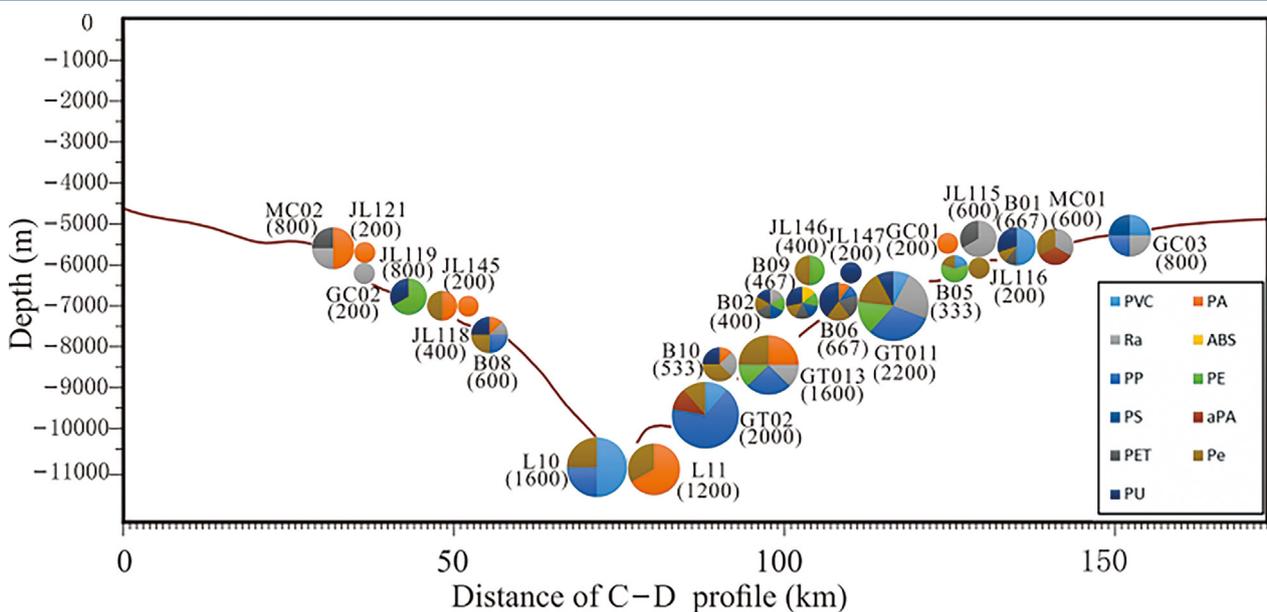


Figura 9: Profilo della diffusione e della composizione delle microplastiche nei campioni d'acqua della Fossa delle Marianne. I grafici a torta rappresentano la composizione delle microplastiche, mentre i numeri tra parentesi indicano la loro diffusione in unità di particelle per litro. PVC (cloruro di polivinile), PA (poliammide), Ra (viscosa), ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), PP (polipropilene), PE (polietilene), PS (polistirene), PAA (poliammide aromatica), PET (polietilentereftalato), PES (poliestere), PU (poliuretano). L'asse X corrisponde alla linea trasversale dal punto C (12°N, 141,9°E) al punto B (10,5°N, 141,3°E).

Fonte: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

In realtà, il principale luogo di accumulo delle microplastiche non è la superficie dell'oceano, bensì il fondo marino profondo. Progressivamente, tutto il fondo oceanico si sta ricoprendo di uno strato di plastica. Tuttavia, i dati sull'inquinamento da microplastiche negli oceani sono probabilmente sottostimati, e la situazione reale potrebbe essere molto più grave. Come osserva Melanie Bergmann, biologa dell'[Istituto Alfred Wegener](#) per la ricerca marina e polare in Germania: *“Non tutti hanno accesso agli strumenti complessi e costosi necessari per il campionamento”*.

Secondo le sue stime, fino al 90% delle particelle microplastiche marine potrebbero passare inosservate con i metodi standard di campionamento, poiché sono troppo piccole per essere rilevate²⁸ (Fig. 10).

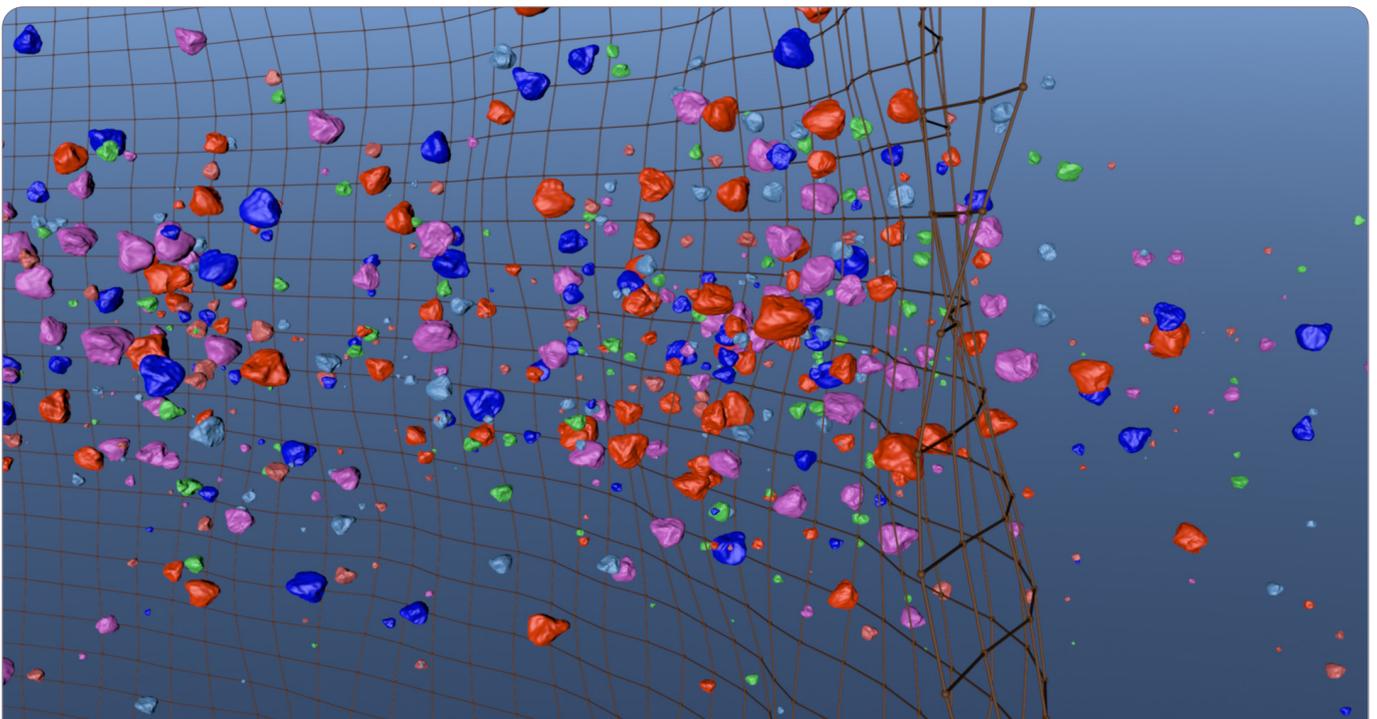


Figura 10: Rappresentazione schematica dei metodi analitici imperfetti di rilevamento delle micro- e nanoplastiche.

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>

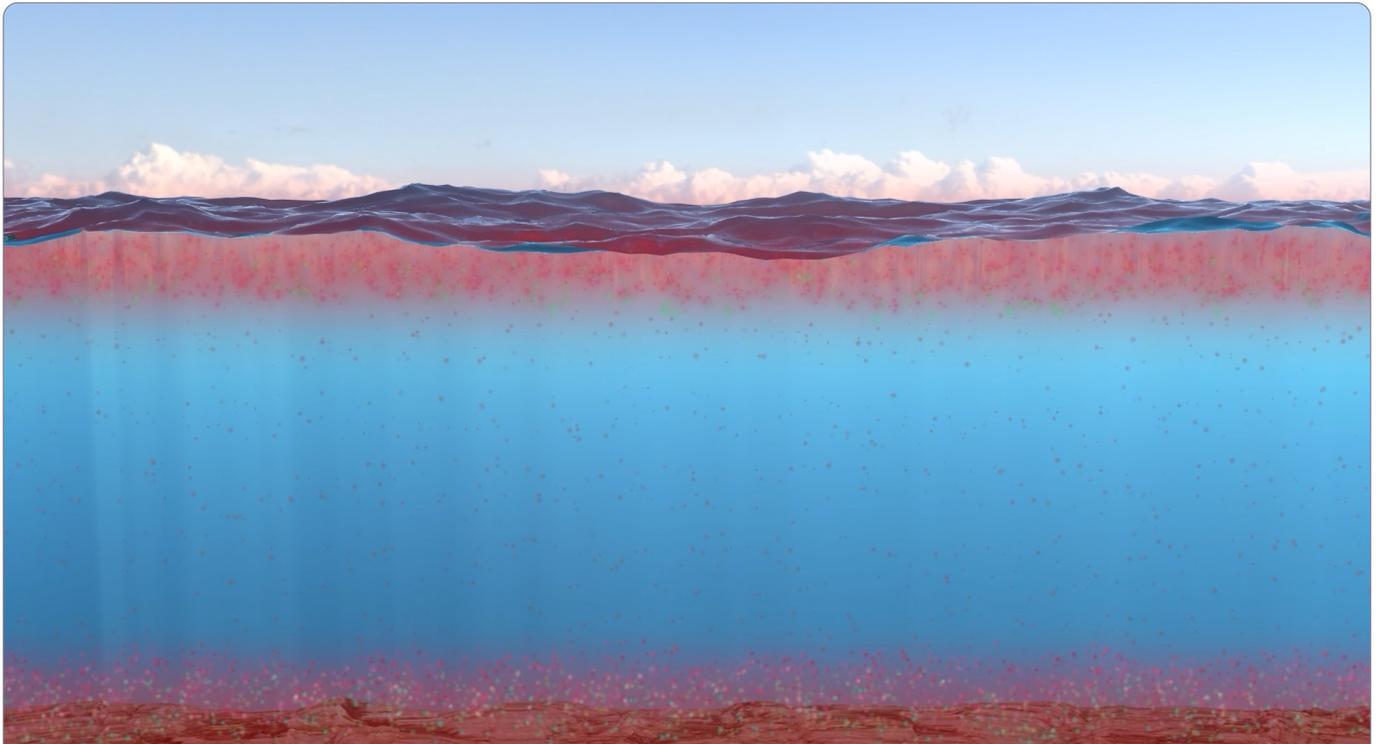


Figura 11: Rappresentazione schematica degli strati superficiali e di fondo della contaminazione da micro- e nanoplastiche.

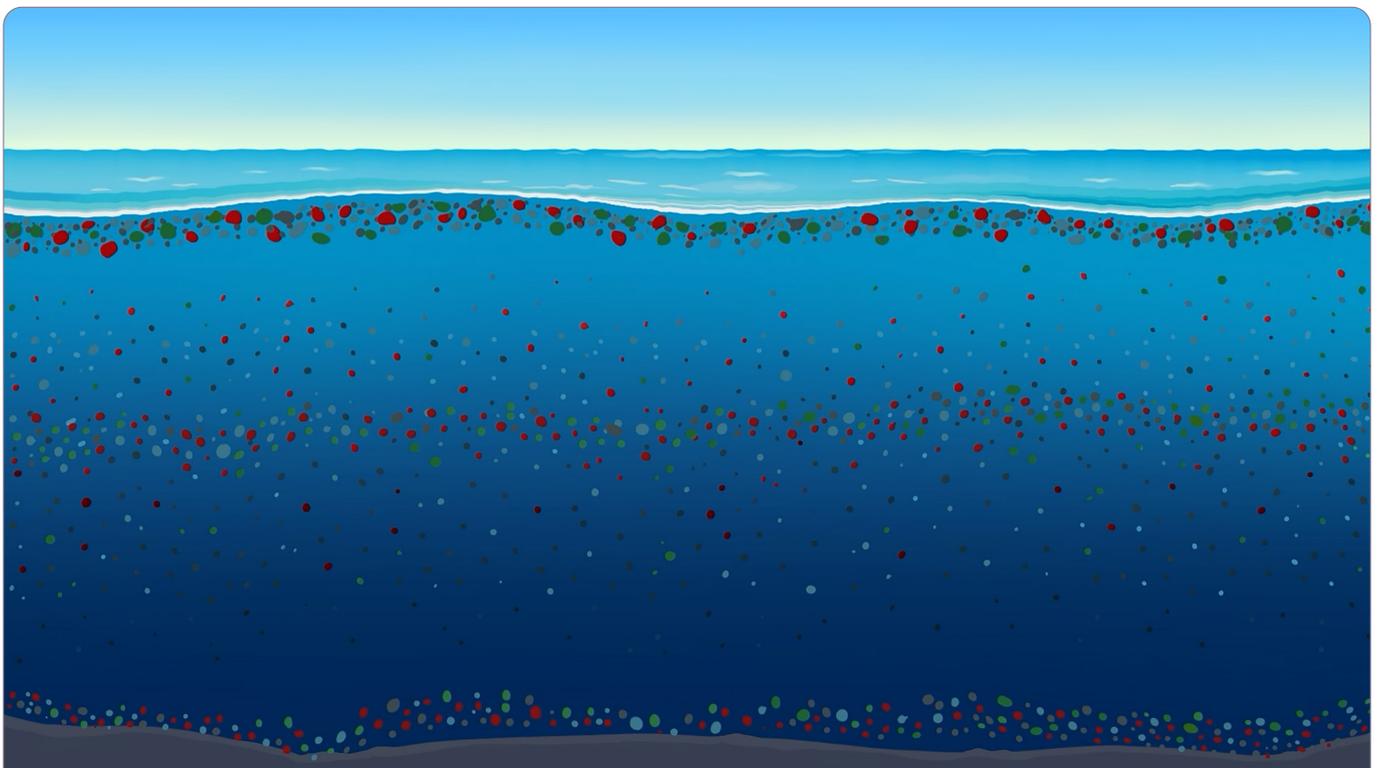


Figura 12: Rappresentazione schematica della distribuzione delle micro- e nanoplastiche negli strati superficiale, di fondo e nella zona del termocline.

Oltre all'inquinamento degli strati superficiali e di fondo (Fig. 11), la concentrazione di micro- e nanoplastiche aumenta significativamente nella zona del termocline²⁹ (Fig. 12) – lo strato d'acqua in cui si verifica un brusco cambiamento di temperatura. L'alto gradiente di densità in questo strato fa sì che le particelle di micro- e nanoplastiche vi rimangano intrappolate per lunghi periodi di tempo.

L'oceano può essere immaginato come una torta a strati, in cui ogni strato ha una temperatura e densità uniche, e la microplastica tende ad accumularsi ai confini tra questi strati.

Inoltre, le microplastiche si diffondono negli oceani anche attraverso gli organismi viventi, che le ingeriscono, digeriscono ed espellono³⁰.

Diffusione delle MNP nell'ambiente

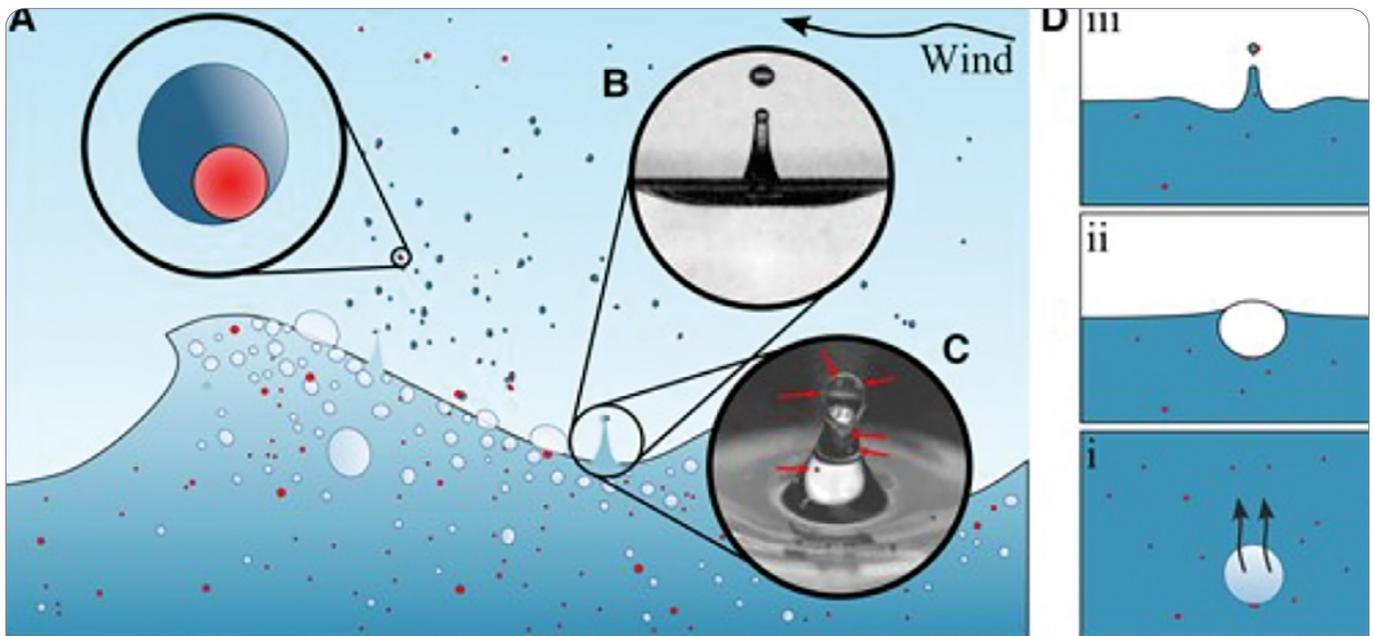


Figura 13: Illustrazione dei processi relativi all'emissione di microplastiche dall'oceano, A) Le microplastiche (rosso / colore più scuro) presenti nell'oceano vengono trasportate nell'atmosfera tramite goccioline d'acqua marina. B) Le bollicine che scoppiano generano piccole gocce o aerosol, come le gocce a getto. C) Le microplastiche presenti nel liquido possono essere incorporate nelle gocce a getto che si formano. Le frecce indicano particelle di microplastica di 100 μm . Le gocce generate possono essere trasportate dal vento, rilasciando materiale di microplastica nell'atmosfera. Il liquido infine evapora, lasciando le particelle di microplastica. D) I processi fisici associati all'emissione di microplastiche tramite lo scoppio delle bolle iniziano con la pulizia delle particelle mentre la bolla risale (Di). Una volta raggiunta la superficie (Dii), la bolla assume una forma di equilibrio che – al momento dello scoppio – concentra le onde capillari alla base, formando gocce a getto (Diii) che trasportano le microplastiche.

Fonte: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. *Ocean emission of microplastic*. PNAS Nexus, 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Quando l'acqua evapora³¹, le microplastiche risalgono nell'atmosfera dalla superficie dell'oceano³². Inoltre, la combinazione di spruzzi del mare, vento e onde genera bolle d'aria nell'acqua, che possono contenere microplastiche³³. Quando queste bolle scoppiano, le particelle vengono rilasciate nell'atmosfera (Fig. 13). Ogni anno, circa 136.000 tonnellate di microplastiche vengono trasportate solo sulle coste dai venti marini. Fino a 25 milioni di tonnellate metriche di micro- e nanoplastiche all'anno possono viaggiare per migliaia di chilometri attraverso l'aria marina, gli spruzzi, la neve e la nebbia, attraversando paesi, continenti e oceani.



“L'aria è un mezzo molto più dinamico dell'acqua,” afferma la coautrice Dott.ssa Melanie Bergmann dell'AWI. “Di conseguenza, le micro- e nanoplastiche possono penetrare molto più rapidamente in quelle regioni del nostro pianeta che sono più remote e finora in gran parte incontaminate.”

Una volta arrivate in questi luoghi, le particelle possono influenzare il clima superficiale e la salute degli ecosistemi locali³⁴.

Le microplastiche sono state trovate in ogni ambiente: dalla superficie del mare ai sedimenti profondi, dai campi agricoli alle vette montane più alte, oltre che nel ghiaccio marino, nei laghi e nei fiumi. Sono state rilevate in oltre 1.300 specie acquatiche e terrestri, dagli invertebrati alla base della catena alimentare fino ai grandi predatori, con prove di effetti a tutti i livelli dell'organizzazione biologica – dal cellulare all'ecosistemico. Le microplastiche sono ampiamente diffuse negli alimenti che mangiamo, nell'acqua che beviamo e nell'aria che respiriamo (Fig. 14). Sono state rinvenute in numerosi tessuti e organi del corpo umano, e stanno emergendo prove del loro potenziale impatto³⁵.

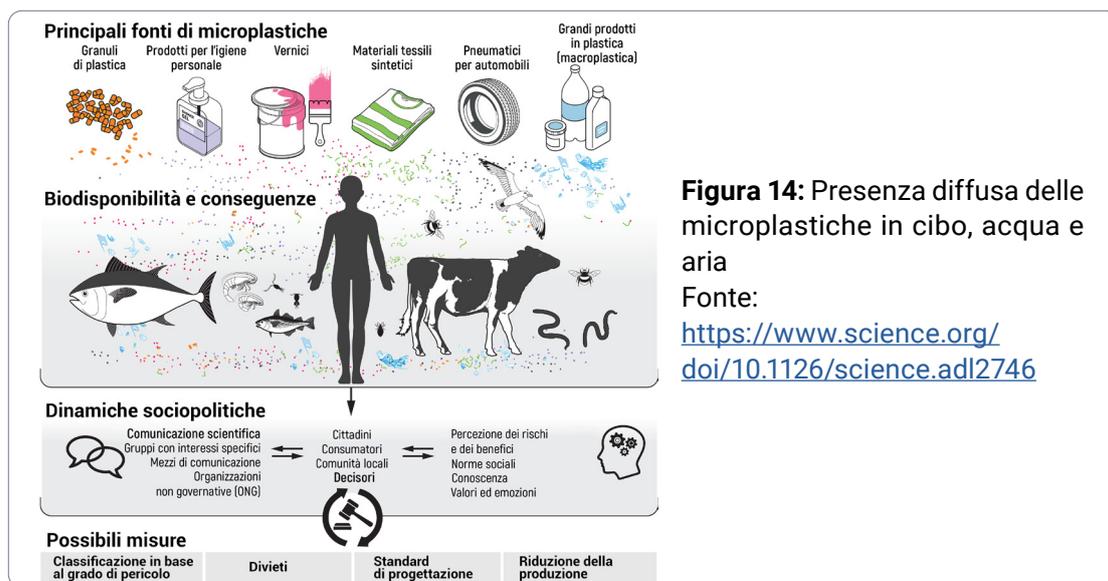


Figura 14: Presenza diffusa delle microplastiche in cibo, acqua e aria

Fonte:

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean.

<https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html>

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024).

<https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Di conseguenza, lo spostamento verso regioni remote e persino polari può essere determinato da una combinazione di trasporto atmosferico e marino. Perciò è fondamentale comprendere l'interazione tra l'atmosfera e l'oceano, al fine di determinare quali dimensioni di particelle vengono trasportate e in quali quantità.

Ad esempio, un recente gruppo di ricercatori ha scoperto granuli di plastica con superficie idrofila (attraente per l'acqua) nelle nuvole sulle cime montuose del Giappone³⁶. Analizzando i campioni, hanno concluso che le nuvole a bassa quota e più dense contengono una maggiore quantità di microplastiche. La presenza di polimeri come nuclei di condensazione gioca un ruolo chiave nella rapida formazione delle nubi, influenzando potenzialmente il clima globale³⁶.

Le particelle di plastica presenti nelle nuvole contribuiscono a trattenere una maggiore quantità d'acqua, ritardando la precipitazione. Quando invece inizia a piovere, le piogge sono più intense, perché le nuvole hanno avuto il tempo di accumulare più acqua. Inoltre, le microplastiche esposte alla luce ultravioletta e all'acqua filtrata dalle nuvole presentano una superficie più ruvida, favorendo l'adesione di piombo, mercurio e gruppi contenenti ossigeno³⁷.

L'atmosfera trasporta principalmente piccole particelle di microplastiche, rendendola una via di trasporto molto più rapida, che può causare depositi significativi in un'ampia gamma di ecosistemi. I dati delle ricerche indicano che le foreste agiscono come barriere contro le microplastiche trasportate dal vento. Foglie, rami e tronchi trattengono le microplastiche, che si depositano sulle loro superfici.

Questo fa sì che le microparticelle di plastica trasportate dal vento e dalle precipitazioni rimangano sulle piante o si accumulino nel suolo.

La scarsa ventilazione sotto una fitta copertura forestale favorisce l'accumulo persistente di queste particelle all'interno dei boschi. Le foglie della chioma forestale funzionano come un serbatoio a lungo termine per le microplastiche presenti nell'aria³⁸. Le ricerche hanno mostrato che, tra l'autunno 2017 e l'estate 2019, in 11 parchi naturali e riserve del ovest degli Stati Uniti, sono cadute con le precipitazioni oltre 1.000 tonnellate di particelle di plastica — una quantità sufficiente per produrre 120 milioni di bottiglie di plastica³⁹. Situazione simile è stata osservata anche in altre parti del mondo. Ad esempio, le foreste di *Quercus serrata* in Giappone, che coprono un'area di circa 32.500 km², catturano ogni anno circa 420 trilioni di particelle di microplastica trasportate dall'aria nelle loro chiome⁴⁰.

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

A differenza delle foreste, nelle città, grazie alla buona ventilazione e alla presenza di sospensioni più pesanti provenienti dai gas di scarico delle auto e dallo smog industriale, una parte delle micro- e nanoplastiche si deposita. Oggi, l'aria nelle foreste è più ricca di nanoplastiche rispetto a quella delle metropoli.

Il mondo è cambiato! E ora, quando le persone fanno il bagno nell'oceano, prendono il sole in spiaggia, fanno jogging lungo la costa o nel parco, o passeggiano nei boschi per migliorare la salute, in realtà espongono il loro corpo a un'ulteriore dose di microplastiche.

Microplastiche provenienti dall'Africa e dal Nord America sono state trovate anche in luoghi remoti e apparentemente incontaminati, come i Pirenei francesi. Ciò dimostra la diffusione globale delle microplastiche, che possono essere trasportate dai venti e dalle precipitazioni per migliaia di chilometri.

Le micro- e nanoplastiche raggiungono i bacini idrici urbani attraverso gli scarichi pluviali, le emissioni industriali e l'acqua piovana, che cattura le particelle presenti nell'atmosfera. Ad esempio, un singolo lavaggio di tessuti sintetici può rilasciare nelle acque reflue fino a 1,5 milioni di particelle di microplastica⁴¹. Una volta finite nelle acque reflue, queste particelle vengono trasportate nei fiumi e negli oceani, dove vengono ingerite da pesci e altri organismi acquatici. Analizzando i rifiuti trovati nei fiumi e nei paesaggi circostanti, i ricercatori hanno stimato che solo 10 sistemi fluviali sono responsabili dell'88–95% della plastica che finisce nell'oceano dai fiumi⁴².

In un altro studio, gli scienziati hanno rivisto le ipotesi comuni sul trasporto della plastica nei fiumi e hanno concluso che la quantità reale di rifiuti di plastica nei corsi d'acqua potrebbe essere superiore del 90% rispetto alle stime precedenti⁴³.

La plastica è presente anche nella maggior parte dei grandi laghi del mondo. La densità di rifiuti di plastica nei laghi può persino superare quella delle più grandi isole di plastica negli oceani, e anche i laghi situati in aree incontaminate contengono una quantità significativa di rifiuti. Questa realtà è stata confermata da un ampio studio internazionale guidato da Barbara Leoni e Veronica Nava dell'Università di Milano-Bicocca⁴⁴.

Secondo il rapporto del Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) del 2021, microplastiche sono state trovate in tutti i corpi idrici dolci analizzati, inclusi fiumi, laghi e bacini artificiali⁴⁵.

Ad esempio, i ricercatori hanno scoperto che quasi 10.000 tonnellate metriche – ovvero 22 milioni di libbre di rifiuti di plastica entrano ogni anno nei Grandi Laghi provenienti dagli Stati Uniti e dal Canada⁴⁶.

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵United Nations Environment Programme. *Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies*. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies>

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Alla fine, la microplastica ritorna all'essere umano sotto forma di pesce o frutti di mare.

Scienziati italiani hanno scoperto che anche frutta e verdura contengono milioni di particelle di microplastica. Una maggiore concentrazione di queste particelle è stata rilevata in mele, pere, carote, patate, lattuga e broccoli. Nei frutti, la concentrazione è risultata da 2 a 3 volte superiore rispetto a quella degli ortaggi: si va da 52.000 particelle per grammo nella lattuga a 223.000 nelle mele⁴⁷.

Secondo uno studio, l'81% dei 159 campioni d'acqua potabile prelevati in tutto il mondo contiene microplastiche⁴⁸. Altri studi confermano questi dati, rilevando particelle di microplastica anche nell'acqua minerale. Curiosamente, la quantità di particelle era simile sia nelle bottiglie di vetro che in quelle in PET (polietilene tereftalato), raggiungendo fino a 6292 particelle per litro^{49, 50, 51}.

Gli scienziati dell'Università di Newcastle, Australia hanno condotto una ricerca⁵² per stimare quanta plastica ingerisce in media una persona moderna. I risultati hanno mostrato che una persona consuma circa 250 grammi di plastica all'anno, l'equivalente di 50 sacchetti di plastica⁵³.

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

CONSEGUENZE ECOLOGICHE E CLIMATICHE DELL'INQUINAMENTO DA MICRO- E NANOPLASTICHE

In che modo le MNP danneggiano gli ecosistemi a livello molecolare

I rifiuti di plastica sono presenti ovunque: dagli oceani ai fiumi, dal suolo all'aria e persino ai ghiacciai⁵⁴.

Osservazioni pluriennali confermano che la plastica, a differenza delle sostanze vegetali e animali, non subisce un attivo processo di degradazione naturale⁵⁵. Essa persiste nell'ambiente senza partecipare ai cicli naturali di biodegradazione. Creata per resistere alla decomposizione, la plastica è diventata un elemento permanente dell'ecosistema globale. Questa resistenza, inizialmente considerata un successo tecnologico, sta ora causando gravi squilibri ecologici.

Nella produzione delle materie plastiche si utilizzano oltre 13.000 sostanze chimiche. Di queste, più di 3.200 tra cui monomeri, additivi e agenti ausiliari per la lavorazione, sono potenzialmente pericolose a causa delle loro proprietà tossiche⁵⁶.

Impatto delle MNP sulle proprietà del suolo e la degradazione degli ecosistemi

Le ricerche dimostrano che l'inquinamento da microplastica negli ecosistemi terrestri, in particolare nei suoli agricoli, può superare il livello di contaminazione degli ambienti acquatici di 4–23 volte⁵⁷, indicando un accumulo significativo di plastica nel suolo. La plastica si accumula nel terreno attraverso diversi percorsi: impianti di trattamento delle acque reflue, pacciamatura agricola, deposizioni atmosferiche e prodotti di uso quotidiano. L'utilizzo diffuso di articoli monouso in plastica è strettamente legato alla contaminazione severa del suolo da parte di MP (microplastiche) e NP (nanoplastiche). Fattori naturali e antropici favoriscono⁵⁸ la penetrazione delle particelle di microplastica nel terreno, alterando processi ecologici fondamentali⁵⁹.

Le osservazioni confermano l'impatto dannoso delle microplastiche sugli ecosistemi, influenzando la struttura e le funzioni dei microrganismi, delle piante e del suolo (Fig. 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

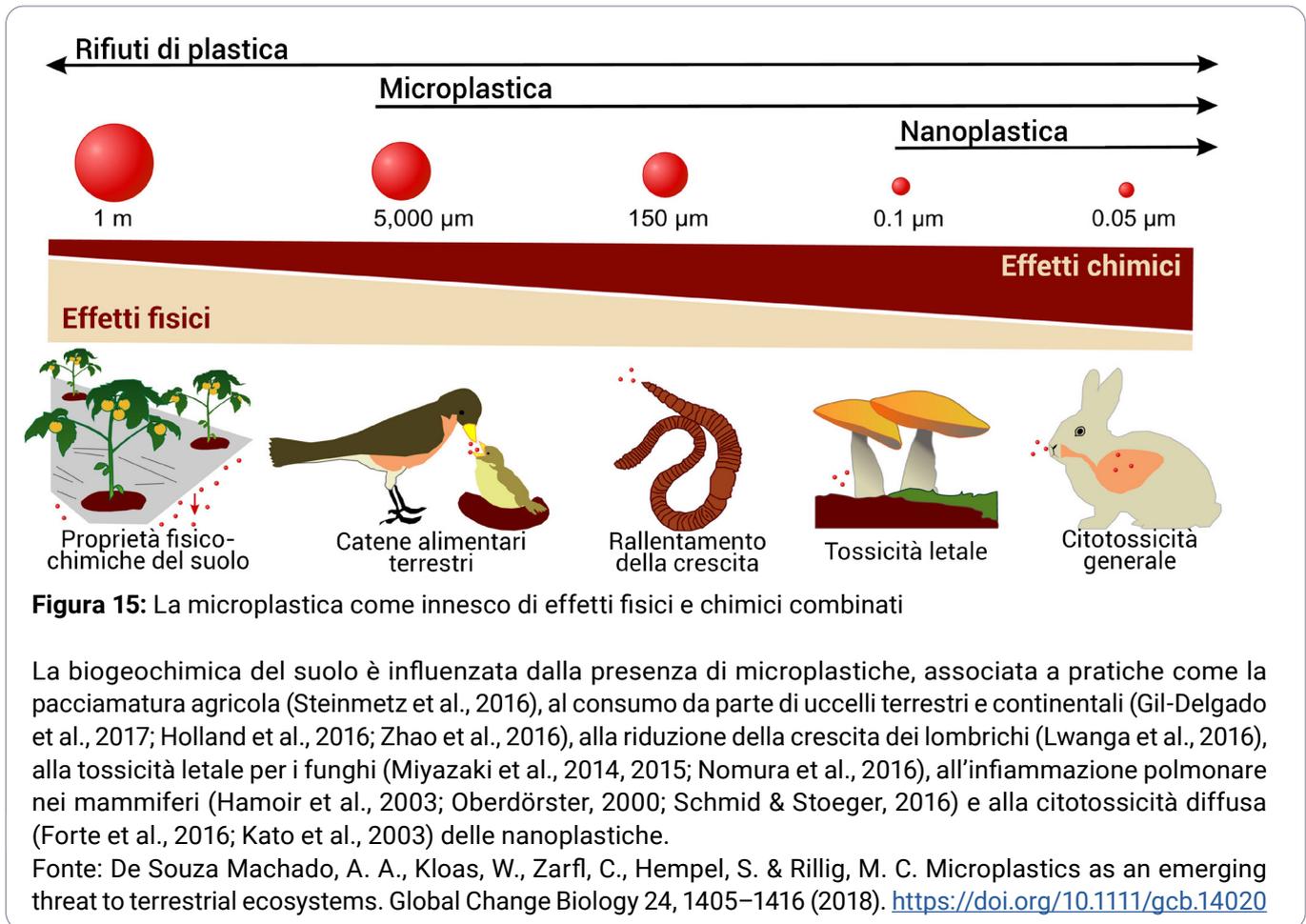
⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶United Nations Environment Programme. *Chemicals in Plastics - A Technical Report* (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (accessed: 1 May 2025)

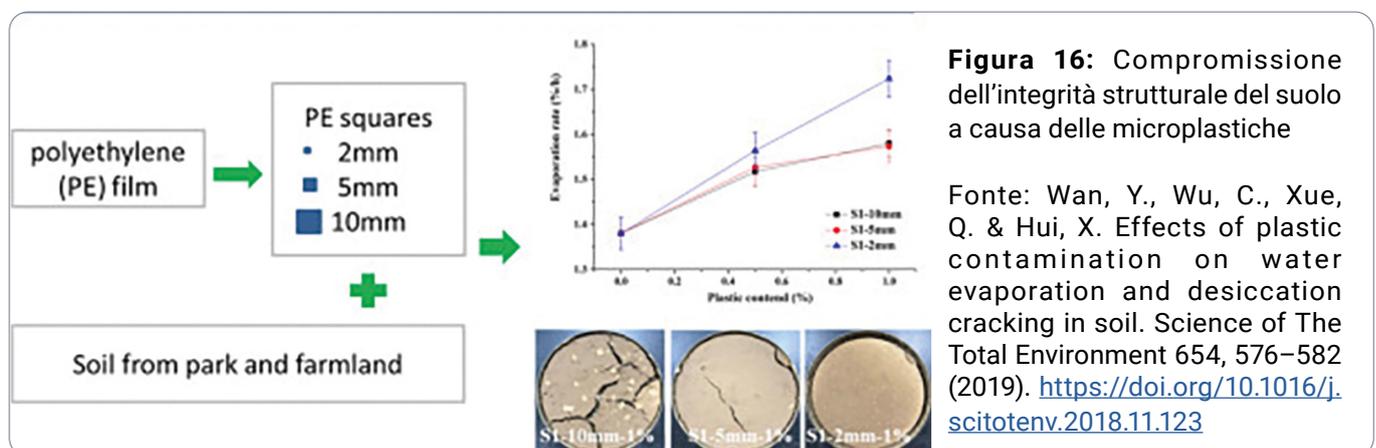
⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>



I risultati di uno studio condotto dall'Accademia Cinese delle Scienze hanno mostrato che la presenza di un strato di plastica di diverse dimensioni nel suolo aumenta significativamente la velocità di evaporazione dell'acqua. L'effetto è particolarmente marcato con l'aggiunta di particelle da 2 mm. I frammenti di plastica di dimensioni maggiori (5–10 mm) causano la fessurazione del terreno, compromettendone l'integrità strutturale. Questi dati indicano che l'inquinamento da plastica altera il ciclo idrico nel suolo, con il rischio di aggravare la carenza di acqua nel terreno e influenzare il trasporto verticale degli inquinanti⁶⁰ (Figg. 16, 17).



⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

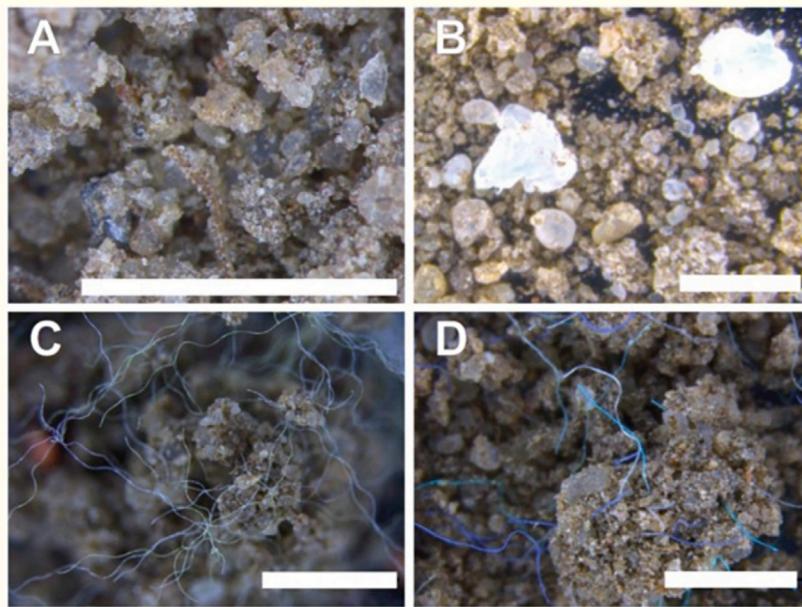


Figura 17: Integrazione delle particelle di microplastiche nell'ambiente biofisico del suolo

La struttura del suolo di controllo (A) non mostrava differenze visive significative sotto lo stereomicroscopio rispetto al suolo contaminato con sfere di poliammide (SI S1D). I frammenti di polietilene (B), le fibre di poliestere (C) e quelle di poliacrilico (D) hanno invece causato modifiche visivamente distinguibili nella struttura del suolo.

La linea bianca in ciascun pannello rappresenta una lunghezza di 1 mm.

Fonte: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environmental Science & Technology*, 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Le ricerche confermano anche l'impatto negativo della plastica sulla biota del suolo – una comunità diversificata che comprende microrganismi (come batteri e funghi) e fauna (animali microscopici e macroscopici). Questi organismi interagiscono tra loro, con le radici delle piante e con l'ambiente circostante, formando catene alimentari del suolo (Fig. 18), essenziali per il ciclo dei nutrienti e la salute delle piante.

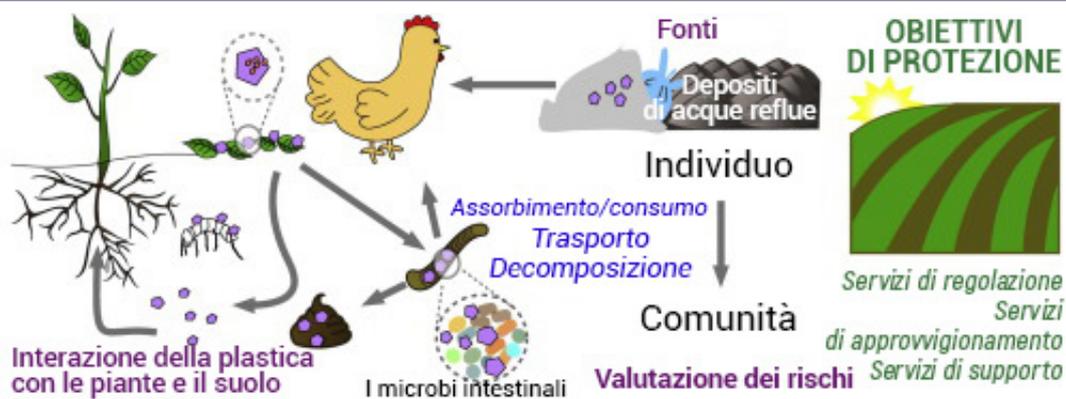
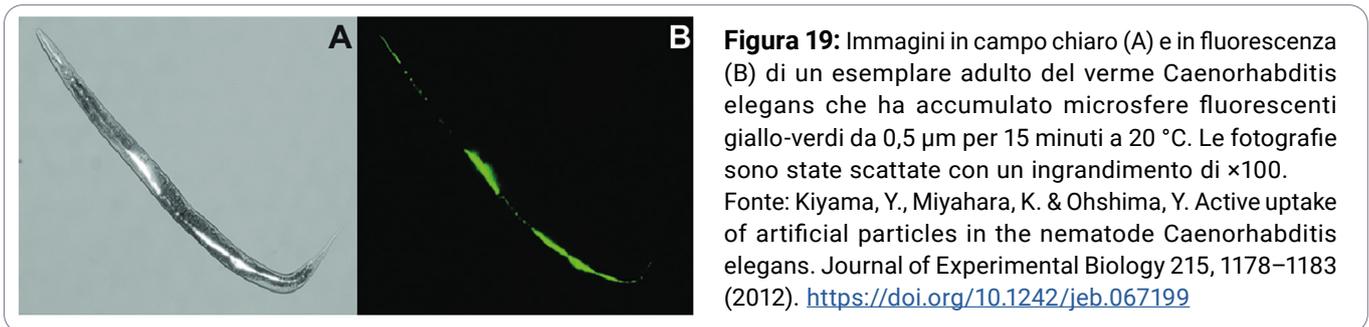


Figura 18: Rappresentazione schematica del processo di formazione delle catene alimentari del suolo

Fonte: Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Diverse specie della biota terrestre fungono da bioindicatori dell'inquinamento da microplastiche. L'analisi di tutti i campioni ha rilevato la presenza di particelle di microplastica e di elementi potenzialmente tossici (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) in concentrazioni variabili, indicando⁶¹ una possibile tossicità associata alla microplastica⁶².

Gli studi hanno dimostrato che i granuli di polistirene possono essere assorbiti dall'organismo del suolo, il nematode *Caenorhabditis elegans* (Fig. 19); ciò implica anche la possibilità che questi materiali si accumulino nella catena alimentare del suolo⁶³.



La biota del suolo non è semplicemente il “motore biologico della Terra”, ma un sistema multifunzionale da cui dipendono tutti gli ecosistemi terrestri. Il suo ruolo nel mantenimento della vita sul pianeta è paragonabile a quello degli oceani e dell'atmosfera, come dimostrano gli studi di pedologi, ecologi e climatologi. Per questo motivo, qualsiasi alterazione causata dalla tossicità può compromettere numerosi processi critici del suolo e influenzare la rete alimentare, provocando uno squilibrio ecologico⁶⁴.

I dati indicano che la microplastica ha la capacità di adsorbirsi rapidamente sulla superficie del suolo grazie alle sue dimensioni ridotte, all'ampia area superficiale specifica, all'elevata idrofobicità e alla resistenza alla biodegradazione⁶⁵. Ciò ne facilita l'assorbimento da parte degli organismi e l'accumulo nei loro corpi, rappresentando una potenziale minaccia per la salute umana. Questo processo non si limita allo strato del suolo, ma si estende anche alle piante, dove continua a esercitare i suoi effetti nocivi.

MNP negli alimenti

Gli inquinanti di origine antropica possono avere un impatto significativo sugli ecosistemi, specialmente quando vengono assorbiti dalle piante.

⁶¹Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

È stato confermato che le MNP possono essere assorbite e traslocate in diversi organi vegetali. I dati di ricerca indicano che la microplastica si accumula nei sistemi vegetali attraverso vari percorsi, esercitando effetti negativi sulle piante, sulle colture agricole e sugli alimenti.

La nanoplastica, grazie alle sue dimensioni estremamente ridotte, è in grado di penetrare direttamente nei tessuti vegetali⁶⁶. Le piante assorbono le nanoplastiche dal substrato nutritivo, dopo di che vengono trasportate nelle parti aeree attraverso lo xilema – il sistema vascolare che trasporta acqua e nutrienti dalle radici ai fusti e alle foglie. La microplastica che si deposita sulle foglie può penetrare attraverso gli stomi e spostarsi verso le radici lungo i fasci vascolari. Sia la micro- che la nanoplastica esercitano un'azione tossica sui processi fisiologici e sull'attività enzimatica delle colture agricole ⁶⁷ (Fig. 20).

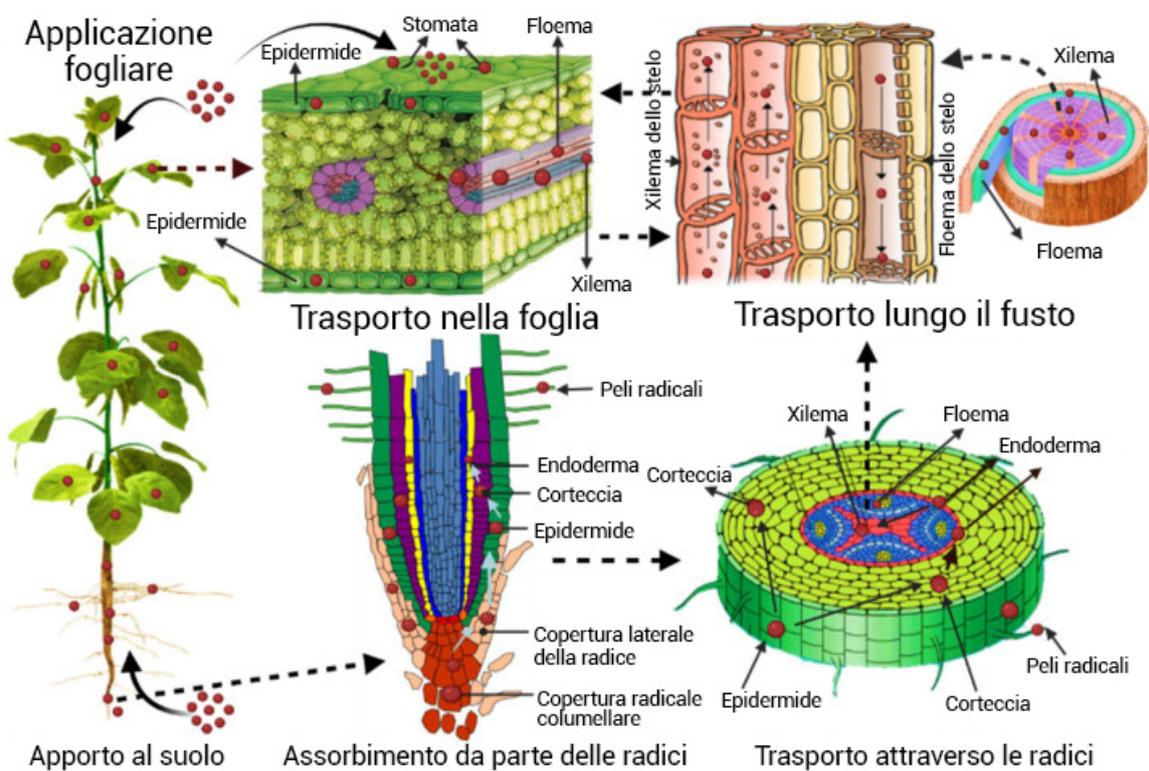


Figura 20: Meccanismi di assorbimento di micro- e nanoplastiche nelle piante
Il meccanismo di assorbimento della plastica da parte delle piante in seguito alla sua presenza nel terreno attraverso l'assorbimento da parte delle radici; e percorsi di trasporto dalla radice al fusto e dal fusto alle foglie e ai frutti. L'applicazione fogliare mostra l'ingresso della plastica attraverso gli stomi fogliari e il successivo trasporto verso altre parti della pianta. La freccia continua indica la disponibilità della plastica per la pianta, mentre la freccia tratteggiata rappresenta il trasporto interno.

Fonte: Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Il sistema di trasporto dell'acqua nelle piante è in grado di trasferire rapidamente le nanoplastiche verso fusti, foglie e, potenzialmente, anche verso i frutti. Secondo i dati ottenuti su piante di tabacco (*Nicotiana tabacum*), le particelle di nanoplastiche con una dimensione di 100 nanometri non riescono a penetrare nelle cellule vegetali, mentre quelle di dimensioni comprese tra 20 e 40 nanometri vengono assorbite con successo⁶⁸.

Inoltre, alcune particelle di plastica possiedono una carica elettrica, che può rafforzare l'adsorbimento nelle radici delle piante tramite attrazione elettrostatica, influenzando l'immobilizzazione dei nutrienti o i processi di fotosintesi⁶⁹. Le microplastiche con carica negativa hanno maggiori probabilità di penetrare nella corteccia radicale⁷⁰.

Nelle agroecosistemi fortemente contaminati da particelle di plastica si osserva un rallentamento della crescita e dello sviluppo delle piante⁷¹, oltre a effetti transitori sulla velocità di germinazione e sulla crescita radicale⁷².

Le ricerche confermano la presenza di microplastiche nel miele disponibile in commercio, sia di produzione industriale che locale. Analisi successive hanno rilevato una diffusione significativa di microplastiche nelle infiorescenze di diverse specie vegetali^{73, 74}.

Negli ultimi anni, lo stato delle popolazioni di api in tutto il mondo è peggiorato drasticamente. Le ricerche mostrano che una delle cause sottovalutate potrebbe essere l'inquinamento ambientale da microplastiche (MP) e nanoplastiche (NP).

Gli studi hanno dimostrato che le api "raccolgono" microplastiche dall'aria, dall'acqua, dalle piante e dal suolo, e poi le portano nell'alveare. Le api raccolgono nettare e polline dalle piante, così come acqua da fonti naturali – e tutti questi ambienti, già oggi, contengono microplastiche.

I peli presenti sul corpo delle api agiscono come "trappole" per le particelle. Le particelle di plastica si accumulano anche sulle zampe, in particolare nelle pieghe e tra i segmenti, poiché entrano in contatto con le superfici delle piante, del suolo, dell'acqua e persino con l'alveare stesso.



*"L'ape mellifera è un ottimo indicatore biologico dell'inquinamento ambientale perché è ovunque, ricoperta di peli che catturano i contaminanti e le particelle presenti nell'aria, è sensibile agli inquinanti, ha una grande mobilità e un ampio raggio di volo, tra le altre cose."*⁷⁵

Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123000805>

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Le micro- e nanoplastiche entrano nell'organismo dell'ape anche attraverso la cuticola (il rivestimento esterno del corpo). Una volta penetrate nel corpo, entro soli 3 giorni raggiungono il cervello, provocando disturbi della memoria, dell'orientamento e delle funzioni cognitive — fondamentali per la ricerca del cibo e la navigazione⁷⁶.

L'impatto delle microplastiche sul cervello comporta anche una ridotta capacità di recupero della memoria. Questo è critico, perché le api si orientano nello spazio in base a punti di riferimento familiari. Le nanoplastiche nel cervello portano inoltre alla perdita della capacità di ricordare dove si trovano le fonti di nettare, a una risposta peggiorata agli odori dei fiori e alla difficoltà di ritrovare la via del ritorno all'alveare. Questi disturbi cognitivi riducono direttamente l'efficacia dell'impollinazione e possono destabilizzare l'intera colonia⁷⁶.

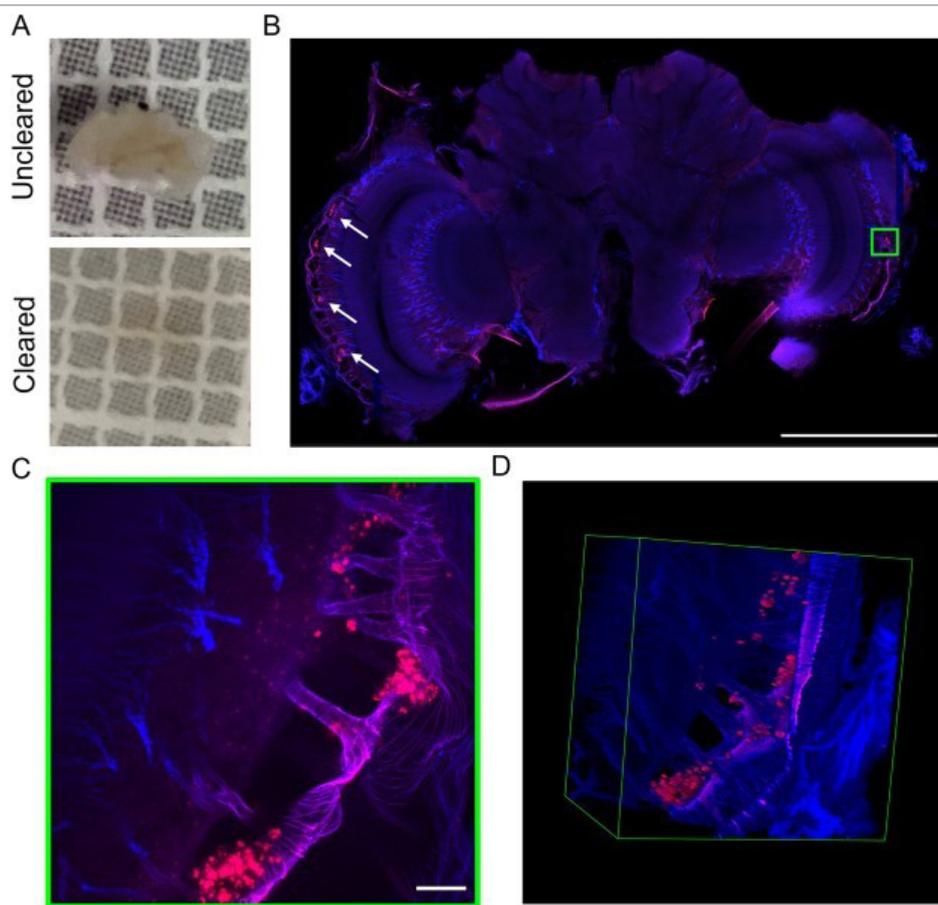


Figura 21: Rilevamento di una quantità significativa di microplastica nel cervello dell'ape mellifera.

A) Fotografie del cervello dissezionato prima e dopo la chiarificazione mediante il metodo iDISCO.

B) Singolo piano ottico (profondità ~200 μm) da una ricostruzione 3D dell'intero cervello ottenuta con microscopia a fluorescenza a due fotoni, obiettivo 10 \times ; risoluzione — 0,51 \times 0,51 \times 2 μm^3 . Colore blu: autofluorescenza del tessuto; colore rosso: microplastica con fluorescenza rossa (indicata con frecce bianche). Barra di scala: 1000 μm .

C) Ingrandimento ad alta risoluzione dell'area evidenziata in verde nell'immagine B, ottenuto con obiettivo 63 \times . L'immagine è una proiezione a massima intensità di una serie di stack con profondità di 150 μm e risoluzione di 0,17 \times 0,17 \times 1 μm^3 . Barra di scala: 20 μm .

D) Visualizzazione 3D della serie di stack mostrata in C. Dimensioni: 170 \times 170 \times 150 μm^3 .

Fonte: Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

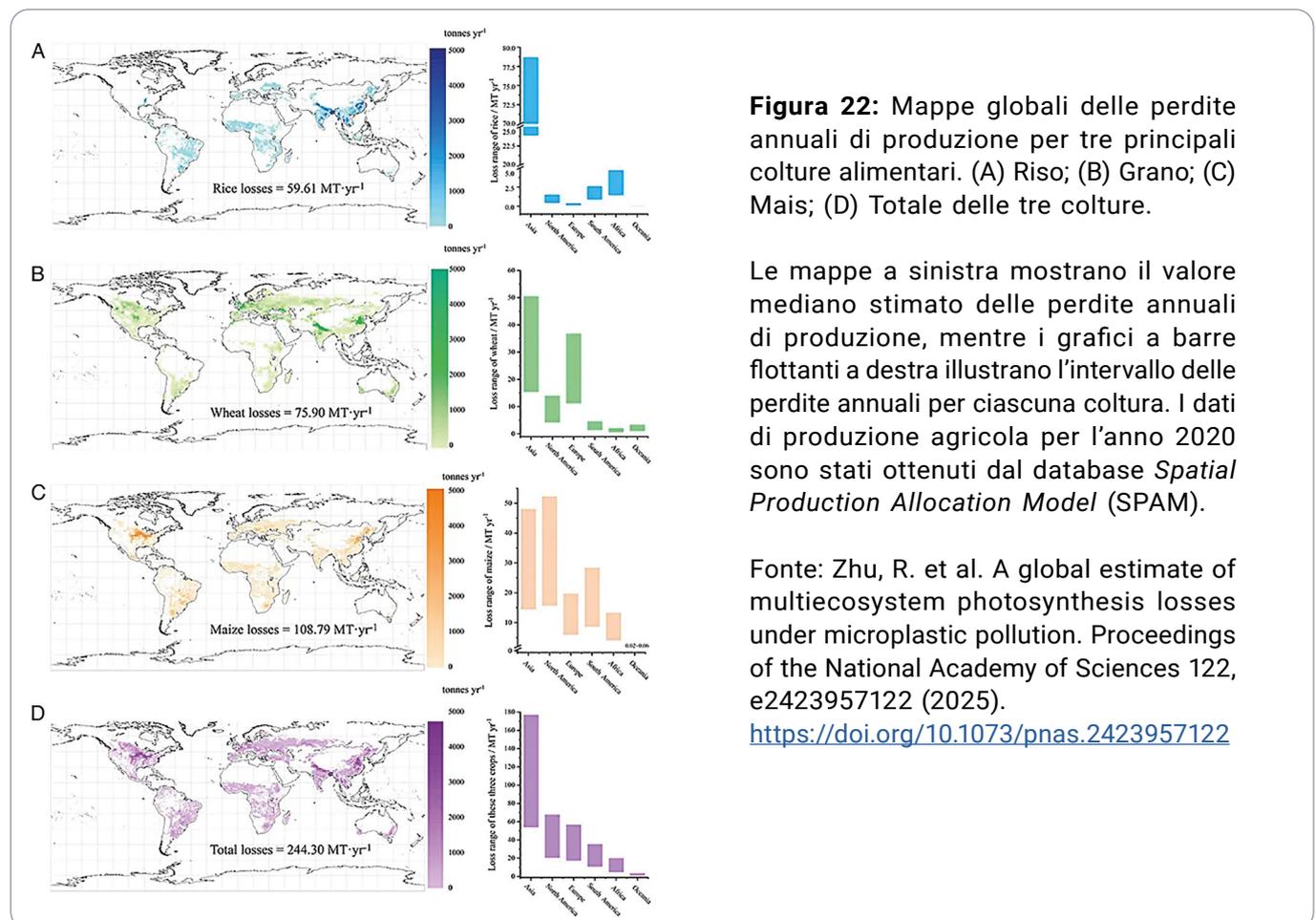
Una volta penetrato nell'organismo dell'ape, la nanoplastica provoca anche danni all'intestino, un indebolimento del sistema immunitario e una maggiore vulnerabilità ai virus, che può portare alla morte delle api anche in assenza di una tossicità acuta della plastica^{75,77}. Inoltre, le particelle di plastica si accumulano non solo nelle api, ma anche nel miele, nella cera e nelle larve, creando così un ciclo chiuso di inquinamento da plastica all'interno dell'alveare⁷⁵.

Questo può potenzialmente avere gravi conseguenze non solo per le api stesse, ma anche per la sicurezza alimentare. Le api sono impollinatrici fondamentali e il loro indebolimento incide direttamente sulla resa delle colture agricole.

Danni cerebrali, perdita di peso corporeo e indebolimento del sistema immunitario riducono l'attività di impollinazione, il che – come avvertono gli scienziati – potrebbe aggravare la crisi della produzione alimentare globale⁷⁷.

Le api agiscono come bioindicatori attivi dell'inquinamento ambientale e già oggi microplastiche sono state trovate in quantità significative nel miele, indipendentemente dal Paese di produzione⁷⁸.

L'esposizione alle MP riduce anche il contenuto totale di clorofilla dal 5,63% al 17,42%, provocando una perdita nella produzione globale di riso, grano e mais compresa tra il 4,11% e il 13,52% del volume annuo totale, con gravi ripercussioni sulla sicurezza alimentare⁷⁹ (Fig. 22).



⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁸Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Le foreste come luoghi di accumulo di MNP

L'analisi ha rilevato la presenza di nanoplastiche nelle radici, nei fusti, nelle foglie e negli aghi in tutte le concentrazioni e gli intervalli di tempo studiati. Le concentrazioni di nanoplastiche nelle radici superavano quelle nelle parti aeree di almeno 10 volte.

L'inquinamento da plastica influisce negativamente sul funzionamento sia delle specie sempreverdi con aghi sia di quelle decidue, provocando stress ossidativo e riducendo l'efficienza della fotosintesi, con conseguente rallentamento della crescita e, in alcuni casi, morte della pianta. Gli studi dimostrano che le alterazioni nelle fasi della fotosintesi portano all'accumulo di energia luminosa in eccesso che, non convertita in energia chimica, causa stress foto-ossidativo e danneggiamento dei tessuti vegetali. Per proteggersi, le piante attivano meccanismi di fotoprotezione nei quali i carotenoidi dissipano l'energia in eccesso sotto forma di calore⁸⁰.

Interferendo con la fotosintesi, inducendo stress ossidativo e riducendo l'attività fisiologica delle piante, l'inquinamento da plastica aumenta la vulnerabilità degli ecosistemi ai cambiamenti climatici. Questi dati sottolineano l'ampiezza dell'impatto dell'inquinamento da plastica sulle comunità vegetali, sollevando interrogativi anche sul suo effetto sugli animali terrestri che dipendono da tali ecosistemi.

Come la nanoplastica danneggia la fauna

Numerosi studi confermano che l'accumulo di micro- e nanoplastiche nell'ambiente, comprese quelle assorbite dalle piante, influisce negativamente sul settore zootecnico⁸¹, compromettendo le catene alimentari e la salute degli animali. Osservazioni condotte in un'azienda lattiero-casearia in Italia hanno rilevato che tutti i campioni di fieno di loietto contenevano microplastiche⁸². In India, un'indagine ha identificato la presenza di polietilentereftalato (PET) nel 100% dei campioni di razioni alimentari destinate a vacche da latte, con concentrazioni comprese tra 89 e 326 g/kg⁸³.

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojaf* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojaf.2023.50>

Analisi successive hanno confermato la presenza di microplastiche nel liquido follicolare del bestiame⁸⁴, nel latte⁸⁵, nelle feci di pecore⁸⁶, nella carne bovina e nel sangue⁸⁷, indicando un impatto significativo sugli animali ruminanti. Secondo i dati disponibili, dal 50 al 60% dei corpi estranei rimossi durante la macellazione del bestiame⁸⁸ – inclusi piccoli ruminanti come capre e pecore – era costituito da materiali plastici. Inoltre, sono state rilevate microplastiche nei tessuti interni di cani e gatti⁸⁹ domestici in ambiente urbano, nell'intestino di anatre allevate in casa⁹⁰ e nei polmoni dei suini⁹¹.

I dati degli studi confermano che le microplastiche arrecano danni agli animali non solo per la loro presenza fisica, ma anche per gli additivi utilizzati nella loro produzione e per gli inquinanti ambientali che esse assorbono, causando danni di diversa gravità⁹². Le osservazioni mostrano che le microplastiche inducono effetti tossici negli animali, tra cui stress ossidativo, danni intestinali, immunotossicità, nonché tossicità riproduttiva e neurotossicità⁹³ (Fig. 23). Inoltre, le microplastiche agiscono come vettori per contaminanti quali metalli pesanti, antibiotici, composti organici persistenti e pesticidi, aumentando i potenziali rischi per gli ecosistemi, la salute animale e quella umana⁹⁴.

⁸⁴Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUF.pdf>

⁸⁸Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

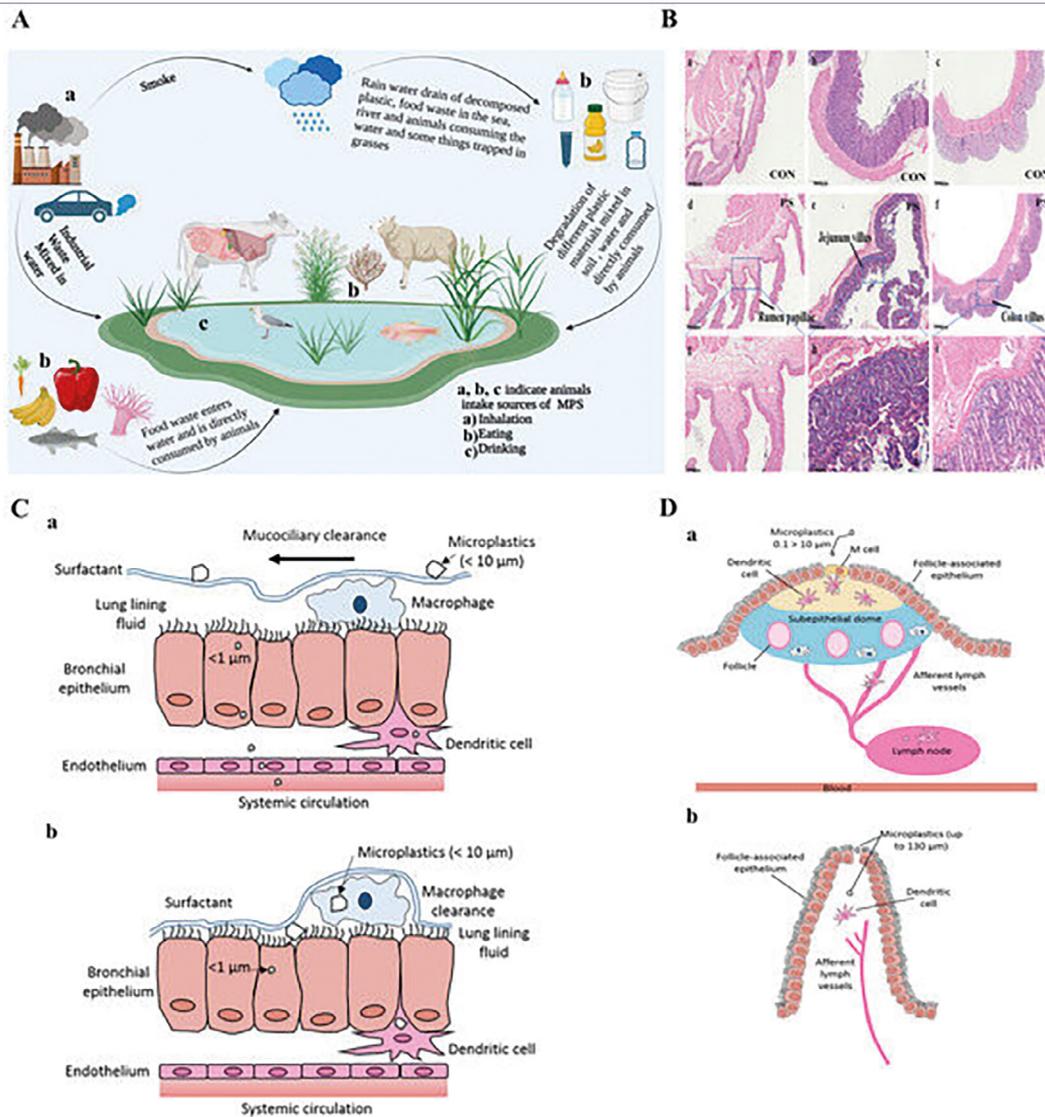


Figura 23: Rappresentazione schematica delle vie di ingresso delle microplastiche negli organismi animali e del loro effetto sul tratto gastrointestinale.

(A) Vie di ingresso delle microplastiche (MP) nell'organismo degli animali.

(B) Stato del tratto gastrointestinale sotto l'influenza delle particelle di polistirene (PS), prima e dopo l'esposizione: Immagini colorate con ematosilina-eosina (H&E) del ruminante (a), del tratto del digiuno (b) e del tratto del colon (c) nel gruppo di controllo (GC).

(d) Immagine H&E del ruminante nel gruppo esposto a particelle di polistirene di piccole dimensioni (PS Piccolo).

(e) Immagine H&E del digiuno nel gruppo esposto a particelle di polistirene di grandi dimensioni (PS Grande).

(f) Immagine H&E del colon nel gruppo esposto a particelle di polistirene di grandi dimensioni (PS Grande).

(g-i) Immagini ingrandite localmente corrispondenti rispettivamente a (d-f).

(C) Meccanismi potenziali di assorbimento ed eliminazione delle microplastiche (di dimensioni comprese tra 0,1 e 10 μ m) nei polmoni:

(a) Nelle vie respiratorie superiori (parte centrale dei polmoni), dove la membrana polmonare è più spessa, i liquidi polmonari (surfattante e muco) riducono la probabilità di penetrazione delle microplastiche. Le particelle superiori a 1 μ m vengono rimosse dal rivestimento mucociliare. Le particelle inferiori a 1 μ m possono essere assorbite dall'epitelio. (b) Se il diametro aerodinamico delle microplastiche consente il loro deposito nelle parti profonde dei polmoni, possono attraversare uno strato più sottile di liquido polmonare e raggiungere l'epitelio, diffondendosi o venendo assorbite attivamente dalle cellule.

(D) Vie ipotizzate di assorbimento delle microplastiche dal tratto gastrointestinale (GIT):

(a) Assorbimento di microplastiche (0,1-10 μ m) dal lume intestinale tramite cellule M delle placche di Peyer attraverso l'endocitosi. Le cellule M catturano e trasportano le particelle dal lume intestinale al tessuto linfoide della mucosa.

(b) Le microplastiche vengono assorbite anche attraverso l'assorbimento paracellulare dal lume intestinale. Particelle non degradabili come le microplastiche possono penetrare meccanicamente nei tessuti sottostanti tramite giunzioni deboli dell'epitelio monostratificato. Le cellule dendritiche possono catturare queste particelle, trasportandole nei vasi linfatici e nelle vene sottostanti. Le particelle possono quindi distribuirsi nei tessuti secondari, inclusi fegato, muscoli e cervello.

Le osservazioni indicano che gli animali selvatici spesso scambiano erroneamente i rifiuti di plastica per cibo, provocando l'accumulo di plastica nel tratto intestinale. In Zimbabwe⁹⁵ e nello Sri Lanka⁹⁶, alcuni elefanti che si nutrivano in discariche a cielo aperto sono morti a causa della plastica non digeribile. Nel parco di Nara, in Giappone, cervi selvatici sono deceduti per complicazioni legate all'ingestione di rifiuti di plastica lasciati dai turisti⁹⁷. Uno studio condotto su oltre 30.000 cammelli vicino a Dubai, negli Emirati Arabi Uniti, ha rilevato che circa l'1% degli animali è presumibilmente morto a causa dell'accumulo di plastica nel tratto digerente⁹⁸.

I ricercatori hanno introdotto il termine "polibezoario" per descrivere una massa densa di materiali non digeribili – come plastica, corde, rifiuti e depositi salini – che si forma come un conglomerato simile a un calcolo nello stomaco o nell'intestino, soprattutto nei ruminanti. Il termine unisce "poli" (materiale sintetico) e "bezoario" (formazione solida simile a una pietra). Le osservazioni confermano che i polibezoari possono causare ostruzione gastrointestinale, sepsi dovuta alla proliferazione batterica, disidratazione e malnutrizione (Fig. 24).



Figura 24: Polibezoari trovati all'interno di cammelli morti nel deserto vicino a Dubai. Il più grande analizzato nello studio pesava quasi 64 kg (141 libbre).

Fonte: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. (2021). The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments*, 185, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps>

⁹⁷Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags>

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Trasferimento delle MNP lungo le catene alimentari, dal plancton all'uomo

L'accumulo di plastica negli oceani ha un impatto significativamente negativo sugli ecosistemi marini. Le osservazioni scientifiche degli ultimi quattro decenni hanno rilevato la presenza di microplastiche in quasi tutti gli habitat marini del mondo⁹⁹. Gli studi confermano che i rifiuti di plastica minacciano la biodiversità marina, interessando almeno 690 specie, tra cui cetacei, pinnipedi, uccelli marini, tartarughe, pesci e crostacei¹⁰⁰. L'ingestione di plastica espone gli animali a tossine supplementari: le sostanze chimiche contenute nella plastica vengono rilasciate nell'organismo dopo l'ingestione, trasferendosi lungo le catene alimentari dalla preda al predatore. Le conseguenze dell'ingestione o dell'intrappolamento variano da effetti letali a sub-letali, provocando disturbi nell'alimentazione, problemi digestivi, malnutrizione, malattie, riduzione della fertilità, crescita rallentata e diminuzione della durata della vita¹⁰¹.

Grazie alle loro ridotte dimensioni, le microplastiche vengono assimilate dal plancton — un elemento chiave delle catene alimentari marine. Il plancton viene consumato da numerose specie marine, e anche chi non si nutre direttamente di esso ingerisce organismi che lo hanno già assimilato, favorendo così l'integrazione delle microplastiche nelle catene alimentari. (Figg. 25,26)

Nel 1999, l'analisi dei campioni di acque superficiali nel vortice centrale del Pacifico settentrionale ha rivelato che la massa della plastica superava di sei volte¹⁰² quella dello zooplancton — principale fonte di nutrimento dell'ecosistema — evidenziando il predominio della plastica sugli organismi viventi nell'oceano.

Calcoli basati su dati osservativi mostrano che la concentrazione di microplastiche aumenta con la dimensione del pesce. I dati indicano che il più grande animale — la balena — ingerisce quotidianamente fino a 43,6 kg di plastica, e il 98,5% di tale quantità proviene dal cibo, non direttamente dall'acqua, poiché la microplastica è già presente nelle prede¹⁰³.

⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf>

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

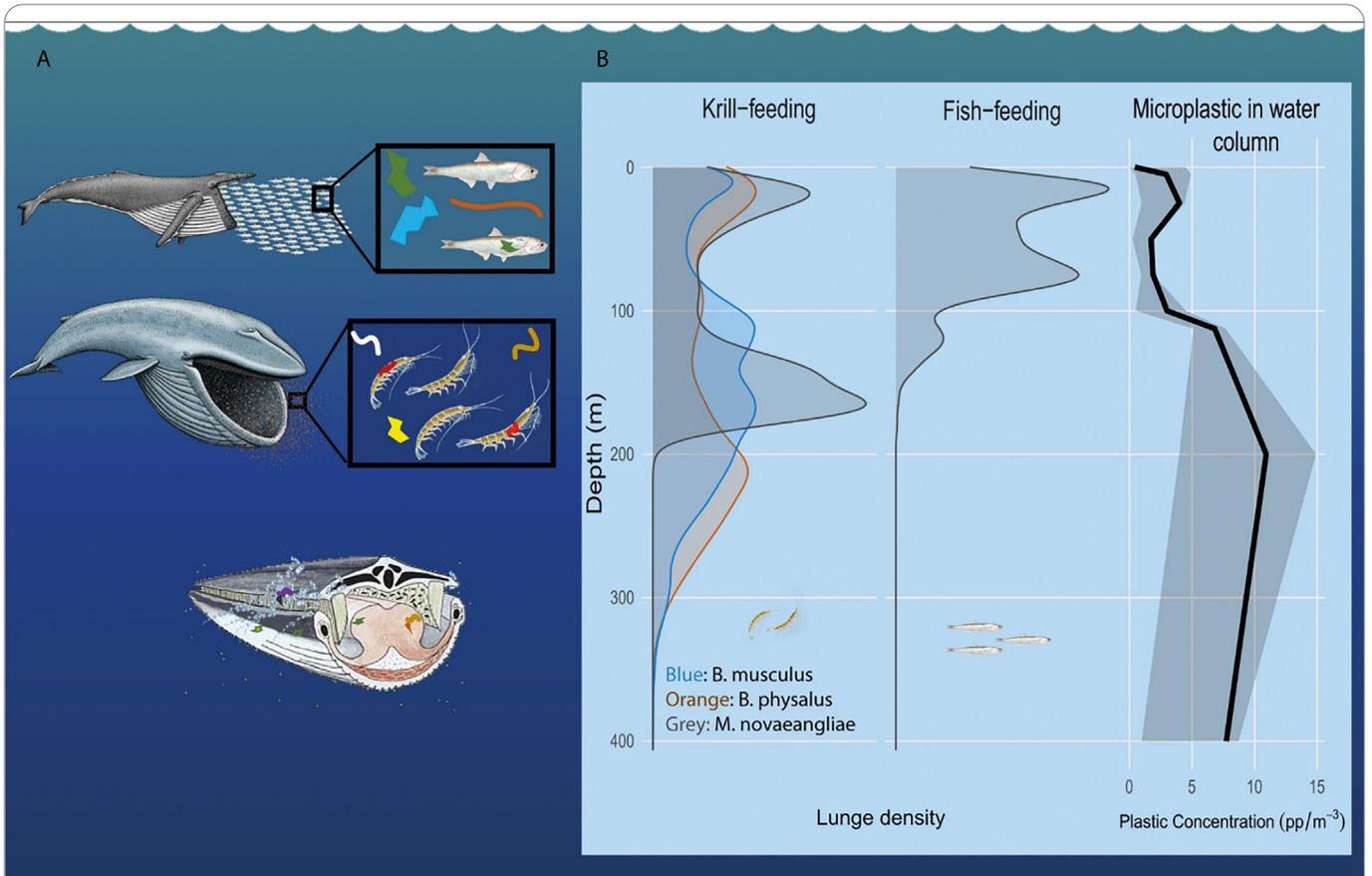


Figura 25: Profondità del comportamento alimentare delle balene roqual in funzione della concentrazione di microplastiche nella colonna d'acqua.

a – La quantità di plastica ingerita quotidianamente dalle balene, modellata come somma di (i) plastica filtrata dall'acqua ogni giorno e (ii) plastica ingerita attraverso le prede giornaliere. Gamma del possibile rischio di esposizione dovuto all'ingestione di plastica: basso, medio e alto – poiché alcune variabili non dispongono di dati esaustivi; b – Profondità del deposito di plastica nel Golfo di Monterey, corrispondente al profilo di profondità della concentrazione di plastica nella stessa area. Le balene e le loro prede sono state illustrate da Alex Boersma, mentre il diagramma in sezione del filtraggio è stato illustrato da Scott Landry del *Center for Coastal Studies*.

Fonte: Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



Figura 26: Rappresentazione schematica della penetrazione della plastica nelle catene alimentari

La plastica uccide gli organismi marini

Ogni anno, circa 1 milione di uccelli marini e 100.000 mammiferi marini muoiono a causa dell'inquinamento da plastica¹⁰⁴. Le osservazioni confermano il legame tra i rifiuti ingeriti e la mortalità degli uccelli marini. Uno studio su 1733 esemplari di 51 specie ha rilevato che 557 uccelli (32,1%) contenevano rifiuti marini — da 1 a 40 oggetti, con un peso massimo di 3340 mg e un volume di 3621 mm³ ¹⁰⁵.

Alcuni dati indicano che alcune plastiche emettono dimetilsolfuro, una sostanza chimica che imita il segnale olfattivo utilizzato dagli uccelli marini per identificare il cibo¹⁰⁶. Nuove ricerche dimostrano inoltre che l'ingestione di plastica provoca nei pulcini lesioni ai reni, al fegato e allo stomaco, nonché danni cerebrali simili al morbo di Alzheimer. Ciò evidenzia l'impatto distruttivo dell'inquinamento da plastica sulla fauna marina¹⁰⁷. In ciascun esemplare di tutte e sette le specie di tartarughe nei tre bacini oceanici sono state trovate particelle sintetiche¹⁰⁸ (Fig. 27).

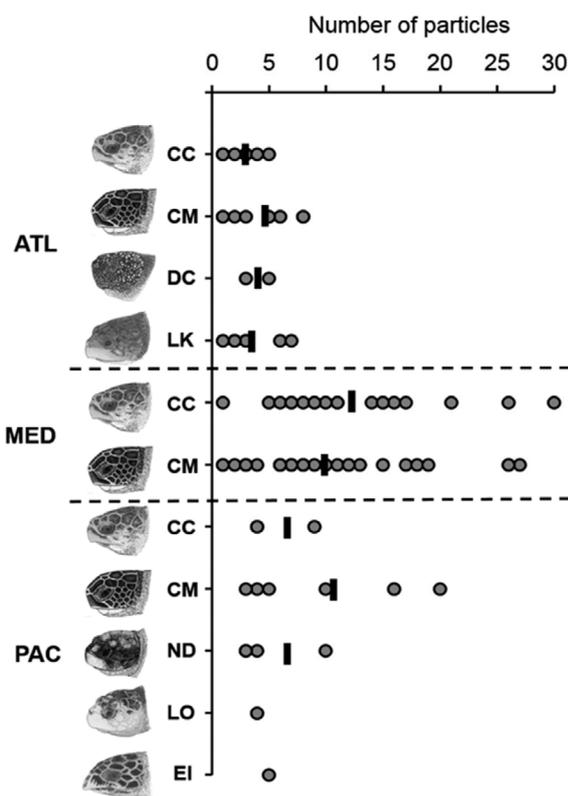


Figura 27: Ingestione di microparticelle sintetiche da parte di tutte le specie di tartarughe marine provenienti da tre bacini oceanici. Numero totale di particelle identificate in ogni sottocampione da 100 ml per ciascuna specie in ciascun bacino oceanico. Linea nera è il numero medio di particelle. Le illustrazioni dei teschi delle tartarughe marine sono utilizzate con il permesso di WIDECAS; disegni originali di Tom McFarland

Fonte: Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019).
<https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://www.wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

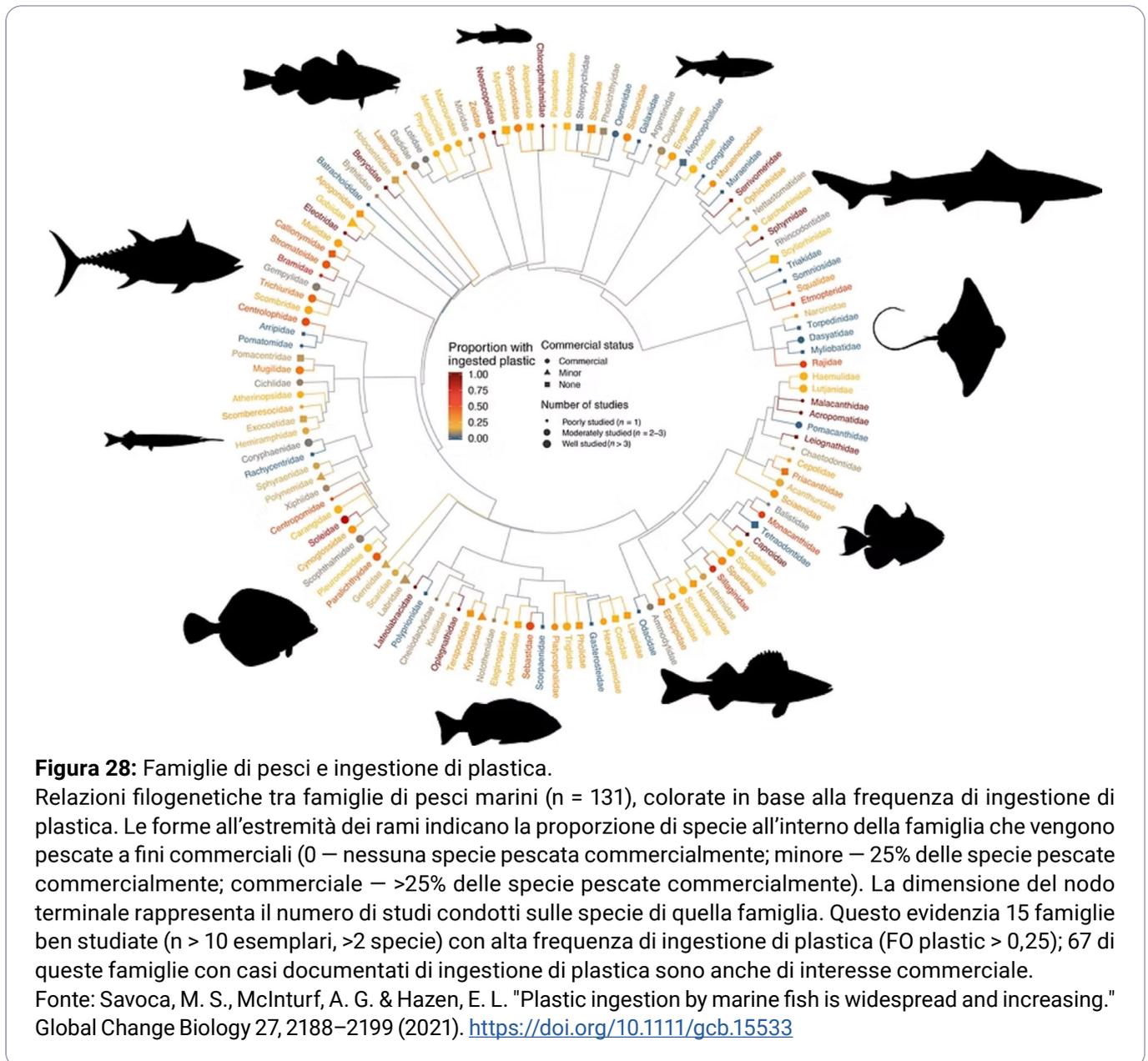
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Gli studi condotti su 171.774 esemplari appartenenti a 555 specie di pesci marini dimostrano che 386 specie, tra cui 210 di rilevanza commerciale, ingeriscono rifiuti di plastica¹⁰⁹. Secondo le ricerche, la frequenza di ingestione di microplastiche nei pesci marini è del 26%, raddoppiando nell'ultimo decennio (Fig. 28). L'analisi ha rivelato una correlazione positiva tra l'abbondanza di plastica nelle acque superficiali (Fig. 29) e il suo consumo da parte degli organismi marini (Fig. 30).

Gli studi di laboratorio dimostrano che i composti plastici, una volta penetrati nei tessuti dei pesci, riducono l'attività, compromettono la funzionalità epatica, danneggiano il cervello, rallentano la crescita e peggiorano le capacità riproduttive^{109, 110, 111}.



¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorb, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.

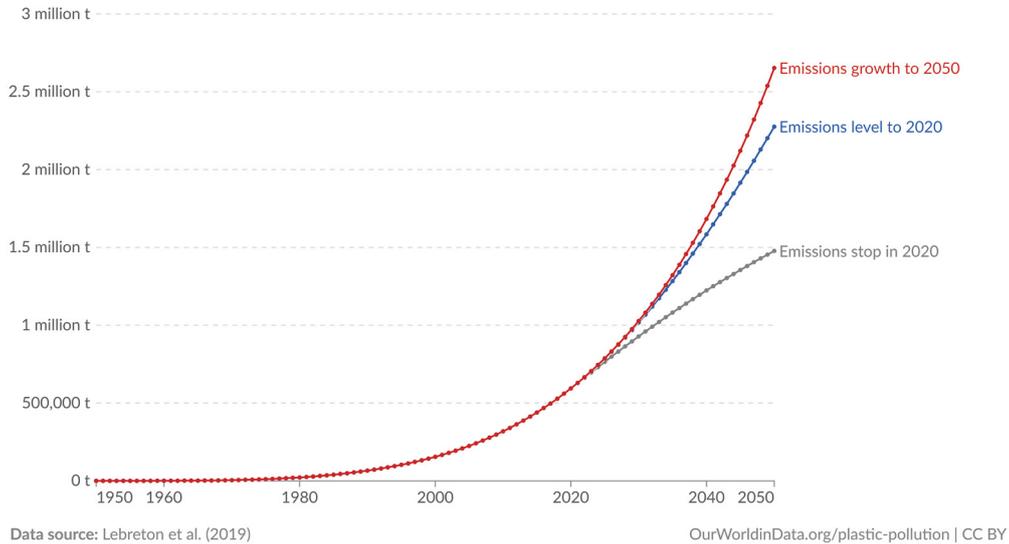


Figura 29: Grafico della crescita della quantità di microplastica sulla superficie dell'oceano con una previsione fino al 2050.

Fonte: *Our World in Data* – <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (accesso: 01.05.2025).

Fonte dati: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

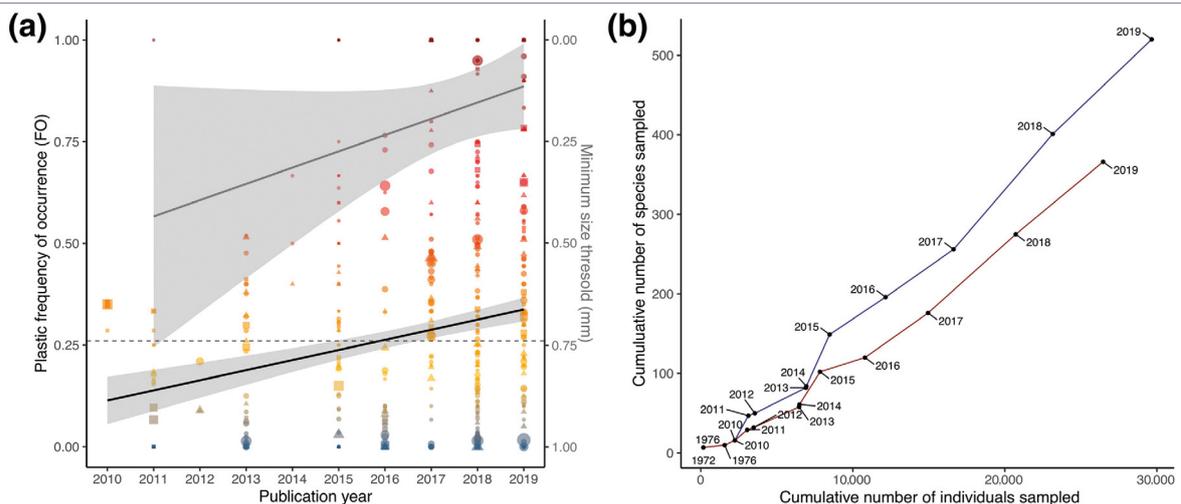


Figura 30: Tendenze temporali del consumo di plastica da parte dei pesci. (a) La linea grigia in alto indica una tendenza, a partire dal 2011, verso il rilevamento di particelle sempre più piccole. La linea nera in basso mostra un aumento della frequenza di occorrenza della plastica (FO) tra tutte le specie di pesci dal 2010 al 2019. Durante questo periodo, la frequenza del consumo di plastica è aumentata in modo significativo, con un tasso annuo del 2,4%. La linea tratteggiata orizzontale rappresenta una FO di 0,26, ovvero la frequenza media globale del consumo di plastica da parte dei pesci. (b) Curva di accumulo delle specie, dove la linea blu indica il numero cumulativo di specie studiate nel tempo, includendo sia quelle con e senza plastica ingerita, mentre la linea rossa rappresenta solo le specie con presenza di plastica ingerita. L'assenza di un asintoto nella linea rossa indica un'alta probabilità che nei prossimi anni emergeranno nuove specie che ingeriscono plastica. Fonte: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

I coralli sotto attacco: una microminaccia di portata globale

L'inquinamento da plastica rappresenta una minaccia crescente per le barriere coralline, penetrando nelle loro catene alimentari e aggravando la diffusione di malattie e la distruzione delle strutture comunitarie dei reef. Le analisi hanno rilevato rifiuti antropici in 77 delle 84 barriere esaminate, inclusi atolli isolati del Pacifico centrale¹¹². In cinque delle sei specie studiate sono stati osservati effetti negativi sulla salute¹¹³, come lo sbiancamento e la necrosi dei tessuti¹¹⁴ (Fig. 31). I frammenti di plastica più grandi favoriscono la trasmissione di patologie e i danni fisici, aumentando la vulnerabilità dei coralli ai patogeni¹¹⁵. Questi effetti coinvolgono anche il microbioma scheletrico, che svolge un ruolo chiave nel mantenimento della salute delle colonie coralline¹¹⁶ (Fig. 32). Le ricerche rivelano inoltre che i biofilm presenti sulle microplastiche, noti come "plastisfere"¹¹⁴, possono provocare disbiosi del microbioma dei coralli¹¹⁷.

Il contatto con la plastica aumenta il rischio di malattie nei coralli dal 4% all'89% (Fig. 33). La morte delle barriere coralline ha gravi conseguenze per la biodiversità marina, poiché esse costituiscono l'habitat di un quarto di tutte le specie oceaniche¹¹⁵.

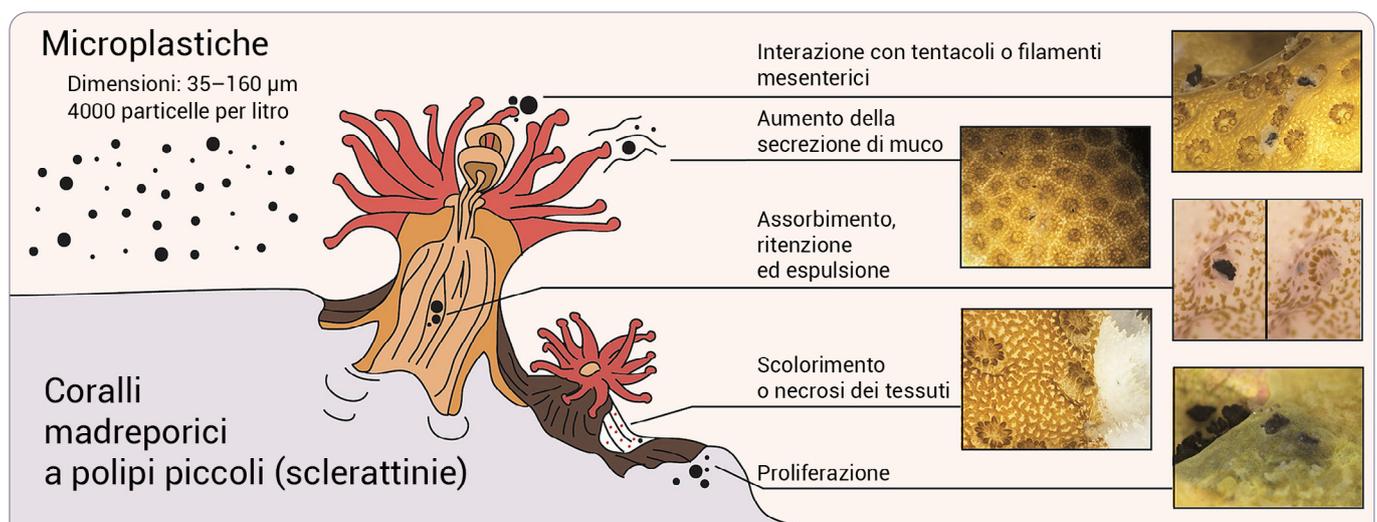


Figura 31: Impatto della plastica sullo stato delle barriere coralline

I coralli possono reagire alle particelle di plastica attraverso vari meccanismi di difesa, come l'azione delle ciglia, la produzione di muco o l'espansione dei tessuti, trattenendo le particelle tramite accrescimento o espellendo quelle ingerite per errore.

Fonte: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

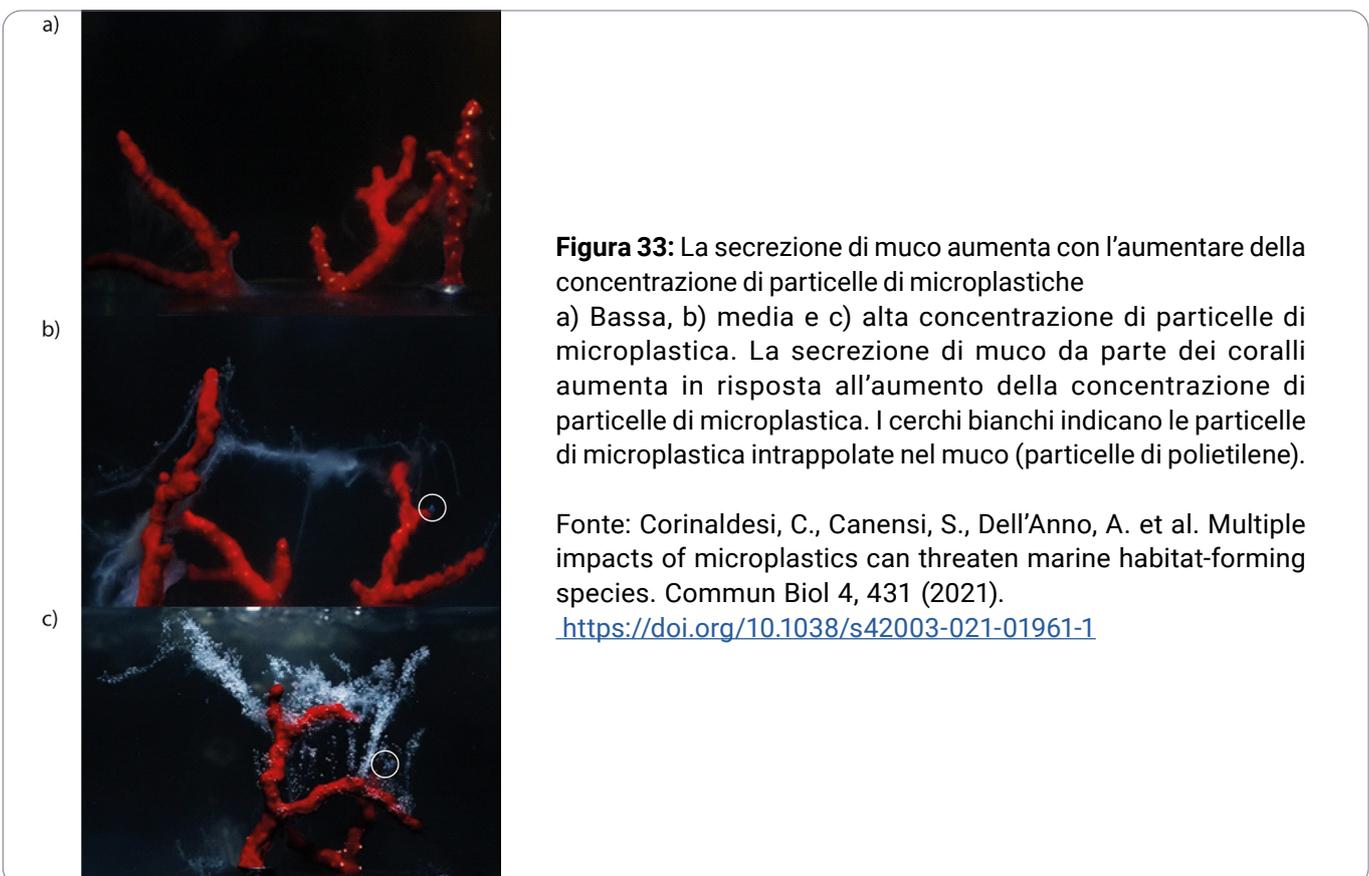
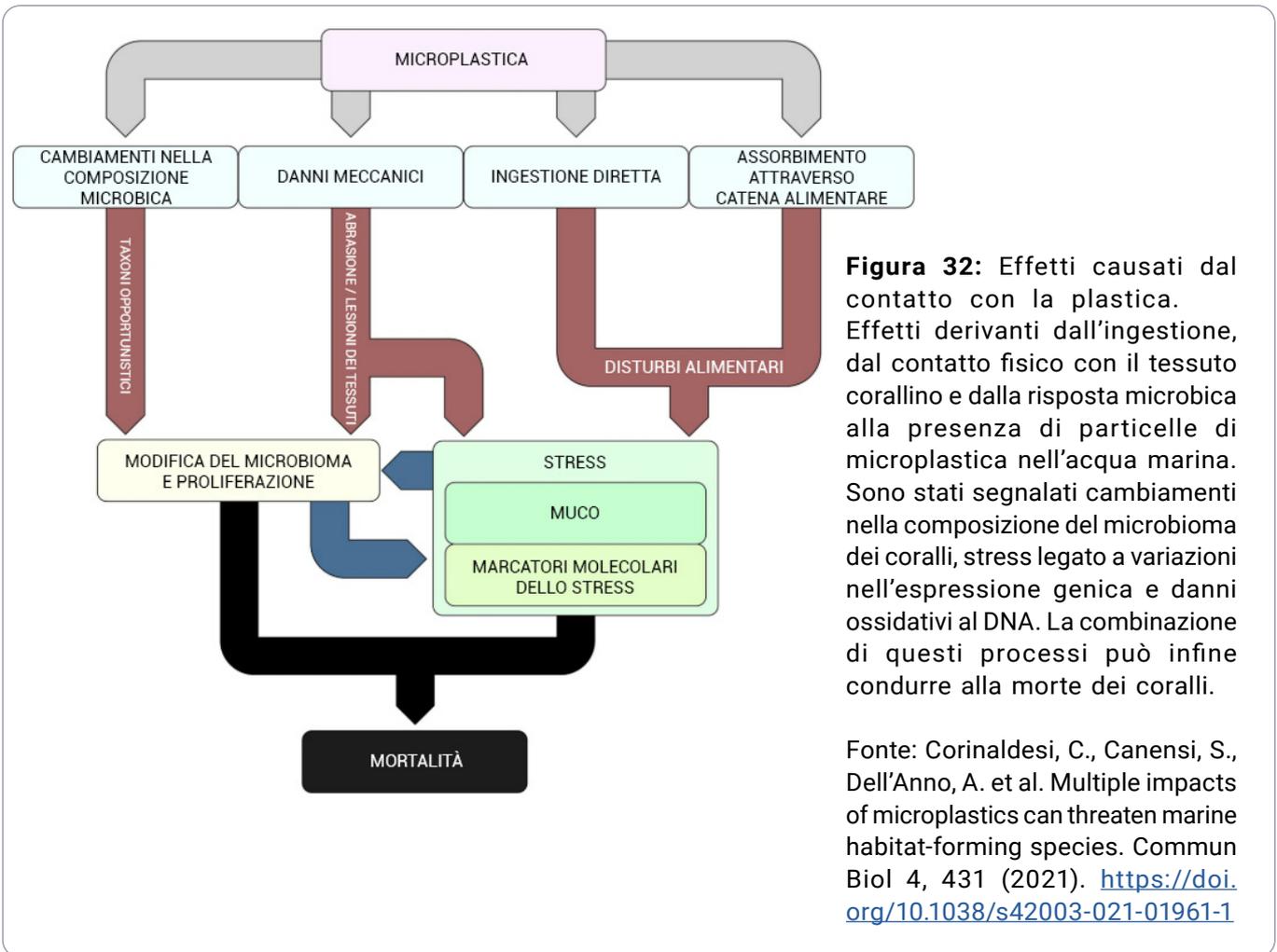
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>



Impatto delle MNP sull'equilibrio dell'ossigeno negli ecosistemi

Le osservazioni dimostrano che la plastica nell'ambiente si degrada prevalentemente sotto l'influenza della radiazione solare. Questo processo ne altera la composizione chimica e la struttura. Gli studi confermano che le reazioni indotte dalla luce solare intensificano il rilascio di composti organici disciolti, influenzando la biogeochimica dell'acqua marina e stimolando la crescita dei batteri eterotrofi¹¹⁸ (Fig. 34).

Minacce derivanti dalla microplastica nell'ambiente marino

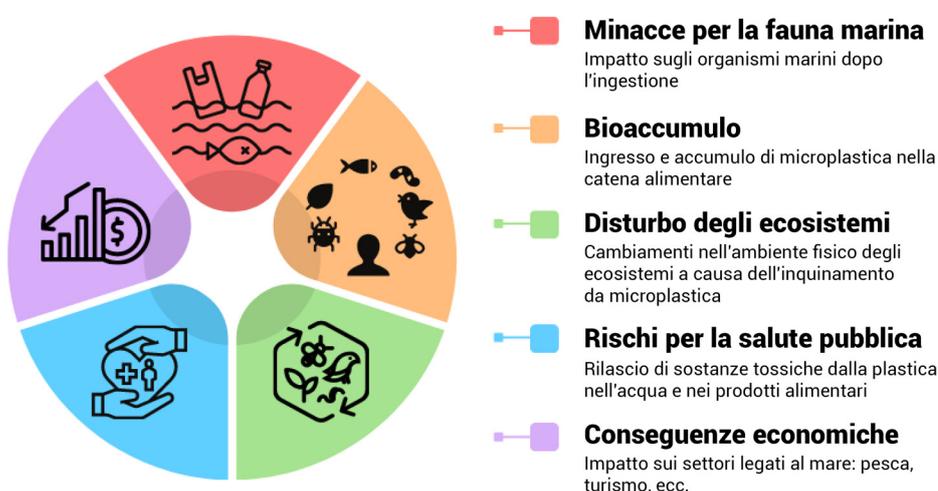


Figura 34: Minacce poste dalla microplastica marina

Fonte: Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Le ricerche pluriennali dimostrano che i composti chimici rilasciati dalla plastica nell'acqua marina durante la sua degradazione provengono sia dal materiale stesso sia dagli additivi utilizzati per conferire colore o resistenza al polimero. Alcuni di questi composti sono acidi organici, il che spiega il loro ruolo nella diminuzione del pH. Di conseguenza, la plastica intensifica l'acidificazione degli oceani (Fig. 35), che a sua volta può compromettere in modo significativo il funzionamento dei sistemi naturali della Terra¹¹⁹.

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

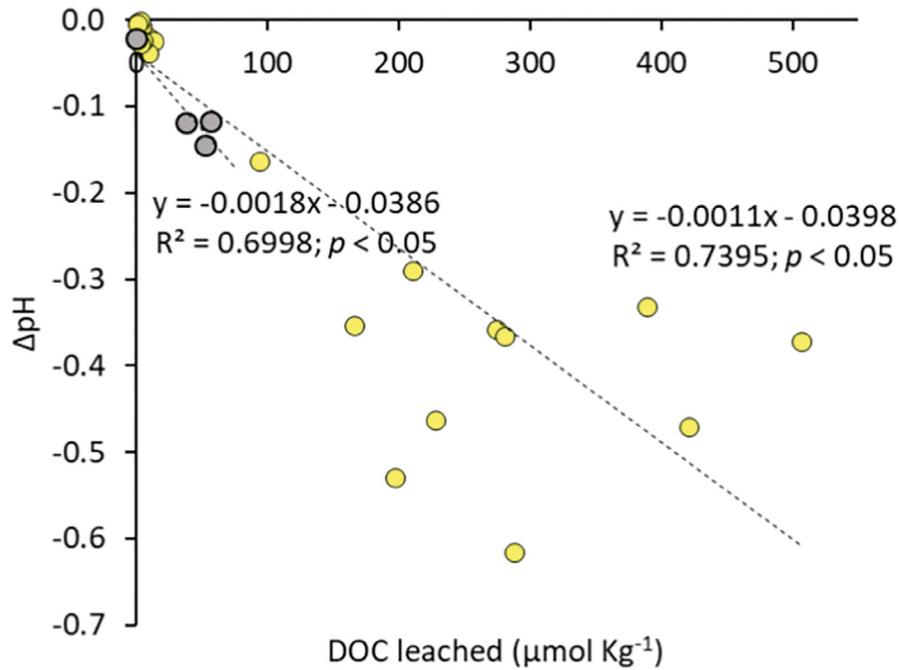


Figura 35: Le relazioni tra la variazione del pH e il DOC (carbonio organico disciolto) lisciviato dalla plastica sono tracciate per ciascun campione ripetuto di tutti gli esperimenti. Sono inclusi anche i controlli senza plastica per ciascun esperimento. I punti gialli corrispondono ai trattamenti irradiati, mentre i punti grigi ai trattamenti al buio.
Fonte: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



“Grazie a questo studio, siamo riusciti a dimostrare che nelle aree oceaniche fortemente contaminate dalla plastica, la degradazione della stessa può portare a una diminuzione del pH fino a 0,5 unità, un valore paragonabile alla riduzione prevista negli scenari peggiori di emissioni antropiche entro la fine del XXI secolo”, osserva Cristina Romera-Castillo, ricercatrice dell'Istituto di Scienze Marine (ICM-CSIC)¹²⁰ (Fig. 36).

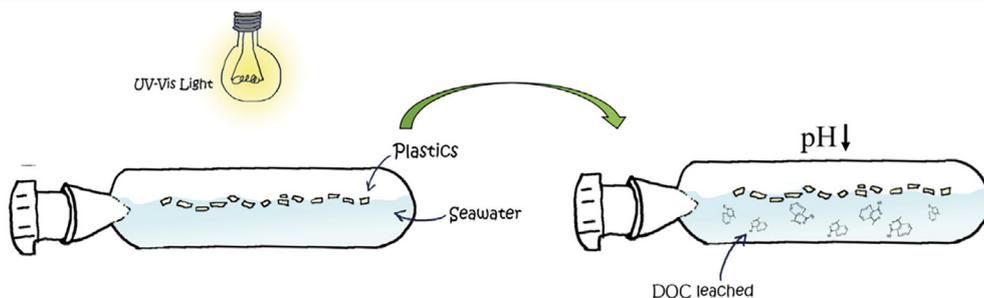


Figura 36: Il rilascio di composti dalla plastica può causare una diminuzione del pH dell'acqua marina fino a 0,5 unità
Fonte: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025)

L'acidificazione degli oceani rappresenta un'alterazione delle condizioni dell'ambiente marino, una pressione ecologica crescente e persistente¹²¹. Le conseguenze per gli ecosistemi si manifestano su scale temporali di decenni, secoli e oltre. Le osservazioni confermano una riduzione della biodiversità nei sistemi costieri dovuta al calo del pH^{122, 123}. Ciò diminuisce la resilienza degli ecosistemi e compromette le loro funzioni, inclusi l'habitat, il ciclo dei nutrienti e lo stoccaggio del carbonio¹²³.

Gli studi dimostrano che, in condizioni di acidificazione oceanica, le cozze (*Mytilus edulis*) crescono più lentamente e hanno una sopravvivenza ridotta (Fig. 37). Questo comporta un calo della loro popolazione, riducendo la capacità di filtrare l'acqua e mantenere la qualità dell'ambiente costiero¹²⁴. I valori attuali di pH della superficie oceanica sono senza precedenti almeno negli ultimi 26.000 anni¹²⁵. Questo processo ha un impatto significativo sulle barriere coralline, sugli ecosistemi di acque profonde e su quelli delle alte latitudini, che dipendono da specie uniche. Queste specie svolgono un ruolo insostituibile e la loro scomparsa compromette funzioni chiave degli ecosistemi, poiché non esistono analoghi in grado di sostituirle¹²⁶.

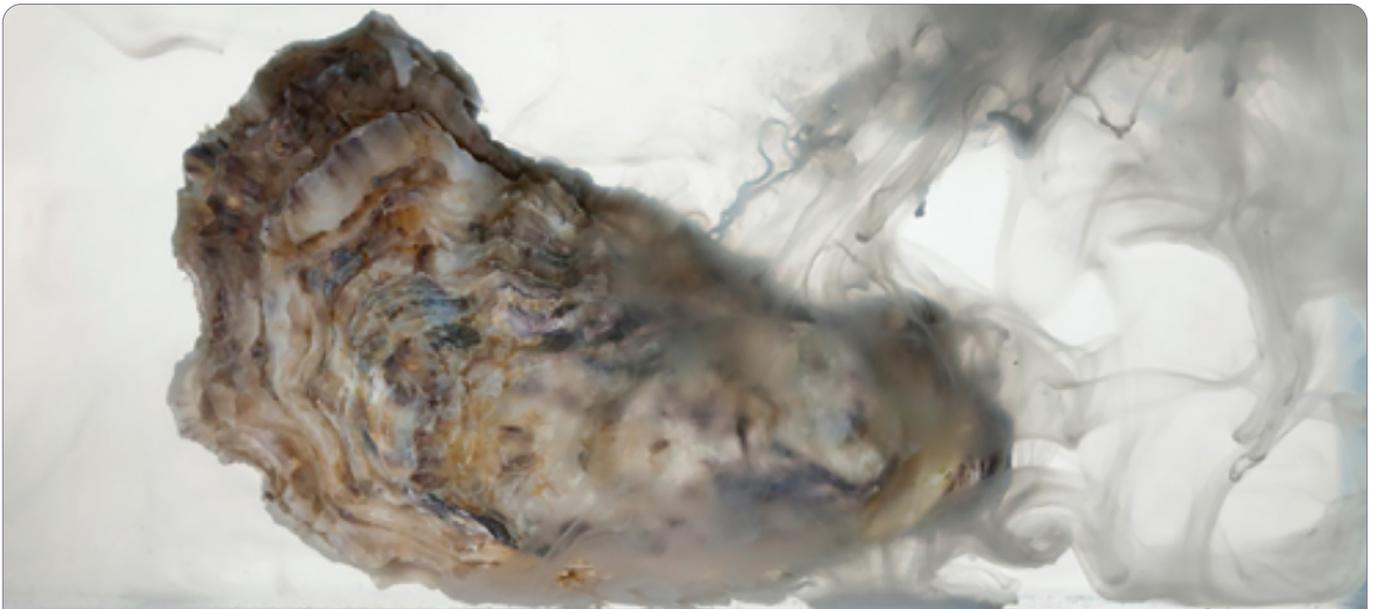


Figura 37: L'ostrica del Pacifico rilascia sperma torbido nell'allevamento di ostriche Whiskey Creek, in Oregon. In alcune acque costiere, l'acidificazione ha già raggiunto livelli critici; qui ha dimezzato la produzione, rallentando la crescita delle larve di ostrica.

Fonte: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

Le ostriche e le cozze si riducono sensibilmente in numero lungo i gradienti di saturazione carbonatica decrescente. L'acidificazione degli oceani può portare a una diminuzione della popolazione di ostriche e dei servizi ecosistemici che esse forniscono in natura; inoltre, può comprometterne la qualità come prodotto alimentare.

¹²¹Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Gli studi confermano un impatto negativo significativo delle microplastiche sui parametri biologici delle microalghe¹²⁷, tra cui la crescita, il contenuto di clorofilla, l'attività fotosintetica e il livello delle specie reattive dell'ossigeno^{128, 129}.

Secondo la ricerca, l'esposizione alle microplastiche porta a una riduzione globale della fotosintesi compresa tra il 7,05% e il 12,12% nelle alghe marine e d'acqua dolce¹³⁰. La fotosintesi, com'è noto, è il principale processo terrestre che produce ossigeno molecolare (O₂) rilasciato nell'atmosfera.

Inoltre, le microplastiche nei sedimenti marini alterano le comunità microbiche e interferiscono con il ciclo dell'azoto, potenzialmente aggravando problemi di origine antropica, come le fioriture algali tossiche. I cambiamenti nelle comunità planctoniche sulla superficie oceanica possono peggiorare la deossigenazione, privando gli organismi marini dell'ossigeno vitale¹³¹.

I dati indicano che, tra il 1960 e il 2010, l'oceano ha perso il 2% dell'ossigeno disciolto a causa dell'aumento della temperatura dell'acqua e dell'accumulo di inquinanti, tra cui scarichi industriali, domestici e agricoli¹³². La riduzione dell'ossigeno porta alla formazione di zone morte – aree oceaniche in cui flora e fauna marina sono praticamente scomparse. Le osservazioni mostrano che negli anni '60 esistevano 45 zone morte negli oceani del mondo, mentre nel 2011 il loro numero era salito a circa 700¹³³. Secondo i dati pubblicati dal sito dell'UNDP, il numero di zone morte raddoppia ogni dieci anni dal 1960. In base a questa tendenza, si può affermare con un alto grado di certezza che entro il 2025 il numero potrebbe raggiungere le 1500 unità¹³⁴.

L'inquinamento da plastica incide su numerosi processi all'interno del sistema Terra. Secondo le ricerche, può aggravare problemi ambientali acuti come la perdita di biodiversità e il cambiamento climatico¹³⁵.

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. *Mongabay*. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Accessed May 1, 2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

IMPATTO DELLE MNP SUL CLIMA

Funzioni dell'oceano

L'oceano svolge un ruolo chiave nel mantenimento dell'equilibrio climatico del pianeta, funzionando come un "condizionatore d'aria" naturale. La sua capacità unica di accumulare e rilasciare gradualmente il calore permette di attenuare le variazioni di temperatura sulla Terra. Uno strato d'acqua oceanica spesso appena dieci metri è in grado di assorbire più calore di tutta l'atmosfera terrestre (Fig. 38). Questo riduce le fluttuazioni termiche sia tra il giorno e la notte (Fig. 39), sia tra le stagioni – estate e inverno.

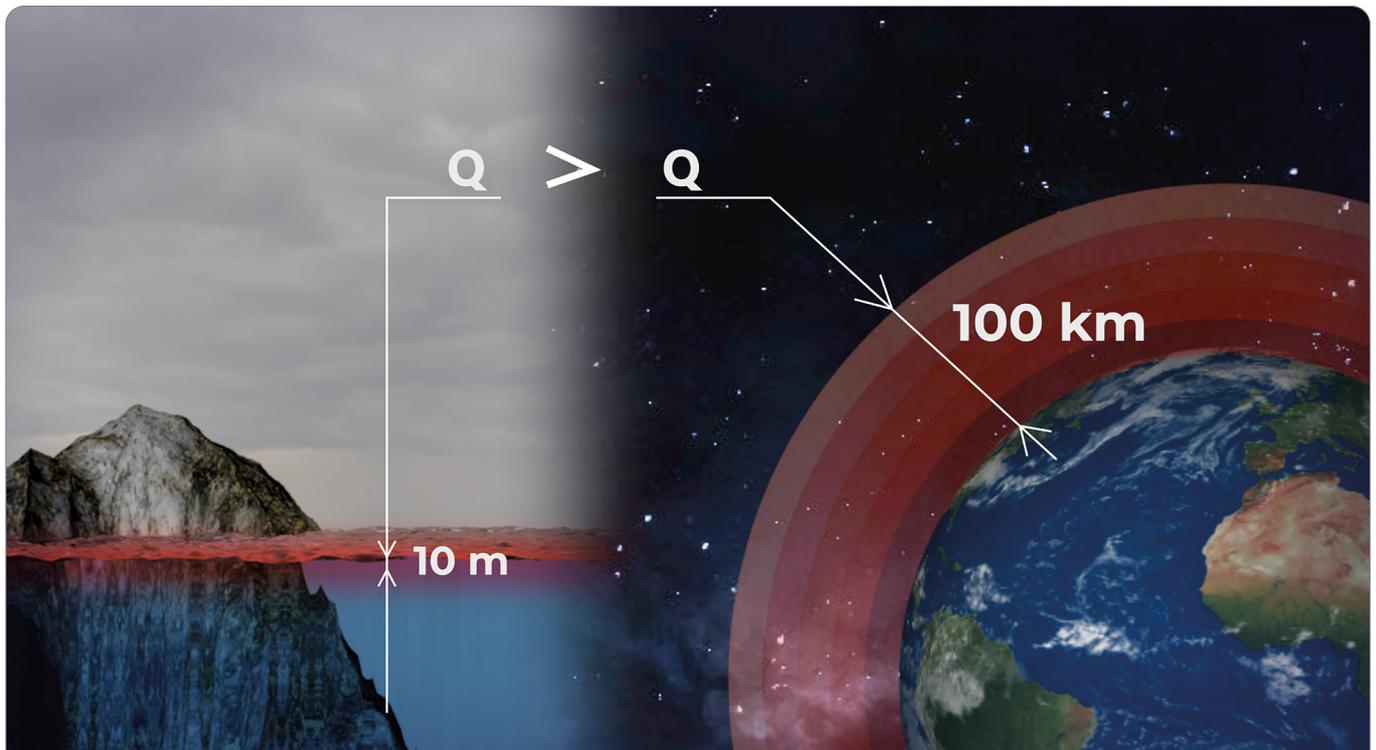


Figura 38: Rappresentazione schematica della capacità termica comparativa dell'oceano e dell'atmosfera: nonostante la massa dell'aria sia inferiore, l'oceano è in grado di accumulare e trattenere decine di volte più calore, svolgendo un ruolo chiave nella regolazione del clima terrestre.

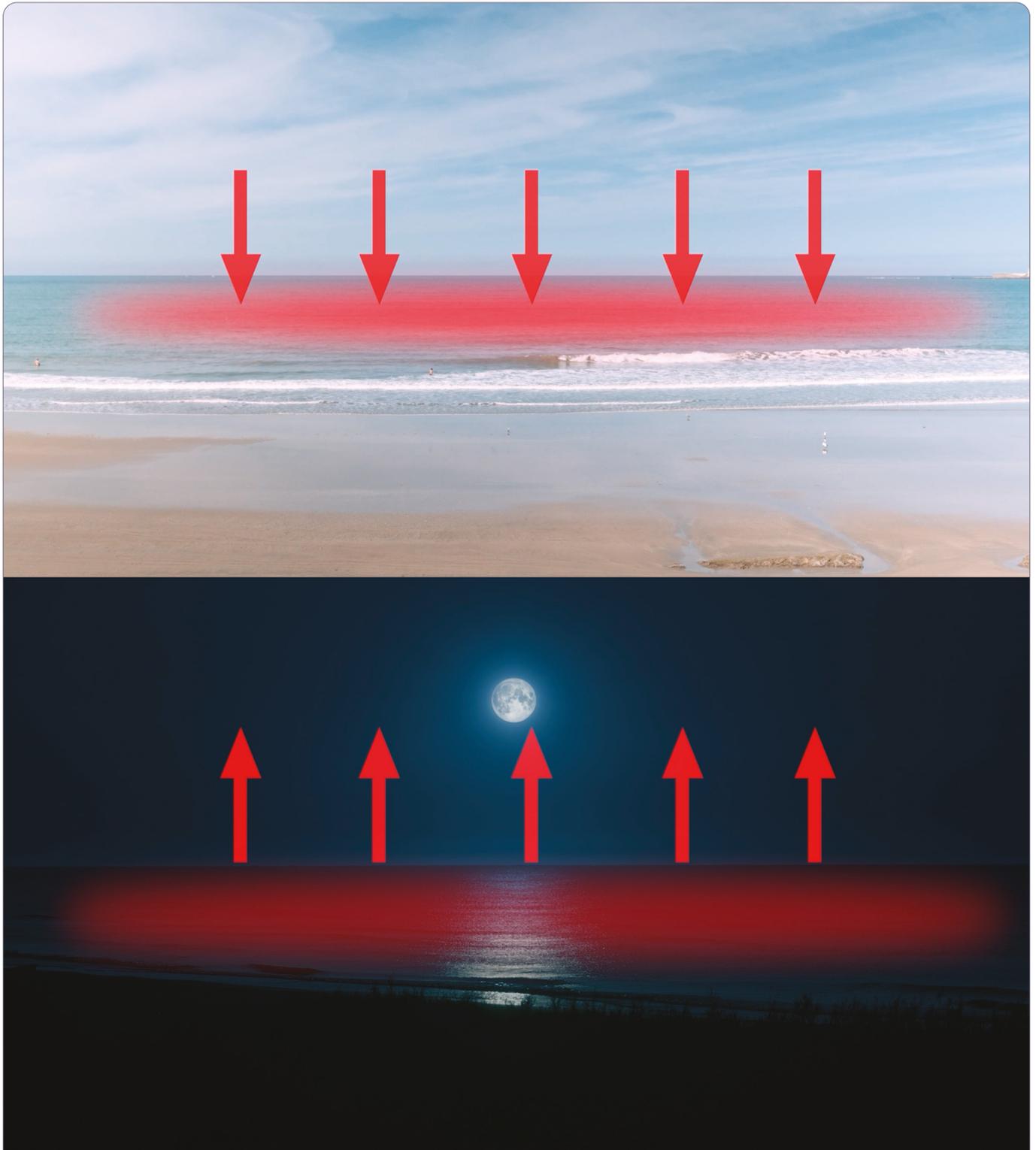
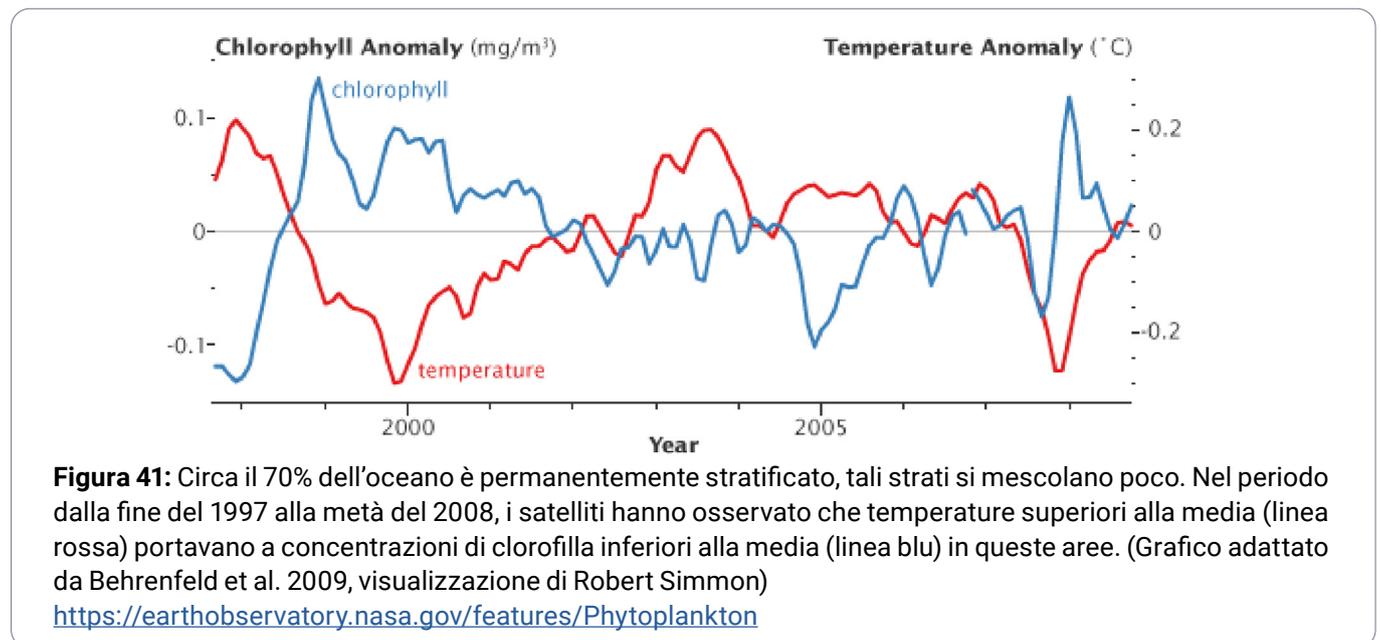


Figura 39: Rappresentazione schematica dello scambio termico giornaliero: l'oceano assorbe calore durante il giorno e lo rilascia durante la notte, attenuando le fluttuazioni della temperatura dell'aria

Le correnti oceaniche trasportano l'acqua calda dai tropici verso le regioni più fredde, come le latitudini settentrionali. Questo aiuta a mitigare il clima nelle zone costiere. Al contrario, le correnti fredde riportano l'acqua raffreddata verso l'equatore. In questo modo, l'oceano regola il clima del pianeta. L'oceano ha un'influenza significativa sui processi atmosferici, svolgendo un ruolo chiave nella formazione delle nuvole e delle precipitazioni. Ogni giorno, una grande quantità d'acqua evapora dalla sua superficie, si condensa in nuvole e ritorna sulla Terra sotto forma di pioggia o neve. Questo processo è fondamentale per il rifornimento d'acqua dolce nei fiumi, laghi e nel suolo.

Le alghe microscopiche nell'oceano, come il fitoplancton (Fig. 40), producono oltre il 50% dell'ossigeno¹³⁶. Molti modelli di chimica e biologia oceanica prevedono che, con il riscaldamento della superficie oceanica in risposta all'aumento dei gas serra nell'atmosfera, la produttività del fitoplancton diminuirà^{137, 138} (Fig. 41).



¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

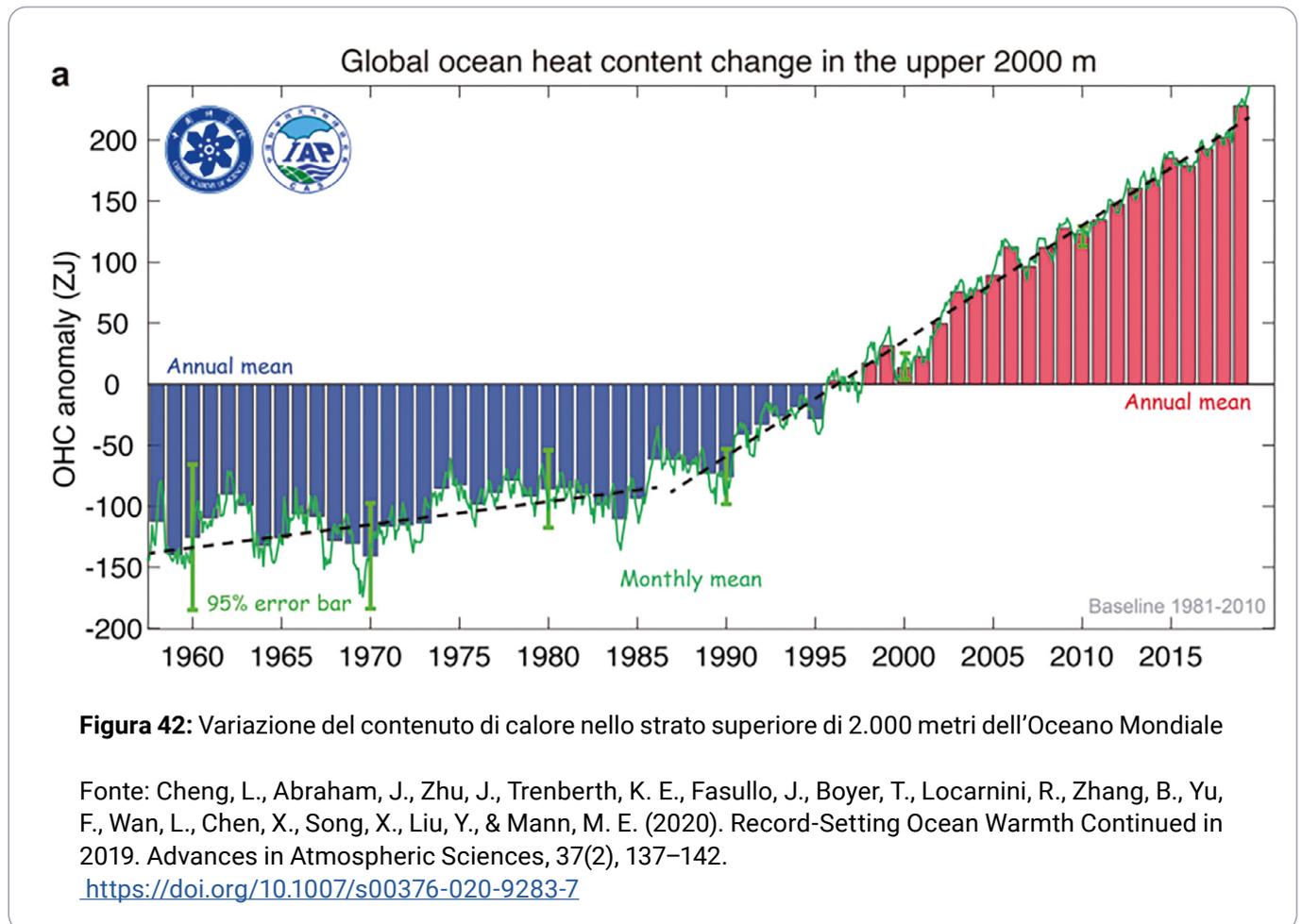
¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Variazione del regime termico dell'oceano

Come riportato nel Rapporto sullo Stato dell'Oceano Mondiale del 2024, la situazione è allarmante: si osserva un riscaldamento oceanico senza precedenti.

Le ricerche mostrano che, tra il 1960 e il 1986, si è registrato un aumento costante della temperatura degli oceani. Tuttavia, negli ultimi decenni, questo processo è accelerato di due volte¹³⁹ (Fig. 42).



Il 2023 è stato l'anno più caldo mai registrato, superando il precedente record stabilito nel 2016. È stato inoltre registrato un record assoluto della temperatura della superficie oceanica¹⁴⁰. Questa tendenza è proseguita: il 2024 ha superato i record del 2023 (Fig. 43) ed è diventato l'anno più caldo dell'intero periodo di osservazione¹⁴¹. In questo periodo, la temperatura della superficie oceanica è rimasta eccezionalmente elevata per 15 mesi consecutivi, sottolineando la persistenza del riscaldamento osservato.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.

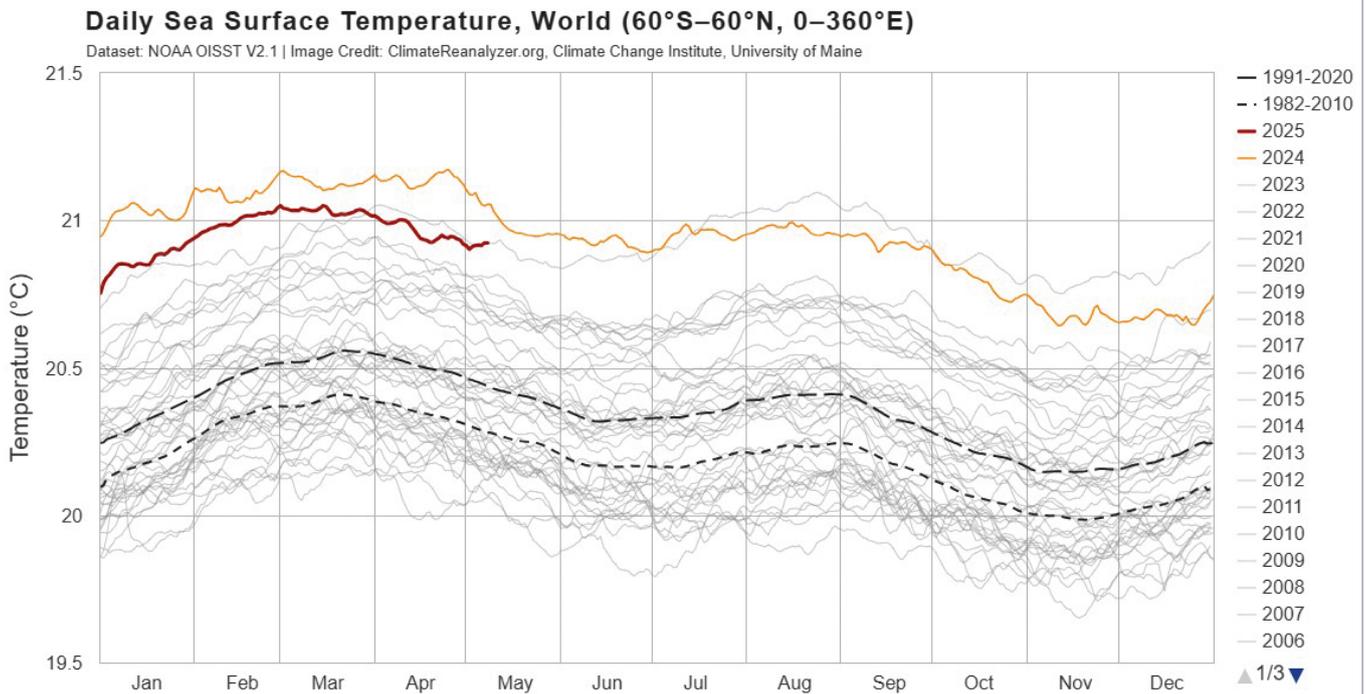


Figura 43: Temperature giornaliere della superficie del mare: rappresentazione grafica delle variazioni della temperatura del livello superficiale dell'oceano, che riflette le oscillazioni stagionali nel corso degli anni.

Fonte: NOAA OISST V2.11

Crediti immagine: Climate [Reanalyzer.org](https://climate-reanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine
[Climate Reanalyzer - Daily Sea Surface Temperature](https://climate-reanalyzer.org)

Per la prima volta nella storia, la temperatura media annuale ha superato di 1,5°C il livello del periodo preindustriale¹⁴² (Fig. 44). Secondo gli esperti, questo valore rappresenta una soglia critica, oltre la quale l'umanità si troverà ad affrontare sconvolgimenti climatici su larga scala¹⁴³.

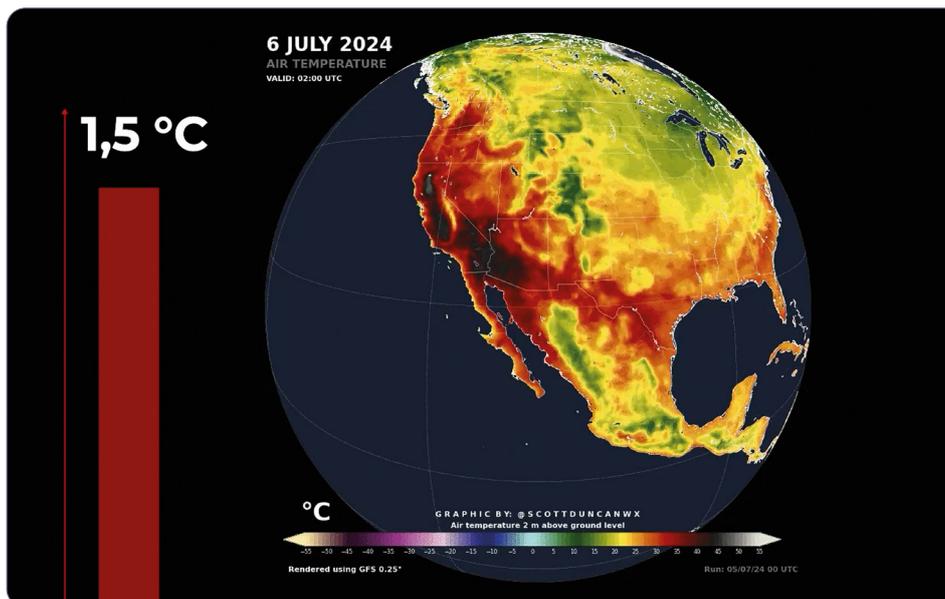


Figura 44: Rappresentazione schematica della soglia climatica: nel 2024, la temperatura media globale annuale ha superato per la prima volta la soglia di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025)

Un tale aumento della temperatura era previsto per la metà del XXI secolo¹⁴⁴, tuttavia questa soglia è già stata superata. Secondo le stime delle Nazioni Unite, se le tendenze attuali continueranno, la temperatura globale potrebbe aumentare di quasi 3°C entro la fine di questo secolo¹⁴⁴.

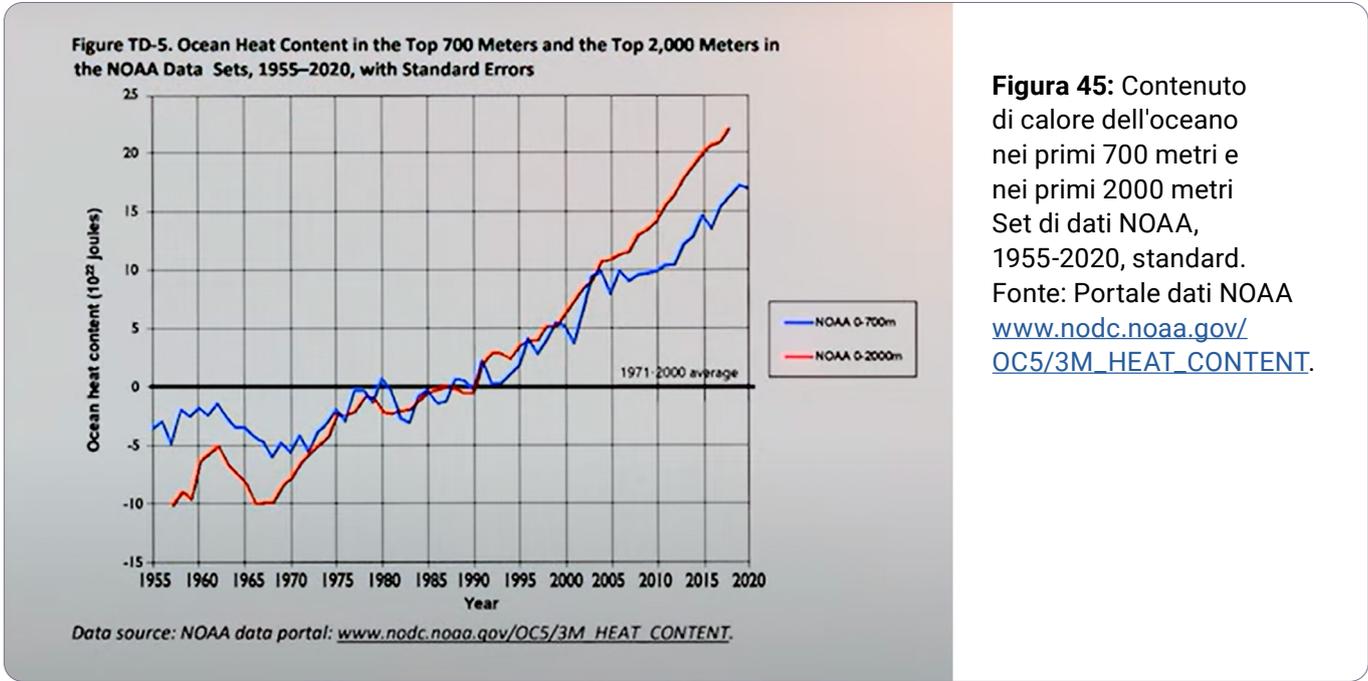


Figura 45: Contenuto di calore dell'oceano nei primi 700 metri e nei primi 2000 metri Set di dati NOAA, 1955-2020, standard. Fonte: Portale dati NOAA www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT.

Figura 46: Questo diagramma mostra le variazioni del contenuto termico nei primi 700 metri dell'oceano mondiale dal 1955 al 2023. Il calore contenuto nell'oceano viene misurato in joule, un'unità di energia, e confrontato con la media del periodo 1971-2000, che è impostata a zero come riferimento. La scelta di un altro periodo di riferimento non cambierà la forma dei dati nel tempo. Le linee sono state calcolate indipendentemente utilizzando metodi diversi da parte di organizzazioni governative di quattro paesi: la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) degli Stati Uniti, il Commonwealth Scientific



and Industrial Research Organisation (CSIRO) dell'Australia, l'Istituto di Fisica Atmosferica della Cina (IAP) e il Meteorological Research Institute dell'agenzia meteorologica giapponese (MRI/JMA).

Fonte: CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024.

<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ocean-heat>

¹⁴⁴ The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Negli ultimi 60 anni, gli oceani a profondità intermedie si sono riscaldati 15 volte più velocemente rispetto ai precedenti 10.000 anni¹⁴⁵ (Figg. 45,46). Ciò dimostra che i processi di riscaldamento globale coinvolgono non solo gli strati superficiali dell'acqua, ma anche le parti più profonde dell'oceano, dove non arrivano nemmeno i raggi solari. Per riscaldare l'acqua a tali profondità è necessaria un'enorme quantità di energia, il che sottolinea la portata del problema. Secondo le stime degli scienziati, affinché l'oceano si riscaldi al ritmo attuale, è necessario un rilascio di energia equivalente all'esplosione di 7 bombe atomiche ogni secondo per un anno intero¹⁴⁶ — dati sconcertanti che sollevano una domanda: da dove proviene tutta questa energia? L'aumento della temperatura dell'acqua comporta inevitabilmente un innalzamento del livello del mare, che minaccia di sommergere intere zone costiere. Negli ultimi due secoli, il livello del mare si è alzato di 21 cm, di cui 10,1 cm¹⁴⁷ solo negli ultimi 30 anni. L'attuale ritmo di crescita è 2,5 volte superiore a quello precedente e la tendenza sembra destinata a continuare. Se la situazione non cambierà, milioni di persone diventeranno rifugiati climatici, costretti ad abbandonare le proprie case e cercare rifugio lontano dalle coste.

“L’innalzamento osservato nel 2024 è stato superiore a quanto ci aspettassimo”, ha dichiarato Josh Willis, ricercatore del livello del mare presso il *Jet Propulsion Laboratory* della NASA in California del Sud. *“Ogni anno è leggermente diverso, ma è evidente che l’oceano continua a salire, e la velocità dell’innalzamento è sempre più rapida”*¹⁴⁸ (Fig. 47).

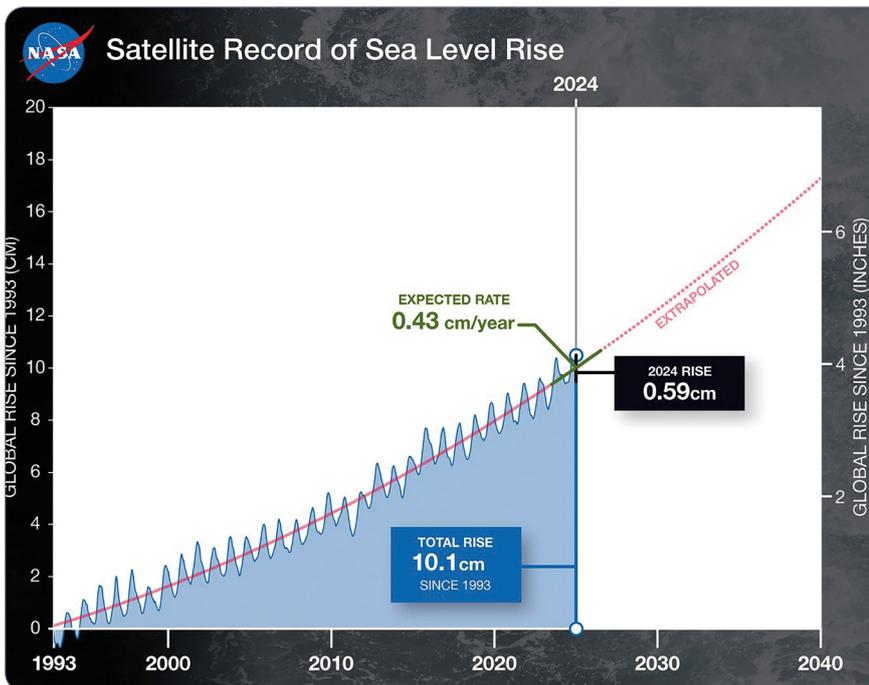


Figura 47: Questo grafico mostra il livello medio globale del mare (in blu) dal 1993, misurato da una serie di cinque satelliti. La linea rossa continua indica la traiettoria di questo innalzamento, che è più che raddoppiata negli ultimi tre decenni. La linea rossa tratteggiata rappresenta la previsione dell'ulteriore innalzamento futuro del livello del mare. Crediti: NASA/ JPL-Caltech

Fonte: NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

Il riscaldamento degli oceani contribuisce anche a eventi meteorologici estremi sempre più frequenti e intensi, come inondazioni, tifoni e precipitazioni anomale. Questi cambiamenti minacciano gli ecosistemi del pianeta e la vita di miliardi di persone, diventando ogni anno sempre più evidenti.

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴⁶Взят прирост энергии океана в 1022 джоулей в 2022 году по сравнению с 2021 годом (Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>) и энергия ядерного взрыва 6.3×10^{13} джоулей.

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

Perché l'oceano si riscalda? Ipotesi

I principali fattori comunemente riconosciuti che contribuiscono al riscaldamento dell'oceano sono i gas serra, come la CO₂, che trattengono il calore nell'atmosfera e aumentano la temperatura degli strati superficiali delle acque oceaniche. Tuttavia, esistono anche altri fattori che possono influenzare significativamente questo processo. Un ulteriore possibile fattore di riscaldamento degli oceani sarà analizzato nel capitolo intitolato "Il Fattore X. Influenza delle micro- e nanoplastiche sulla dinamica del ciclo dei cataclismi naturali".

Dalla seconda metà del XX secolo si osserva un netto aumento della quantità di plastica negli oceani, coincidente con il periodo di rapido sviluppo industriale e produzione di massa di oggetti in plastica (Fig. 48). Dal 1960 al 2019 si rileva anche una variazione della temperatura oceanica. Il grafico (Fig. 49) mostra un aumento parallelo della temperatura media della superficie oceanica, anch'esso a partire dalla metà del XX secolo.

Confrontando i due grafici (Figg. 48, 49), si può notare una correlazione tra l'aumento della concentrazione di plastica negli oceani e il riscaldamento delle acque. Ciò suggerisce che l'inquinamento da plastica negli oceani potrebbe essere uno dei fattori significativi, ma ancora insufficientemente studiati, che contribuiscono al riscaldamento delle acque oceaniche.

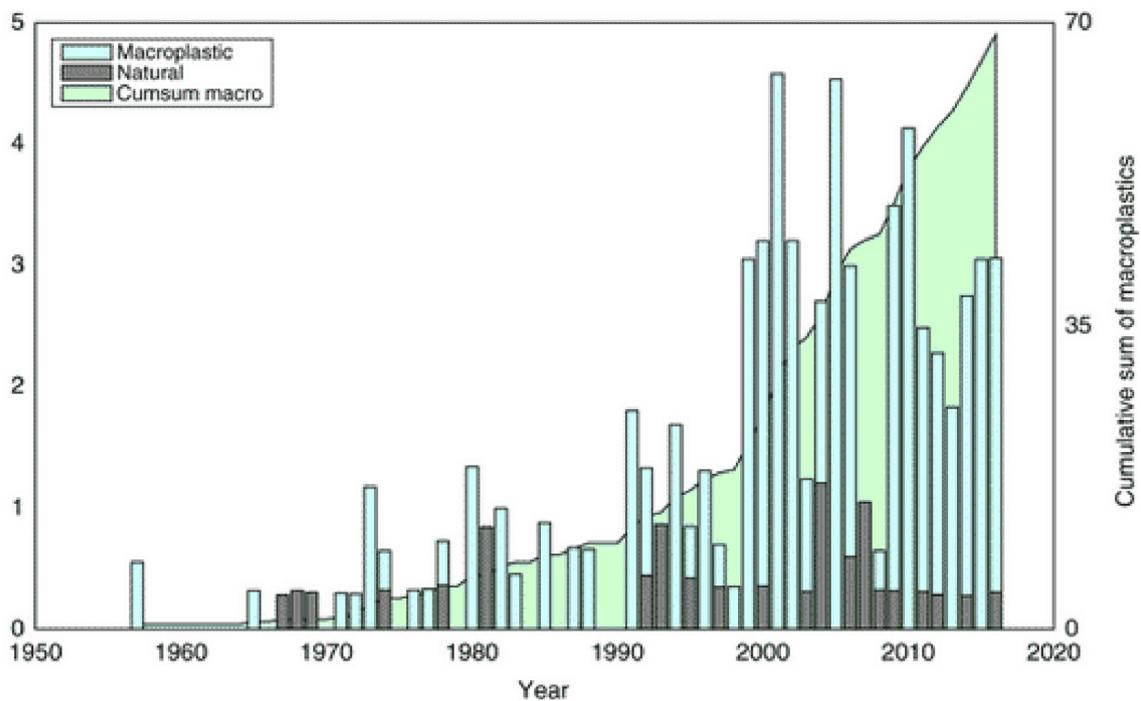


Figura 48: Grafico che mostra l'aumento della concentrazione di plastica negli oceani negli ultimi decenni. Somma cumulativa di macroplastica presente nell'oceano e valori annuali.

Fonte: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

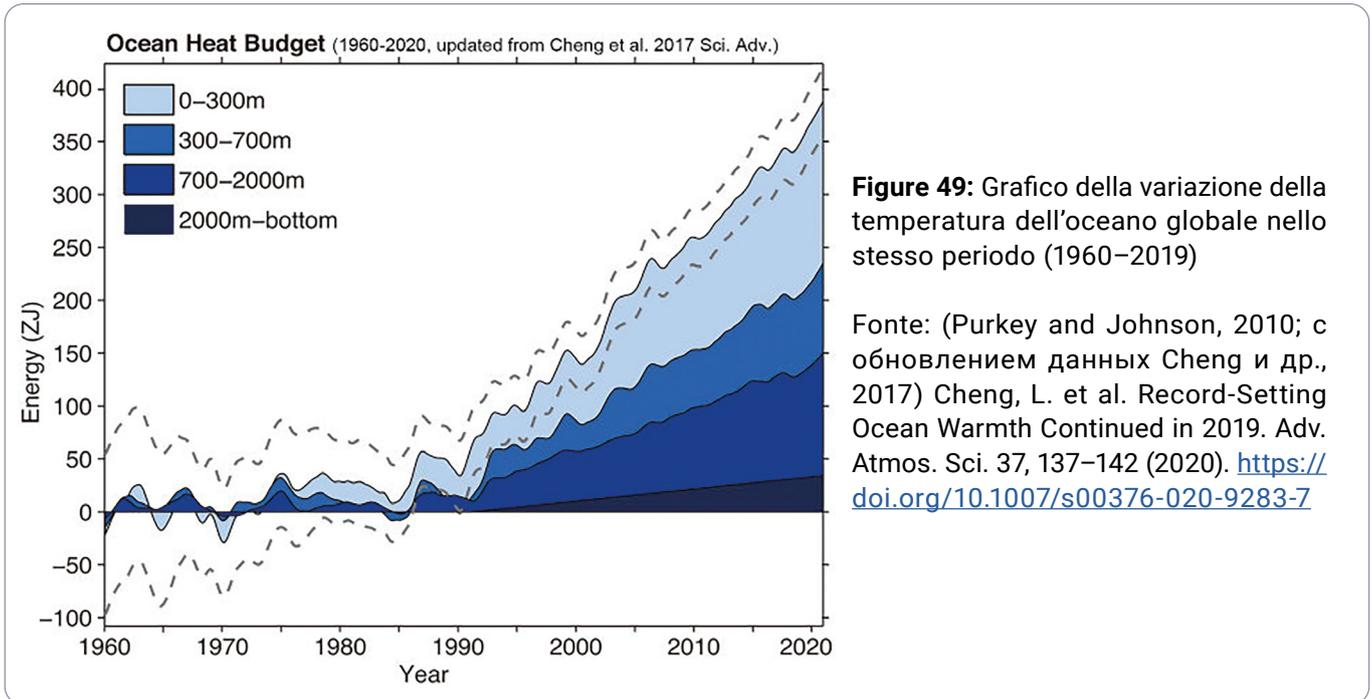


Figure 49: Grafico della variazione della temperatura dell'oceano globale nello stesso periodo (1960–2019)

Fonte: (Purkey and Johnson, 2010; с обновлением данных Cheng и др., 2017) Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Per approfondire questo argomento, è fondamentale comprendere se la plastica possa influenzare le proprietà fisiche dell'acqua oceanica, come la conducibilità termica e la capacità termica. Tali cambiamenti potrebbero contribuire all'aumento della temperatura degli oceani? Per rispondere a questa domanda, esamineremo più da vicino le caratteristiche fondamentali dell'acqua e il modo in cui essa interagisce con gli inquinanti.

Caratteristiche principali dell'acqua

La molecola dell'acqua ha una forma a V simmetrica, in cui i due atomi di idrogeno sono disposti da un lato rispetto all'atomo di ossigeno, che è più grande (Fig. 50).

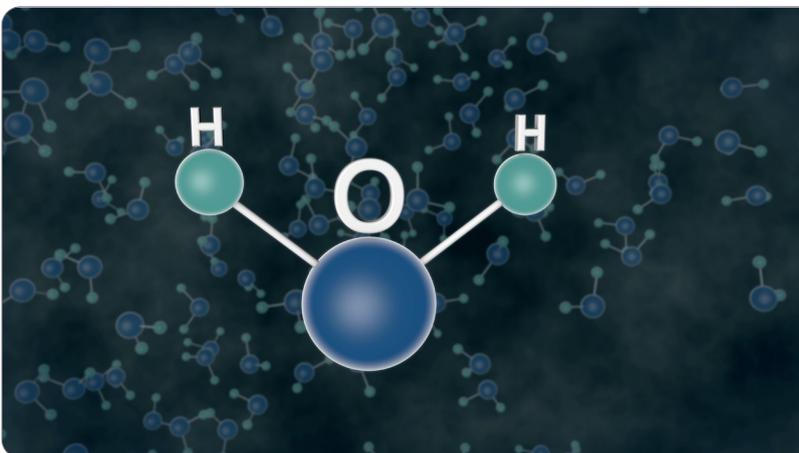


Figura 50: Rappresentazione schematica della molecola d'acqua: due atomi di idrogeno (H) sono legati a un atomo di ossigeno (O) con un angolo di circa 104,5°, formando un dipolo con cariche positiva e negativa

Questa struttura è diversa da quella delle molecole lineari, come ad esempio la CO_2 , in cui tutti gli atomi sono disposti in linea retta. Questa forma della molecola d'acqua la rende unica e fondamentale per numerosi processi sulla Terra. Le particolari caratteristiche delle molecole d'acqua permettono all'acqua di rimanere liquida a temperature che normalmente causerebbero la trasformazione in gas di altre molecole triatomiche (Fig. 51).

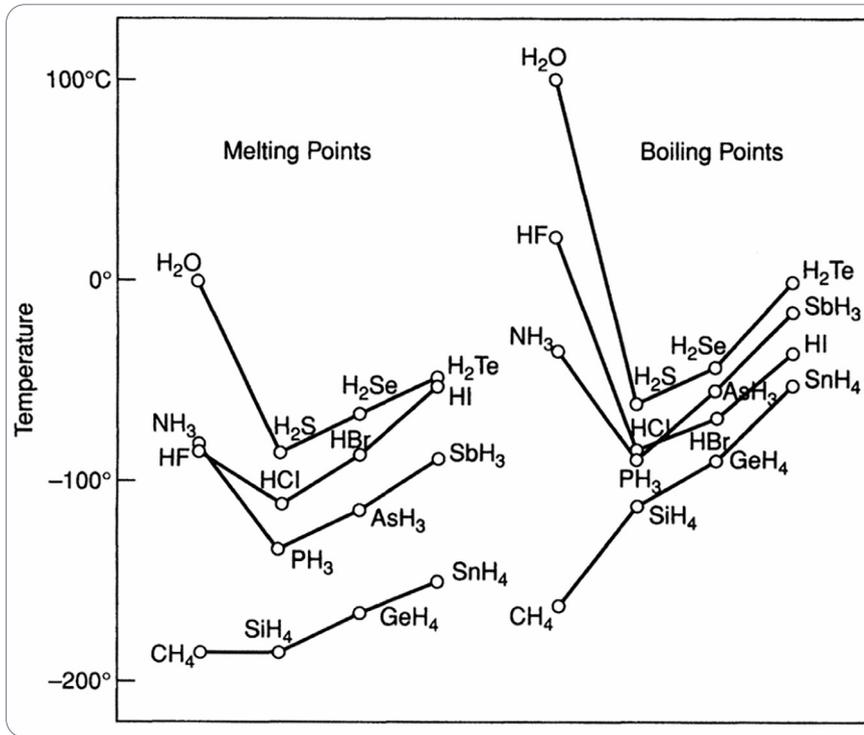


Figura 51: Temperature di fusione (a sinistra) e di ebollizione (a destra) delle sequenze isoelettroniche dei composti idruri. Le temperature dell'acqua sono significativamente più alte rispetto a quelle ottenute per estrapolazione dagli altri composti analoghi.

Fonte: L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd ed., Chapter 12-2, Cornell Univ. Press, 1960.

Ciò avviene grazie ai legami a idrogeno¹⁴⁹ che uniscono le molecole d'acqua, formando una struttura stabile e ordinata.

La maggior parte dei legami a idrogeno sono attrazioni deboli, con una forza pari a circa un decimo di quella di un legame covalente normale. Tuttavia, essi sono estremamente importanti. Senza di essi, tutte le strutture in legno crollerebbero, il cemento si sbriciolerebbe, gli oceani evaporerebbero e tutta la vita si disgregherebbe in materia inanimata¹⁵⁰.

Per questo motivo, l'acqua ha la capacità di formare cluster, il che spiega molte delle sue proprietà anomale (Figg. 52, 53). I cluster d'acqua possono coinvolgere oltre il 95% della rete di legami a idrogeno, e alcuni cluster possono comprendere migliaia di molecole, estendendosi oltre i 3,0 nanometri¹⁵¹.

¹⁴⁹ Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. *Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods*. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

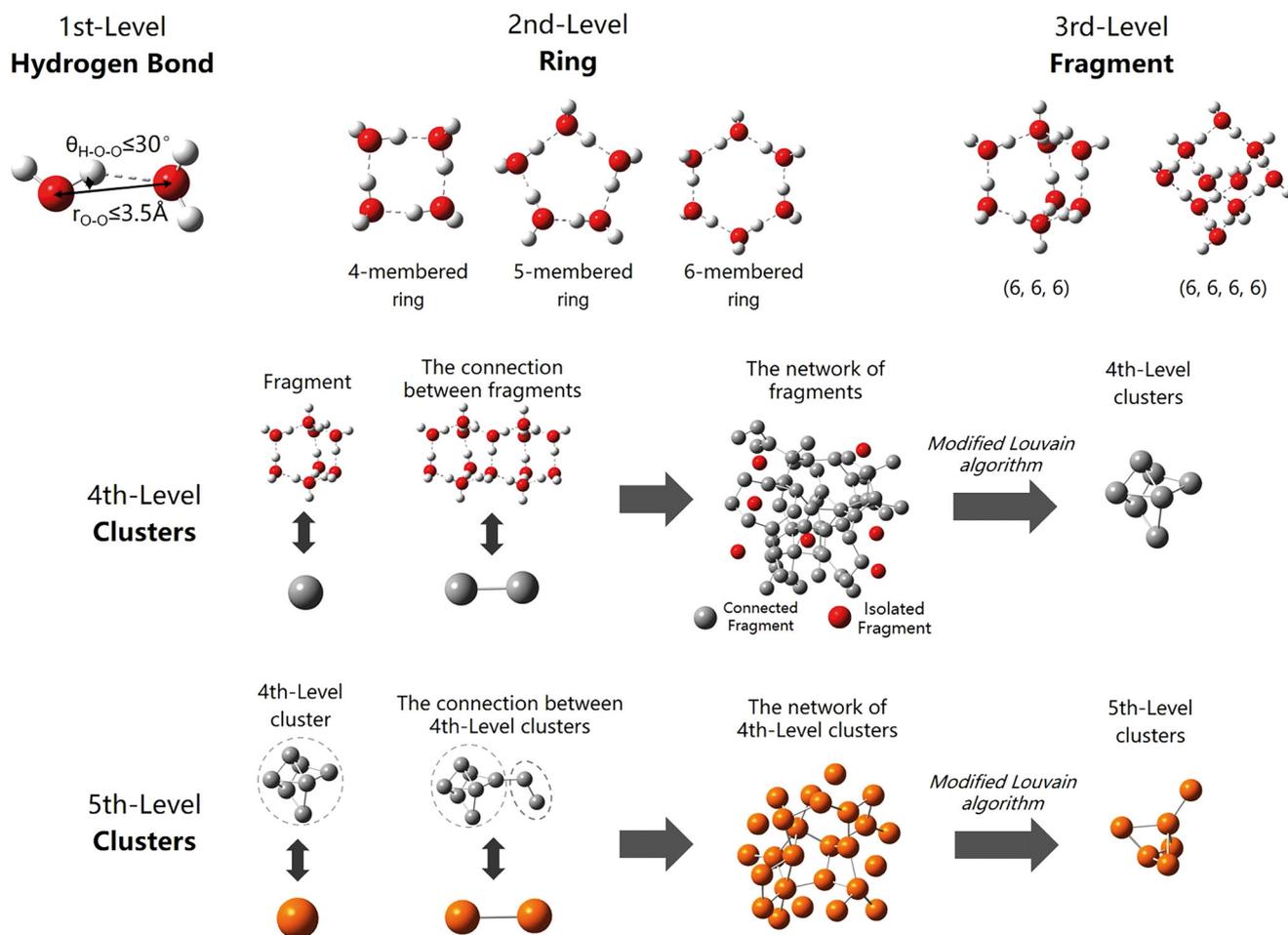


Figura 52: Schemi del metodo di clustering gerarchico proposto in questo studio. Legami a idrogeno, anelli e frammenti sono considerati come strutture di 1°, 2° e 3° livello, che da una prospettiva chimica rappresentano modelli a sfere e bastoncini, e le sfere rosse e bianche indicano rispettivamente gli atomi di ossigeno e idrogeno. Le sfere piene e punteggiate indicano rispettivamente i legami covalenti O–H e i legami a idrogeno. I cluster di 4° e 5° livello sono illustrati da una prospettiva topologica. Le sfere rappresentano la struttura degli ultimi livelli. Si noti che le strutture in figura sono solo una selezione tra quelle considerate dall'algorithmo di clustering.

Fonte: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

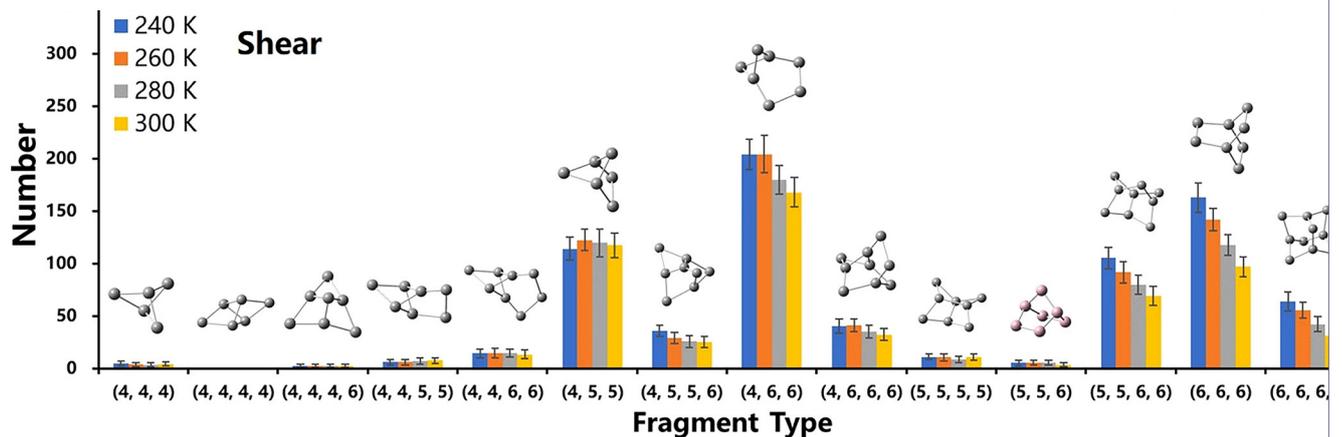


Figura 53: Distribuzione delle strutture gerarchiche di 1°, 2° e 3° livello nella rete in diversi casi. (a) Distribuzione dei legami a idrogeno (strutture di 1° livello) a diverse temperature. (b) Distribuzione degli anelli (strutture di 2° livello) a diverse temperature. (c) Distribuzione dei frammenti (strutture di 3° livello) a diverse temperature. Si noti che (4, 4, 4) rappresenta un simbolo di frammento che include tre anelli a 4 membri.

Fonte: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Capacità termica, conducibilità termica e densità dell'acqua e il loro significato funzionale

1. Elevata capacità termica dell'acqua

L'acqua possiede la capacità termica specifica più alta tra i liquidi e i solidi in condizioni normali, superata solo da alcuni gas come l'idrogeno¹⁵². Ciò significa che è in grado di assorbire, trattenere e trasferire grandi quantità di energia termica con una variazione relativamente piccola della propria temperatura. La capacità termica dell'acqua è definita come la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di 1 grammo d'acqua di 1 grado Celsius, e corrisponde a circa 4,18 J/(g°C) in condizioni standard. Questa proprietà è uno dei fattori chiave nella regolazione del clima: l'acqua degli oceani immagazzina calore durante il giorno e lo rilascia lentamente durante la notte.

In estate l'oceano assorbe il calore in eccesso, mentre in inverno lo rilascia gradualmente, agendo come un enorme termostato e mitigando le escursioni termiche del pianeta.

2. Conducibilità termica dell'acqua

L'acqua ha una conducibilità termica relativamente bassa rispetto ai metalli, ma superiore a quella di molti altri liquidi. La conducibilità termica rappresenta la capacità di una sostanza di trasmettere calore da una parte all'altra in assenza di movimento interno della sostanza. Per l'acqua, essa è di circa 0,6 W/(m·K) in condizioni standard (25 °C), il che la rende un conduttore di calore efficace nei processi naturali, come la distribuzione del calore negli oceani e in altri corpi idrici.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).

Osservazioni mostrano che la conducibilità termica dell'acqua aumenta con la temperatura fino a un certo limite¹⁵². Inoltre, questo valore può variare in presenza di impurità o sostanze disciolte^{153,154}. Queste caratteristiche influenzano la distribuzione del calore nell'acqua, aspetto cruciale per comprendere le interazioni tra oceano e atmosfera.

3. Comportamento anomalo della densità dell'acqua

A differenza della maggior parte delle sostanze, la densità dell'acqua si comporta in modo anomalo al variare della temperatura. Quando si raffredda fino a 4 °C, la sua densità aumenta, ma con un ulteriore raffreddamento (da 4 °C a 0 °C), la densità inizia a diminuire (Fig. 54).

Quando l'acqua si ghiaccia, la sua densità si riduce dell'8–9%, motivo per cui il ghiaccio non affonda, ma rimane sulla superficie.

Questo fenomeno è di importanza vitale per la vita negli ambienti acquatici, poiché il ghiaccio protegge l'acqua sottostante e gli organismi viventi dal congelamento completo, impedendo che l'acqua geli fino al fondo.

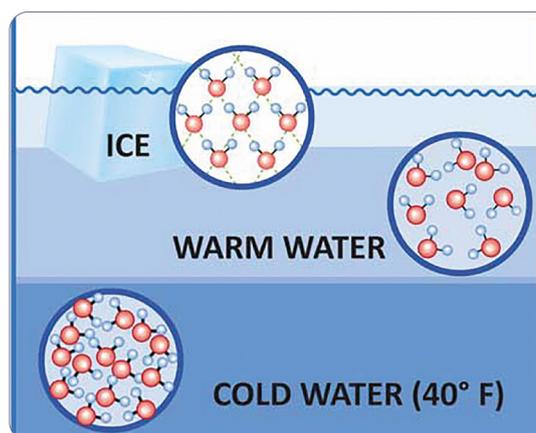


Figura 54: Rappresentazione schematica della variazione della densità dell'acqua durante il raffreddamento: man mano che l'acqua si raffredda, le molecole d'acqua si avvicinano, aumentando la densità, che raggiunge il massimo a 4°C. Con il continuo raffreddamento, i legami a idrogeno iniziano a prevalere, le molecole d'acqua si organizzano in una struttura cristallina di ghiaccio, il che porta all'espansione dell'acqua e alla riduzione della densità del ghiaccio, che diventa circa il 10% meno denso rispetto all'acqua liquida.

Fonte: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Influenza delle proprietà dell'acqua sul clima e sugli ecosistemi

Le variazioni della temperatura dell'acqua possono influenzare significativamente il bilancio termico dell'oceano globale e la sua capacità di accumulare e trasmettere calore. Questo, a sua volta, avrà un impatto sul sistema climatico della Terra.

Pertanto, le proprietà fisico-chimiche dell'acqua, in particolare la sua capacità e conducibilità termica, svolgono un ruolo fondamentale nel mantenimento dell'equilibrio ecologico del pianeta e nella regolazione dei processi climatici (Fig. 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

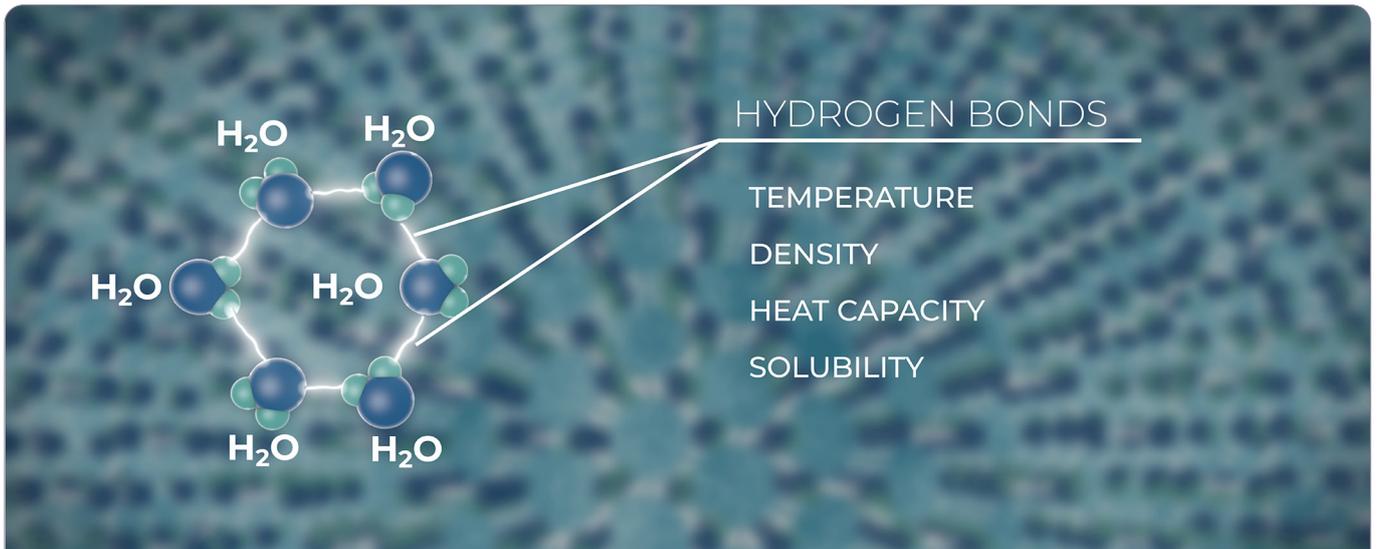


Figura 55: Rappresentazione schematica dei legami a idrogeno nelle molecole d'acqua e del loro impatto sulle proprietà chiave dell'acqua: i legami a idrogeno contribuiscono all'elevata capacità termica dell'acqua, consentendole di assorbire e trattenere efficacemente il calore. Questi legami determinano anche la densità dell'acqua, massima a 4 °C, nonché la sua capacità di sciogliere sostanze polari e ioniche, rendendo l'acqua un solvente universale.

Ruolo delle MNP nell'alterazione delle proprietà fisiche delle acque marine

La plastica, essendo un prodotto dell'industria petrolchimica, non si decompone in natura, ma si frammenta in particelle sempre più piccole, come le micro- e nanoplastiche¹⁵⁵. Queste particelle, in particolare le nanoplastiche, possono influenzare in modo significativo le proprietà fisico-chimiche dell'acqua, con potenziali ripercussioni sugli ecosistemi e sui processi climatici. Le nanoplastiche sono particelle di dimensioni nanometriche, più piccole di un virus (Fig. 56).

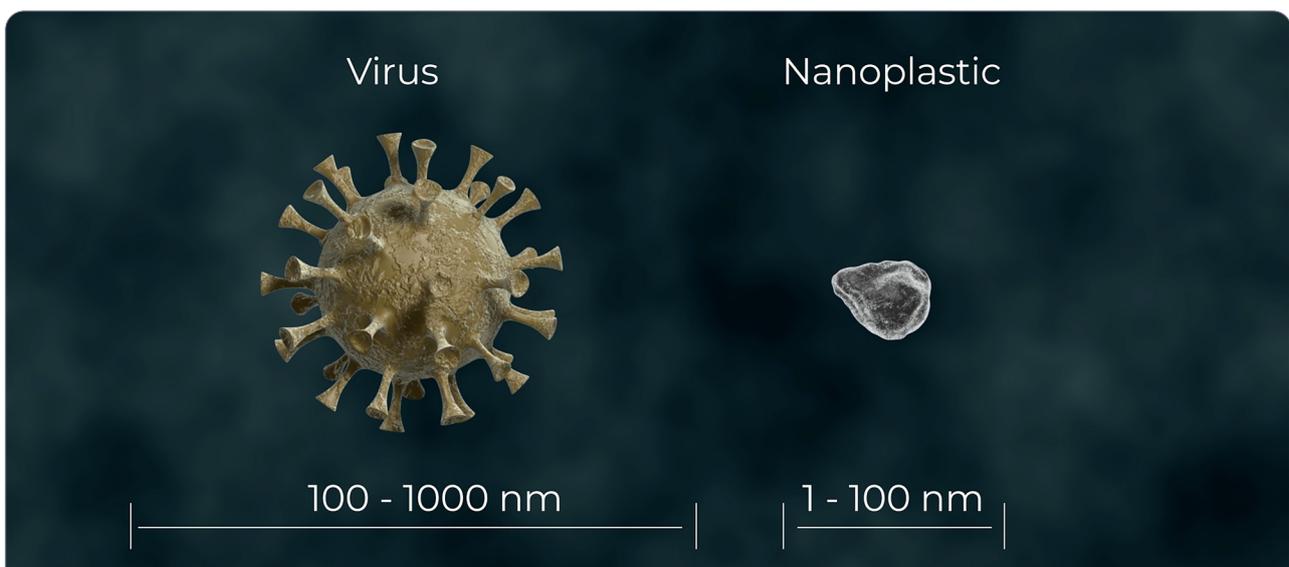


Figura 56: Confronto schematico delle dimensioni di un virus e delle particelle di nanoplastiche

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023).
<https://doi.org/10.3390/su151713252>

Ad esempio, la nanoplastica derivata dal nylon (poliammide), che contiene azoto e ossigeno, è in grado di formare legami a idrogeno con le molecole d'acqua¹⁵⁶. Quando le particelle di nanoplastica contaminano l'acqua, ne disturbano la struttura ordinata basata sui legami a idrogeno tra le sue stesse molecole, alterandone potenzialmente le proprietà fisico-chimiche (Fig. 57).

In particolare, le molecole d'acqua perdono mobilità, riducendo la loro capacità di partecipare efficacemente ai processi di scambio termico. Inoltre, nelle soluzioni acquose contenenti diverse sostanze, le particelle di nanoplastica possono acquisire una carica elettrica¹⁵⁷.

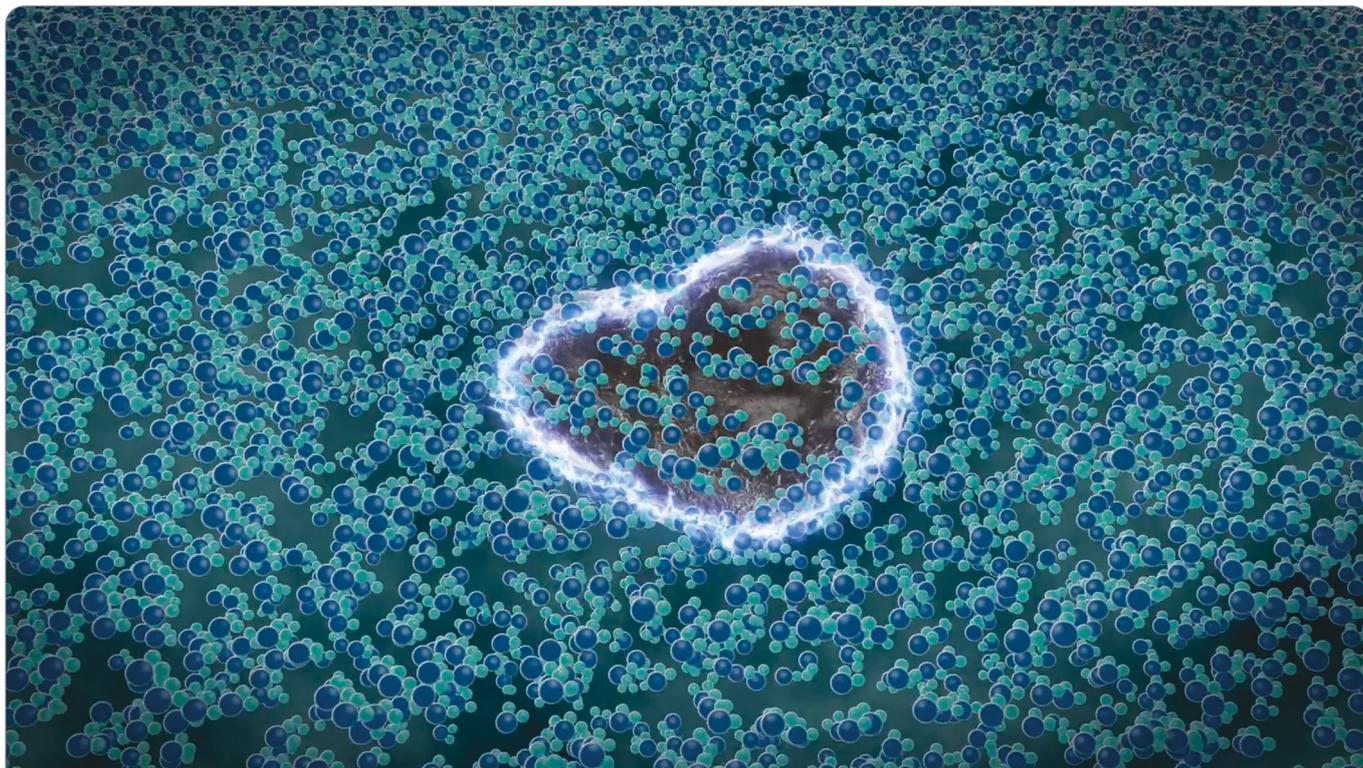


Figura 57: Rappresentazione schematica delle nanoparticelle di plastica cariche nell'acqua: quando esposta a condizioni instabili dell'acqua, come la presenza di impurità organiche o sintetiche, variazioni di pH, temperatura o salinità, la superficie delle nanoplastiche diventa potenzialmente attiva e in grado di generare cariche elettriche nell'ambiente acquatico.

Fonte: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Ciò avviene a causa di modificazioni chimiche sulla loro superficie, come l'ossidazione, nonché dell'adsorbimento di ioni, come sodio (Na^+) e cloro (Cl^-), presenti nell'acqua marina. Le nanoparticelle di plastica cariche, circondate da ioni, attraggono le molecole d'acqua e formano intorno a sé un guscio di idratazione¹⁵⁸ (Fig. 58).

¹⁵⁶Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

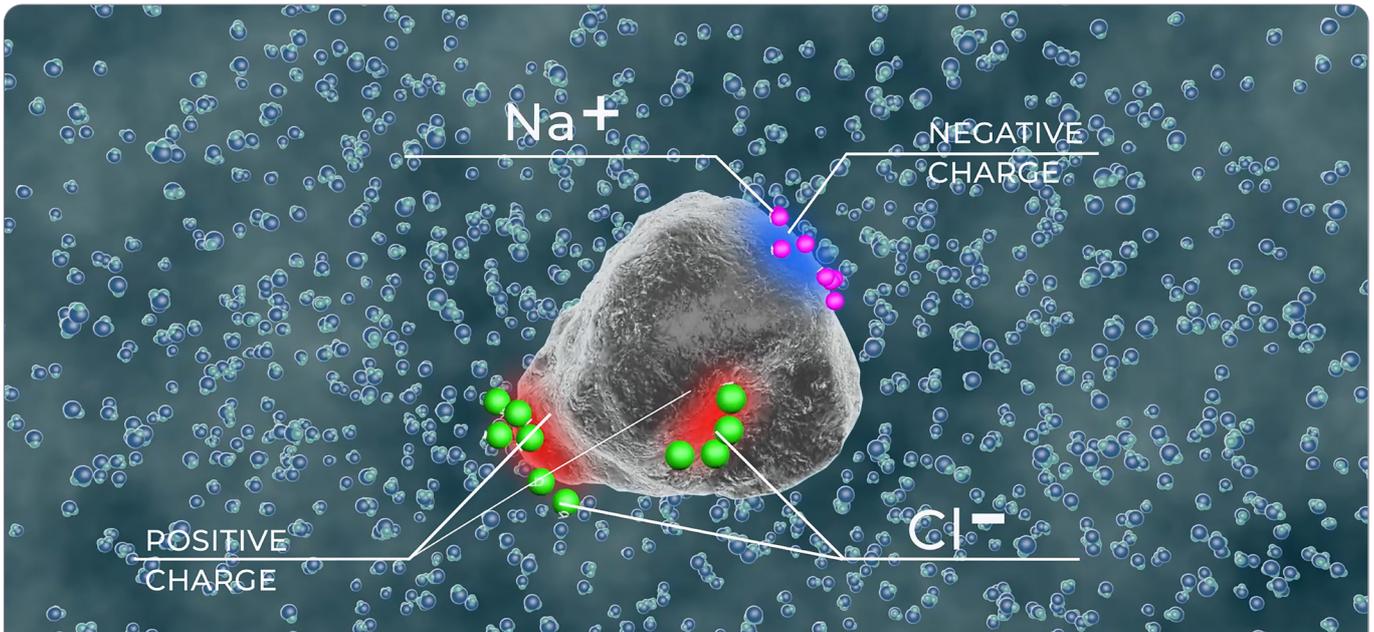


Figura 58: Rappresentazione schematica del processo di formazione di un guscio idratato attorno alle nanoparticelle di plastica cariche: in questo processo, le nanoparticelle, essendo cariche, attraggono ioni, il che favorisce la formazione di molecole d'acqua attorno a esse, creando un guscio protettivo idratato. Fonte: Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

I ricercatori della Scuola Politecnica Federale di Losanna hanno deciso di scoprire quanto sia grande il guscio di idratazione intorno agli ioni, ovvero quante molecole d'acqua reagiscono con un singolo ione. È emerso che un singolo ione può influenzare circa un milione di molecole d'acqua circostanti. Questo effetto si amplifica se la particella ha una carica superficiale elevata e una forte concentrazione di ioni adsorbiti. Di conseguenza, una sola particella di nanoplastica può modificare le proprietà di milioni di molecole d'acqua¹⁵⁸ (Fig. 59). Le molecole legate nel guscio di idratazione diventano meno mobili¹⁵⁹, il che porta a una riduzione della capacità termica complessiva dell'acqua^{160, 161}.

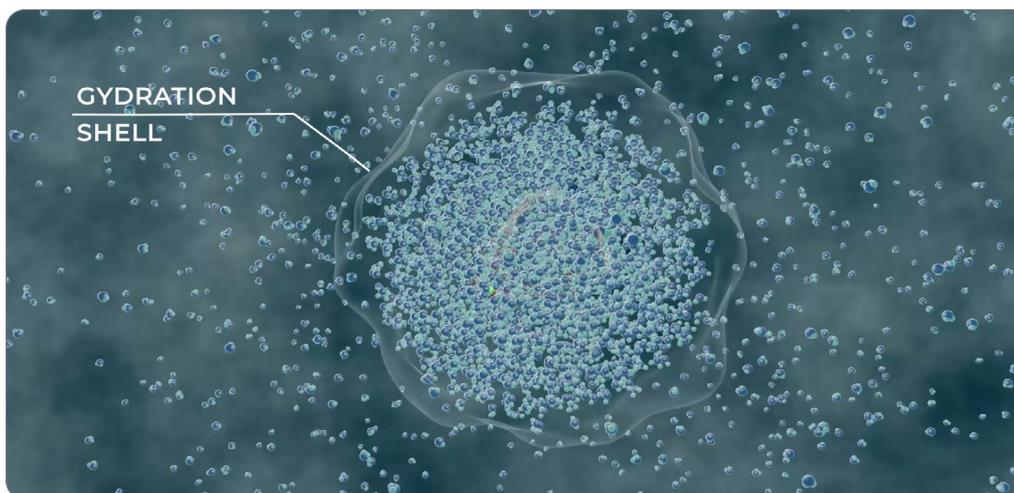


Figura 59: Rappresentazione schematica della guaina idratata attorno a una particella di nanoplastica

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

La rottura della struttura dei legami a idrogeno porta anche a una riduzione della conducibilità termica¹⁶². Di conseguenza, l'acqua nelle vicinanze delle particelle di nanoplastica può rimanere riscaldata, poiché perde la capacità di trasferire efficacemente il calore.

Zone di concentrazione di micro- e nanoplastica nell'oceano

Micro- e nanoplastiche si possono diffondere in tutto l'oceano grazie alle correnti marine, mentre le particelle più dense o contaminate tendono a depositarsi sul fondale marino. Inoltre, si osserva un accumulo significativo di nanoplastica nelle zone del termoclino – lo strato di transizione tra le acque superficiali calde e gli strati profondi più freddi¹⁶³ (Fig. 60).

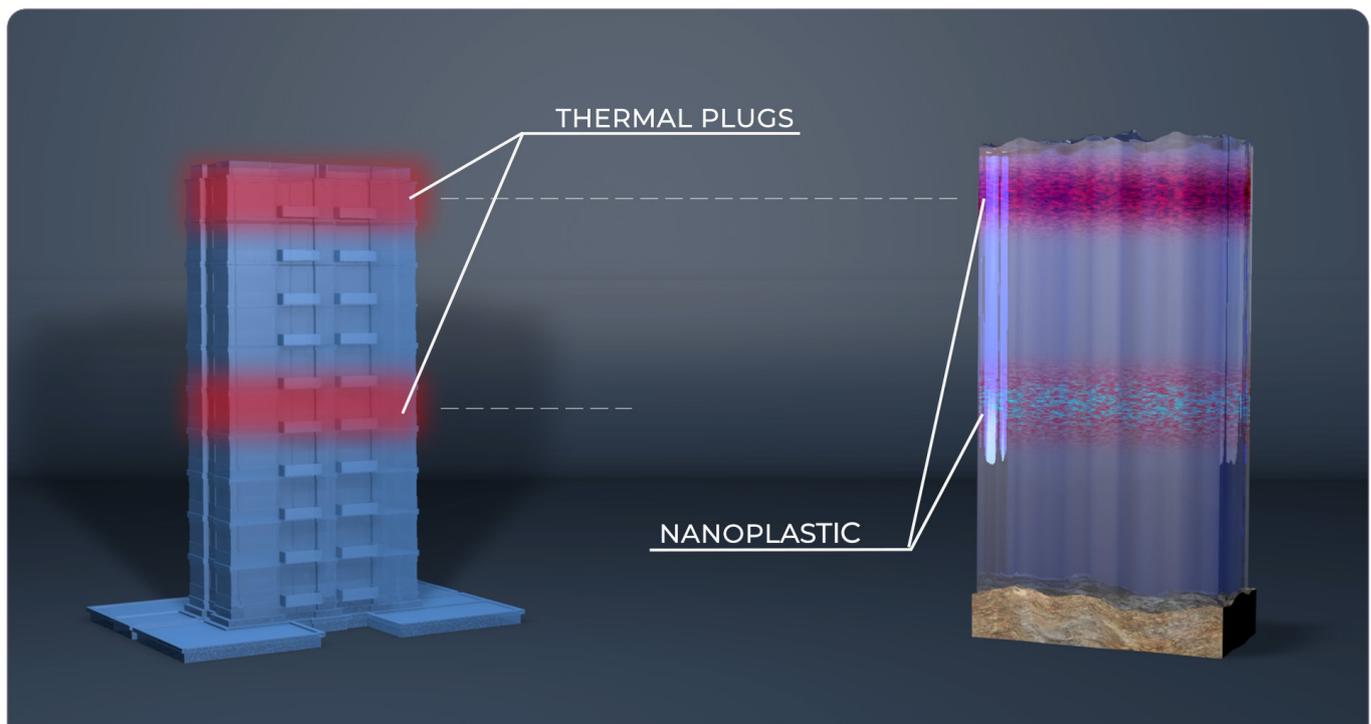


Figura 60: L'immagine mostra un confronto figurativo tra le zone di concentrazione di micro- e nanoplastiche nell'oceano e un edificio a più piani con "blocchi termici" al 5° e al 10° piano. Questi blocchi ostacolano il normale scambio di calore, causando un accumulo di calore su quei livelli. Una termocamera mostrerebbe che la temperatura all'interno dell'edificio è significativamente più alta rispetto a un edificio simile ma senza blocchi. Allo stesso modo, le nanoplastiche nell'acqua alterano i meccanismi naturali di scambio termico, creando "blocchi termici" nell'oceano.

L'aumento della concentrazione di nanoplastiche negli oceani può causare cambiamenti nell'equilibrio termico globale. Questo può contribuire al riscaldamento degli oceani, con conseguenti alterazioni climatiche. È importante sottolineare che anche una quantità minima di nanoplastica può avere un impatto significativo sugli ecosistemi. L'innalzamento della temperatura della superficie oceanica accelera la frammentazione dei rifiuti di plastica in micro- e nanoplastiche (Fig. 61). Di conseguenza, cresce il numero di queste particelle, che insieme al vapore acqueo si diffondono nell'atmosfera. La presenza di micro- e nanoplastiche nell'atmosfera contribuisce a un ulteriore riscaldamento, che a sua volta accentua il riscaldamento oceanico. Si crea così un circolo vizioso, in cui i processi si rafforzano reciprocamente.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

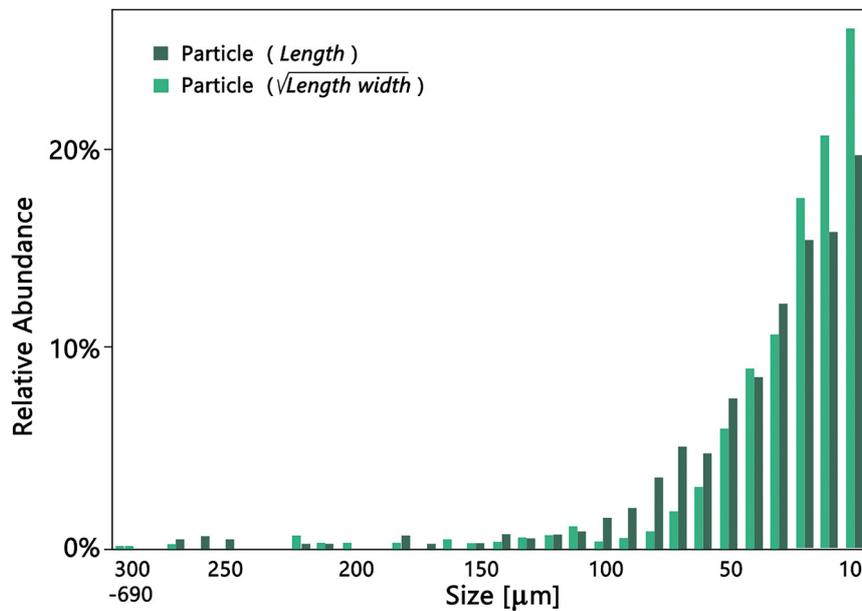


Figura 61: Distribuzione relativa delle particelle di microplastica per dimensioni in tutte le stazioni analizzate (np = 543). Le immagini mostrano le particelle di microplastica più piccole (a sinistra) e più grandi (a destra) trovate e confermate tramite spettroscopia Raman.

Fonte: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Connessione tra carica elettrostatica delle MNP e fenomeni atmosferici

Micro- e nanoplastiche entrano nell'atmosfera attraverso diverse vie. Il vapore acqueo che evapora dalla superficie degli oceani e di altri bacini idrici può trasportare microparticelle nell'aria¹⁶⁴. Sui continenti, le principali fonti di plastica atmosferica sono le fabbriche, gli inceneritori e le discariche. Inoltre, la plastica può essere sollevata nell'atmosfera dall'essiccamento e dalla dispersione eolica di fertilizzanti agricoli e pacciamatura in plastica. Anche l'attrito degli pneumatici delle automobili contribuisce in modo significativo al rilascio di microplastiche. Queste e molte altre fonti alimentano l'inquinamento atmosferico.

Questi processi favoriscono l'accumulo e la diffusione delle microplastiche nell'aria, rappresentando gravi minacce ambientali e climatiche. Una volta nell'atmosfera, le particelle di micro- e nanoplastiche possono agire come nuclei di condensazione per il vapore acqueo. Più numerosi sono questi nuclei, più rapidamente il vapore si condensa in gocce d'acqua. Microplastiche sospese nell'aria sono state rilevate in campioni di acqua delle nuvole raccolti sulle cime montuose in Giappone¹⁶⁵ (Fig. 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

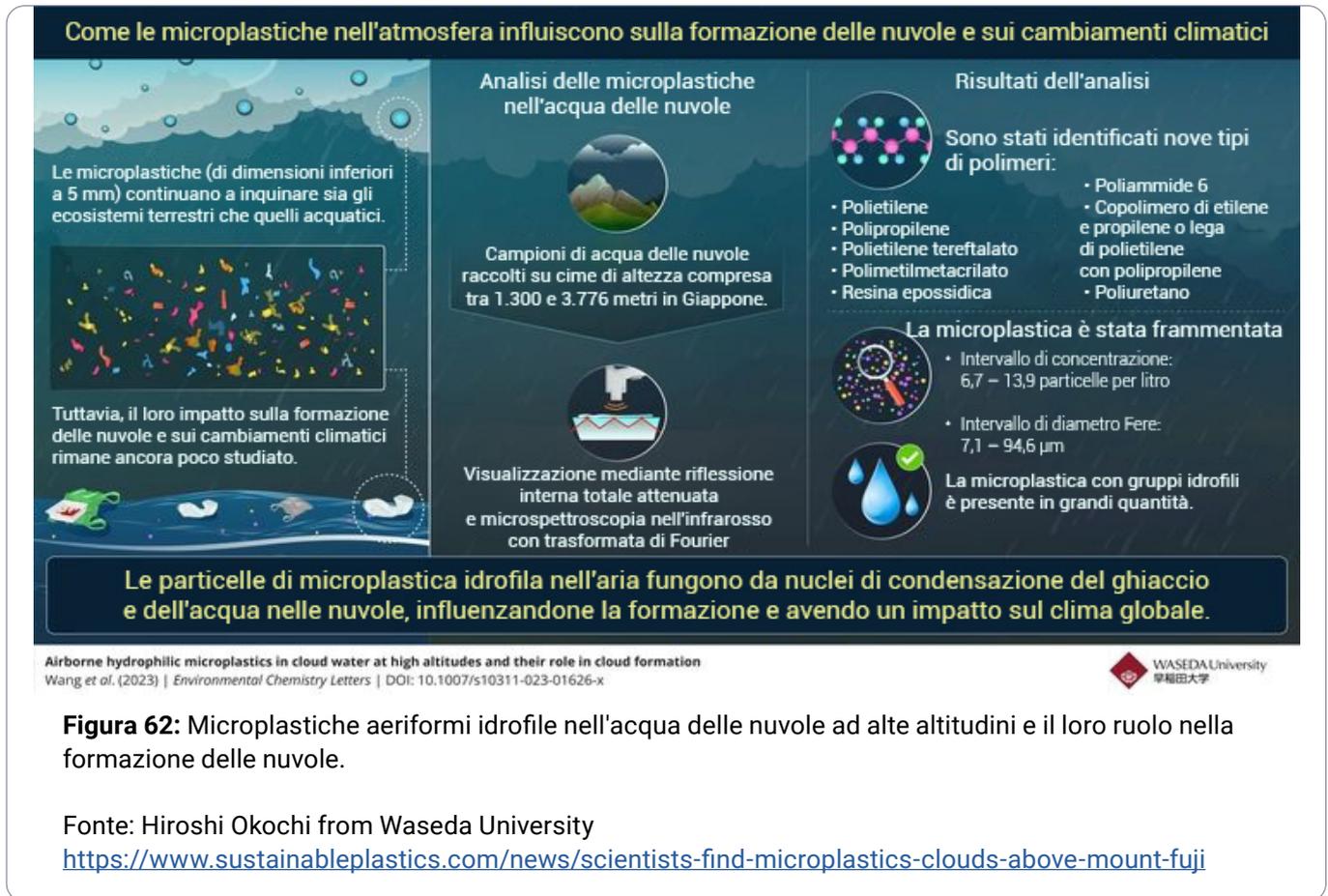


Figura 62: Microplastiche aeriformi idrofile nell'acqua delle nuvole ad alte altitudini e il loro ruolo nella formazione delle nuvole.

Fonte: Hiroshi Okochi from Waseda University

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>



“In un ambiente inquinato, con un’alta concentrazione di particelle aerosoliche come le microplastiche, l’acqua disponibile si distribuisce tra un numero maggiore di particelle, formando gocce più piccole attorno a ciascuna di esse. Quando ci sono più gocce, si ha meno pioggia inizialmente, perché le gocce precipitano solo quando diventano abbastanza grandi. Di conseguenza, si accumula più acqua all’interno della nuvola prima che le gocce raggiungano una dimensione sufficiente per precipitare, e questo porta a piogge più intense” – ha spiegato Miriam Friedman, professoressa di chimica presso il Dipartimento di Meteorologia e Scienze dell’Atmosfera della Pennsylvania State University¹⁶⁶.

Questo spiega perché negli ultimi anni sono state osservate precipitazioni anomale in diverse regioni del mondo.

¹⁶²The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024)
<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

Cariche elettriche nelle nuvole

L'atmosfera terrestre è un sistema elettrico complesso in cui le molecole d'acqua svolgono un ruolo fondamentale. Fin dal 1752, quando Benjamin Franklin dimostrò per la prima volta che l'atmosfera è elettrificata e che i temporali hanno una natura elettrica, è diventato chiaro che l'interazione dell'acqua (sotto forma di vapore, liquido o ghiaccio) è essenziale in questi processi.

L'acqua, nella sua forma pura, è neutra, ma durante i cambiamenti di fase, come la fusione e il congelamento, così come durante le collisioni tra molecole, può trasferire ioni ad altre particelle, generando effetti elettrici.

Nell'atmosfera, le collisioni tra cristalli di ghiaccio, gocce d'acqua raffreddate e altre particelle, in presenza di campi elettrici naturali, portano alla separazione delle cariche. Questo fenomeno è fondamentale per la formazione dell'elettricità atmosferica, in particolare nelle nubi temporalesche. Le gocce cariche si attraggono, accelerando la loro coalescenza in gocce più grandi, che portano infine alla formazione di nuvole capaci di generare precipitazioni – pioggia, neve o grandine.



“Le cariche sono davvero importanti. Nella formazione delle nuvole, le cariche sono praticamente tutto. Quello che abbiamo scoperto è che le cariche sono fondamentali.”— ha affermato Gerald H. Pollack, PhD, professore di bioingegneria presso l'Università di Washington, caporedattore e fondatore della rivista di ricerca interdisciplinare WATER¹⁶⁷.

Nel 1843 Michael Faraday scoprì che l'elettricità può generarsi dallo sfregamento delle gocce d'acqua contro il metallo, fenomeno che carica elettricamente l'acqua. Questa scoperta ha dato impulso allo studio dell'elettrificazione dell'acqua in seguito a frizione, transizioni di fase e elettrificazione da contatto, e ha ispirato tentativi di sfruttare questo effetto per creare nuove fonti di energia.

È noto che l'aria umida può neutralizzare le cariche superficiali formando un sottile strato d'acqua che permette agli ioni di muoversi e di dissipare la carica accumulata. Tuttavia, in alcune circostanze, le superfici che adsorbono acqua possono invece accumulare carica proveniente dall'atmosfera umida, influenzando lo stato elettrico dell'ambiente circostante¹⁶⁸. Le ricerche hanno inoltre dimostrato che i metalli pesanti possono facilmente aderire alle particelle di microplastica, e questa combinazione può rappresentare una minaccia significativa per gli ecosistemi del pianeta.

¹⁶⁷AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (accessed 1 May 2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Inoltre, le microplastiche e le sostanze chimiche presenti sulla loro superficie non solo possono aderire ad altri inquinanti, ma anche interagire tra loro, modificando le proprietà chimiche¹⁶⁹. Quando particelle di micro- e nanoplastica entrano nell'atmosfera, possono alterare il delicato equilibrio dei processi atmosferici. Le particelle di plastica possono portare una carica elettrica, che rafforza l'attrazione delle molecole polari d'acqua, favorendo così la formazione delle gocce. Queste particelle non si comportano come normali nuclei di condensazione (come il polline, il sale marino o la fuliggine), ma possono raccogliere l'acqua in modo più efficiente rispetto alle particelle neutre¹⁷⁰.

Ciò significa che intorno alle particelle cariche le gocce d'acqua iniziano a formarsi più rapidamente, influenzando la struttura delle nuvole e portando alla formazione di gocce più grandi e, in alcuni casi, di cristalli di ghiaccio insolitamente grandi¹⁷¹. Ad esempio, un recente studio ha rivelato la presenza, nelle nuvole raccolte sulle cime montuose del Giappone, di granuli di plastica con superfici idrofile, in grado di attrarre l'acqua¹⁷².

Influenza sulla formazione delle nuvole e delle precipitazioni

Le microplastiche possono influenzare il tipo di precipitazioni, le previsioni meteorologiche, la modellazione del clima e persino la sicurezza dei voli, poiché incidono sul modo in cui i cristalli di ghiaccio atmosferico contribuiscono alla formazione delle nuvole.

Uno studio¹⁷³ ha dimostrato che le gocce d'acqua contenenti microplastiche si congelano a temperature superiori di 4–10 gradi rispetto a quelle prive di tali particelle, cioè a quote più basse. Normalmente, una goccia d'acqua pura si congela a circa -38 °C. Tuttavia, nel caso delle microplastiche, il 50% delle gocce si è congelato a una temperatura compresa tra -18 °C e -24 °C, a seconda del tipo di plastica. Le gocce d'acqua contenenti microplastiche si congelano più rapidamente, formando particelle di ghiaccio più grandi. Queste particelle vengono sollevate dalle correnti ascensionali d'aria, si ricoprono ripetutamente di strati di ghiaccio e infine ricadono al suolo.

Questo fenomeno può aumentare le dimensioni della grandine (Figg. 63, 64), intensificare gli effetti distruttivi e favorire la formazione di nubi di ghiaccio. Di conseguenza, cambiano la frequenza e l'intensità delle precipitazioni, comprese piogge e nevicate. Tali alterazioni possono generare effetti a cascata, influenzando il clima, il ciclo idrologico e gli ecosistemi.

Quando nell'atmosfera sono presenti particelle di nanoplastiche, le nubi iniziano a formarsi a quote più basse, solitamente al di sotto dei 2 km. Questo comporta una minore mobilità delle nubi, ostacolando la normale distribuzione delle precipitazioni. Di conseguenza, alcune aree possono essere colpite da siccità, mentre altre possono subire piogge eccessive.

¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS ES&T Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

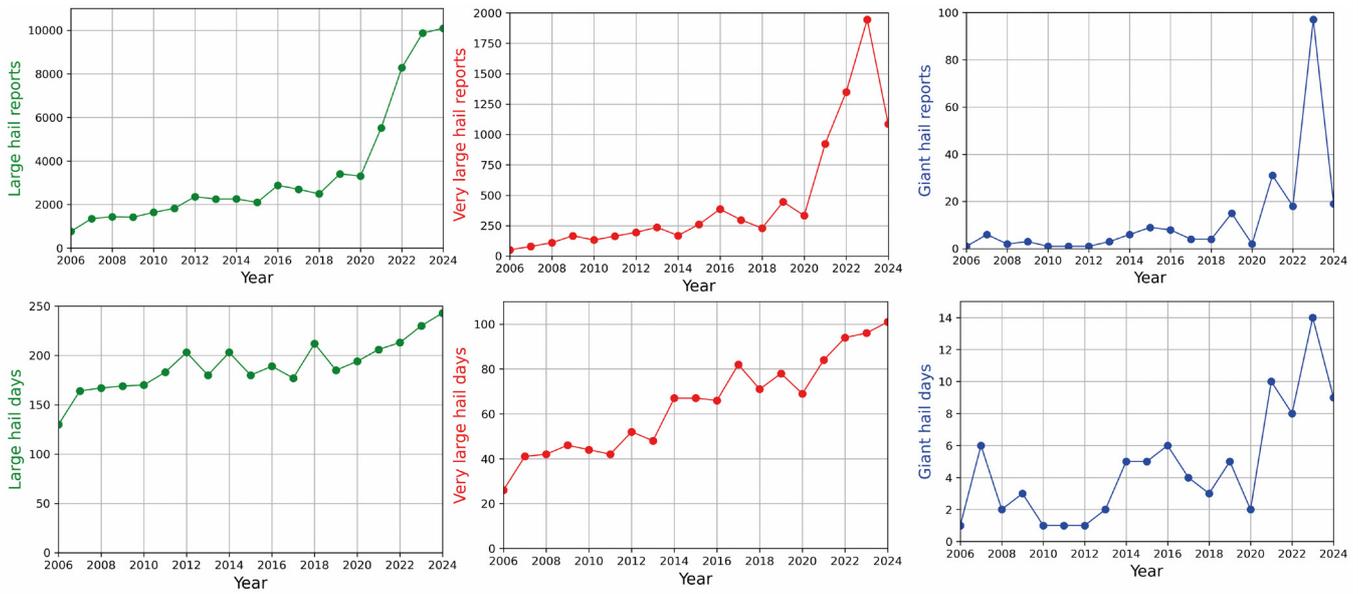
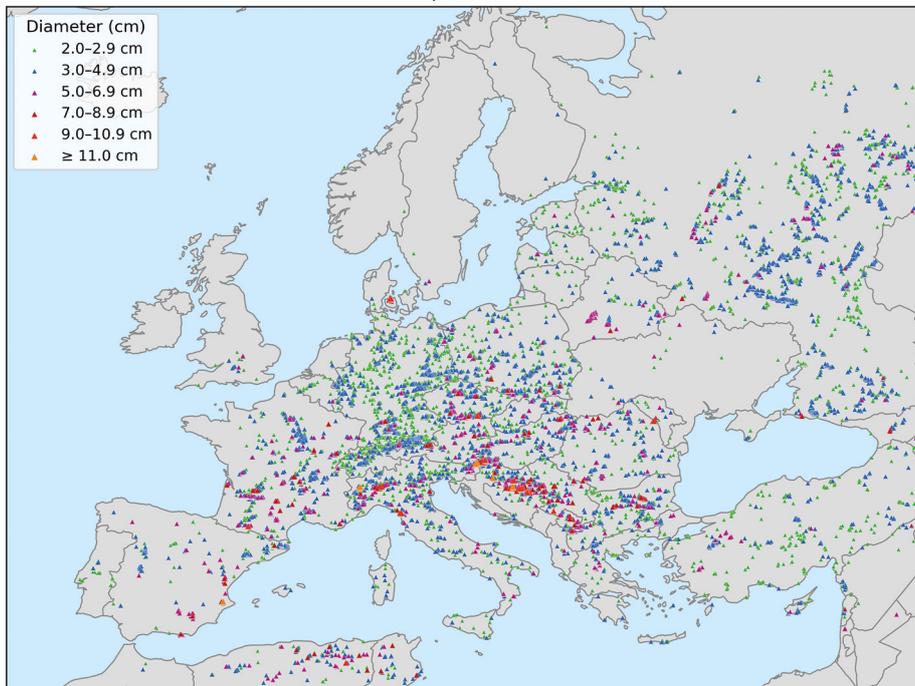


Figura 63: Numero di segnalazioni e giorni con chicchi di grandine di dimensioni grandi (2+ cm), molto grandi (5+ cm) e giganti (10+ cm) nel periodo dal 2006 al 2024.

Fonte: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024
<https://www.esssl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Hail reports in 2024



Source: ESSL, European Severe Weather Database: www.eswd.eu

Figura 64: Distribuzione spaziale delle segnalazioni di grandine di grandi dimensioni in Europa e nelle aree circostanti nel 2024.

Fonte: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024
<https://www.esssl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Ruolo delle MNP nello squilibrio climatico del pianeta

Le nubi più dense iniziano a trattenere il calore negli strati inferiori dell'atmosfera, agendo come una coperta, assorbendo e riflettendo una parte della radiazione termica verso la superficie terrestre. Questo riduce la dispersione di calore nello spazio e contribuisce al riscaldamento dell'atmosfera. L'aumento della temperatura favorisce un'ulteriore evaporazione dell'acqua dagli oceani, e una maggiore quantità di umidità nell'atmosfera porta a un ulteriore riscaldamento. Si crea così un circolo vizioso. È importante sottolineare che per ogni grado di aumento della temperatura, la quantità di vapore acqueo nell'aria cresce di circa il 7%¹⁷⁴, e la frequenza dei fulmini aumenta del 12%¹⁷⁵.



Come osserva Kevin Trenberth, climatologo emerito del Centro nazionale per gli studi atmosferici degli Stati Uniti d'America (NCAR) e autore principale dei rapporti dell'IPCC: *“Questi due ingredienti – temperatura più alta e maggiore vapore acqueo – portano a un aumento dell'instabilità atmosferica. E questo porta a una maggiore convezione, a più temporali, alcuni dei quali diventano più intensi. E se i temporali si combinano e interagiscono, come accade in una tempesta tropicale, si può finire per avere uragani più forti. Tutti questi fattori si sommano. Il risultato è un aumento del rischio di tempeste intense: temporali violenti, in particolare le supercelle, che producono grandine e che, in alcune aree e in condizioni favorevoli, possono anche generare tornado.”*

Pertanto, il riscaldamento estremo degli oceani, insieme a un eccesso di elettricità e calore nell'atmosfera, aggrava la crisi climatica, portando a fenomeni meteorologici più distruttivi come forti temporali, uragani, fulmini e sprite.

La plastica presente nell'atmosfera non solo inquina l'ambiente, ma altera anche i processi climatici, influenzando la formazione delle nuvole e delle precipitazioni. Essa aumenta la carica elettrostatica nell'atmosfera, accelera la condensazione del vapore acqueo e influisce sulla densità delle nubi, il che può portare a un'intensificazione di tempeste, temporali e altri fenomeni naturali distruttivi. Siamo sull'orlo di comprendere le conseguenze su larga scala di questo impatto sul clima, il che richiede misure urgenti e globali per ridurre l'inquinamento da particelle di plastica negli oceani e nell'atmosfera.

¹⁷⁴NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

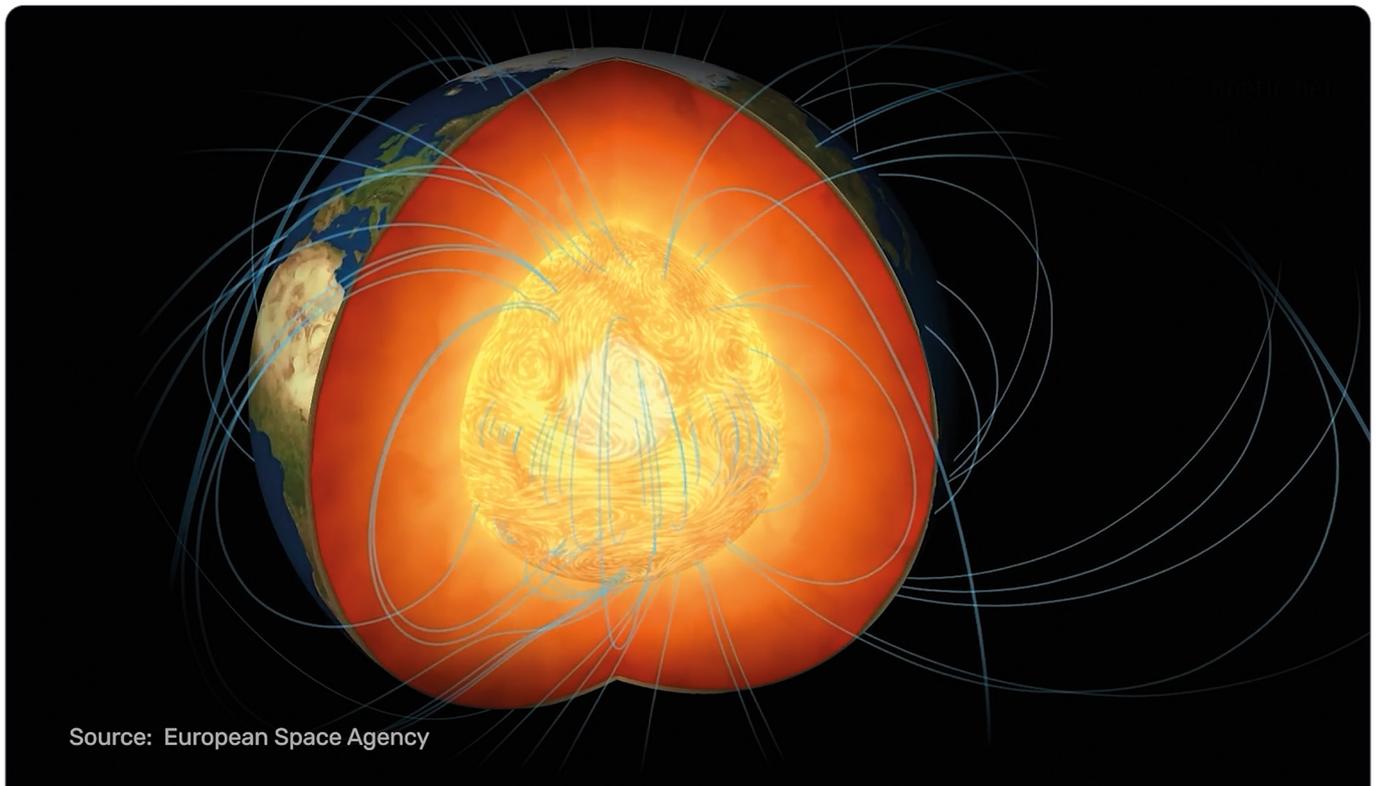
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵ Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Interazione dell'oceano con il campo magnetico terrestre

Gli oceani coprono circa il 70% della superficie terrestre e non sono solo enormi riserve d'acqua, ma anche elementi fondamentali nei complessi processi elettrici del pianeta. Essi interagiscono con il campo magnetico terrestre, partecipando ai suoi processi elettromagnetici.

Il campo magnetico della Terra protegge la superficie del pianeta dal vento solare e dalle radiazioni cosmiche, agendo come uno scudo naturale. Senza questo campo, l'atmosfera verrebbe distrutta. Il campo geomagnetico è generato nelle profondità del pianeta, dove il nucleo esterno liquido, composto da metalli, si muove attorno al nucleo interno solido, creando un generatore naturale – un processo chiamato geodinamo (Fig. 65).



Source: European Space Agency

Figura 65: Immagine del processo di formazione del campo geomagnetico: il nucleo esterno liquido della Terra ruota attorno al nucleo interno solido, formando un generatore naturale – conosciuto come geodinamo, grazie al quale si crea il campo magnetico del pianeta.

Fonte: The European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

Il campo magnetico terrestre interagisce con i fenomeni elettrici presenti negli oceani e nell'atmosfera. L'acqua marina, grazie al contenuto di sali e ioni disciolti, possiede una notevole conduttività elettrica, che le consente di trasportare correnti elettriche. Queste correnti, a loro volta, interagiscono con il campo magnetico generando complessi processi elettromagnetici che a loro volta influenzano la dinamica del campo magnetico planetario.

Come discusso in precedenza, l'inquinamento degli oceani, in particolare da micro- e nanoplastiche, può alterare le proprietà chimiche ed elettriche dell'acqua. Maggiore è la concentrazione di sostanze inquinanti, più vengono compromessi i processi elettromagnetici naturali. Quando l'acqua contaminata evapora, goccioline microscopiche e aerosol possono trasportare micro- e nanoplastiche, metalli pesanti e altre sostanze nell'atmosfera, il che può influenzare i processi elettromagnetici locali. Durante l'evaporazione, minuscole gocce e aerosol possono trasportare micro- e nanoplastiche, metalli pesanti¹⁷⁶ e altre particelle nell'atmosfera, interferendo con i processi elettromagnetici locali. È simile a ciò che accade quando un oggetto metallico posto vicino a un magnete altera la distribuzione del campo magnetico, indebolendolo in una determinata area.

L'impatto dell'inquinamento degli oceani sul campo magnetico terrestre richiede ulteriori studi, soprattutto nel contesto dei cambiamenti climatici globali. Comprendere questi processi può aiutare a valutare il loro potenziale effetto sul sistema climatico e sugli ecosistemi del pianeta.



¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

IMPATTO DELLE MICRO- E NANOPLASTICHE SULLA SALUTE UMANA



"La plastica non solo inquina i nostri oceani e corsi d'acqua e uccide la vita marina – è presente in ognuno di noi, e non possiamo evitarne il consumo. È urgente e necessario un intervento globale per affrontare questa crisi."

Marco Lambertini
Direttore Generale di WWF International

MNP come nuovo fattore di rischio nello sviluppo delle epidemie del XXI secolo

Negli ultimi 30 anni si osserva un aumento continuo di infarti, ictus, malattie oncologiche, diabete mellito, allergie e malattie infiammatorie intestinali. La riduzione dell'immunità si rileva sia nei bambini che negli adulti in tutto il mondo. Sta aumentando anche la diffusione dell'infertilità. Nonostante i dati sul numero di persone e coppie infertili siano limitati, secondo le stime dell'Organizzazione Mondiale della Sanità circa il 17,5% degli adulti¹⁷⁷ – ovvero circa una persona su sei nel mondo – si confronta con problemi di infertilità.

Dal 2010 si osserva una riduzione delle capacità intellettive nella popolazione. Anche nei Paesi sviluppati, il 25% degli adulti non riesce a risolvere problemi matematici di base; negli Stati Uniti questa cifra arriva al 35%. Si assiste a una riduzione della capacità di concentrazione, del pensiero logico e della risoluzione di problemi elementari. Aumentano le forme di demenza e i disturbi cognitivi¹⁷⁸.

La crescita dei disturbi mentali supera quella delle malattie somatiche¹⁷⁹. I disturbi d'ansia, l'autismo, la depressione e il disturbo bipolare, così come il disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD), stanno assumendo proporzioni pandemiche.

Sempre più dati indicano il coinvolgimento delle micro- e nanoplastiche nella patogenesi di diverse malattie.

¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023)

<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (accessed 1 May 2025).

Meccanismi molecolari della tossicità delle MNP: danni al DNA, ai mitocondri e alle membrane cellulari

La micro- e nanoplastiche (MNP) rappresentano una delle forme più diffuse di inquinamento ambientale di origine antropica. Grazie alle sue proprietà fisico-chimiche, le particelle di plastica sono in grado di spostarsi su grandi distanze, superando barriere geografiche ed ecologiche. I principali percorsi attraverso cui la micro- e nanoplastica entra nell'organismo umano sono: l'ingestione (attraverso acqua e cibo), l'inalazione con l'aria e la penetrazione attraverso la pelle¹⁸⁰ (Fig. 66).

Come menzionato nella sezione: ***“Le conseguenze dell'inquinamento da plastica: micro- e nanoplastiche (MNP) come nuovo fattore della crisi globale”***, l'ambiente marino rappresenta una fonte significativa di microplastica secondaria. Secondo le stime, la brezza marina trasporta circa 136.000 tonnellate di microplastiche ogni anno verso le aree costiere. Inoltre, le acque aperte nelle zone urbanizzate, inclusi i sistemi fognari e le acque piovane, diventano importanti centri di accumulo e ulteriore diffusione delle particelle plastiche, la cui quantità può superare del 90% le stime precedenti.

Gli alimenti costituiscono una via importante di introduzione delle MNP nell'organismo umano. Le piante sono in grado di accumulare nanoplastica attraverso l'apparato radicale: durante l'irrigazione o le precipitazioni, le particelle penetrano nel suolo e vengono assorbite insieme all'acqua, risalendo lungo lo xilema e accumulandosi nei tessuti di foglie e frutti¹⁸¹. I livelli più elevati di particelle di plastica sono stati rilevati in colture come mele, pere, carote e broccoli.

I frutti di mare rappresentano anch'essi una via rilevante di trasmissione delle MNP. L'ingestione di microplastica da parte degli organismi marini è stata documentata a tutti i livelli trofici. Secondo uno studio dell'Università di Newcastle, una persona media può ingerire fino a 250 grammi di microplastica all'anno, pari a circa 5 grammi a settimana — l'equivalente del peso di una carta di credito. Inoltre, il riscaldamento di contenitori in plastica, incluso il cibo per bambini, nei forni a microonde può liberare nel cibo oltre 2 miliardi di nanoparticelle e 4 milioni di microparticelle di plastica per ogni centimetro quadrato di superficie.

La microplastica è ampiamente diffusa nell'acqua potabile. Studi dimostrano che fino al 90% dei campioni di acqua del rubinetto negli Stati Uniti contiene particelle di MNP. Le principali vie attraverso cui essa entra nei sistemi idrici sono gli scarichi, le emissioni industriali e le precipitazioni atmosferiche contenenti plastica, trasportata dall'aria. Quando l'acqua contaminata evapora, le particelle di plastica possono salire nell'atmosfera e successivamente ricadere con la pioggia o la neve. In uno studio condotto in 11 parchi nazionali degli Stati Uniti, è stata rilevata, in un periodo di 14 mesi, una deposizione atmosferica di oltre 1.000 tonnellate di particelle di plastica — un quantitativo sufficiente a produrre 120 milioni di bottiglie di plastica.

¹⁸⁰ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics.

<https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (accessed 1 May 2025).

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

La diffusione aerosolica delle MNP rappresenta uno dei meccanismi più pericolosi di esposizione per l'uomo. Le particelle di plastica si sollevano dalla superficie di mari e specchi d'acqua, vengono trasportate dalle masse d'aria e diventano parte integrante dell'aerosol atmosferico. Le stime indicano che, in un contesto metropolitano, una persona adulta può inalare fino a 106.000 particelle di microplastica durante una passeggiata di due ore; nei pressi di bacini idrici, questa cifra può aumentare di dieci volte.

Un nuovo studio presentato alla conferenza dell'*American College of Cardiology* (ACC.25) ha rilevato che una maggiore esposizione alle microplastiche – che possono essere inconsapevolmente ingerite o inalate – è associata a una più elevata incidenza di malattie croniche non trasmissibili. La ricerca ha mostrato che, nelle comunità situate lungo le coste orientali, occidentali e del Golfo, così come in alcune aree lacustri degli Stati Uniti, concentrazioni più elevate di microplastica nell'ambiente sono correlate a una maggiore prevalenza di malattie croniche non infettive come ipertensione, diabete e ictus.



“Questo studio fornisce prove iniziali del fatto che l'esposizione alla microplastica influisce sulla salute cardiovascolare, in particolare sulle malattie croniche non trasmissibili come l'ipertensione, il diabete e l'ictus”, ha dichiarato Sai Rahul Ponnana, MA, ricercatore in scienze dei dati presso la Case Western Reserve University School of Medicine in Ohio e autore principale dello studio. “Quando abbiamo incluso nella nostra analisi 154 variabili socioeconomiche e ambientali diverse, non ci aspettavamo che la microplastica rientrasse tra i primi dieci fattori predittivi della prevalenza delle malattie croniche non trasmissibili.”¹⁸²

¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)
<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (accessed 1 May 2025).

Modalità di azione delle microplastiche (MP)

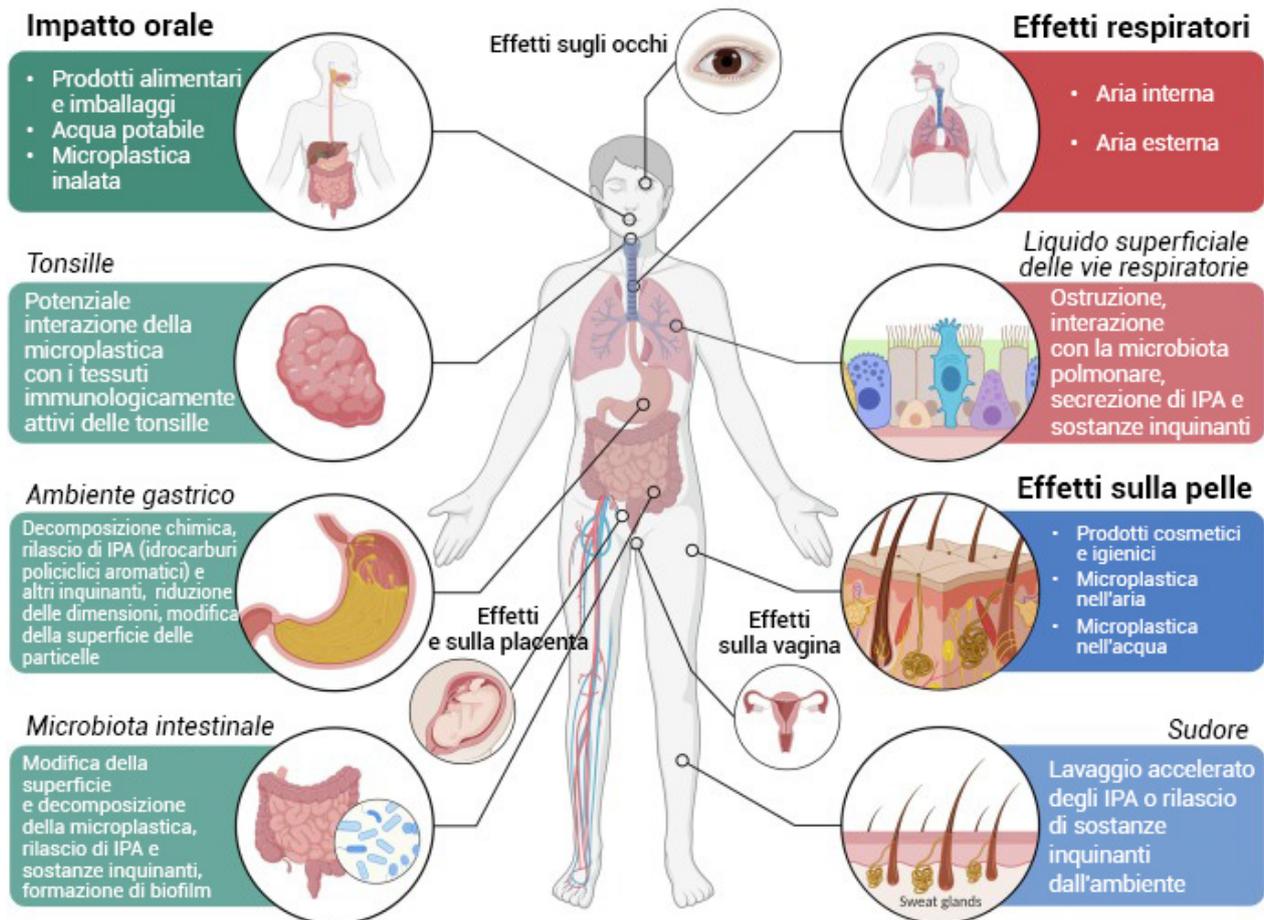


Figura 66: Panoramica delle vie di esposizione della microplastica (MP) sull'essere umano e degli eventi generali che possono determinare l'impatto delle particelle di MP, delle sostanze chimiche associate alla plastica (PAC) e degli inquinanti ambientali adsorbiti sulla salute umana.

Fonte: Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

La micro- e nanoplastica è in grado di attraversare le barriere biologiche, comprese quelle intestinali, polmonari, encefaliche e placentari¹⁸³. La microplastica esposta ad acqua dolce o salata penetra più facilmente nelle cellule (Fig. 67) a causa dell'accumulo di biomolecole sulla loro superficie. Queste biomolecole formano un rivestimento (eco-corona) che aiuta le microplastiche a passare attraverso il tratto digestivo e a integrarsi nei tessuti. Tale rivestimento agisce come un meccanismo che agevola l'ingresso delle particelle nelle cellule, in modo simile a un cavallo di Troia¹⁸⁴.

¹⁸³ Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. *Front. Toxicol.* 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴ Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

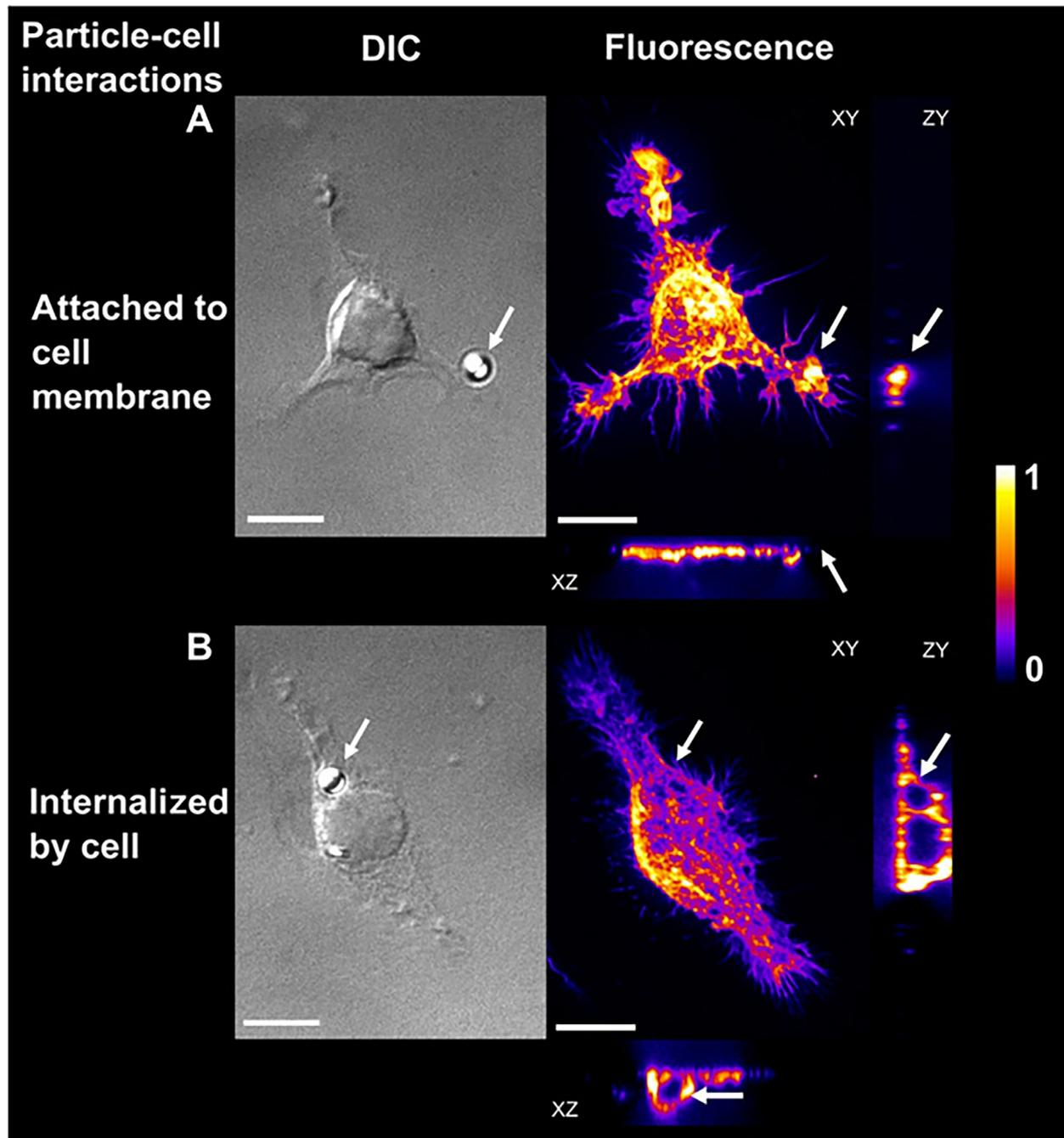


Figura 67: Immagini delle interazioni tra particelle e cellule di particelle di microplastica esposte ad acqua dolce per 2 settimane.

DIC: Immagini microscopiche a contrasto interferenziale differenziale delle interazioni particella-cellula. Fluorescenza: Immagini confocali a disco rotante delle cellule con actina filamentosa marcata con fluorescenza (immagini in falsi colori, proiezione massima di intensità, che mostra unità arbitrarie). Le proiezioni XY, YZ e XZ delle immagini confocali tridimensionali permettono di distinguere le particelle di microplastica (A) attaccate alle membrane cellulari oppure (B) particelle di microplastica internalizzate. Le frecce indicano la posizione delle particelle di microplastica. Barre di scala: 10 μ m.

Fonte: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

La tossicità della microplastica dipende da numerosi fattori: dimensioni, forma, carica superficiale, grado di degradazione, durata dell'esposizione, composizione degli additivi e altre caratteristiche¹⁸⁵. Le particelle più piccole penetrano più facilmente nelle cellule e provocano uno stress ossidativo più marcato. La carica superficiale delle microplastiche è un fattore chiave nel determinare quanto efficientemente vengano assorbite dalle cellule, poiché influisce sull'adesione. Inoltre, la microplastica è composta da polimeri e da vari additivi che ne potenziano gli effetti negativi¹⁸³.

Le particelle di micro- e nanoplastica, i composti chimici presenti nella plastica e gli inquinanti ambientali che essa può adsorbire esercitano un impatto negativo complesso¹⁸⁶ sulla salute umana (Fig. 68), rappresentando una minaccia significativa.

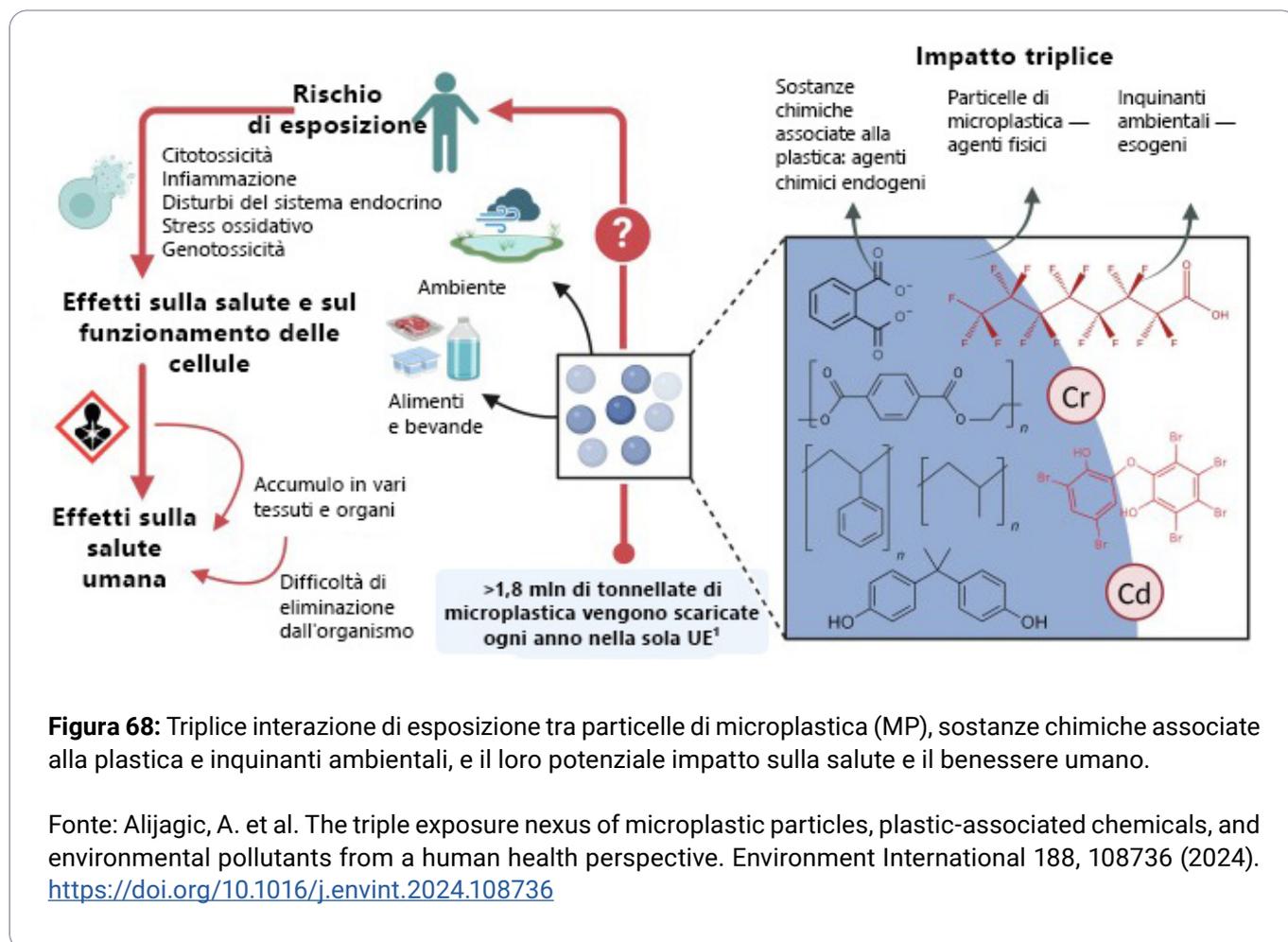


Figura 68: Triplice interazione di esposizione tra particelle di microplastica (MP), sostanze chimiche associate alla plastica e inquinanti ambientali, e il loro potenziale impatto sulla salute e il benessere umano.

Fonte: Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. *Front. Toxicol.* 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

Un grammo di microplastica può contenere fino a 24.000 nanogrammi di inquinanti organici persistenti¹⁸⁷. Queste sostanze sono altamente tossiche, si accumulano negli organismi e possono causare danni anche a concentrazioni molto basse.

La microplastica può rendere altri inquinanti ancora più nocivi¹⁸⁸, poiché le particelle di plastica e la miscela di sostanze sulla loro superficie non solo aderiscono ad altri contaminanti, ma possono anche interagire tra loro con modifica delle proprietà chimiche.

Le ricerche dimostrano che l'esposizione a micro- e nanoplastiche provoca effetti tossici a diversi livelli dell'organizzazione biologica:

- **Macromolecole:** danni al DNA, alterazione dell'espressione genica e modificazioni nella trascrizione delle proteine.
- **Cellule e organelli:** disturbi nella divisione cellulare, citotossicità, apoptosi, stress ossidativo, disfunzione metabolica e aumento della concentrazione intracellulare di calcio.
- **Tessuti:** processi infiammatori, fibrosi, osteolisi del tessuto osseo.
- **Organi:** reazioni immunitarie, disfunzioni d'organo, neurotossicità, cancerogenesi, alterazioni del metabolismo e dell'equilibrio energetico.
- **Popolazioni animali e umane:** riduzione della fertilità, rallentamento della crescita, spopolamento.

Questi effetti evidenziano l'impatto multilivello delle micro- e nanoplastiche sui sistemi biologici¹⁸⁹.

1. Alterazione delle funzioni cellulari

La degradazione dell'organismo causata dalle micro- e nanoplastiche (MNP) inizia a livello cellulare¹⁹⁰. Le MNP interagiscono con le membrane cellulari attraverso vari meccanismi, tra cui legami a idrogeno, interazioni alogene, forze idrofobiche, forze di Van der Waals e interazioni elettrostatiche. Agendo come fattori destabilizzanti, le MNP compromettono l'integrità e la funzionalità delle membrane cellulari (Fig. 69).

¹⁸⁷ Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

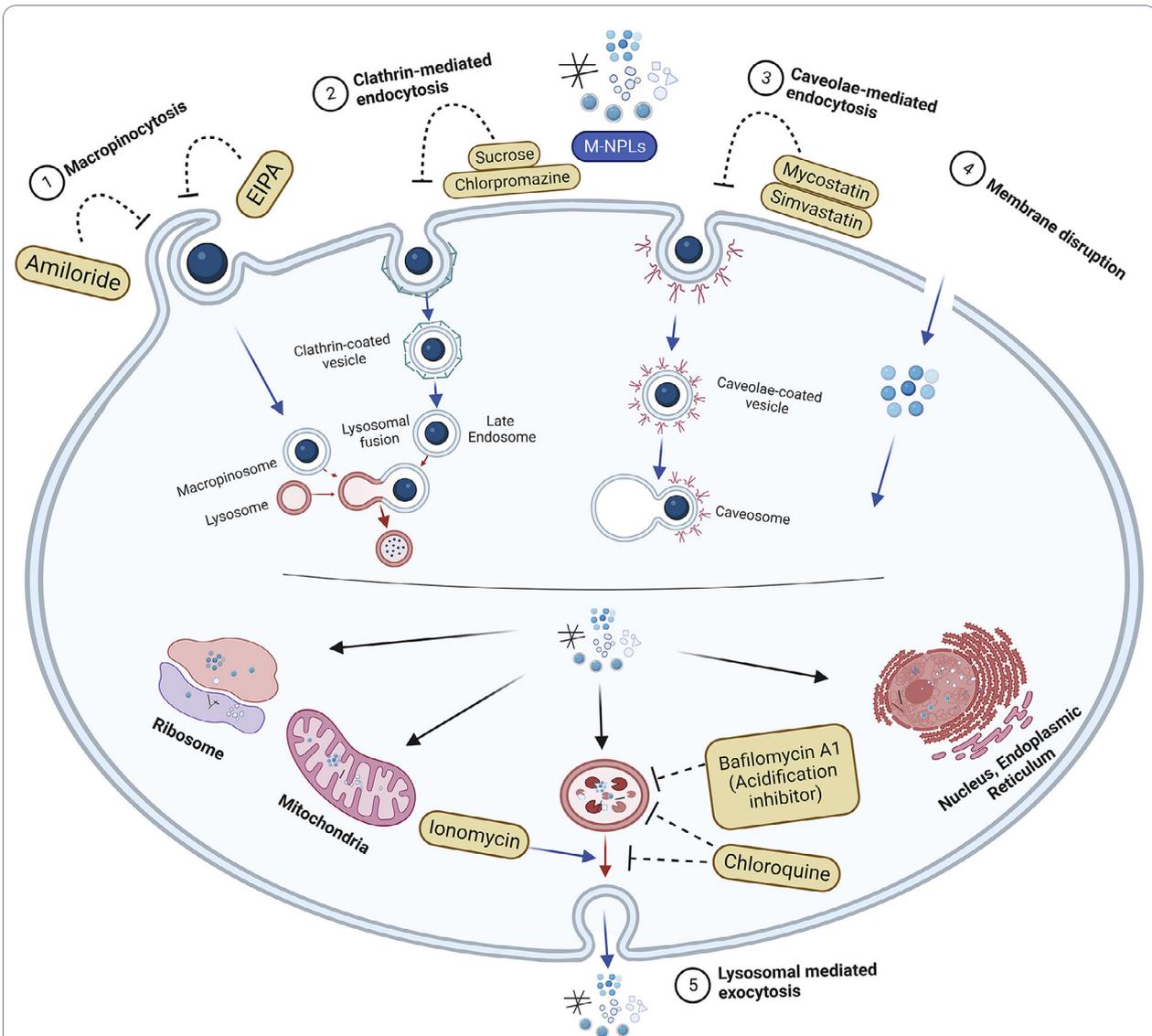


Figura 69: Assorbimento cellulare e rilascio delle micro- e nanoplastiche (M-NPL). I M-NPL utilizzano diversi tipi di endocitosi:

(1) macropinocitosi, (2) endocitosi mediata da clatrina, (3) endocitosi mediata da caveole, oltre alla rottura della membrana cellulare per l'internalizzazione. I M-NPL vengono rilasciati dalle cellule tramite (4) esocitosi mediata dai lisosomi.

Fonte: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Grazie alle loro ridotte dimensioni, le MNP sono in grado di penetrare facilmente all'interno delle cellule dell'organismo umano (Fig. 70). Le piccole dimensioni e la carica elettrostatica accumulata sulle MNP determinano il loro effetto sistemico sull'organismo¹⁹¹.

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>

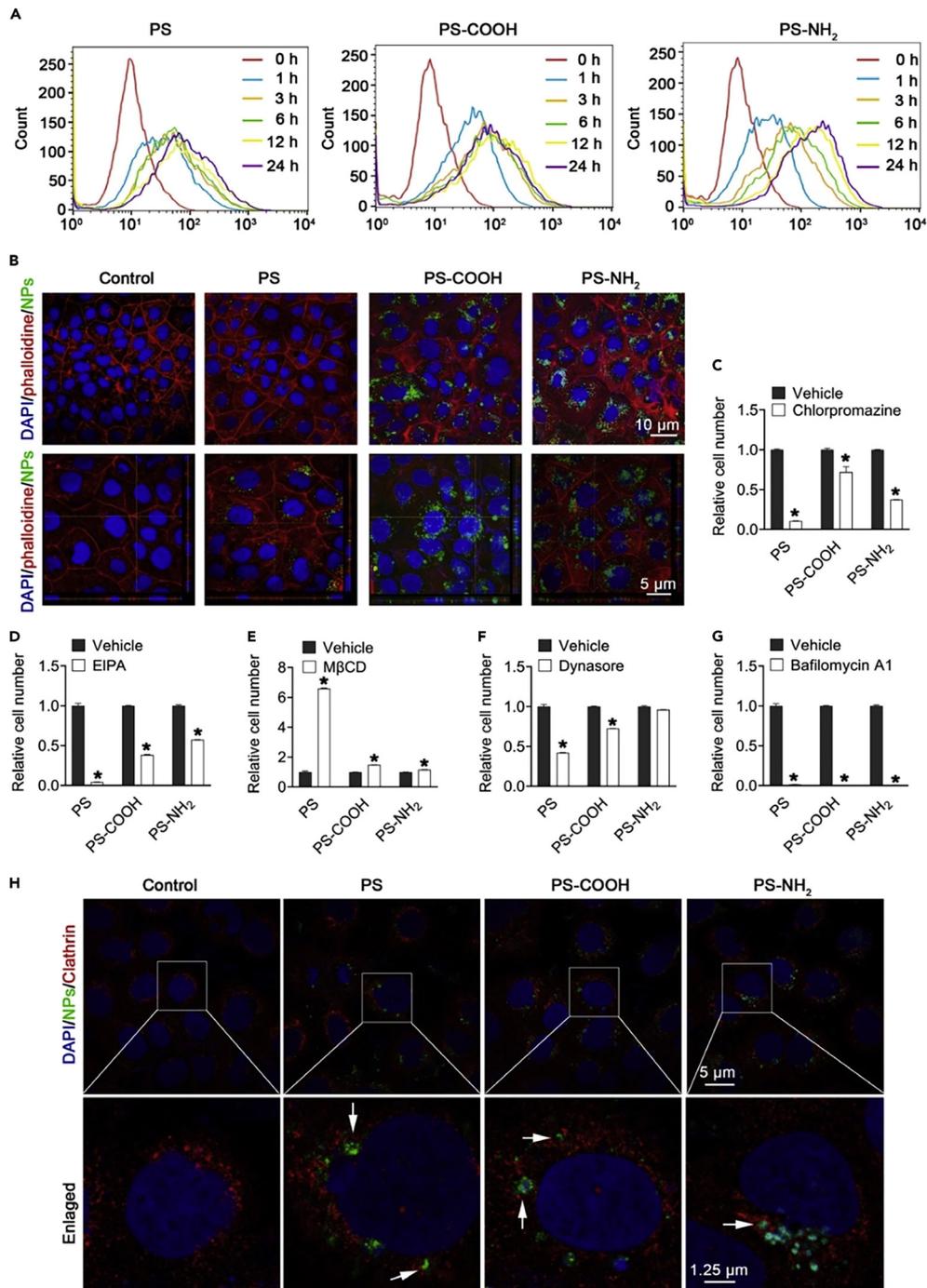


Figura 70: Cellule Caco-2 che internalizzano nanoplastiche (NP).

(A–G) Analisi dell’internalizzazione delle NP da parte delle cellule Caco-2 mediante citometria a flusso (A) e microscopia confocale (B). Analisi della citometria a flusso delle cellule Caco-2 pretrattate per 1 ora con clorpromazina (C), EIPA (D), MβCD (E), dynasore (F) e bafilomicina A1 (G), seguita da esposizione alle NP per 24 ore. Localizzazione delle NP in vescicole mediate da clatrina, analizzata tramite microscopia confocale (H).

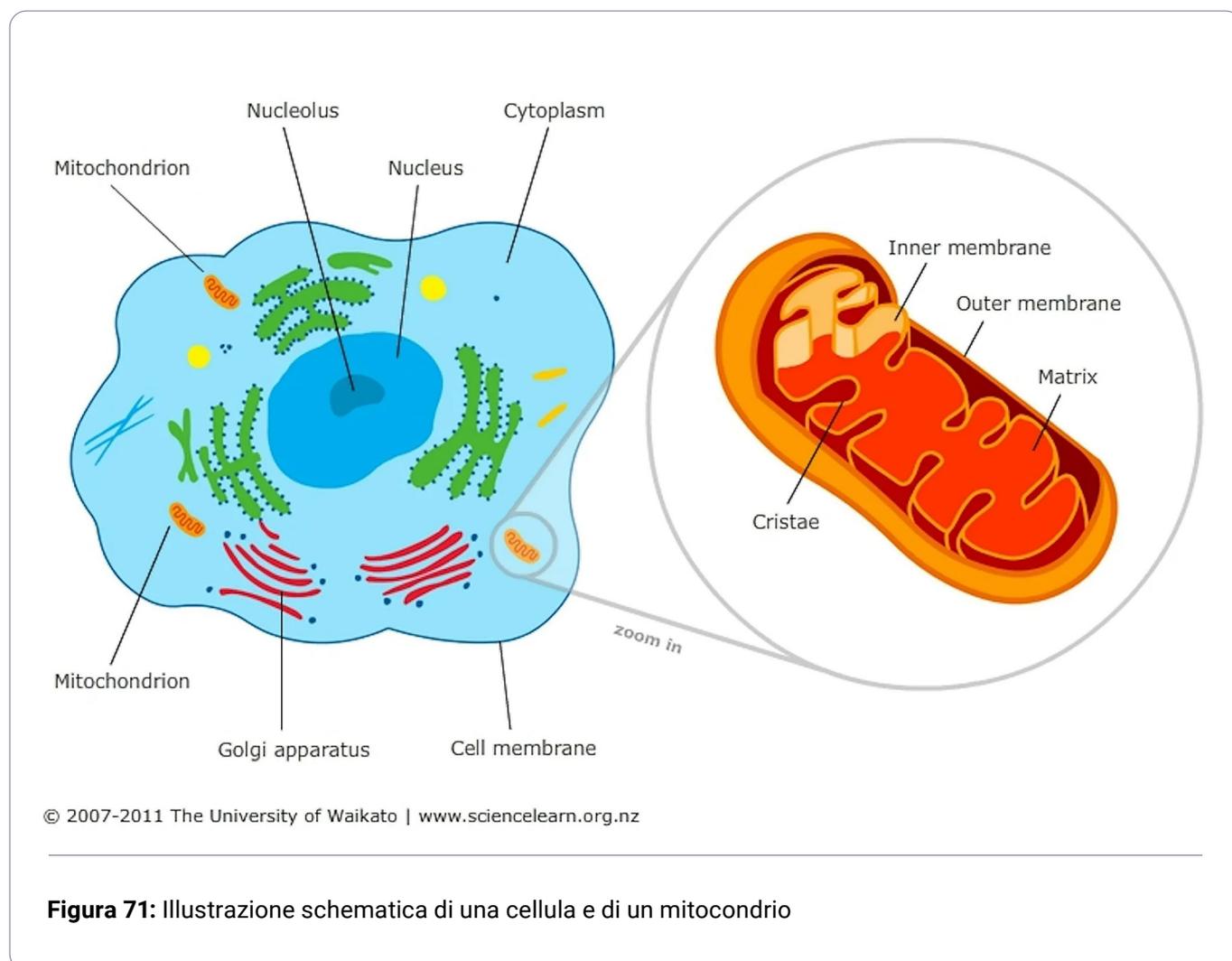
Fonte: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Un aspetto chiave dell'azione distruttiva a livello cellulare è il danneggiamento delle membrane cellulari, dei mitocondri e la degradazione del DNA. Le particelle di micro- e nanoplastiche caricate elettrostaticamente possono destabilizzare il potenziale di membrana delle cellule, in particolare dei neuroni, provocando segnali elettrici spontanei, interferenze nella trasmissione delle informazioni tra le cellule o morte cellulare.

All'interno della cellula, il bersaglio principale dell'azione distruttiva delle nanoplastiche sono i mitocondri – organelli fondamentali per la sopravvivenza e la rigenerazione cellulare (Fig. 71).

Oltre alla funzione di “centrali energetiche”, i mitocondri svolgono ruoli multifunzionali, determinando lo stato di salute dell'organismo, la resistenza allo stress, lo sviluppo di malattie croniche e i processi di invecchiamento.



Il corretto funzionamento dei mitocondri è fondamentale per la sopravvivenza cellulare, l'omeostasi e la produzione di energia.

La struttura e la funzione dei mitocondri sono mantenute da un sistema di controllo della qualità mitocondriale, che comprende processi di biogenesi mitocondriale, dinamica mitocondriale (fusione/fissione), mitofagia e risposta mitocondriale alle proteine mal ripiegate (UPR^{mt}). La disfunzione e/o il danneggiamento dei mitocondri sono associati all'insorgenza e alla progressione di numerose malattie umane, tra cui patologie neurodegenerative, cardiovascolari, legate all'invecchiamento, diabete e cancro. Lo stress ambientale e gli inquinanti possono aumentare la sensibilità dei mitocondri ai danni, portando alla disfunzione mitocondriale.

Crescono le evidenze che indicano l'impatto delle nanoplastiche e delle microplastiche sulla salute e sulla funzionalità mitocondriale. È stato riportato che le MNP inducono stress ossidativo e produzione di specie reattive dell'ossigeno, alterando infine il potenziale della membrana mitocondriale.

Le MNP possono attraversare le barriere biologiche nell'organismo umano ed essere assimilate dalle cellule, potenzialmente modificando la dinamica mitocondriale, la bioenergetica, la trasmissione di impulsi, influenzando così il metabolismo e la funzione cellulare.

Data l'importanza critica dei mitocondri per la salute cellulare e dell'intero organismo, le MNP rappresentano una minaccia significativa per la salute e la funzionalità mitocondriale stessa.

Le attuali evidenze sottolineano l'urgenza di affrontare il problema globale dell'inquinamento da MNP non solo per proteggere l'ambiente, ma anche per salvaguardare la salute umana¹⁹².

I mitocondri sintetizzano l'ATP, la molecola universale per l'energia che alimenta tutti i processi biologici: dalla contrazione muscolare e trasmissione degli impulsi nervosi alla sintesi ormonale e alla divisione cellulare. Essi partecipano al metabolismo di carboidrati, grassi e amminoacidi, mantenendo l'equilibrio metabolico dell'organismo.

I mitocondri controllano la morte cellulare programmata (apoptosi), un processo cruciale che impedisce l'accumulo di cellule danneggiate o potenzialmente pericolose. Alterazioni in questo sistema sono associate allo sviluppo di malattie oncologiche, autoimmuni e neurodegenerative. I mitocondri svolgono un ruolo chiave nella difesa antiossidante, regolando i livelli delle specie reattive dell'ossigeno (ROS). Quando questo sistema perde il suo equilibrio, i danni si accumulano, l'invecchiamento accelera e aumenta il rischio di infiammazioni croniche e patologie (Fig. 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

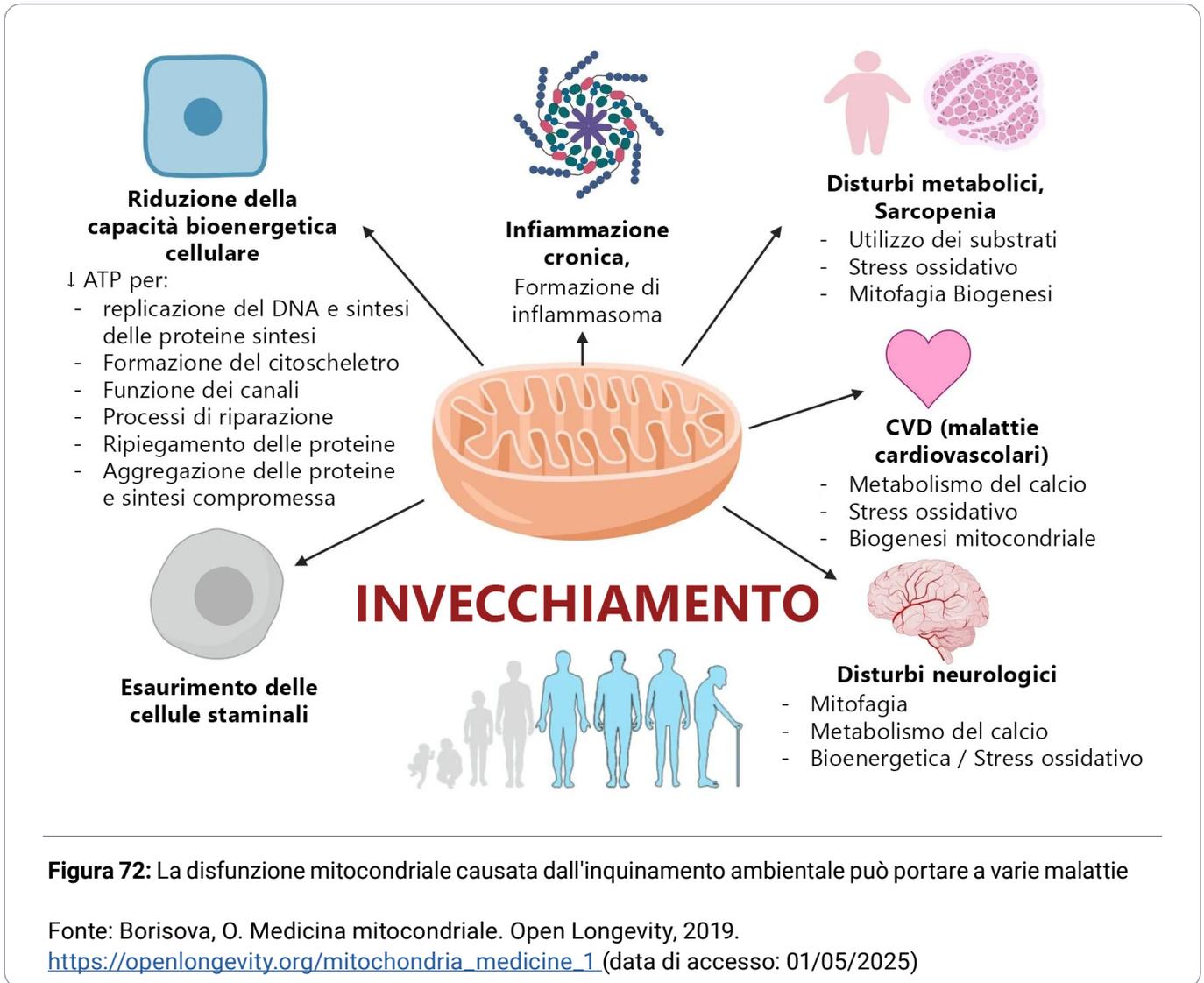


Figura 72: La disfunzione mitocondriale causata dall'inquinamento ambientale può portare a varie malattie

Fonte: Borisova, O. Medicina mitocondriale. Open Longevity, 2019.

https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (data di accesso: 01/05/2025)

I mitocondri possiedono un proprio DNA, ereditato per via materna, il che li rende partecipanti unici nelle malattie ereditarie. Essi regolano l'attività dei geni nucleari e l'adattamento delle cellule ai cambiamenti dell'ambiente esterno. Inoltre, i mitocondri partecipano alla sintesi degli ormoni steroidei – cortisolo, estrogeni e testosterone. È proprio l'alterazione delle funzioni mitocondriali, causata dall'esposizione alle nanoplastiche, a costituire la base di una cascata di processi patologici in grado di determinare conseguenze gravi e potenzialmente irreversibili, sia a livello degli organi e sistemi specifici, sia dell'intero organismo (Tabella 1).

Malattie neurologiche	Morbo di Parkinson, Morbo di Alzheimer, Sclerosi Laterale Amiotrofica (SLA), Epilessia, Emicranie, Encefalomiopatie mitocondriali (ad esempio, sindrome MELAS)
Malattie cardiovascolari	Cardiomiopatie, Insufficienza cardiaca Aterosclerosi (attraverso lo stress ossidativo)
Malattie immunitarie e infiammatorie	Malattie autoimmuni (ad esempio, <i>lupus eritematoso sistemico</i>), Stati infiammatori cronici (mediati da disfunzione delle ROS e della segnalazione citochinica)
Disturbi metabolici	Diabete mellito di tipo 2, Obesità, Sindrome metabolica, Disturbi del metabolismo degli acidi grassi e del lattato
Malattie oncologiche	In caso di disfunzione mitocondriale, si verifica un aumento del rischio di mutazioni e di trasformazione maligna delle cellule
Malattie muscolari	Miopatie mitocondriali, Debolezza muscolare cronica e affaticamento
Malattie degli organi di senso	Retinite pigmentosa, Neuropatia ottica di Leber (perdita della vista ereditaria)
Sindromi mitocondriali genetiche	Sindrome di Leigh, Sindrome di Kearns-Sayre, Sindrome di Barth

Tabella 1. Panoramica di alcune malattie associate alla disfunzione mitocondriale

Coinvolgimento delle MNP nei meccanismi dell'invecchiamento precoce e dell'oncogenesi

L'esposizione alle nanoplastiche può provocare un invecchiamento precoce, interferendo con la funzione mitocondriale e alterando i programmi genetici dell'organismo. Il danneggiamento dei mitocondri porta a una produzione eccessiva di specie reattive dell'ossigeno (ROS), che causano stress ossidativo. Questo danneggia il DNA, compromette la stabilità genetica, attiva processi infiammatori e accelera l'invecchiamento dei tessuti. Inoltre, le nanoplastiche contribuiscono all'accorciamento dei telomeri, limitando la capacità di divisione cellulare.



*“Siamo anche riusciti a dimostrare che, negli esseri umani, anche una sola variazione di un nucleotide nel DNA mitocondriale, associata a un peggioramento della funzione mitocondriale e a malattie mitocondriali pediatriche, può accelerare i processi di invecchiamento”, ha dichiarato Taosheng Huang, medico, dottore di ricerca, professore e direttore del Dipartimento di Genetica presso il Dipartimento di Pediatria della *Jacobs School of Medicine and Biomedical Sciences* dell'Università di Buffalo. “Abbiamo scoperto che le specie reattive dell'ossigeno, derivanti da una cattiva funzione mitocondriale, portano a un aumento del danno al DNA nel tempo”¹⁹³.*

L'invecchiamento epigenetico è un insieme di cambiamenti nella regolazione genica che avvengono a livello delle modificazioni del DNA (accensione/spegnimento dei geni), senza alterare la sequenza del DNA stesso. Si tratta di un delicato “timer molecolare” misurabile, che può procedere più velocemente o più lentamente rispetto all'invecchiamento cronologico. Un'elevata attività del DNA mitocondriale è associata a un'accelerazione dell'invecchiamento epigenetico. In alcune persone, già tra i 20 e i 30 anni, l'età biologica delle cellule può risultare significativamente superiore all'età cronologica: ciò significa che l'organismo invecchia più rapidamente del previsto.

Nei soggetti con disfunzioni mitocondriali, le malattie tipicamente legate all'età – come la demenza, le patologie cardiovascolari, le aritmie e l'insufficienza cardiaca – possono manifestarsi già in giovane età. Gli scienziati scozzesi hanno scoperto che più tardi una persona è nata, maggiore è il rischio che sviluppi malattie entro i 50 anni. Ad esempio, le persone nate tra il 1956 e il 1960 presentano in media un numero maggiore di malattie rispetto a quelle nate tra il 1951 e il 1955 o tra il 1946 e il 1950¹⁹⁴ (Fig. 73).

¹⁹³ Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (accessed 1 May 2025).

¹⁹⁴ Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>.

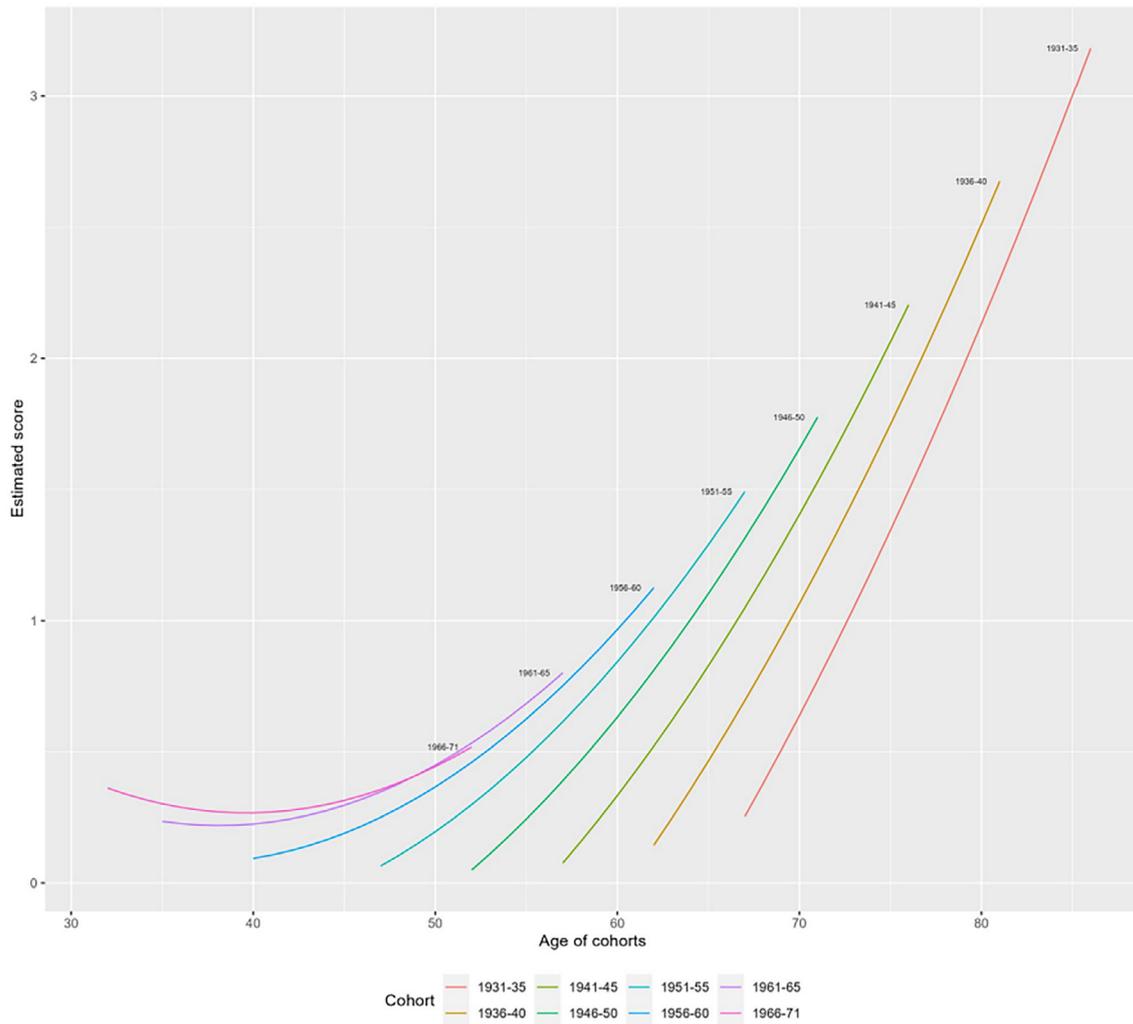


Figura 73: Tassi previsti di multimorbidity per gruppi e per età (basati sulle stime del Modello 1 nella Tabella Supplementare S3).

Fonte: Studio longitudinale scozzese. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Mutazioni del DNA mitocondriale nell'invecchiamento e nel cancro

I meccanismi chiave alla base dell'invecchiamento e dello sviluppo delle neoplasie coincidono in larga misura. Uno degli snodi centrali è la disfunzione dei mitocondri, organelli cellulari responsabili della produzione di energia. Con l'avanzare dell'età, nei tessuti umani si accumulano mutazioni del DNA mitocondriale (mtDNA), e simili alterazioni sono da tempo riscontrate in varie forme di cancro¹⁹⁵.

Quando in una cellula si verifica una mutazione, questa può modificarne il comportamento. Ad esempio, la cellula può iniziare a crescere e a dividersi più rapidamente, sottrarsi al processo di morte programmata, diventare "invisibile" al sistema immunitario o adattarsi meglio alla carenza di ossigeno o nutrienti. Tali cellule acquisiscono un vantaggio rispetto a quelle normali: vivono più a lungo, si dividono più spesso, occupano sempre più spazio e finiscono per prevalere sulle altre. Quando l'accumulo di queste cellule mutanti diventa significativo, può avere inizio la formazione di un tumore.



Figura 74: Danni al DNA che portano a mutazioni

Le cellule post-mitotiche — come i neuroni, i cardiomiociti e alcune cellule muscolari — sono particolarmente vulnerabili ai danni mitocondriali. Queste cellule non si dividono, quindi le mutazioni accumulate con l'età, in particolare nel DNA mitocondriale (Fig. 74), restano nella cellula per tutta la sua vita.

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022).
<https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Le cellule post-mitotiche sono altamente attive: i neuroni consumano molta energia per la trasmissione dei segnali, mentre le cellule del cuore pompano costantemente il sangue. Ciò significa che i mitocondri lavorano al massimo regime, producendo grandi quantità di specie reattive dell'ossigeno (ROS). Queste danneggiano i mitocondri stessi, aumentando ulteriormente la produzione di ROS e innescando un circolo vizioso di distruzione.

Con il tempo, i danni si accumulano e possono attivare processi patologici – come malattie neurodegenerative, cardiovascolari, o tumorali – fino a provocare la morte cellulare.

Questo potrebbe spiegare perché le malattie cardiovascolari, gli infarti, gli ictus e i tumori rappresentano le principali cause di morte a livello globale.

L'effetto tossico delle nanoplastiche sull'organismo umano, drasticamente aumentato negli ultimi 10–20 anni, chiarisce anche perché queste patologie colpiscono sempre più precocemente e hanno assunto dimensioni pandemiche, causando decine di milioni di morti ogni anno. Le nanoplastiche, infatti, compromettono innanzitutto il funzionamento mitocondriale, provocano stress ossidativo e inducono mutazioni nel DNA mitocondriale e nucleare.

Destabilizzazione del sistema ormonale per effetto delle MNP

Nella produzione delle plastiche vengono utilizzate sostanze chimiche che possono interferire con il sistema endocrino e l'equilibrio ormonale. Questi composti sono in grado di imitare, bloccare o modificare l'azione degli ormoni naturali, con possibili conseguenze negative sulla salute.

Nel corpo umano sono state rilevate oltre 3.000 sostanze chimiche provenienti da materiali per imballaggi¹⁹⁶, e circa 100 di esse sono classificate come ad alto rischio per la salute umana.

Bisfenolo

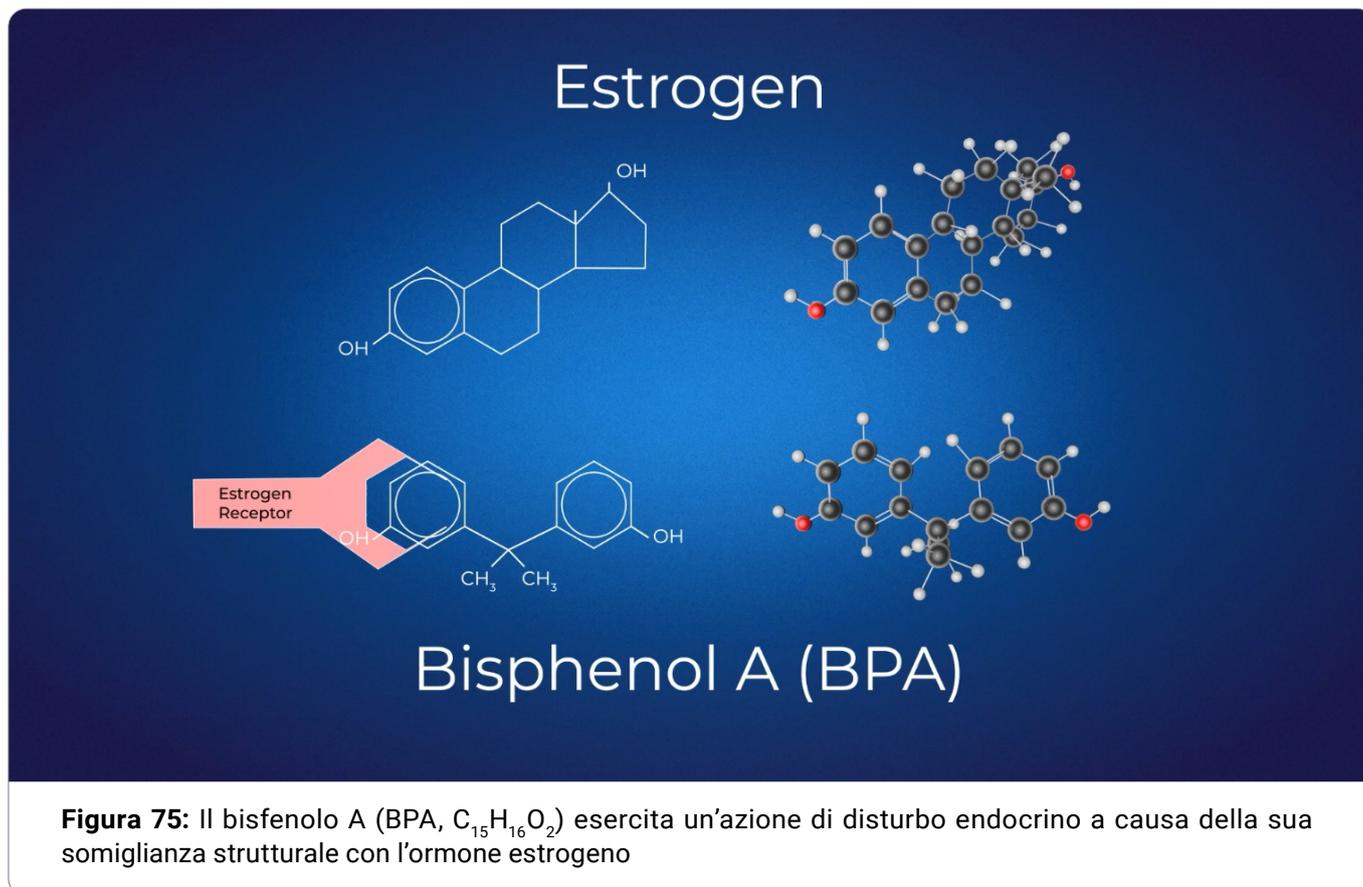
Bisfenolo A (BPA, C₁₅H₁₆O₂) – è un plastificante sintetico ampiamente utilizzato nella produzione di plastica in policarbonato (bottiglie, contenitori), resine epossidiche (rivestimento delle lattine) e dispositivi medici.

Quando viene riscaldato, il BPA migra negli alimenti e nelle bevande.

¹⁹⁶ Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>



“Il BPA agisce come un ormone “fuori controllo”, sostituendo quello naturale che normalmente regola questo processo” – ha dichiarato il professor Ian Rae, esperto di sostanze chimiche ambientali presso la Scuola di Chimica dell’Università di Melbourne ¹⁹⁷ (Fig. 75).



Ogni anno vengono prodotti 8 milioni di tonnellate di bisfenolo A a livello globale, e 100 tonnellate vengono rilasciate nella biosfera¹⁹⁸.

Le ricerche dimostrano che sia il BPA sia il suo sostituto, il bisfenolo S (BPS), alterano la coordinazione tra segnali eccitatori e inibitori nel sistema nervoso¹⁹⁹. Entrambi i composti, in alte concentrazioni, inducono effetti patologici simili (Fig. 76). Esperimenti condotti su cellule cerebrali hanno rivelato che anche basse dosi di BPA/BPS, se somministrate per un mese, modificano la trasmissione chimica ed elettrica dei segnali sinaptici²⁰⁰.

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (accessed 1 May 2025).

¹⁹⁹Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).

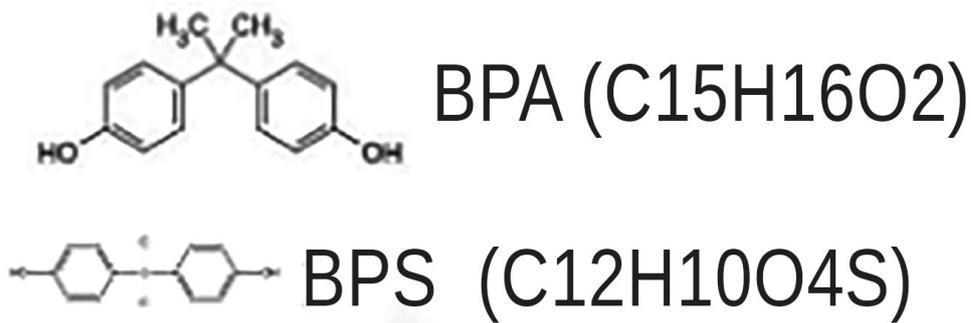


Figura 76: Strutture molecolari e formule chimiche del bisfenolo A (BPA) e del bisfenolo S (BPS)

Nel 2023, uno studio ha rilevato che i bambini con disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD) presentavano livelli più elevati di bisfenolo A e ftalati rispetto ai bambini senza questa condizione²⁰¹.

I ricercatori del *Florey Institute of Neuroscience and Mental Health* di Melbourne hanno scoperto che i ragazzi le cui madri avevano alti livelli di BPA nelle fasi avanzate della gravidanza avevano un rischio sei volte maggiore di sviluppare l'autismo entro gli 11 anni²⁰².



“Il BPA può interferire con lo sviluppo cerebrale del feto maschile, che è regolato dagli ormoni, in diversi modi, inclusa l'inibizione dell'enzima chiave aromatasi, che controlla i neuro-ormoni ed è particolarmente importante per lo sviluppo cerebrale del feto maschio”, ha spiegato la professoressa Ponsonby.

“Sembra essere una parte del puzzle dell'autismo”¹⁹⁷.

L'inibizione dell'enzima aromatasi può spiegare la disparità di genere nell'autismo: 4–5 maschi per ogni femmina²⁰³. Le bambine sviluppano l'autismo più raramente, ma quando ciò accade, tendono a manifestarne una forma più grave²⁰⁴.

Il bisfenolo A (BPA) è coinvolto anche nello sviluppo del diabete di tipo 2, inducendo iperglicemia e insulino-resistenza²⁰⁵. La mortalità globale causata dal diabete è in costante aumento (Fig. 77).

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

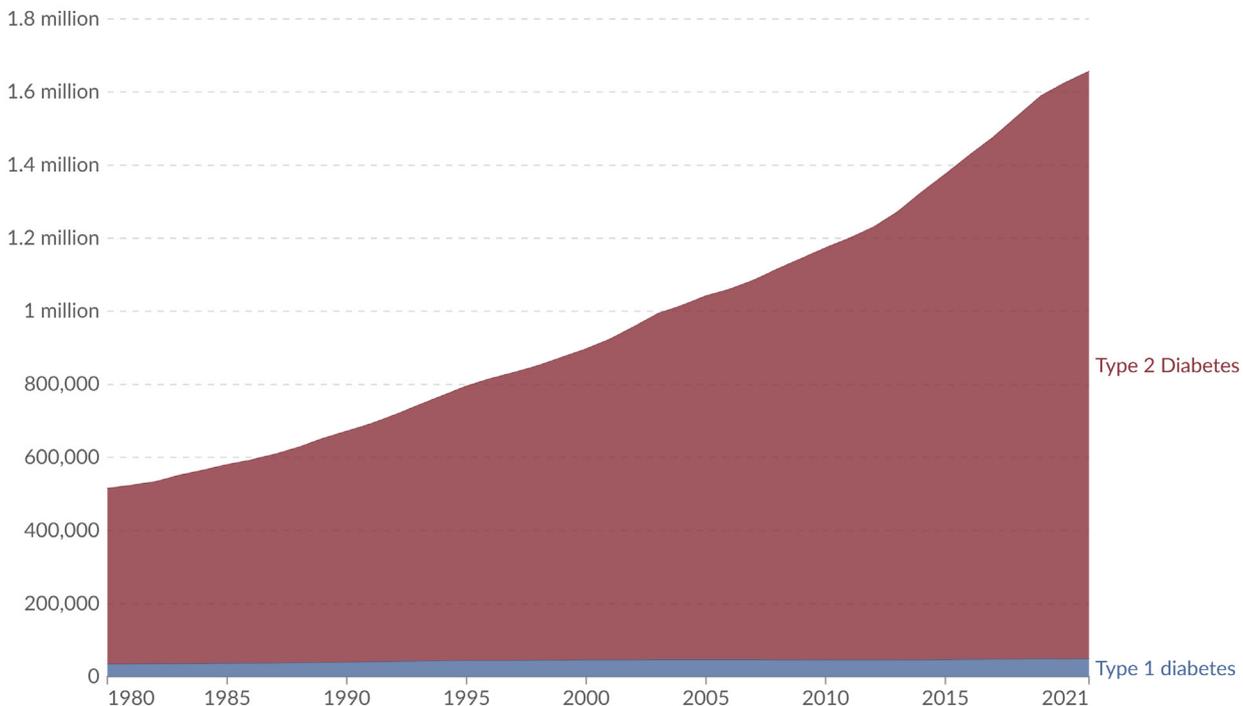
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Figura 77: Mortalità per diabete per tipo, nel mondo, 1980–2021.

<https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

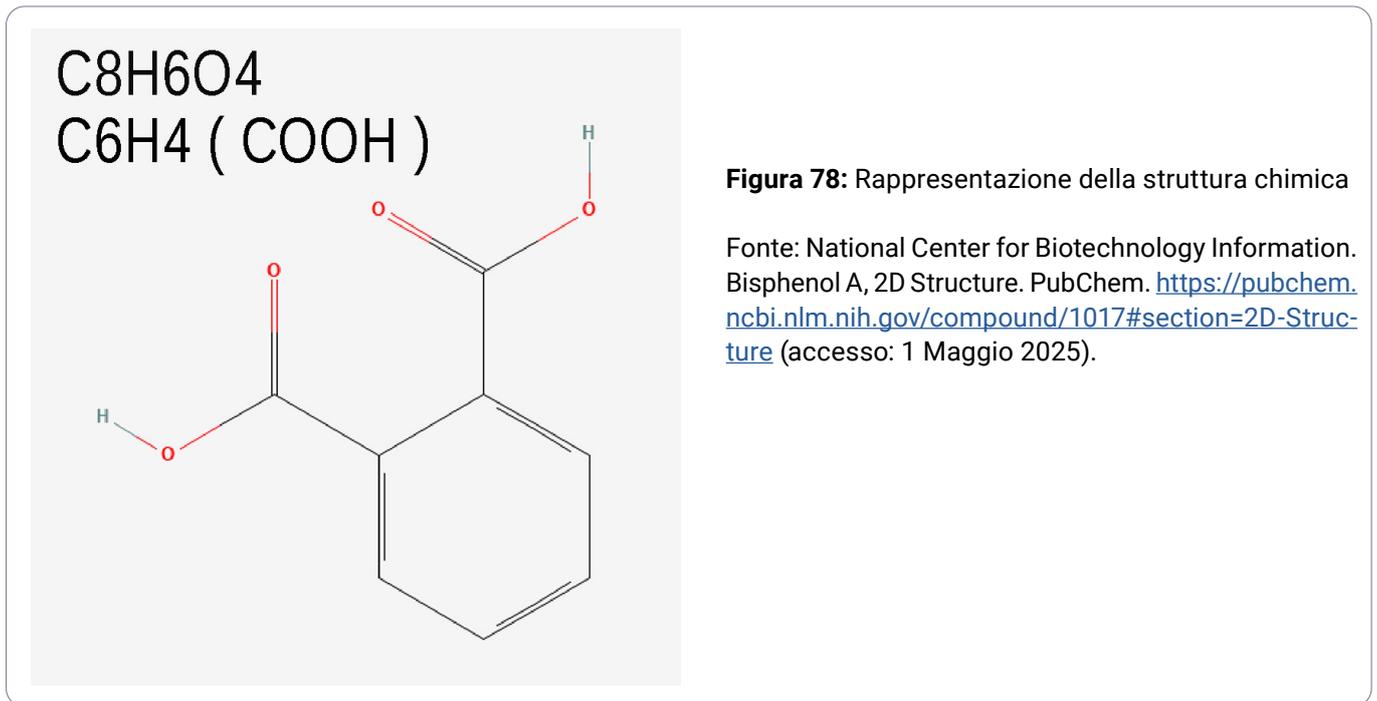
Ftalati

I ftalati sono un gruppo di composti chimici utilizzati principalmente come plasticizzanti, ovvero sostanze che rendono le materie plastiche, come il cloruro di polivinile (PVC), più flessibili, morbide e durevoli.

I ftalati sono ampiamente utilizzati nell'industria e nella vita quotidiana, ma la loro capacità di interferire con il sistema endocrino desta preoccupazione²⁰⁶.

Formula molecolare (Fig. 78). I ftalati non sono ormoni, ma possono inibire l'azione degli androgeni (come il testosterone), un aspetto particolarmente critico per lo sviluppo maschile. La loro esposizione è associata a ridotta motilità degli spermatozoi, anomalie nello sviluppo degli organi genitali (ad esempio, criptorchidismo nei neonati). Negli uomini infertili è stata rilevata una maggiore concentrazione di ftalati.

²⁰⁶Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>



Nelle donne, l'esposizione ai ftalati può provocare alterazioni del ciclo mestruale, aumento del rischio di aborto spontaneo e parto prematuro. L'esposizione fetale durante la gravidanza può portare a ritardi nello sviluppo cerebrale, riduzione del QI e disturbi del comportamento²⁰⁷.

Gli scienziati hanno dimostrato un rapporto causale tra l'esposizione ai ftalati ambientali (sostanze chimiche tossiche presenti nei prodotti di consumo quotidiani) e l'aumento della crescita dei fibromi uterini, i tumori benigni più comuni tra le donne²⁰⁸.

L'esposizione ai ftalati contenuti nella plastica è associata a un aumento del 20% del rischio di cancro infantile, con un triplice incremento dei tumori maligni ossei e un raddoppio dei casi di linfoma²⁰⁹.

Uno studio su oltre 5000 madri statunitensi ha rivelato che i ftalati sono collegati a un rischio maggiore di parto prematuro e basso peso alla nascita²¹⁰. Questi fattori aumentano moderatamente la probabilità di mortalità infantile e possono influenzare il rendimento scolastico, accrescere il rischio di malattie cardiache e diabete, nonché di disturbi mentali come autismo e ADHD²¹¹ nei bambini.

²⁰⁷ Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸ Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹ Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Gli additivi chimici presenti nelle plastiche contribuiscono allo sviluppo dell'obesità²¹². Secondo i dati dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), tra il 1990 e il 2020 il tasso di obesità tra gli adulti è più che raddoppiato a livello globale, mentre tra gli adolescenti è quadruplicato²¹³.

Tendenze dell'obesità tra adulti e giovani negli Stati Uniti (Figg. 79, 80).

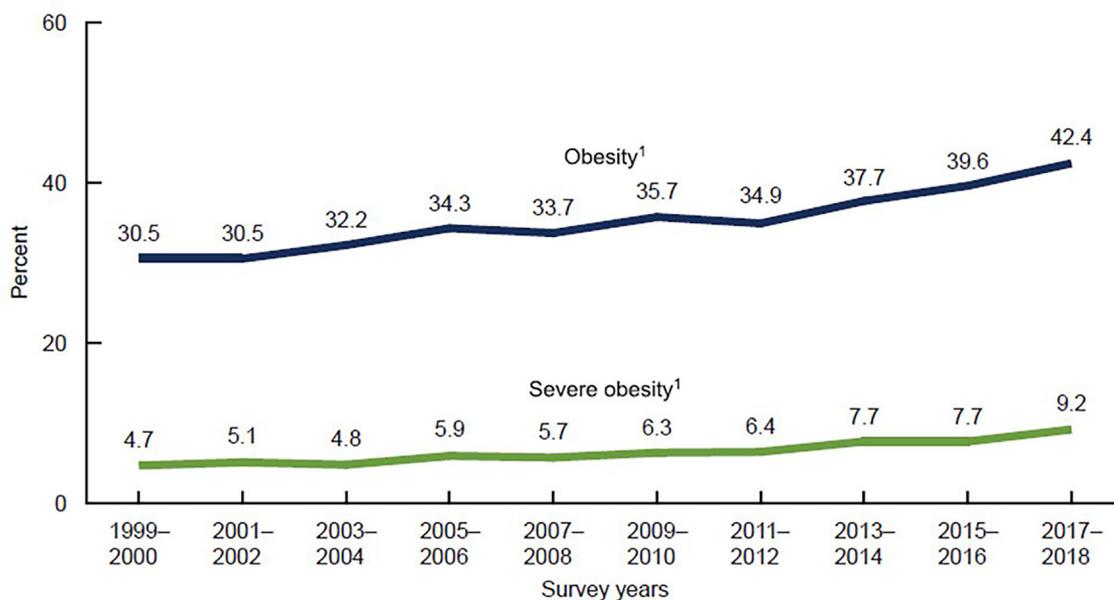


Figura 79: Andamento della prevalenza dell'obesità e dell'obesità grave corretta per età tra gli adulti di 20 anni e oltre: Stati Uniti, dal 1999-2000 al 2017-2018

Fonte: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (accesso: 1 Maggio 2025).

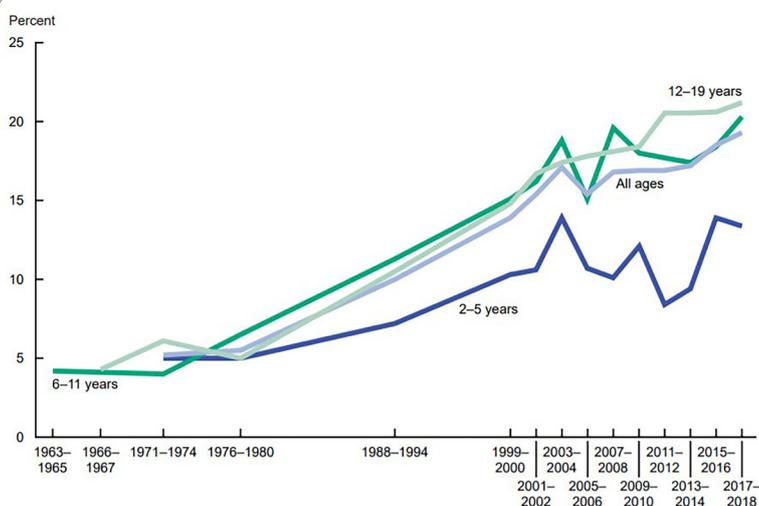


Figura 80: Tendenze dell'obesità tra i bambini e gli adolescenti di età compresa tra i 2 e i 19 anni, per età: Stati Uniti, dal 1963-1965 al 2017-2018

Fonte: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (accesso: 1 Maggio 2025).

²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487-2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (accessed 10 May 2025).

La carica elettrostatica delle nanoplastiche come fattore chiave della loro elevata tossicità per l'organismo umano

Il corpo umano produce costantemente energia bioelettrica. Tutti i processi fisiologici — dall'attività cardiaca e la percezione sensoriale fino alle funzioni cognitive superiori — sono determinati da reazioni chimiche innescate dal movimento delle cariche elettriche. I fluidi intracellulari ed extracellulari che circondano le proteine sono costituiti prevalentemente da acqua, che possiede proprietà elettropolari. Di conseguenza, le interazioni elettrostatiche, comprese le interazioni a idrogeno, i legami ionici e l'impacchettamento idrofobico, svolgono un ruolo fondamentale nella formazione delle strutture delle proteine cellulari, essenziali per il loro corretto funzionamento e, di conseguenza, per il mantenimento della vita dell'organismo²¹⁴.

L'elettricità biologica ha un ruolo diretto nel funzionamento cellulare attraverso l'interazione tra i canali ionici e i potenziali di membrana. Ogni cellula mantiene una differenza di potenziale elettrico tra l'ambiente interno ed esterno — il potenziale di membrana a riposo — che è garantita dalla diversa concentrazione di ioni fra l'interno e l'esterno della cellula (Fig. 81). I principali tipi di canali ionici presenti nel corpo umano includono i canali del sodio, del potassio, del calcio e del cloruro. Questi canali, insieme al potenziale di membrana, sono responsabili delle funzioni chiave nei diversi tipi cellulari (Figg. 82, 83).

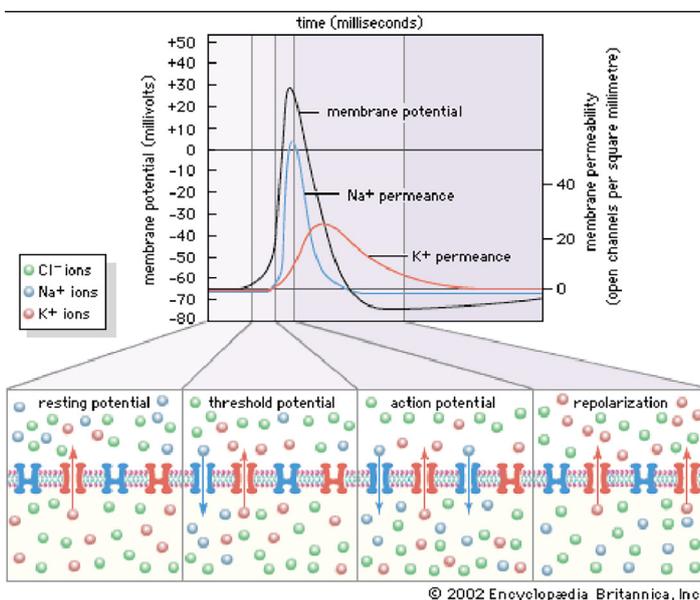


Figure 81: Permeabilità ionica e potenziale d'azione

Variazioni della permeabilità ionica alla base del potenziale d'azione. Il potenziale elettrico è indicato a sinistra in millivolt, mentre la permeabilità ionica è mostrata a destra come numero di canali aperti per millimetro quadrato. Al potenziale di riposo, il potenziale di membrana è vicino a E_K , il potenziale di equilibrio del potassio (K^+). Quando i canali del sodio si aprono, la membrana si depolarizza. Quando la depolarizzazione raggiunge il potenziale soglia, viene innescato un potenziale d'azione. La generazione del potenziale d'azione avvicina il potenziale di membrana a E_{Na} , il potenziale di equilibrio del sodio (Na^+). Quando i canali del sodio si chiudono (riducendo la permeabilità al Na^+) e i canali del potassio si aprono (aumentando la permeabilità al K^+), la membrana si ripolarizza. Fonte: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (accesso: 1 Maggio 2025).

²¹⁴Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (accessed 1 May 2025).

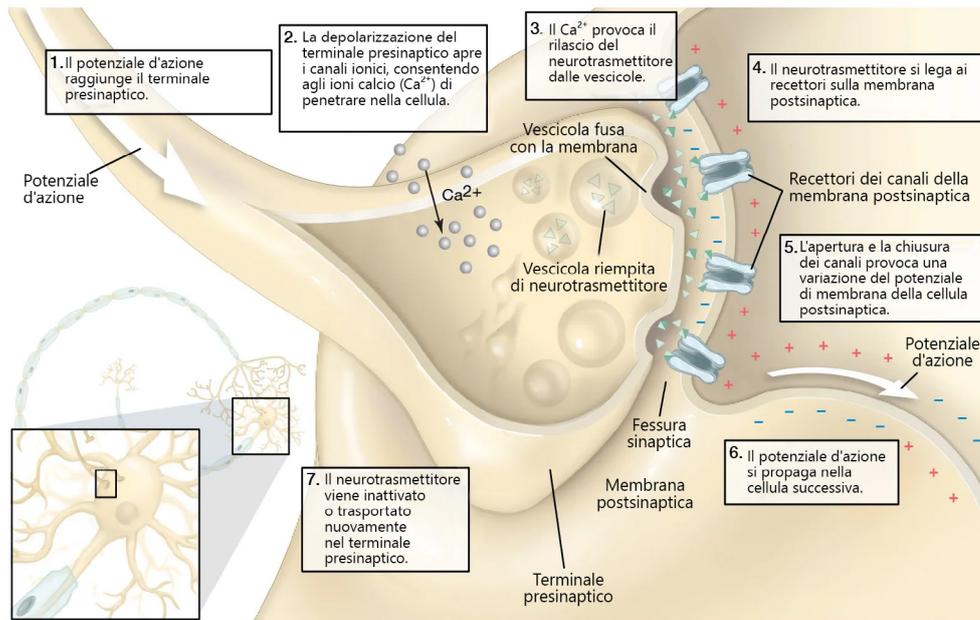


Figura 82: Sinapsi. Trasmissione chimica dell'impulso nervoso nella sinapsi. L'arrivo dell'impulso nervoso al terminale presinaptico stimola il rilascio dei neurotrasmettitori nella fessura sinaptica. Il legame dei neurotrasmettitori con i recettori sulla membrana postsinaptica stimola la rigenerazione del potenziale d'azione nel neurone postsinaptico. Fonte: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (accesso: 1 Maggio 2025).

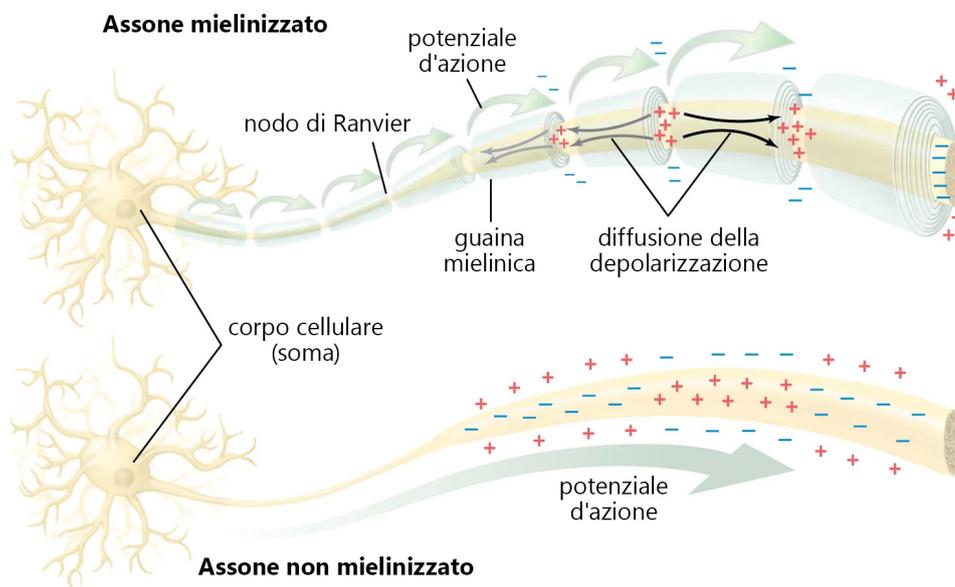


Figura 83: Neurone: conduzione del potenziale d'azione

In un assone mielinizzato, la guaina mielinica impedisce alla corrente locale (frecce nere piccole) di fluire attraverso la membrana. Ciò costringe la corrente a viaggiare lungo la fibra nervosa verso i nodi di Ranvier, non mielinizzati, che possiedono un'elevata concentrazione di canali ionici. Quando stimolati, questi canali ionici propagano il potenziale d'azione (frecce verdi grandi) al nodo successivo. In questo modo, il potenziale d'azione "salta" lungo la fibra, rigenerandosi ad ogni nodo, in un processo chiamato conduzione saltatoria. In un assone non mielinizzato, invece, il potenziale d'azione si propaga lungo tutta la membrana, attenuandosi mentre diffonde nuovamente nella zona depolarizzata d'origine.

Fonte: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (accesso: 1 Maggio 2025).

L'elettricità biologica che si genera nel corpo umano (ad esempio, durante la contrazione muscolare o la trasmissione degli impulsi nervosi) non è dannosa, poiché rappresenta una componente naturale dei processi fisiologici. Tuttavia, le micro- e nanoplastiche introdotte nell'organismo portano con sé una carica elettrostatica che sono in grado di trattenere a lungo. È proprio questa carica che può interferire con i processi biologici e risultare dannosa per la salute.

La nanoplastica è costituita da particelle di plastica di dimensioni inferiori a 1 micrometro. Grazie alla loro struttura unica, queste particelle sono capaci di accumulare cariche elettrostatiche, diventando oggetto di crescente interesse scientifico.

Quando le particelle di micro- e nanoplastica si elettrizzano attraverso **l'effetto triboelettrico** (cioè a seguito del contatto o dello sfregamento con altre superfici), esse acquisiscono una carica positiva o negativa. Questa carica influisce sul loro comportamento sia nell'organismo che nell'ambiente.

La struttura delle particelle di nanoplastica le rende capaci di adsorbire sostanze inquinanti, ioni e molecole organiche, potenziando il loro ruolo come vettori di tossine nei sistemi biologici ed ecologici^{215, 216}.

La composizione chimica della nanoplastica gioca un ruolo cruciale nella formazione delle sue proprietà elettrostatiche. Polimeri comuni come il polistirene (PS), il polietilene (PE) o il polipropilene (PP) possono contenere gruppi funzionali – come i carbossilici (-COOH), i solfati (-SO₃H) o gli amminici (-NH₂) – che si ionizzano a seconda delle condizioni ambientali. Ad esempio, uno studio pubblicato sulla rivista Langmuir ha dimostrato che le nanoparticelle di polistirene con gruppi carbossilici (PS-COOH) mostrano un potenziale zeta negativo, mentre quelle con gruppi amminici (PS-NH₂) presentano un potenziale positivo, confermando l'influenza diretta delle strutture funzionali sulla carica delle nanoplastiche²¹⁷.

L'accumulo di cariche non dipende solo dalla chimica del materiale. Durante la produzione o in seguito a sollecitazioni meccaniche (come lo sfregamento), la nanoplastica può caricarsi per effetto di elettrizzazione da contatto. Uno studio condotto su contenitori in plastica ha rivelato che il polistirene può accumulare cariche fino a -10 kV, capaci di persistere a lungo e attrarre particelle con carica opposta, come polveri o spore batteriche²¹⁸. Inoltre, le variazioni nella struttura del polimero, in particolare la presenza di gruppi polari, possono determinare la polarità della carica in base al pH dell'ambiente. In ambiente acido, i gruppi amminici conferiscono una carica positiva alle particelle, mentre in ambiente basico prevalgono le cariche negative dovute ai gruppi carbossilici. Questo comportamento è stato osservato anche in studi condotti su piante di *Arabidopsis thaliana*²¹⁹.

²¹⁵Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Pertanto, la comprensione della struttura della nanoplastica e delle sue caratteristiche elettrostatiche non solo ne svela la natura fisica, ma rappresenta anche la base per analizzare come queste particelle possano influenzare gli ecosistemi e gli organismi, come verrà esaminato più avanti nel contesto dei loro meccanismi patogenici.

Grazie alla sua elevata costante dielettrica (cioè la capacità di trattenere cariche elettriche), la nanoplastica che penetra nell'organismo continua ad accumulare nuove cariche dannose, le quali normalmente verrebbero neutralizzate o disperse dai sistemi conduttivi naturali del corpo. Questo fenomeno interferisce con i processi di autoregolazione dell'organismo, generando un rischio per le strutture cellulari a causa della prolungata esposizione a campi elettrostatici anomali.

Per valutare appieno l'entità della minaccia rappresentata dalla nanoplastica introdotta nell'organismo, occorre tornare ai sistemi bioelettrici del corpo umano: meccanismi sofisticati in cui gli impulsi elettrici costituiscono il linguaggio della comunicazione intracellulare.

Ogni movimento e ogni pensiero sono resi possibili da segnali invisibili che trasmettono comandi alle cellule. I neuroni comunicano attraverso impulsi elettrici, i muscoli si contraggono in risposta a questi segnali, e il cervello elabora le informazioni mediante una combinazione di processi bioelettrici e chimici. Persino la respirazione, i riflessi, la vista e l'udito dipendono da minuscole scariche elettriche che regolano il funzionamento degli organi.

Queste correnti invisibili, affinate da milioni di anni di evoluzione, trasformano gli impulsi bioelettrici nel linguaggio stesso della vita. Tuttavia, tale armonia viene disturbata da elementi estranei – le microscopiche particelle di nanoplastica.

Una volta all'interno dell'organismo, le nanoplastiche sono in grado di adsorbire ioni e creare zone a conducibilità elettrica anomala, interferendo con l'equilibrio ionico naturale e con i meccanismi di neutralizzazione locale delle cariche, regolati dai fluidi intercellulari.

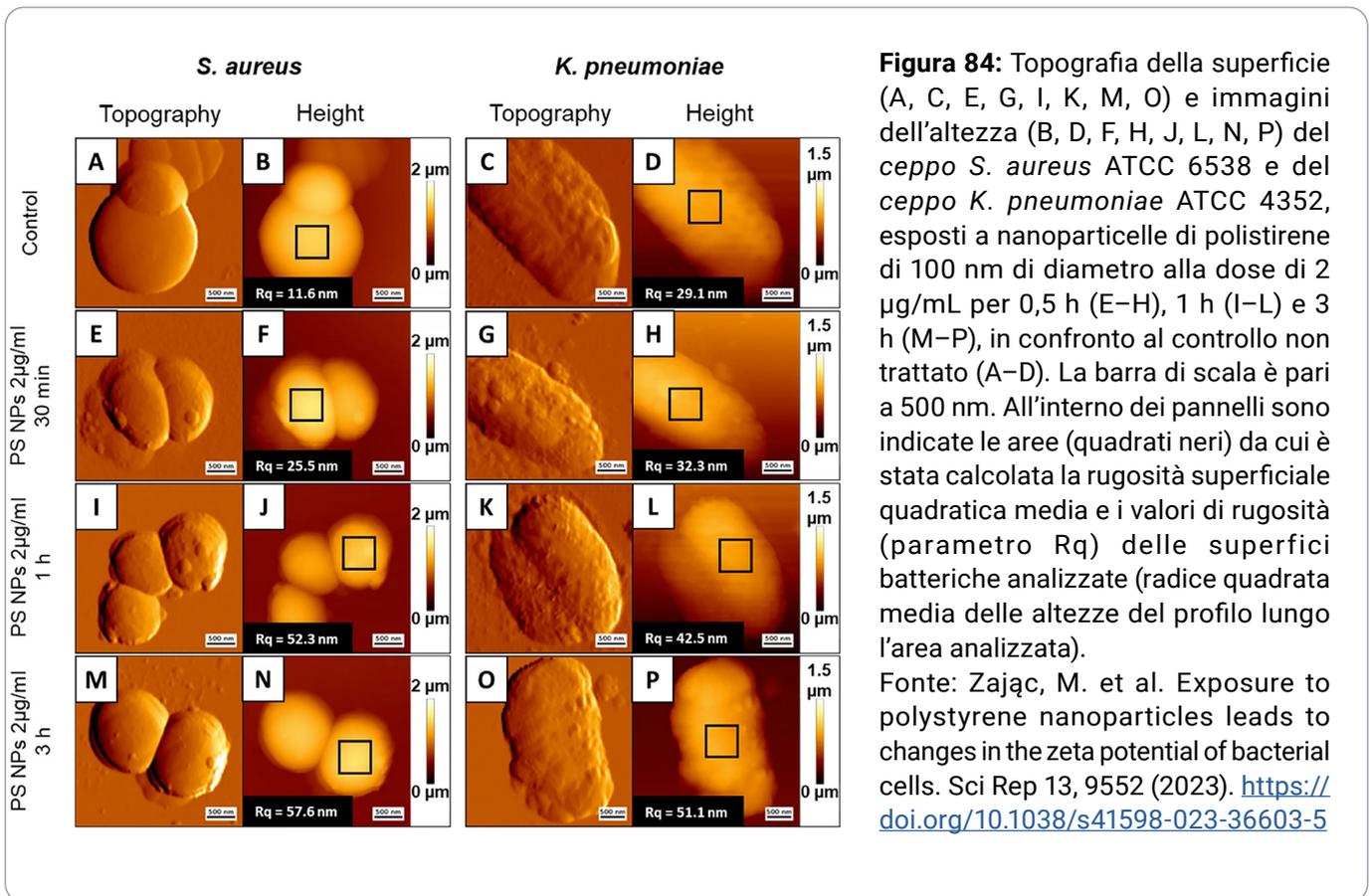
L'adsorbimento di ioni sulla superficie delle nanoplastiche porta all'accumulo di cariche elettrostatiche, un fenomeno che può innescare stress ossidativo attraverso la generazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) e alterare la comunicazione elettrochimica tra le cellule, compromettendo così le loro funzioni vitali.

Tutto ciò è stato confermato da uno studio²²⁰ in cui particelle di polistirene da 100 nm, pur in presenza di ioni sodio (Na⁺), mantenevano la stabilità e si adsorbevano sulla superficie di batteri, nonostante la carica negativa di questi ultimi. Ad esempio, esperimenti con *Staphylococcus aureus* e *Klebsiella pneumoniae* hanno dimostrato che la nanoplastica modifica significativamente il potenziale zeta delle cellule batteriche, rendendo la loro superficie più negativa e compromettendo l'equilibrio elettrostatico naturale.

²²⁰Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Le particelle di nanoplastica cariche possono influenzare i campi elettrici intorno alle cellule, distorcendo la trasmissione dei segnali. È come un'interferenza nelle comunicazioni radio: invece di comandi chiari si ha un rumore caotico che ostacola lo scambio di informazioni tra le cellule. Sebbene l'impatto diretto sui neuroni non sia stato studiato in modo specifico, e le conclusioni sull'organismo umano rimangano preliminari e richiedano ulteriori ricerche, la modifica della carica superficiale dei batteri osservata suggerisce che la nanoplastica può alterare le proprietà elettrochimiche delle membrane cellulari. Ad esempio, a concentrazioni superiori a 64 µg/mm, le particelle di polistirene provocavano importanti variazioni del potenziale zeta, potenzialmente in grado di compromettere il funzionamento di canali ionici o recettori fondamentali per la comunicazione intercellulare.

Inoltre, la capacità delle nanoparticelle di "attaccarsi" alle superfici, documentata tramite immagini di microscopia a forza atomica nello studio citato (Fig. 84), solleva preoccupazioni riguardo agli effetti a lungo termine. Una volta depositate nei tessuti, queste particelle possono formare anomalie elettrostatiche persistenti, che gli ioni sodio e potassio non riescono a neutralizzare completamente, specialmente se la nanoplastica penetra all'interno delle cellule, superando le difese offerte dai fluidi interstiziali.



Un altro pericolo legato alla carica patogena accumulata sulle nanoplastiche consiste nella possibilità che esse generino disturbi elettrici attorno alle cellule immunitarie. Questo è stato confermato da uno studio²²¹ in cui è stato dimostrato che le nanoparticelle di polistirene caricate positivamente (PS-NH₂) riducono significativamente la vitalità delle cellule immunitarie e la stabilità delle membrane lisosomiali rispetto a quelle caricate negativamente (PS-COOH), evidenziando l'importanza del tipo di carica nell'interazione con le cellule.

Le particelle di MNP elettrostaticamente cariche presentano una maggiore capacità di adsorbirsi alle membrane cellulari, ai tessuti e ad altre superfici biologiche, aderendo letteralmente a esse — il che aumenta il rischio di danni meccanici e chimici alle cellule, compromettendone struttura e funzionalità.

La carica elettrostatica può facilitare la penetrazione delle MNP attraverso barriere biologiche complesse come la barriera ematoencefalica o la barriera ematoplacentare. Di conseguenza, le tossine possono raggiungere il cervello o il feto, aumentando il rischio di effetti neurotossici e alterazioni dello sviluppo intrauterino.

L'effetto elettrostatico delle MNP può interferire con la struttura e la funzionalità delle proteine, dei canali ionici e dei recettori cellulari, causando disfunzioni nella trasmissione dei segnali tra cellule, inducendo stress ossidativo e indebolendo le difese immunitarie dell'organismo.

Tali alterazioni possono attivare una cascata di processi patologici, tra cui infiammazioni croniche, disturbi neurodegenerativi, sviluppo di tumori maligni e disfunzioni sistemiche, aumentando significativamente il rischio di gravi malattie.

Pertanto, l'accumulo di carica elettrostatica sulla nanoplastica non è solo un fenomeno fisico, ma un meccanismo che amplifica la pericolosità delle MNP, soprattutto considerando che la carica può persistere a lungo e che le particelle di micro- e nanoplastica difficilmente vengono eliminate dall'organismo.

Lo studio di questo fenomeno è oggi di fondamentale importanza, poiché consente di comprendere come le cariche elettriche patogene accumulate sulla nanoplastica possano costituire una minaccia macroscopica per la sopravvivenza stessa della specie umana.

Fino a poco tempo fa si riteneva che la base dell'energetica cellulare — il trasporto dei protoni — fosse determinata esclusivamente dalla chimica: si pensava che i protoni “saltassero” semplicemente da una molecola d'acqua all'altra. Tuttavia, un nuovo studio pubblicato su *Proceedings of the National Academy of Sciences* cambia radicalmente questa concezione. È emerso infatti che il trasporto dei protoni negli organismi viventi dipende non solo dalle proprietà chimiche, ma anche da quelle quantistiche — in particolare dallo spin degli elettroni e dalla chiralità delle molecole biologiche (Fig. 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

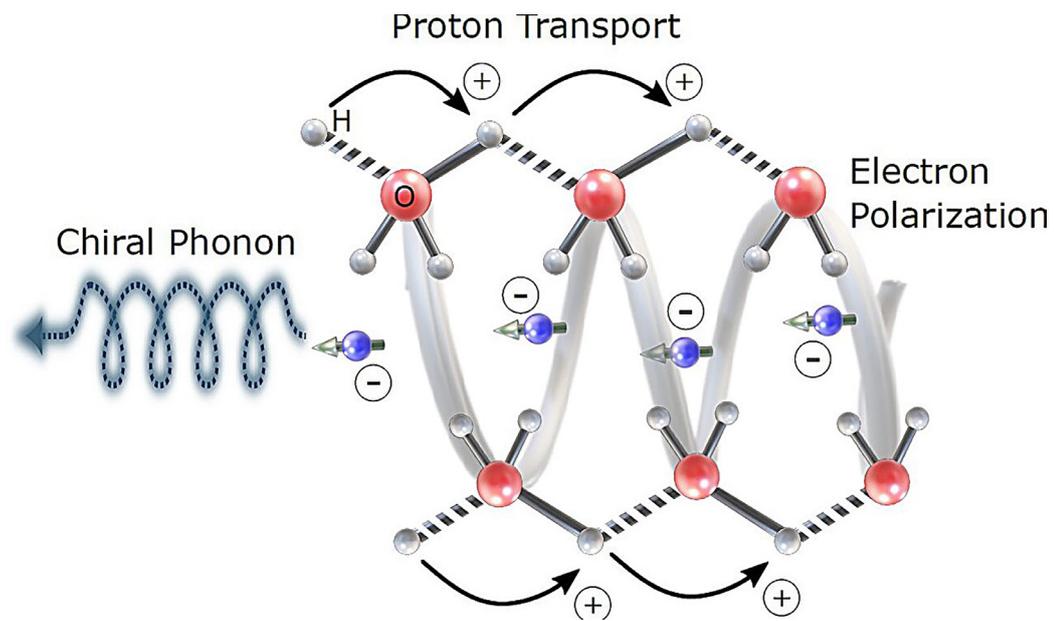


Figura 85: Modello schematico semplificato. Il trasporto dei protoni è accompagnato da una polarizzazione elettronica in ambienti chirali. A causa dell'effetto CISS, questa polarizzazione elettronica genera una polarizzazione di spin. La conservazione del momento angolare genera fononi chirali, che potenziano il trasporto dei protoni.

Crediti: Goren, N. et al. Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Uno studio condotto da ricercatori israeliani dell'Università Ebraica ha dimostrato che, in proteine come il lisozima, il trasporto dei protoni accelera notevolmente quando vengono introdotti elettroni con lo "spin corretto" – e, al contrario, rallenta con lo spin opposto. Questo avviene perché, nei sistemi viventi, protoni ed elettroni si comportano come un meccanismo quantistico coordinato. Anche minimi cambiamenti nell'orientamento dello spin possono influenzare processi fondamentali – produzione di energia, metabolismo e regolazione intracellulare.



Come ha osservato il responsabile dello studio, Naama Goren: *"I nostri risultati mostrano che il modo in cui i protoni si muovono nei sistemi biologici non riguarda solo la chimica, ma anche la fisica quantistica"*. Ciò significa che anche lievi disturbi nella carica elettrica o nell'orientamento magnetico possono influenzare il metabolismo cellulare, la produzione di energia e lo stato generale di salute²²².

²²²Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (accessed 10 May 2025).

Impatto sistemico delle MNP sugli organi e sui sistemi funzionali dell'uomo

Dopo essere entrate nell'organismo umano, le particelle di MNP si diffondono attraverso il flusso sanguigno raggiungendo tutti gli organi e tessuti (Fig. 86). Tracce di particelle di plastica sono state rilevate nel sangue umano, nei tessuti cardiaci e ossei, nel cervello, nella placenta, nei polmoni, nel fegato e in altri organi²²³.

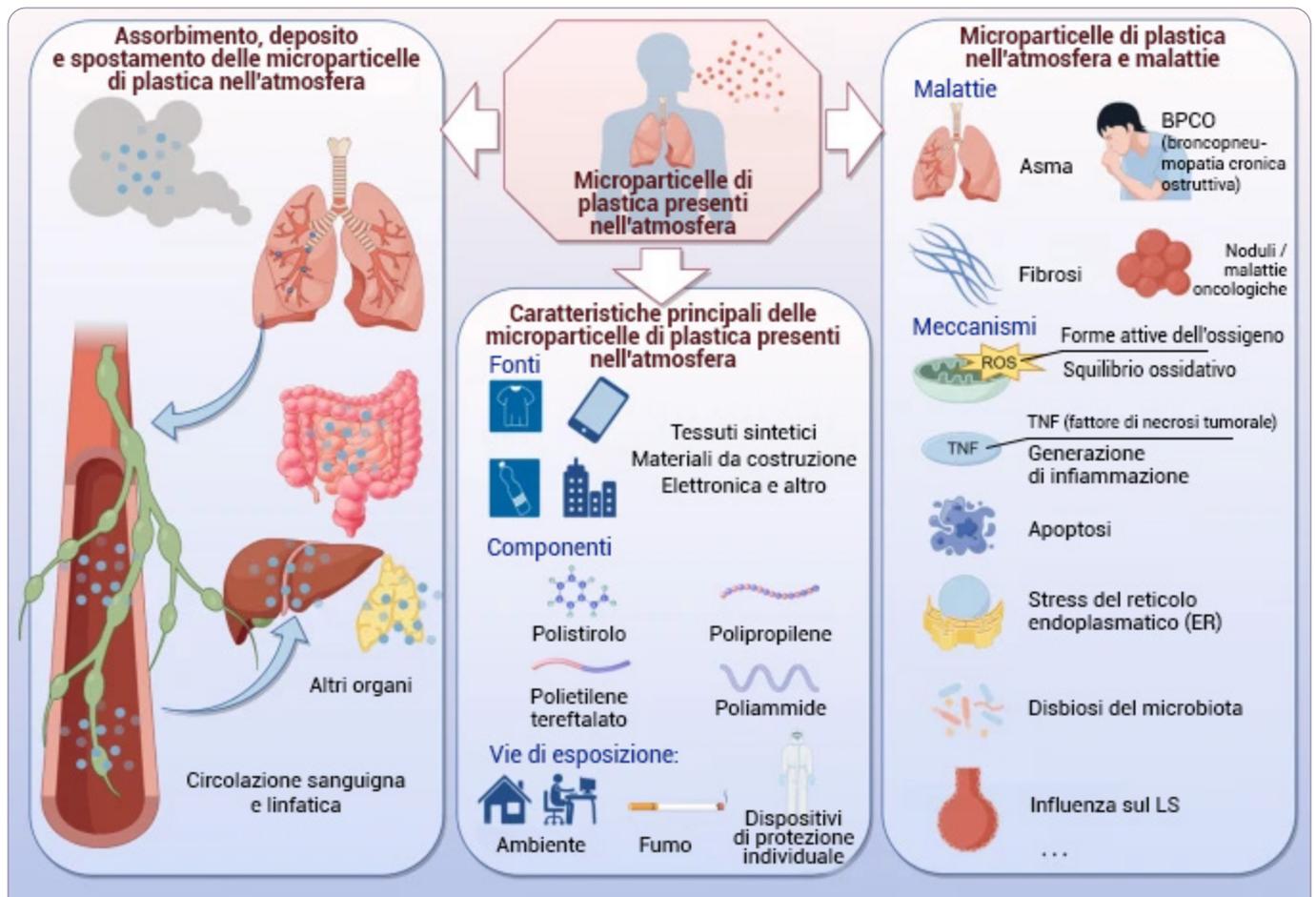


Figura 86: Inalazione di MNP e i loro effetti tossici sul corpo umano

Fonte: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Meccanismi di danno all'apparato respiratorio per inalazione di MNP

Una delle principali vie attraverso cui le MNP entrano nel corpo umano è tramite l'inalazione. I risultati di uno studio condotto da ricercatori cinesi²²⁴ hanno mostrato che, in sole due ore di attività all'aperto, un adulto inala circa 106.000 particelle di microplastica, mentre un bambino circa 73.700.

Le particelle di dimensioni inferiori a 0,1 µm, grazie alle loro proprietà termodinamiche, possono depositarsi efficacemente lungo tutto il tratto respiratorio (dalle vie aeree superiori fino agli alveoli)²²⁵.

I polmoni presentano una vasta superficie alveolare (circa 150 m²) e una barriera tissutale sottile (meno di 1 µm), il che consente alle NP di penetrare facilmente nel flusso sanguigno (Fig. 87).

In 13 su 20 campioni di tessuto polmonare umano è stata rilevata la presenza di MP²²⁶.

Secondo uno studio, in tutti i campioni di espettorato di 22 pazienti affetti da malattie polmonari è stata rilevata la presenza di microplastiche²²⁸: da 18,75 a 91,75 particelle per 10 ml²²⁹.

È stata inoltre riscontrata un'associazione tra rinite allergica e microplastiche²³⁰.

Le MNP sono strettamente legate all'insorgenza e allo sviluppo di diverse malattie respiratorie, tra cui asma, fibrosi polmonare, broncopneumopatia cronica ostruttiva e tumori²²⁹.

Uno studio ha mostrato che il 97% dei campioni di tumori maligni polmonari contenevano fibre di microplastica²³¹.

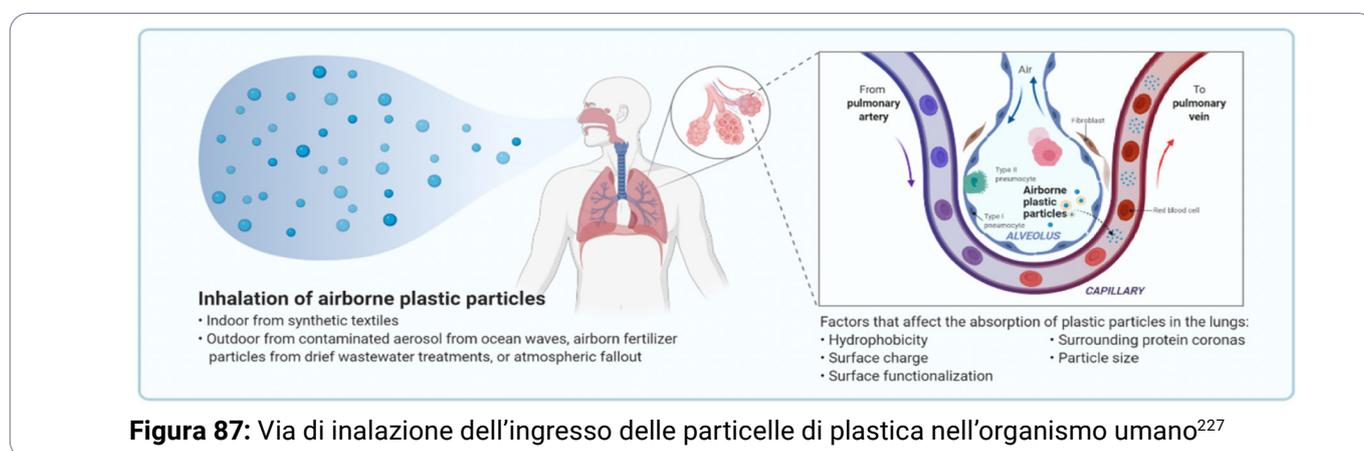


Figura 87: Via di inalazione dell'ingresso delle particelle di plastica nell'organismo umano²²⁷

²²⁴Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

²³⁰Tuna, A., Taş, B. M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

I possibili meccanismi includono lo stress ossidativo, l'infiammazione e lo squilibrio del microbiota polmonare. Le MNP possono contribuire allo sviluppo di infiammazioni polmonari²³².

Secondo un rapporto dell'OMS, attualmente le infezioni delle vie respiratorie inferiori rappresentano la malattia infettiva più letale al mondo e occupano il quinto posto tra tutte le cause di morte²³³.

Inoltre, il numero di decessi per cancro alla trachea, ai bronchi e ai polmoni è aumentato, collocandosi al sesto posto tra le principali cause di mortalità.

Azione neurotossica delle MNP: danni al sistema nervoso centrale e periferico

Le ricerche confermano che i disturbi neurologici rappresentano la principale causa di disabilità fisica e cognitiva a livello globale, colpendo attualmente circa 3,4 miliardi di persone. Il numero assoluto di pazienti è aumentato significativamente negli ultimi 30 anni²³⁴. Inoltre, si prevede che il peso delle malattie neurodegenerative croniche raddoppierà almeno nei prossimi due decenni.

Secondo i dati dell'OMS, una persona su otto nel mondo soffre di un disturbo mentale²³⁵.

L'incidenza del disturbo bipolare tra adolescenti e giovani adulti è aumentata a livello globale, passando da 79,21 ogni 100.000 abitanti nel 1990 a 84,97 ogni 100.000 abitanti nel 2019²³⁶. Negli ultimi tre decenni si è registrato un aumento dei casi sia tra gli uomini sia tra le donne (Fig. 88).

Gli studi mostrano un aumento dei disturbi mentali tra bambini e adolescenti negli ultimi anni. Secondo il Rapporto del 2022 sulla qualità nazionale e le disparità nell'assistenza sanitaria, tra il 2016 e il 2019 il numero di accessi ai pronto soccorso per motivi legati alla salute mentale tra i bambini di età compresa tra 0 e 17 anni è aumentato da 784,1 a 869,3 su 100.000. Inoltre, dal 2008 al 2020, il tasso di mortalità per suicidio tra le persone dai 12 anni in su è aumentato del 16%, passando da 14,0 a 16,3 su 100.000²³⁷.

Secondo un rapporto dell'assicurazione sanitaria *Blue Cross Blue Shield*, dal 2013 il numero di diagnosi di depressione clinica, nota anche come depressione maggiore, è aumentato del 33%. Alcune fonti iniziano già a prevedere che, entro il 2030, la depressione diventerà la principale causa di perdita di longevità o di vita. Il rapporto evidenzia che le donne e gli uomini affetti da depressione possono perdere in media fino a 9,6 anni di vita in buona salute²³⁸.

²³²Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

²³⁸Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>

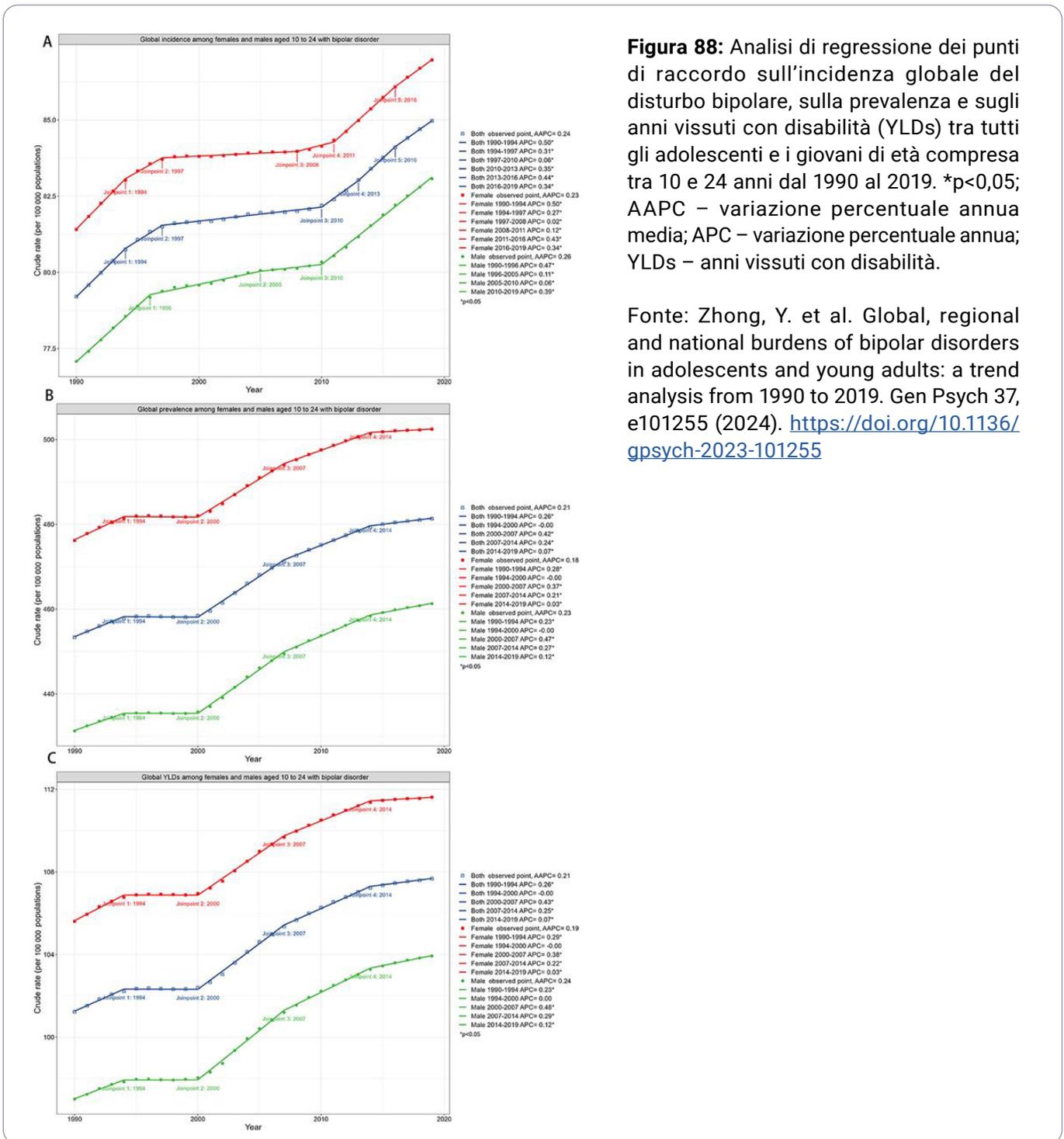


Figura 88: Analisi di regressione dei punti di raccordo sull'incidenza globale del disturbo bipolare, sulla prevalenza e sugli anni vissuti con disabilità (YLDs) tra tutti gli adolescenti e i giovani di età compresa tra 10 e 24 anni dal 1990 al 2019. *p<0,05; AAPC – variazione percentuale annua media; APC – variazione percentuale annua; YLDs – anni vissuti con disabilità.

Fonte: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Negli ultimi decenni si è registrato un costante aumento delle diagnosi di disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD). I sondaggi nazionali negli Stati Uniti mostrano una crescita della prevalenza dal 6,1% al 10,2% nel periodo di 20 anni dal 1997 al 2016²³⁹ (Fig. 89).

Una revisione del 2023, che ha coinvolto 31 Paesi, ha rilevato un calo nei livelli di alfabetizzazione e nelle competenze matematiche²⁴⁰ (Fig. 90).

²³⁵Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>
²³⁶Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (accessed 1 May 2025).

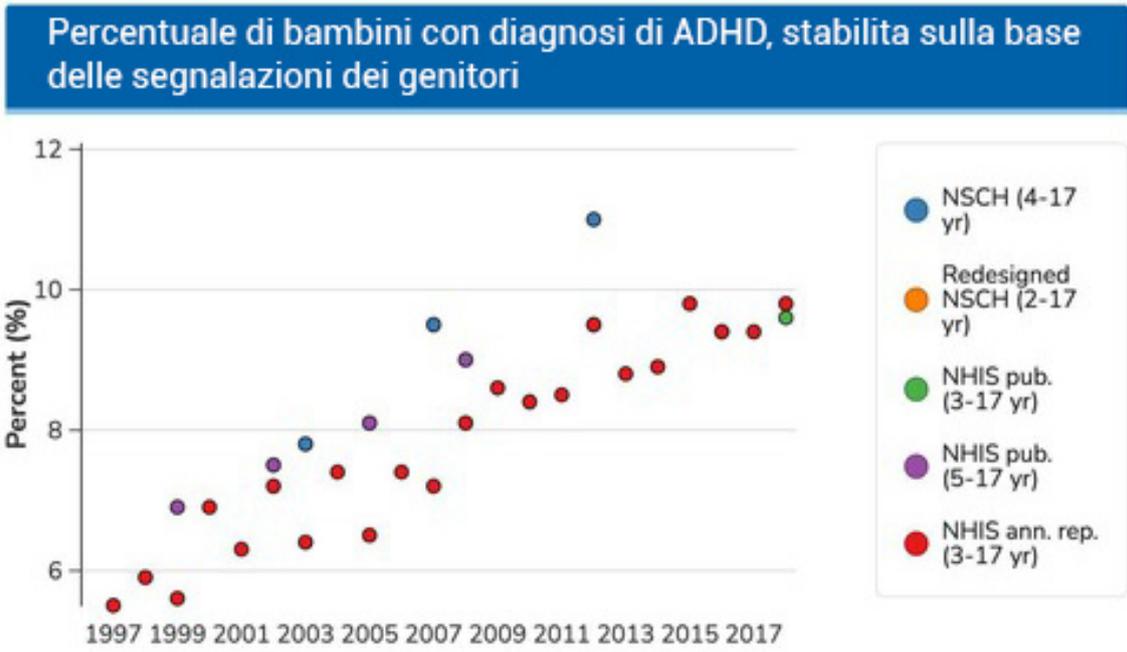


Figura 89: Grafico dell'aumento della prevalenza dell'ADHD dal 1997 al 2016.
Fonte: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

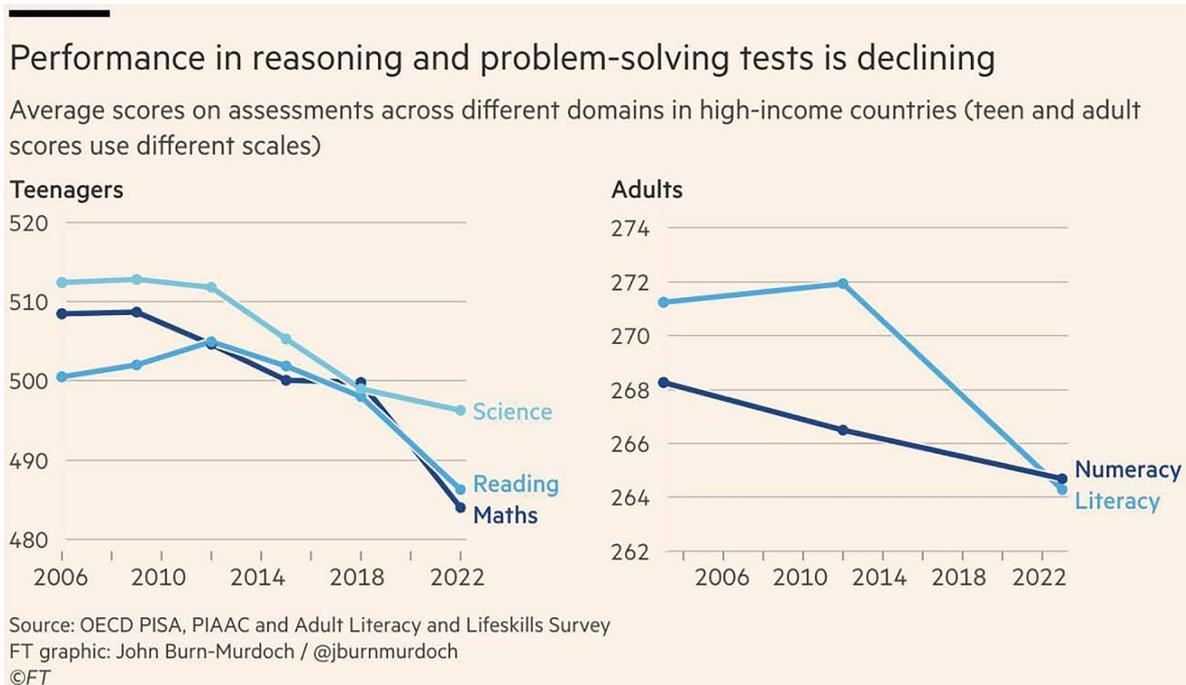


Figura 90: Le prestazioni nei test di logica e risoluzione dei problemi sono in calo.
Fonte: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Le tendenze crescenti delle malattie neurodegenerative e neuropsichiatriche mostrano una chiara correlazione con l'aumento della presenza di plastica nell'ambiente (Figg. 96-97).

Le concentrazioni più elevate di nanoplastiche sono state rilevate nei tessuti cerebrali umani — da 7 a 30 volte superiori rispetto a quelle riscontrate nel fegato o nei reni — e i campioni di tessuto cerebrale di persone con diagnosi di demenza hanno mostrato una presenza ancora maggiore di MNP, fino a 10 volte superiore rispetto al tessuto cerebrale di soggetti senza demenza²⁴¹ (Fig. 91).

Le particelle predominanti nel cervello si sono rivelate minuscoli frammenti o scaglie di polietilene, una delle plastiche più comunemente utilizzate negli imballaggi.

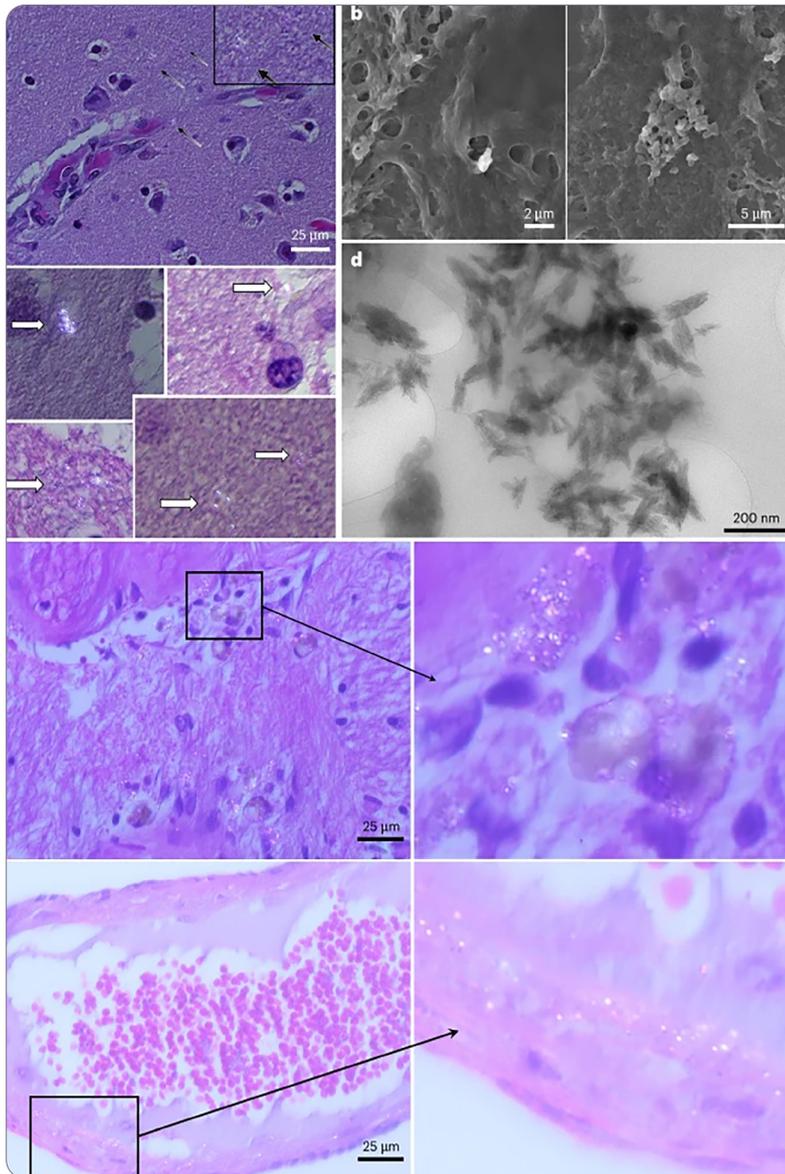


Figura 91: La microscopia a onda polarizzata (a, le frecce nere indicano inclusioni refrattarie; l'inserto mostra un ingrandimento digitale per maggiore chiarezza) e la SEM (b, i campi visivi sono larghi 15,4 e 20,1 µm) sono state utilizzate per esaminare sezioni cerebrali di campioni post mortem. (c), non sono state osservate grandi inclusioni (>1 µm); altri esempi di inclusioni refrattarie submicrometriche (frecce bianche) tramite microscopia a onda polarizzata. A causa dei limiti di risoluzione di queste tecniche, è stata impiegata la TEM per analizzare estratti di granuli utilizzati per la Py-GC/MS. (d), le immagini TEM mostrano numerose particelle solide sotto forma di frammenti o scaglie dopo la dispersione, con dimensioni generalmente <200 nm di lunghezza e <40 nm di larghezza. (e) ed (f), la microscopia a onda polarizzata rivela un numero significativamente maggiore di inclusioni refrattarie nei casi di demenza, soprattutto in aree con accumulo di cellule immunitarie (e) e lungo le pareti vascolari (f). Tutte le immagini sono state ottenute da un sottogruppo ridotto di partecipanti (n = 10 per cervello normale; n = 3 per casi di demenza) per fornire prove visive a supporto della chimica analitica.

Fonte: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

Nuovi dati confermano che, dal 2016 al 2024, cioè in soli otto anni, il contenuto di plastica nel cervello umano è aumentato del 50%²⁴¹.



“Nelle persone sane di età compresa tra i 45 e i 50 anni abbiamo riscontrato in media 4.900 microgrammi di particelle plastiche per grammo di tessuto cerebrale. (...) Un intero cucchiaino di plastica. È all'incirca questa la quantità di microplastica presente nel nostro cervello. Ciò significa che oggi il nostro cervello è composto per il 99,5% da materia cerebrale e per il resto da plastica”, ha affermato il ricercatore principale Matthew Campen dell'Università del New Mexico²⁴².

Considerando l'aumento delle particelle di plastica nell'atmosfera, nell'acqua e negli alimenti, si può affermare con certezza che la quantità di nanoplastica nel nostro organismo continuerà a crescere. Se questa tendenza prosegue, entro quattro anni il livello di plastica nel cervello aumenterà di un ulteriore 50%.

Le MNP penetrano nel cervello attraverso il sangue, superando la barriera ematoencefalica (BEE), e tramite l'inalazione attraverso i nervi olfattivi (Fig. 92).

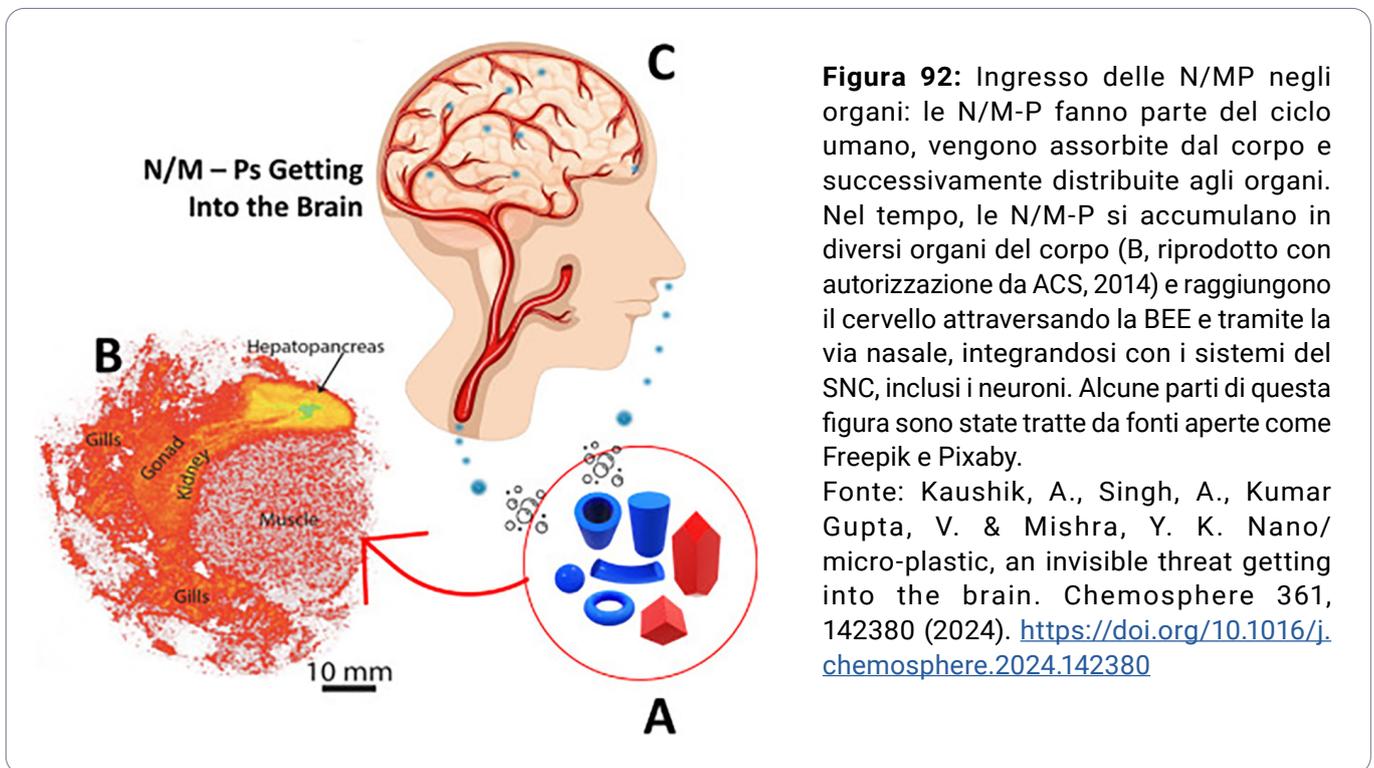


Figura 92: Ingresso delle N/MP negli organi: le N/M-P fanno parte del ciclo umano, vengono assorbite dal corpo e successivamente distribuite agli organi. Nel tempo, le N/M-P si accumulano in diversi organi del corpo (B, riprodotto con autorizzazione da ACS, 2014) e raggiungono il cervello attraversando la BEE e tramite la via nasale, integrandosi con i sistemi del SNC, inclusi i neuroni. Alcune parti di questa figura sono state tratte da fonti aperte come Freepik e Pixaby.

Fonte: Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025)

<https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).

La barriera ematoencefalica è un sistema fisiologico specializzato che regola il passaggio delle sostanze dal flusso sanguigno al sistema nervoso centrale (Fig. 93). Essa consente selettivamente il passaggio di nutrienti e ossigeno, bloccando l'ingresso di tossine e patogeni (Fig. 94). Questo meccanismo fornisce una protezione critica al cervello, mantenendo l'omeostasi dell'ambiente neuronale.

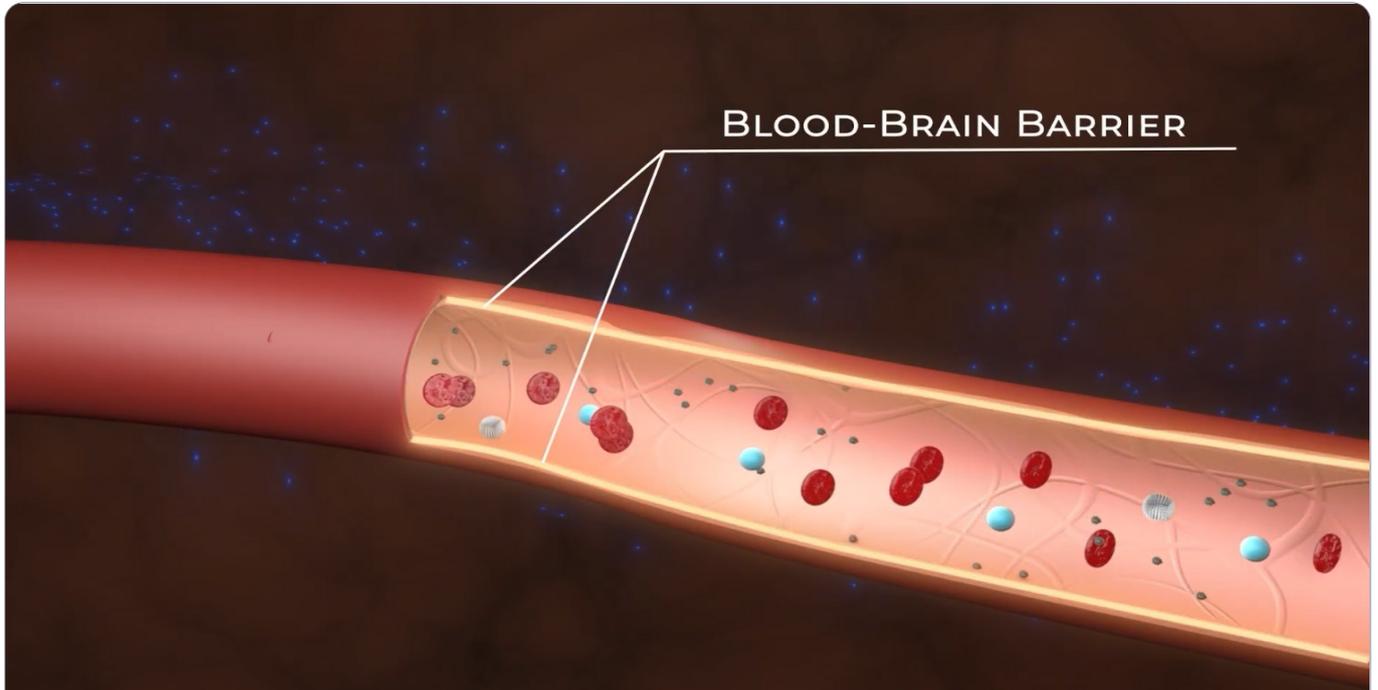


Figura 93: Rappresentazione schematica di un vaso sanguigno cerebrale

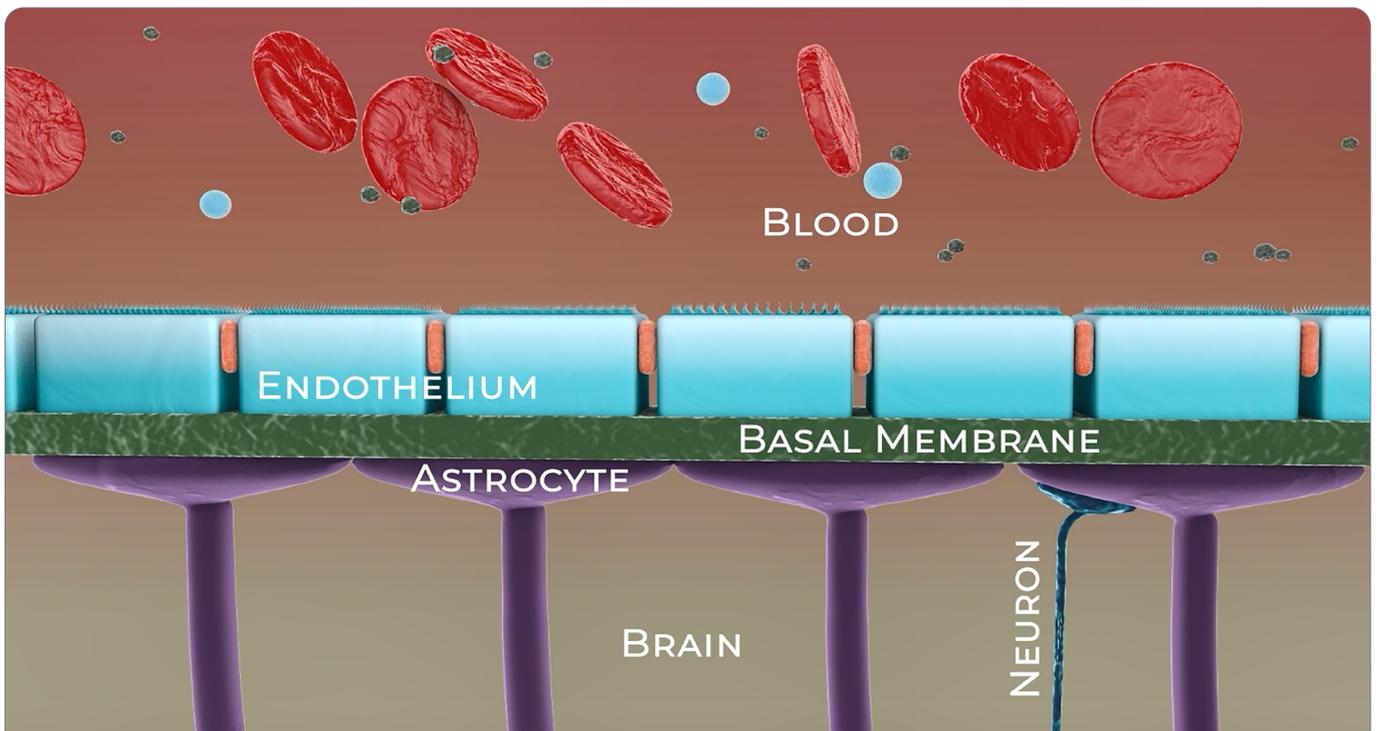


Figura 94: Rappresentazione schematica della barriera ematoencefalica

Le nanoparticelle di plastica, grazie alle loro dimensioni submicrometriche e alle proprietà fisico-chimiche, sono in grado di penetrare nel cervello già dopo 2 ore dall'ingresso nell'organismo²⁴³.

Durante l'inalazione, le nanoparticelle di plastica raggiungono direttamente l'area del cervello responsabile dell'olfatto attraverso i nervi olfattivi²⁴⁴ (Fig. 95). Di conseguenza, seguono un percorso più breve e diretto verso il cervello rispetto ad altri organi.



Figura 95: Penetrazione delle nanoparticelle nel cervello attraverso i nervi olfattivi

Una volta penetrata nel cervello, la nanoplastica compromette il funzionamento delle cellule cerebrali – i neuroni. È stato dimostrato che la superficie delle nanoparticelle e la loro carica elettrica possono influenzare significativamente l'interazione con i neuroni e la trasmissione degli impulsi nervosi.

La carica elettrostatica della nanoplastica consente di disturbare liberamente il funzionamento di ogni cellula del corpo umano, penetrando al suo interno, inducendo stress ossidativo e infiammazione cronica, compromettendo la funzione dei mitocondri fino alla loro completa distruzione e alla morte cellulare.

Uno studio²⁴⁵ ha dimostrato che le nanoparticelle con carica negativa possono causare la depolarizzazione della membrana neuronale, provocando alterazioni della loro attività elettrica.

²⁴³Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Nel corso dell'esperimento è stato rilevato che le particelle di nanoplastica con carica negativa si legavano selettivamente ai neuroni coinvolti attivamente nella trasmissione dell'impulso nervoso. Queste particelle aderivano ai corpi cellulari dei neuroni, ai dendriti e alle fessure sinaptiche, mentre le cellule gliali, prive di attività elettrica, non interagivano con esse.

Ciò significa che l'attività elettrica dei neuroni rappresenta il principale meccanismo scatenante per il legame delle nanoplastiche cariche negativamente con le membrane cellulari.

Secondo gli studi, le micro- e nanoplastiche tendono ad accumularsi nella guaina mielinica del cervello, ricca di lipidi, che avvolge i neuroni e assicura la trasmissione dei segnali nervosi²⁴⁶. La nanoplastica provoca la degradazione della guaina mielinica degli assoni^{247, 248}, compromettendo la trasmissione degli impulsi nervosi tra i neuroni.

Impatto delle nanoplastiche sui neuroni

L'esposizione alla nanoplastica può influenzare i neuroni attraverso i seguenti meccanismi principali:

1. Alterazione del potenziale di membrana dei neuroni

I neuroni funzionano grazie a una differenza di potenziale sulla membrana (circa -70 mV a riposo), mantenuta dai gradienti ionici (Na⁺, K⁺, Cl⁻, ecc.) e dall'attività dei canali ionici. La presenza di una particella di nanoplastica con carica elettrica nelle vicinanze della membrana neurale può modificare il campo elettrico locale e destabilizzare il potenziale di membrana. Questo può causare una depolarizzazione o iperpolarizzazione, e nei casi peggiori portare all'attivazione spontanea del neurone o al blocco della trasmissione del segnale.

2. Interazione elettrostatica con i canali ionici

I canali ionici presenti nella membrana dei neuroni contengono amminoacidi caricati, in particolare nelle "porte" del canale. Una particella con una carica elettrica forte, negativa o positiva, può interagire elettrostaticamente con queste regioni, alterando la conformazione del canale. Ciò può provocare il blocco del canale o la sua attivazione impropria, compromettendo il normale funzionamento del neurone.

3. Compromissione della funzione sinaptica

La trasmissione sinaptica dipende dall'attività precisa di ioni come Ca²⁺ e Na⁺, nonché dal rilascio di neurotrasmettitori²⁴⁹. Le particelle di nanoplastica cariche elettrostaticamente possono interferire con il rilascio corretto dei neurotrasmettitori o generare segnali falsi, provocando malfunzionamenti nella trasmissione degli impulsi nervosi.

²⁴⁶Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Stress ossidativo e infiammazione

Le nanoplastiche elettrostaticamente cariche possono aumentare la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS), causando stress ossidativo. Questo fenomeno si verifica quando i livelli di ROS superano la capacità delle cellule di neutralizzarle, provocando danni al DNA, alle membrane cellulari, alle proteine e ai mitocondri. Nei neuroni, ciò compromette la trasmissione degli impulsi nervosi, portando alla degenerazione e, infine, alla morte cellulare. Poiché i neuroni hanno una capacità limitata di rigenerazione, i danni da stress ossidativo sono spesso irreversibili e possono contribuire a un progressivo declino della memoria, dell'attenzione e di altre funzioni cognitive.

5. Effetto sulla funzione mitocondriale

Le nanoplastiche con carica elettrostatica positiva, una volta penetrate nella cellula, possono accumularsi nei mitocondri, alterandone il potenziale di membrana. Questo compromette la catena respiratoria mitocondriale, causando perdite di elettroni che, reagendo con l'ossigeno, generano specie reattive dell'ossigeno (ROS), come gli anioni superossido. L'accumulo eccessivo di ROS intensifica lo stress ossidativo, danneggiando strutture cellulari fondamentali.

6. Mutazioni mitocondriali

Le nanoparticelle di plastica possono danneggiare il DNA mitocondriale, interferendo con il corretto funzionamento dei mitocondri. Ciò compromette processi cellulari essenziali come la produzione di energia, la gestione dello stress ossidativo, l'apoptosi (morte cellulare programmata) e il metabolismo. Disfunzioni in questi sistemi possono creare condizioni favorevoli allo sviluppo di patologie croniche e neurodegenerative.

7. Proprietà reattive della superficie delle nanoplastiche

L'elevata superficie specifica delle nanoplastiche è uno dei principali fattori che ne determinano l'alta reattività chimica e la capacità di generare specie reattive dell'ossigeno (ROS). Rispetto alle microplastiche, le nanoparticelle possiedono una superficie per unità di massa decine o centinaia di volte maggiore, aumentando significativamente le interazioni con biomolecole e l'ambiente circostante.

La carica elettrostatica delle particelle di plastica può interferire con il funzionamento dei neuroni, bloccando o alterando la trasmissione degli impulsi nervosi. Questo provoca disfunzioni nel sistema nervoso e può indurre una vasta gamma di condizioni patologiche. Tali effetti si manifestano sotto forma di disturbi neurologici, autonomici, cognitivi e psichici (Tabella 2).

Manifestazioni dell'esposizione:

Gli effetti delle nanoplastiche sulle cellule nervose includono un ampio spettro di patologie: sclerosi multipla e laterale amiotrofica, morbo di Alzheimer e di Parkinson, malattie autoimmuni, epilessia, ictus ischemico ed emorragico, depressione, disturbi d'ansia e cognitivi, schizofrenia, disturbo bipolare, autismo, ecc.

Categoria	Manifestazione	Causa / Meccanismo
Disturbi motori	Paralisi	Interruzione nella trasmissione degli impulsi motori dal sistema nervoso centrale ai muscoli
	Convulsioni	Squilibrio tra i segnali neuronali eccitatori e inibitori
	Perdita di sensibilità	Malfunzionamento nei percorsi neurali sensoriali che trasmettono informazioni dai recettori al cervello
	Coordinazione compromessa	Danno alle vie di conduzione cerebellari o spinali
Disturbi sensoriali	Disturbi del linguaggio, della vista e dell'udito	Danno alle vie neurali collegate ai centri sensoriali e motori nel cervello
Disfunzioni autonome	Problemi respiratori, del battito cardiaco e della digestione	Disfunzione del sistema nervoso autonomo
	Termoregolazione compromessa e disfunzione degli organi	Disfunzione dei centri regolatori autonomi
Disturbi cognitivi	Deficit di memoria e attenzione	Alterazioni strutturali o funzionali della corteccia cerebrale
	Coscienza alterata, coma	Danno alla formazione reticolare del cervello, che svolge un ruolo chiave nella regolazione dello stato di veglia e della coscienza
Disturbi psicologici ed emotivi	Ansia, depressione, disturbi dell'umore	Squilibri dei neurotrasmettitori; danni ai centri emotivi del cervello

Tabella 2. Spettro delle condizioni patologiche causate dall'esposizione delle nanoplastiche ai neuroni

Micro e nanoplastiche come fattore di rischio per i disturbi dello spettro autistico (DSA)

Parallelamente all'aumento dell'inquinamento ambientale da plastica, si osserva una crescita della prevalenza dei disturbi dello spettro autistico (DSA) (Figg. 96, 97).

The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023

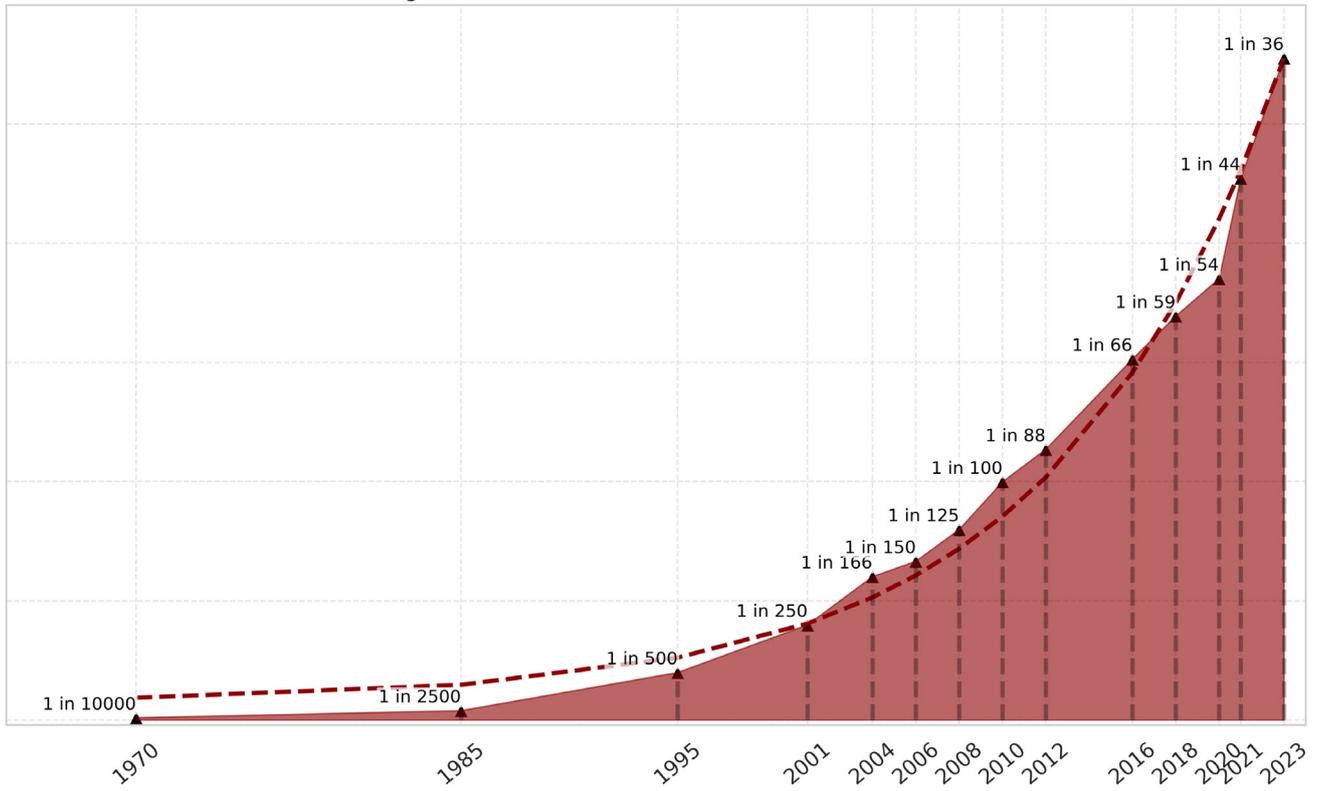


Figura 96: Aumento della prevalenza dell'autismo negli Stati Uniti dal 1970 al 2023.

Fonte: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (accesso: 1 Maggio 2025).

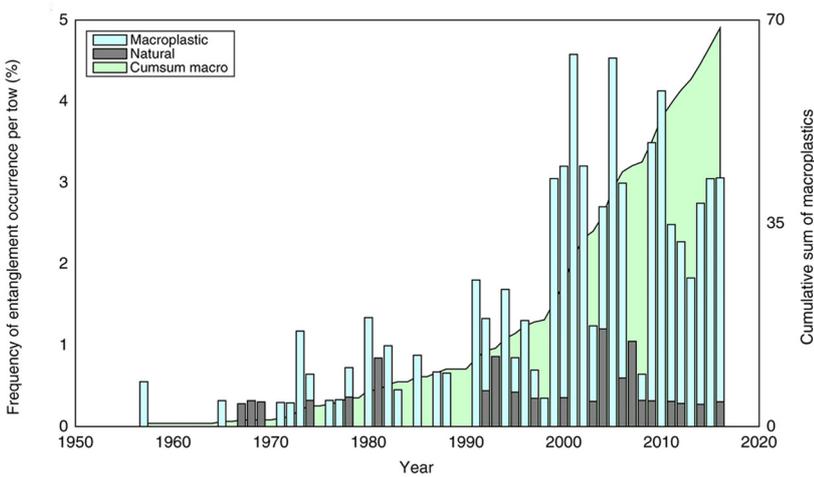


Figura 97: Aumento della quantità di plastica negli oceani dal 1957 al 2020. Fonte: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Negli Stati Uniti, 1 bambino su 36 è stato diagnosticato con un disturbo dello spettro autistico (DSA), secondo le stime del CDC *Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network* (ADDM). Secondo i dati del 2020, il numero di casi di autismo è aumentato del 317% rispetto al 2000^{250, 251}.

A partire dal periodo embrionale e nei primi anni di vita si sviluppa il sistema nervoso umano. Le ricerche indicano un potenziale legame tra l'esposizione a micro- e nanoplastiche e lo sviluppo dei disturbi dello spettro autistico.

Dati sperimentali ottenuti da scienziati sudcoreani dimostrano che l'esposizione prenatale e postnatale a micro- e nanoplastiche può contribuire alla comparsa di alterazioni dello sviluppo neurologico²⁵².

Uno studio sugli effetti molecolari delle nanoplastiche di polistirene sulle cellule staminali neurali umane ha dimostrato che l'esposizione alle nanoplastiche può provocare danni ai tessuti e disturbi legati allo sviluppo neurologico²⁵³.

Studi condotti su roditori²⁵⁴ hanno dimostrato che l'esposizione a micro- e nanoplastiche durante la gravidanza e l'allattamento può compromettere la neurogenesi nell'ippocampo della prole, nonché ridurre il volume di diverse strutture cerebrali, tra cui la corteccia motoria, l'ippocampo, l'ipotalamo, il bulbo olfattivo e il midollo allungato.

È noto che le alterazioni della struttura e della funzione delle proteine nei tessuti nervosi rivestono un ruolo cruciale nello sviluppo di numerose patologie, incluso l'autismo²⁵⁵.

Ricerche recenti hanno dimostrato che le nanoplastiche interagiscono con le proteine principalmente attraverso legami deboli, come interazioni idrofobiche, legami a idrogeno, forze di Van der Waals e forze elettrostatiche²⁵⁶. Queste interazioni provocano deformazioni strutturali delle molecole proteiche, compromettendone la funzionalità.

Considerando il ruolo delle proteine nella formazione delle reti neuronali e nella trasmissione sinaptica, tali alterazioni potrebbero influenzare lo sviluppo dei disturbi dello spettro autistico (DSA).

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

²⁵¹Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

²⁵²Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Coinvolgimento delle MNP nella patogenesi delle malattie cardiovascolari

Le particelle di plastica non solo circolano nel flusso sanguigno, ma possono anche depositarsi sulle pareti vascolari, innescando una serie di cambiamenti patologici. Particolarmente allarmante è il rilevamento di microplastiche all'interno delle placche aterosclerotiche²⁵⁷. Uno studio recente ha dimostrato che i pazienti con microplastiche nelle arterie carotidi avevano un rischio 4,5 volte maggiore di infarto miocardico, ictus e morte. Questo suggerisce che i frammenti plastici partecipano attivamente alla formazione e destabilizzazione delle placche aterosclerotiche, provocandone la rottura e la formazione di trombi²⁵⁸.

Le micro- e nanoplastiche compromettono inoltre l'integrità dell'endotelio, lo strato cellulare che riveste la superficie interna dei vasi sanguigni e che regola il tono vascolare, previene la trombosi e modula le risposte infiammatorie.

Il danneggiamento dell'endotelio da parte delle particelle di plastica porta a infiammazione cronica e aumento del rischio trombotico, soprattutto nelle arterie che irrorano il cuore e il cervello²⁵⁹. Le microplastiche interagiscono anche con gli elementi corpuscolati del sangue, come piastrine ed eritrociti. Esse favoriscono l'aggregazione piastrinica e innescano la formazione di trombi. Inoltre, la superficie ruvida delle particelle può causare danni meccanici alle cellule ed attivare le cascate della coagulazione, portando nel tempo a uno stato di ipercoagulabilità cronica e disfunzioni del microcircolo.

Le cellule immunitarie sono in grado di fagocitare le particelle di plastica, ma non possiedono i meccanismi necessari per la loro completa degradazione. Questo provoca deformazioni cellulari e un aumento del loro volume. L'accumulo di queste cellule alterate nei piccoli vasi cerebrali favorisce la formazione di microtrombi, compromettendo l'irrorazione del cervello e aumentando il rischio di ictus, anche in età giovane²⁶⁰.

Una riduzione cronica dell'apporto di ossigeno al cervello (ipossia) porta alla morte dei neuroni e allo sviluppo di alterazioni neurodegenerative, tra cui l'atrofia del tessuto cerebrale²⁶¹. L'esposizione prolungata a tali condizioni può causare la riduzione del volume di specifiche strutture cerebrali.

Grazie alla loro carica elettrostatica, le MNP interagiscono attivamente con le membrane cellulari, alterandone il potenziale elettrico. Questo fenomeno incide sulla contrattilità vascolare, sulla trasmissione dei segnali nei miociti e sul ritmo cardiaco. La mortalità per malattie cardiovascolari è in costante aumento a livello globale (Fig. 98). Particolare attenzione merita la sindrome della morte cardiaca improvvisa tra i giovani adulti di età compresa tra 25 e 44 anni²⁶² (Fig. 99). Negli Stati Uniti, è riconosciuta come la principale causa di morte in questa fascia d'età. Negli ultimi vent'anni, i casi sono aumentati drasticamente. Considerata la diffusione ubiquitaria delle MNP, non si può escludere il loro potenziale ruolo in questi eventi tragici.

²⁵⁷Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

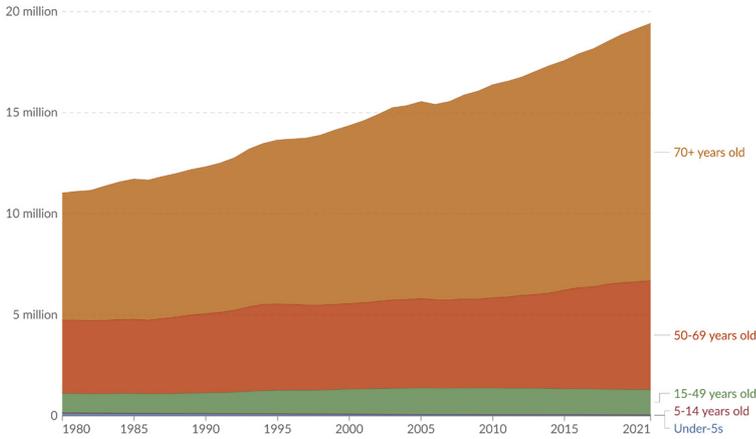
²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases¹ in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration².



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024) [OurWorldinData.org/causes-of-death](https://ourworldindata.org/causes-of-death) | CC BY

- Cardiovascular disease:** Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially when people have risk factors like high blood pressure, smoking, alcohol use, poor diet, and air pollution.
- Civil Registration and Vital Statistics system:** A Civil Registration and Vital Statistics system (CRVS) is an administrative system in a country that manages information on births, marriages, deaths and divorces. It generates and stores 'vital records' and legal documents such as birth certificates and death certificates. [You can read more about how deaths are registered around the world in our article: How are causes of death registered around the world?](#)

Figura 98: Numero di decessi per malattie cardiovascolari per fascia d'età. Dati globali.

Fonte: Our World in Data
<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>

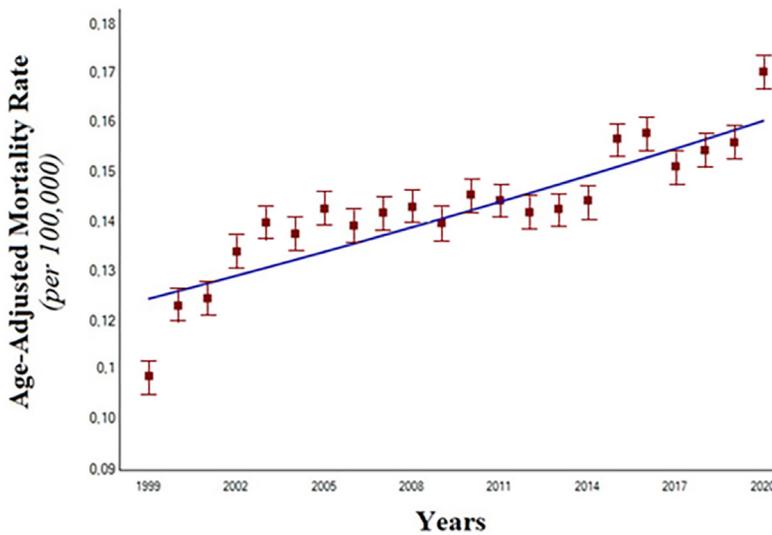


Figura 99: Tendenze nei tassi di mortalità per morte cardiaca improvvisa, aggiustati per età, con relativi intervalli di confidenza al 95%, tra i giovani adulti negli Stati Uniti di età compresa tra 25 e 44 anni, dal 1999 al 2020.

Fonte: Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Un altro problema serio è l'aumento della sindrome della morte improvvisa del lattante (SIDS). Solo negli Stati Uniti, il tasso di questo sindrome è aumentato del 15% tra il 2019 e il 2020, passando dal quarto al terzo posto tra le cause di mortalità infantile²⁶³. Sebbene le cause della SIDS non siano ancora completamente comprese, molti scienziati ipotizzano che fattori in grado di alterare la regolazione del ritmo cardiaco e del tono vascolare nei neonati possano svolgere un ruolo chiave. La nanoplastica, capace di attraversare la placenta e accumularsi nei tessuti dell'organismo in via di sviluppo, rappresenta uno dei potenziali fattori di rischio. Sempre più ricercatori concordano sul fatto che la nanoplastica sia una delle principali candidate al ruolo di "assassino invisibile".

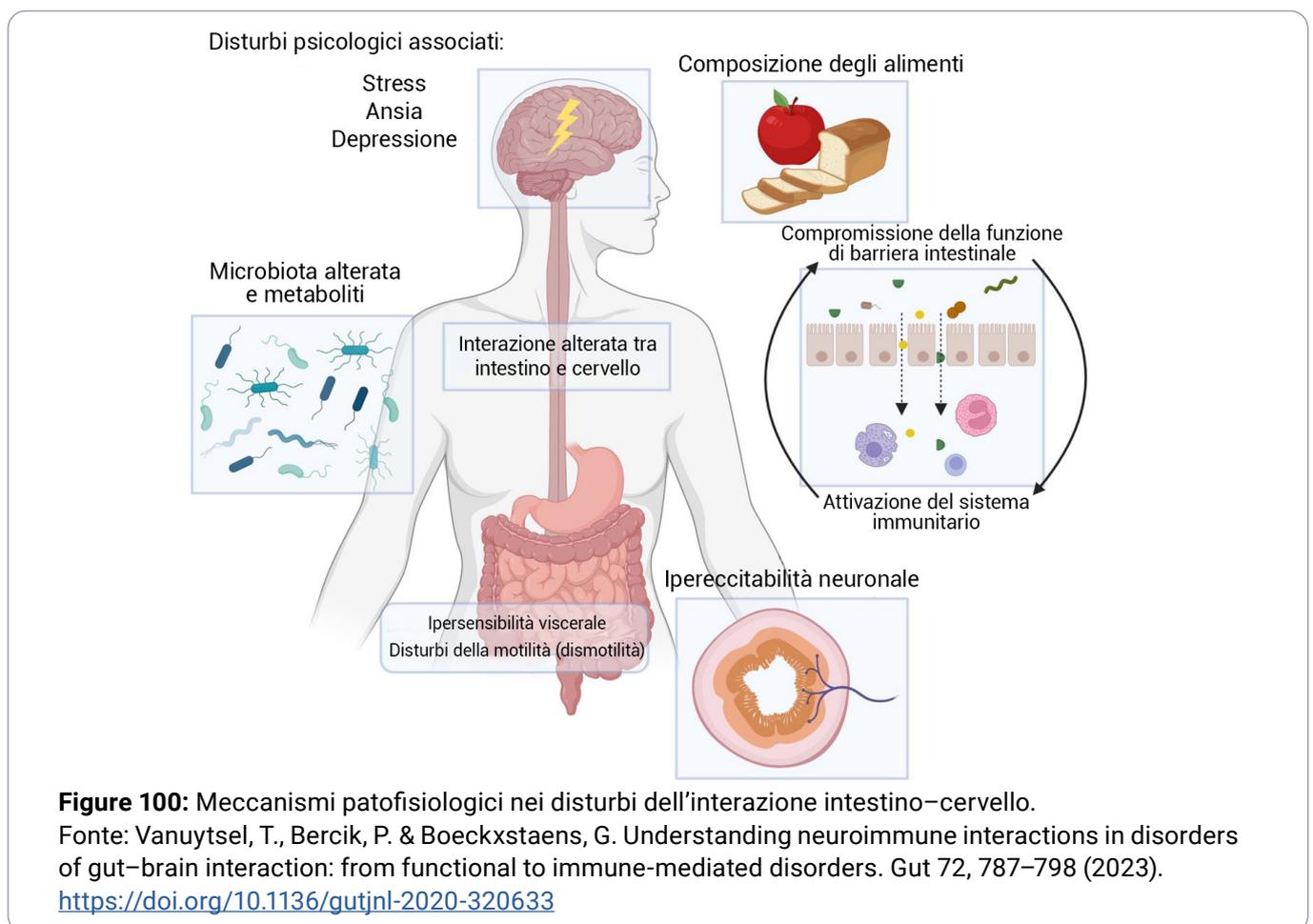
²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Il cuore, essendo uno degli organi con il più alto consumo energetico, dipende in modo critico dal corretto funzionamento dei mitocondri, che forniscono l'energia necessaria per la sua attività. L'esposizione alle particelle di microplastica compromette i processi mitocondriali, con conseguente deficit energetico nel miocardio e potenziali disfunzioni cardiache.

Alterazione delle funzioni gastrointestinali causata dalle MNP

L'intestino è il più grande organo immunitario del corpo umano: contiene circa il 70% di tutte le cellule immunitarie, circa 500 milioni di neuroni e oltre 100 trilioni di microrganismi²⁶⁴. Il microbiota intestinale svolge un ruolo chiave nel mantenimento del sistema immunitario. Uno squilibrio del microbiota può indebolire l'immunità e contribuire allo sviluppo di varie patologie.

L'intestino viene spesso definito "secondo cervello" per via della fitta rete di neuroni e della sua capacità di comunicare con il sistema nervoso centrale²⁶⁵. Lo scambio di segnali biochimici complessi tra cervello e intestino è noto come "asse intestino-cervello" e riveste un ruolo cruciale nella regolazione sia dello stato fisico che emotivo (Fig. 100).



²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁵Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Accessed May 1, 2025).

Una barriera intestinale sana impedisce ai microbi e alle particelle estranee di penetrare dal lume intestinale nel flusso sanguigno²⁶⁵. Le micro- e nanoplastiche compromettono questa protezione, aumentando la permeabilità della parete intestinale. Ne consegue un'inflammatione, sia a livello intestinale che sistemico, che indebolisce il sistema immunitario²⁶⁶. Allo stesso tempo, le MNP alterano la composizione del microbiota intestinale, causando uno squilibrio tra i microrganismi benefici e quelli patogeni. Ciò compromette i processi digestivi, riduce la capacità dell'organismo di degradare gli allergeni alimentari e aumenta il rischio di sviluppare allergie alimentari²⁶⁷.

Questo crea un circolo vizioso: la plastica altera il microbiota intestinale, crea infiammazione e compromette l'integrità della parete intestinale. Di conseguenza, tossine, batteri e particelle di plastica iniziano a entrare nel flusso sanguigno. La loro presenza nel sangue innesca una risposta immunitaria che porta a un'inflammatione cronica in tutto il corpo. Dal sangue, queste tossine, batteri e nanoparticelle di plastica possono attraversare la barriera emato-encefalica e raggiungere il cervello, dove provocano reazioni infiammatorie. A loro volta, questi processi compromettono ulteriormente la risposta immunitaria, aumentano la risposta allo stress dell'organismo e possono influenzare negativamente il microbiota intestinale attraverso meccanismi neuroendocrini—chiudendo così il circolo vizioso lungo l'asse intestino–cervello.

L'alterazione dell'interazione tra microbioma intestinale e sistema nervoso centrale è direttamente associata a disturbi neurologici. Ad esempio, nei bambini con disturbi dello spettro autistico è stato riscontrato un marcato squilibrio del microbiota, confermato sia da analisi microbiologiche che da valutazioni della funzionalità del sistema digerente²⁶⁸.

Le ricerche sui pazienti con malattie intestinali infiammatorie mostrano una correlazione positiva tra la gravità della malattia e la concentrazione di microplastiche nelle feci che è più alta (41,8 unità/g) rispetto alle persone sane (28,0 unità/g).

Inoltre, in questi pazienti è stato riscontrato un accumulo significativo di microplastiche nelle lesioni ulcerose della mucosa del retto²⁶⁹. Inoltre, le microplastiche che rimangono nell'intestino continuano a esercitare effetti dannosi anche molto tempo dopo l'ingresso iniziale nell'organismo.

²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

Effetti delle MNP sul sistema immunitario

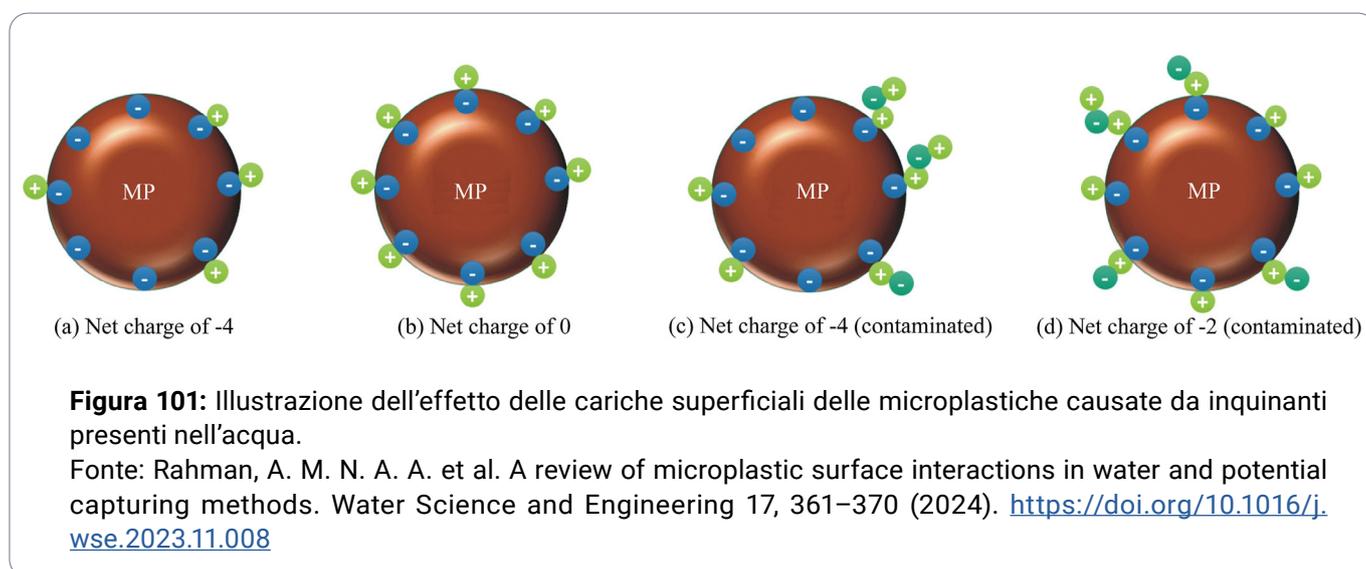
Le MNP compromettono la risposta immunitaria dell'organismo, creando condizioni favorevoli alla proliferazione dei patogeni.

Le particelle di MNP cariche attirano più facilmente altre molecole, come tossine, sali di metalli pesanti, batteri e virus (Fig. 101). Questo le rende una sorta di "piattaforma di trasporto" per composti tossici, amplificandone l'attività biologica e la tossicità. La carica elettrostatica delle nanoplastiche agisce inoltre come una fonte di energia o "batteria", contribuendo a mantenere virus e batteri vitali per periodi più lunghi.

Inoltre, le particelle di micro- e nanoplastica cariche possono persistere più a lungo nell'acqua e nell'aria. Risalgono più facilmente sotto forma di aerosol e penetrano nel sistema respiratorio, aumentando la probabilità di essere assorbite dall'organismo umano.

L'impatto combinato delle MNP sul microbioma, sui patogeni e sul sistema immunitario costituisce un rischio complesso per la salute.

Le cellule immunitarie a contatto con le microplastiche muoiono circa tre volte più velocemente rispetto a quelle che non le incontrano²⁷⁰.



Le particelle di microplastica sono in grado di assorbire virus sulla loro superficie tramite interazioni elettrostatiche e idrofobiche, aumentandone così la vitalità²⁷¹.

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022).

I virus presenti sulla superficie della microplastica possono rimanere attivi fino a tre giorni — tempo sufficiente, ad esempio, per compiere il tragitto dagli impianti di trattamento delle acque reflue alle spiagge²⁷².

La microplastica facilita la diffusione dei patogeni e può favorire la loro ricombinazione genetica. Uno studio ha dimostrato che le particelle di plastica non solo riducono l'efficacia dei farmaci, ma possono anche favorire lo sviluppo di batteri resistenti agli antibiotici²⁷³.

Le particelle cariche di MNP fungono da piattaforma per la colonizzazione da parte dei microrganismi²⁷⁴. Batteri e funghi, sfruttando i campi elettrostatici delle nanoplastiche, mostrano una crescita accelerata. Studi condotti sulle pulci d'acqua (*Daphnia*) hanno rilevato che l'esposizione alle nanoplastiche induce stress ossidativo e aumenta di 11 volte l'incidenza di infezioni fungine (specie *Metschnikowia*)²⁷⁵.

Questo fenomeno è coerente con l'espansione globale dell'area di diffusione e della resistenza delle malattie fungine, riconosciute dall'OMS come una crescente minaccia per la salute pubblica.



“Uscendo dall’ombra della pandemia, la resistenza dei batteri agli antimicrobici ha aperto la strada a un’altra minaccia: le infezioni fungine si stanno diffondendo e diventano sempre più resistenti ai trattamenti, trasformandosi in un problema di salute pubblica globale”, ha dichiarato il dott. Hanan Balkhy, Assistente del Direttore Generale dell’OMS per la resistenza antimicrobica²⁷⁶.

I metaboliti fungini rilasciati in presenza di MNP sono associati alla crescita tumorale²⁷⁷ e all'infiammazione cronica. Il DNA dei funghi è stato rilevato in alcuni tipi di cancro, suggerendo un potenziale ruolo delle nanoplastiche nel processo di oncogenesi²⁷⁸.

²⁷²University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

²⁷³Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schlösser, P., Owczar, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

²⁷⁷Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

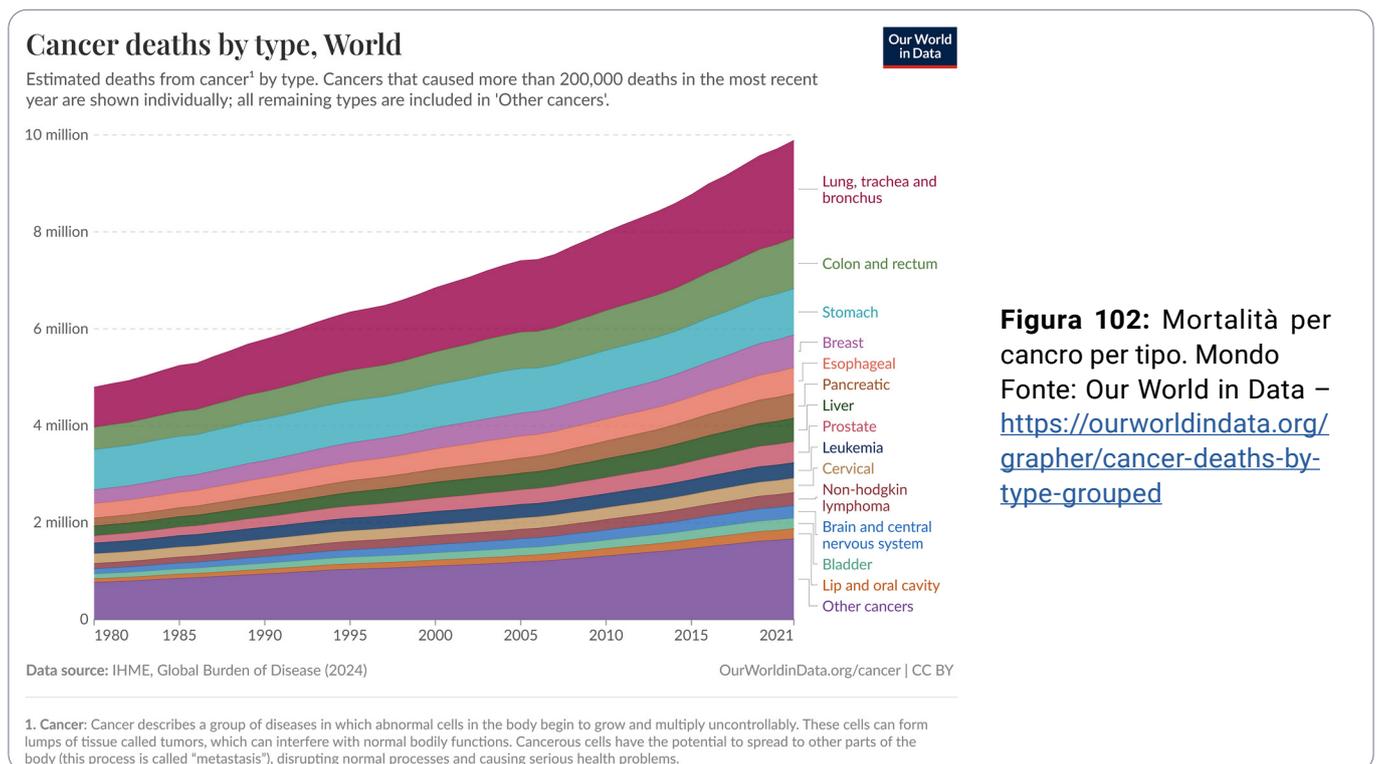
Azione cancerogena delle MNP: meccanismi di mutazione e sviluppo delle metastasi

Secondo le informazioni sopra esposte, le micro- e nanoplastiche rappresentano un fattore significativo nello sviluppo di neoplasie maligne, a causa del loro impatto negativo a livello cellulare e sistemico.

Le ricerche dimostrano che le micro- e nanoplastiche possono agire come catalizzatori nascosti dello sviluppo del cancro, favorendo la migrazione cellulare e la metastatizzazione²⁷⁹. È stato inoltre osservato che le particelle di MNP possono persistere all'interno delle cellule per lunghi periodi e venire trasmesse alle cellule figlie durante la divisione cellulare.

Attualmente, la mortalità per malattie oncologiche continua ad aumentare a livello globale (Fig. 102).

Si prevede che entro il 2050 il numero di nuovi casi di cancro aumenterà del 77%²⁸⁰.



²⁷⁹Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

Influenza delle MNP sul metabolismo del calcio e sulla struttura ossea

Le particelle di plastica sono in grado di penetrare anche nel sistema muscolo-scheletrico – la base del funzionamento fisico dell'uomo (Fig.103). Dove regna un equilibrio preciso tra distruzione e ricostruzione, dove le ossa si rinnovano quotidianamente, le articolazioni assorbono l'attrito e i muscoli sostengono il movimento e il calore, la microplastica – anche grazie alla sua carica elettrostatica – può sostituirsi alle molecole strutturali, innescando processi lenti e distruttivi.

Gli studi mostrano che la microplastica può penetrare nel tessuto osseo, dove la sua struttura molecolare le consente di imitare il calcio e altri minerali necessari al metabolismo osseo. Di conseguenza, la plastica può essere erroneamente riconosciuta dall'organismo come materiale da costruzione per le ossa. Il corpo, letteralmente, inizia a “costruire” ossa con la plastica.

Questo errore nel riconoscimento molecolare è associato a numerose conseguenze negative: la microplastica può compromettere la funzione degli osteoblasti e degli osteoclasti, alterare il metabolismo di calcio e fosforo, contribuendo così allo sviluppo dell'osteoporosi. Si attivano cascate infiammatorie, l'espressione genica viene alterata e il tessuto osseo perde densità e resistenza. Inoltre, la presenza di nanoplastica può provocare infiammazioni croniche che danneggiano la cartilagine articolare e il tessuto osseo, aumentando il rischio di osteoartrite, dolore e rigidità articolare^{281, 282}.

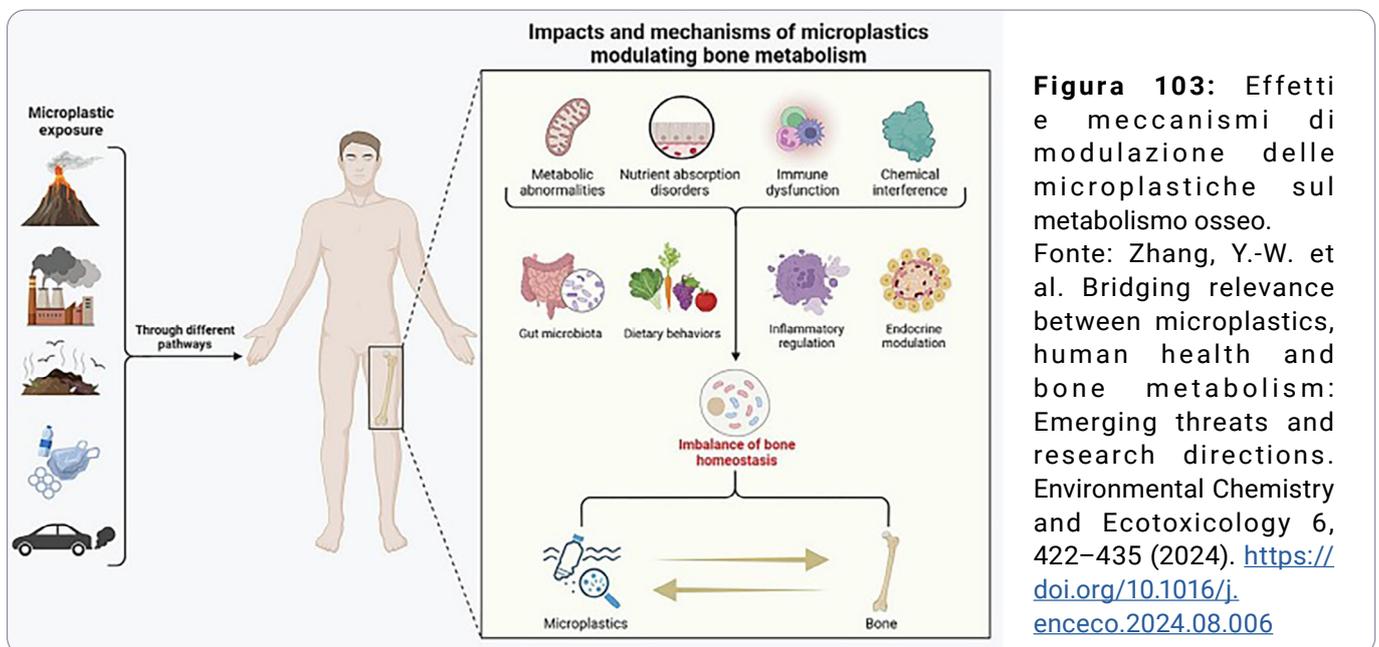


Figura 103: Effetti e meccanismi di modulazione delle microplastiche sul metabolismo osseo.

Fonte: Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025). <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).

Uno studio condotto sui roditori ha dimostrato che il numero di osteoblasti si è ridotto significativamente nei topi esposti a microplastiche di polistirene²⁸⁰.

Non meno minacciosa è l'azione della plastica sulla muscolatura scheletrica. Le ricerche indicano che le nanoplastiche sono in grado di penetrare nelle cellule muscolari, compromettendo il funzionamento dei mitocondri. Ne deriva un deficit energetico, con attivazione di forme reattive dell'ossigeno, che accelera l'invecchiamento cellulare, ostacola il recupero muscolare dopo lo sforzo fisico e favorisce l'atrofia. Particolarmente vulnerabili risultano essere gli anziani e i pazienti affetti da malattie croniche.

Le micro- e nanoplastiche si accumulano anche nel midollo osseo²⁸³, compromettendo la formazione delle cellule staminali (ematopoietiche e mesenchimali)²⁸⁴, da cui si originano eritrociti, leucociti, piastrine, osteociti, condrociti e adipociti. La loro disfunzione può causare danni sistemici all'organismo.

Disturbi riproduttivi associati all'esposizione alle MNP: infertilità e disfunzione erettile

Riduzione della fertilità

Secondo le previsioni, entro il 2045 il mondo potrebbe diventare completamente infertile²⁸⁵.

Già nel 2018, un gruppo di eminenti medici e scienziati, durante il **XIII Simposio Internazionale di Spermatologia a Stoccolma**, ha esortato i governi a riconoscere il calo della fertilità maschile come un serio problema di salute pubblica, sottolineando l'importanza della salute riproduttiva maschile per la sopravvivenza della specie umana²⁸⁶.

Contrariamente a quanto comunemente si crede, la salute riproduttiva non è determinata solo dall'equilibrio ormonale, dalla genetica o dallo stile di vita. Un numero crescente di studi scientifici evidenzia il ruolo cruciale dei mitocondri nei processi di concepimento e nello sviluppo dell'embrione. Questi minuscoli organelli, responsabili della produzione di energia necessaria per tutte le funzioni vitali, svolgono un ruolo fondamentale nella fertilità sia maschile che femminile, e la loro importanza per la funzione riproduttiva umana si rivela ben più profonda di quanto si pensasse in precedenza.

Le disfunzioni mitocondriali possono essere una causa di infertilità sia nelle donne che negli uomini. Negli uomini, i mitocondri situati nella parte caudale degli spermatozoi sono responsabili della motilità necessaria per la fecondazione. Il loro malfunzionamento riduce la mobilità degli spermatozoi e può provocare anomalie.

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

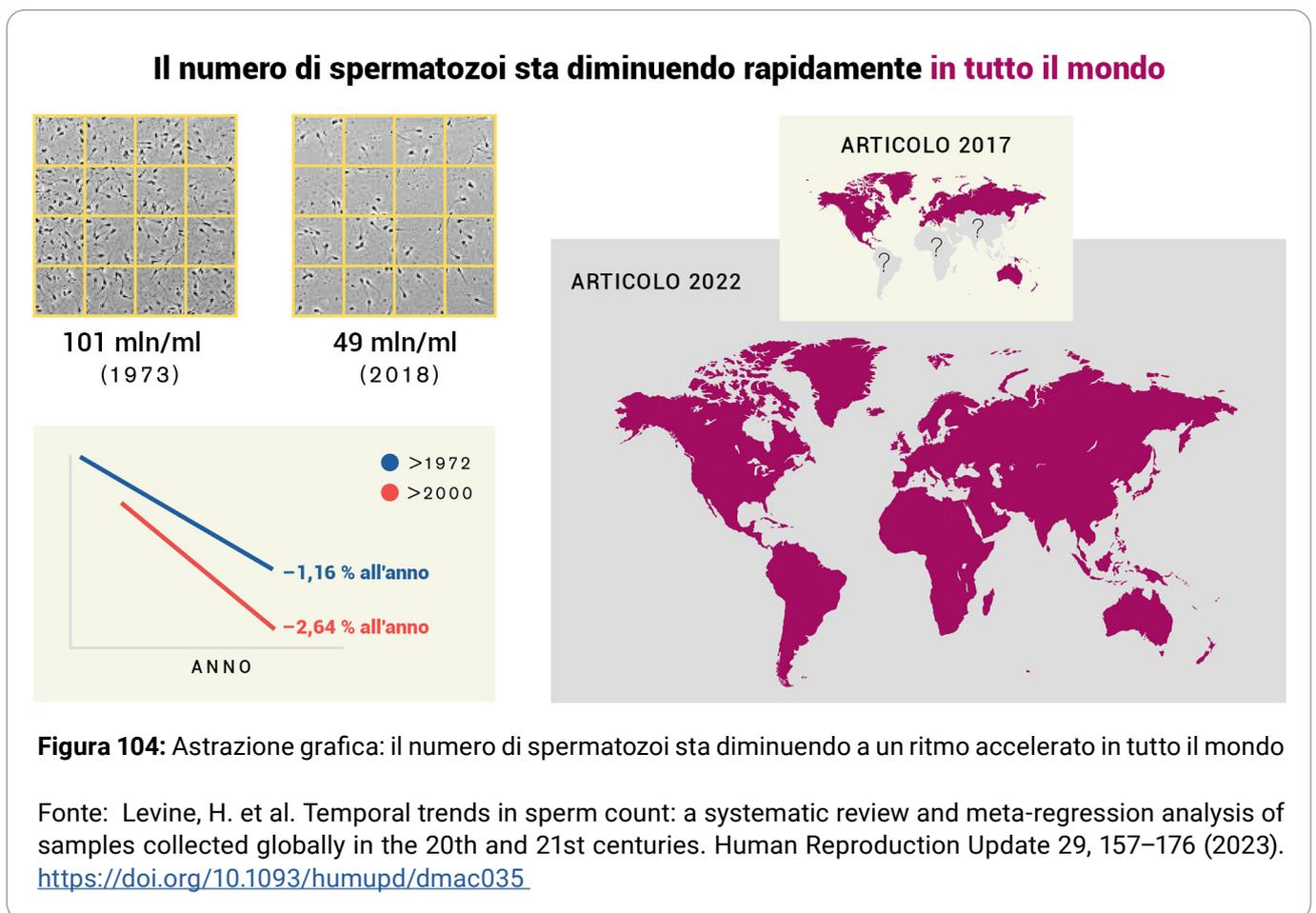
²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swain-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

In studi condotti da scienziati cinesi, la microplastica è stata rilevata in tutti i campioni di sperma analizzati — in media due particelle per campione, di dimensioni fino a 7 µm, prevalentemente di polistirene²⁸⁷.

La presenza di queste particelle è stata associata a anomalie morfologiche degli spermatozoi e all'accorciamento dei telomeri. Grazie alle dimensioni microscopiche e alla loro carica, le nanoplastiche sono in grado di superare la barriera ematotesticolare e penetrare nei tessuti genitali, compromettendone la funzionalità.

Particolarmente preoccupante è la tendenza osservata alla riduzione del numero totale di spermatozoi negli uomini, diminuito del 62,3% tra il 1973 e il 2018²⁸⁸ (Fig.104).

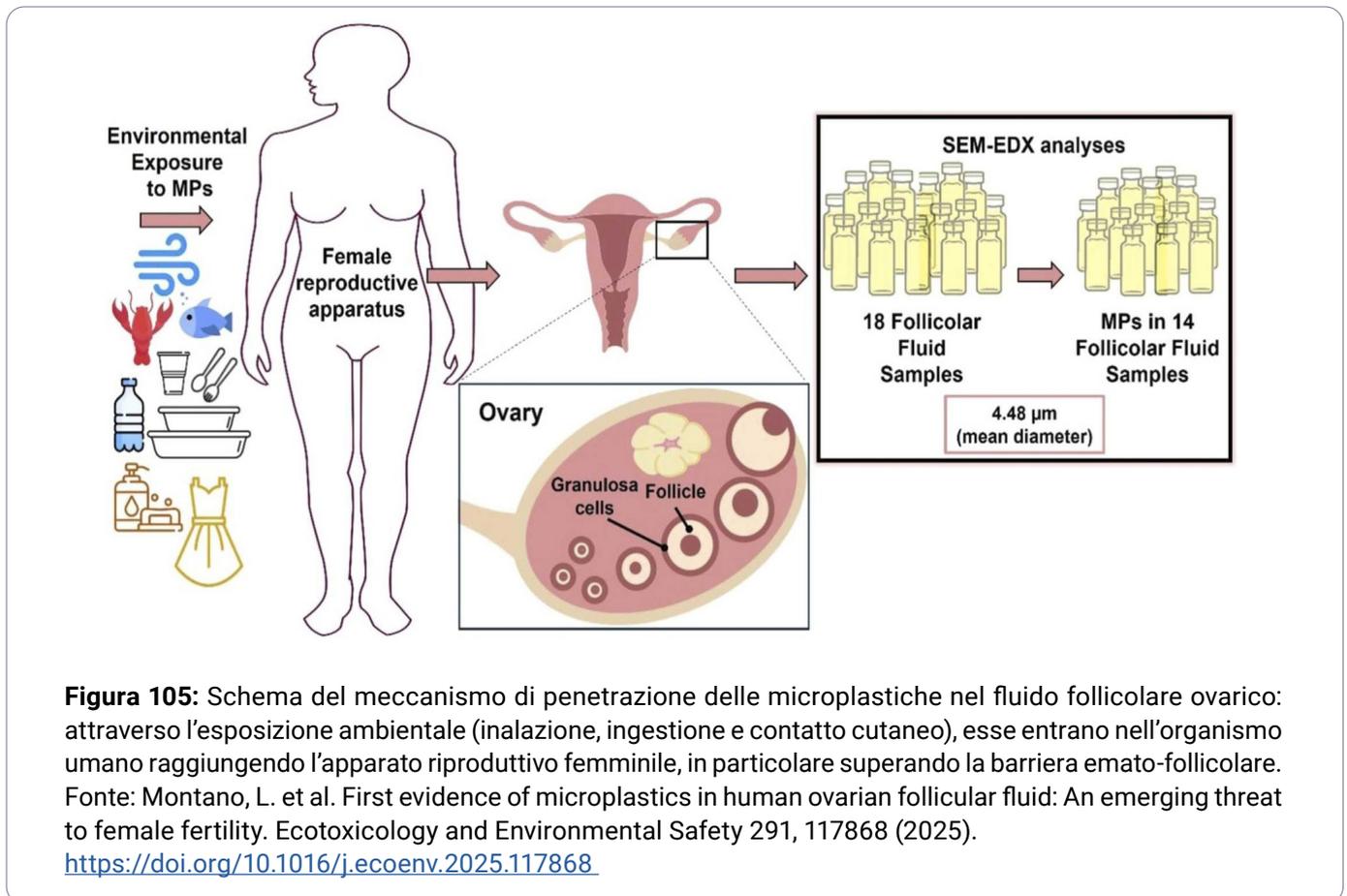


Sebbene la fertilità sia influenzata da numerosi fattori, un numero crescente di scienziati concorda sul fatto che i composti chimici contenuti nella plastica svolgano un ruolo chiave in questo processo. I ftalati, utilizzati per rendere la plastica più flessibile, alterano l'equilibrio ormonale, riducono la libido e possono favorire la pubertà precoce e la disfunzione testicolare.

²⁸⁷Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Non meno preoccupante è la situazione della fertilità femminile. Uno studio del 2025 ha rilevato la presenza di particelle di microplastica nel fluido follicolare ovarico in 14 su 18 donne esaminate, con una media di oltre 2000 particelle per millilitro, la maggior parte delle quali con un diametro inferiore a 5 micrometri²⁸⁹ (Fig. 105).



Questi dati testimoniano la capacità delle particelle di plastica di oltrepassare la barriera emato-follicolare nelle ovaie. A livello cellulare, le micro- e nanoplastiche possono danneggiare il DNA, alterare la divisione cellulare e provocare infiammazioni. È stato dimostrato che interferiscono con la regolazione ormonale, compromettono le funzioni della placenta, influenzano l'angiogenesi e sono associate allo sviluppo del mioma uterino.

Disfunzione erettile

I risultati di uno studio nazionale condotto in Giappone hanno mostrato un calo della funzione erettile e dell'attività sessuale tra le giovani generazioni²⁹⁰. La valutazione basata sulla scala EHS ha rilevato una prevalenza della disfunzione erettile (DE) del 30,9%, che ha interessato circa 14 milioni di uomini, con desiderio sessuale, rigidità dell'erezione, orgasmi e soddisfazione inferiori alle attese tra i giovani uomini giapponesi, in particolare nella fascia d'età tra i 20 e i 24 anni. In effetti, il tasso di prevalenza in questa fascia era del 26,6%, quasi pari a quello della fascia 50–54 anni (27,8%) (Figg. 106, 107).

²⁸⁹Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Inoltre, un altro studio condotto su scala globale ha riportato che tre uomini su quattro presentano sintomi di DE, indicando che questa condizione non è rara e può colpire uomini di qualsiasi età.

Il primo studio nazionale ufficiale sulla funzione sessuale in Giappone, condotto nel 1998, ha stimato che circa 11,3 milioni di uomini soffrivano di DE moderata o completa. Inoltre, gli studi nazionali sull'infertilità maschile condotti in Giappone nel 1996 e nel 2015 hanno rivelato dati sorprendenti. Nel sondaggio del 2015, il 13,5% degli uomini ha affrontato infertilità maschile a causa della DE come causa principale, un dato quasi quattro volte superiore rispetto al 1996.

L'insieme dei dati scientifici attuali indica che le micro- e nanoplastiche presenti nell'organismo rappresentano una delle cause nascoste ma significative del deterioramento della salute riproduttiva. Queste particelle penetrano negli organi sessuali, alterano la funzione mitocondriale, provocano infiammazioni, squilibri ormonali e danni al DNA, riducono la motilità e la qualità morfologica degli spermatozoi. Sono state rilevate nel liquido seminale e nel fluido follicolare, a testimonianza della loro capacità di superare le barriere biologiche e del loro profondo impatto sistemico. Tutto ciò mette a rischio non solo la salute individuale, ma anche il futuro della capacità riproduttiva dell'umanità.

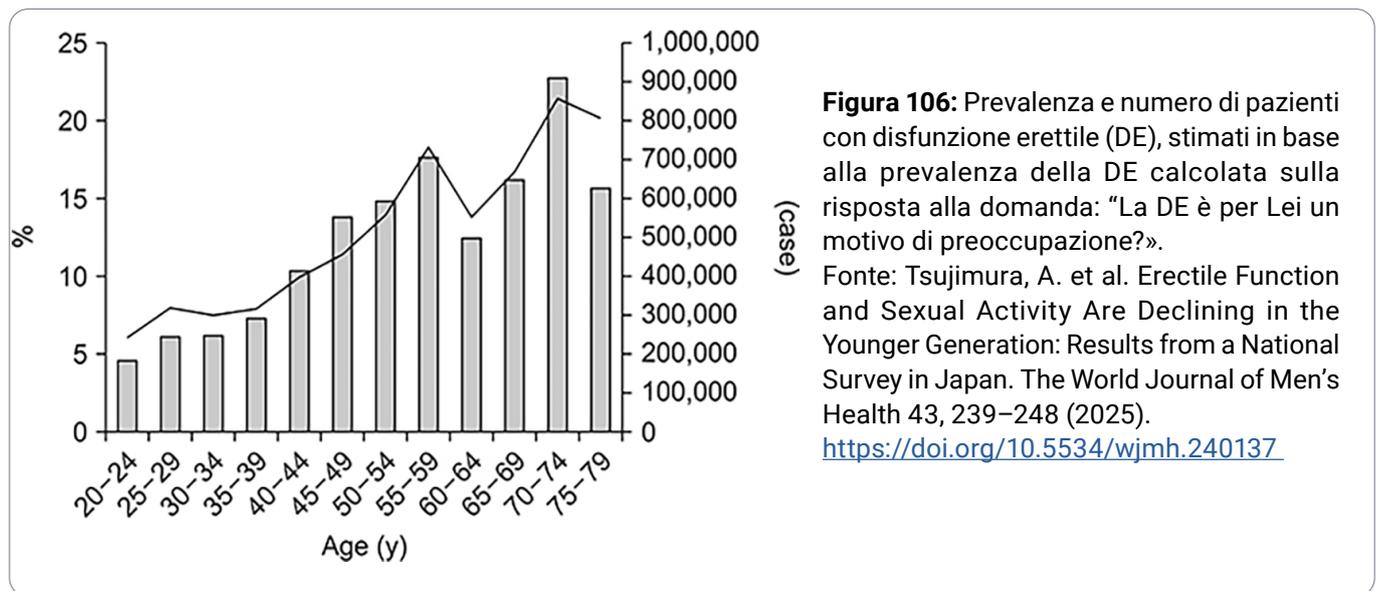


Figura 106: Prevalenza e numero di pazienti con disfunzione erettile (DE), stimati in base alla prevalenza della DE calcolata sulla risposta alla domanda: "La DE è per Lei un motivo di preoccupazione?".

Fonte: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

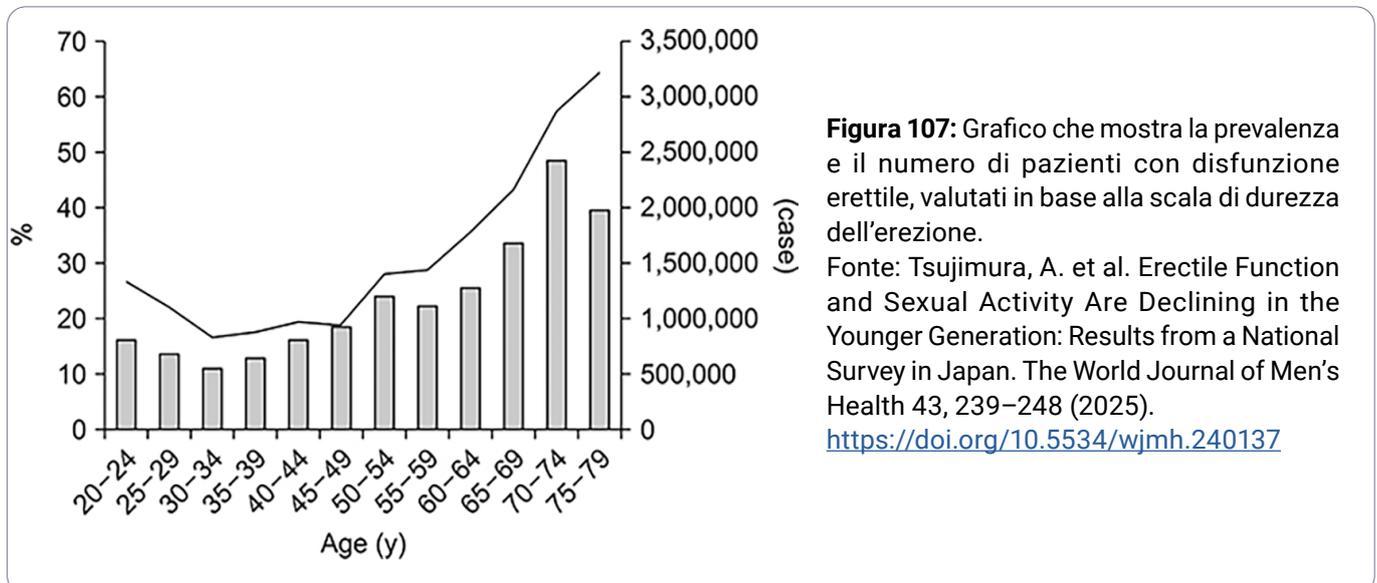


Figura 107: Grafico che mostra la prevalenza e il numero di pazienti con disfunzione erettile, valutati in base alla scala di durezza dell'erezione.

Fonte: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Penetrazione delle MNP attraverso la barriera placentare ed impatto sul corpo in via di sviluppo

Esposizione prenatale alle micro- e nanoplastiche sul feto.

Le donne in gravidanza mostrano una particolare vulnerabilità all'esposizione alle microplastiche²⁹¹. Una volta entrate nell'organismo materno, queste particelle di plastica sono in grado di raggiungere il feto attraversando la placenta, interferire con la secrezione degli ormoni che regolano la gravidanza e aumentare il rischio di parto prematuro, aborto spontaneo e disturbi dello sviluppo fetale (Fig. 108). Secondo le stime, nel 2020 circa 13,4 milioni di bambini (1 su 10) sono nati prematuramente (<37 settimane), e la nascita prematura rimane la principale causa di mortalità infantile. I bambini sopravvissuti presentano un rischio aumentato di gravi patologie e condizioni croniche²⁹².

Il sistema endocrino in via di sviluppo nei bambini è particolarmente sensibile alle sostanze chimiche contenute nella plastica, le quali possono imitare o bloccare gli ormoni²⁹³ (Fig. 109). L'esposizione nei neonati può avvenire anche attraverso il latte materno. Inoltre, la nanoplastica può esercitare effetti ritardati, interferendo con la formazione delle cellule germinali durante l'infanzia e l'adolescenza, riducendo così la fertilità in età adulta.

La barriera ematoplacentare (BEP) svolge un ruolo cruciale nella regolazione dello scambio metabolico tra madre e feto, proteggendolo da sostanze dannose. Tuttavia, studi recenti indicano che le micro- e nanoplastiche sono in grado di oltrepassare questa barriera.

Nel 2020, uno studio guidato da Antonio Ragusa, utilizzando la spettroscopia Raman (una tecnica basata sull'analisi della diffusione della luce per determinare la composizione chimica dei materiali), ha rilevato la presenza di microplastiche nelle placente di quattro donne su sei con gravidanze normali. Nei campioni sono state identificate 12 particelle di dimensioni comprese tra 5 e 10 µm, tra cui polipropilene e pigmenti utilizzati in cosmetici, vernici, colle e prodotti per l'igiene²⁹⁴.

²⁹¹Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>

²⁹²World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).

²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

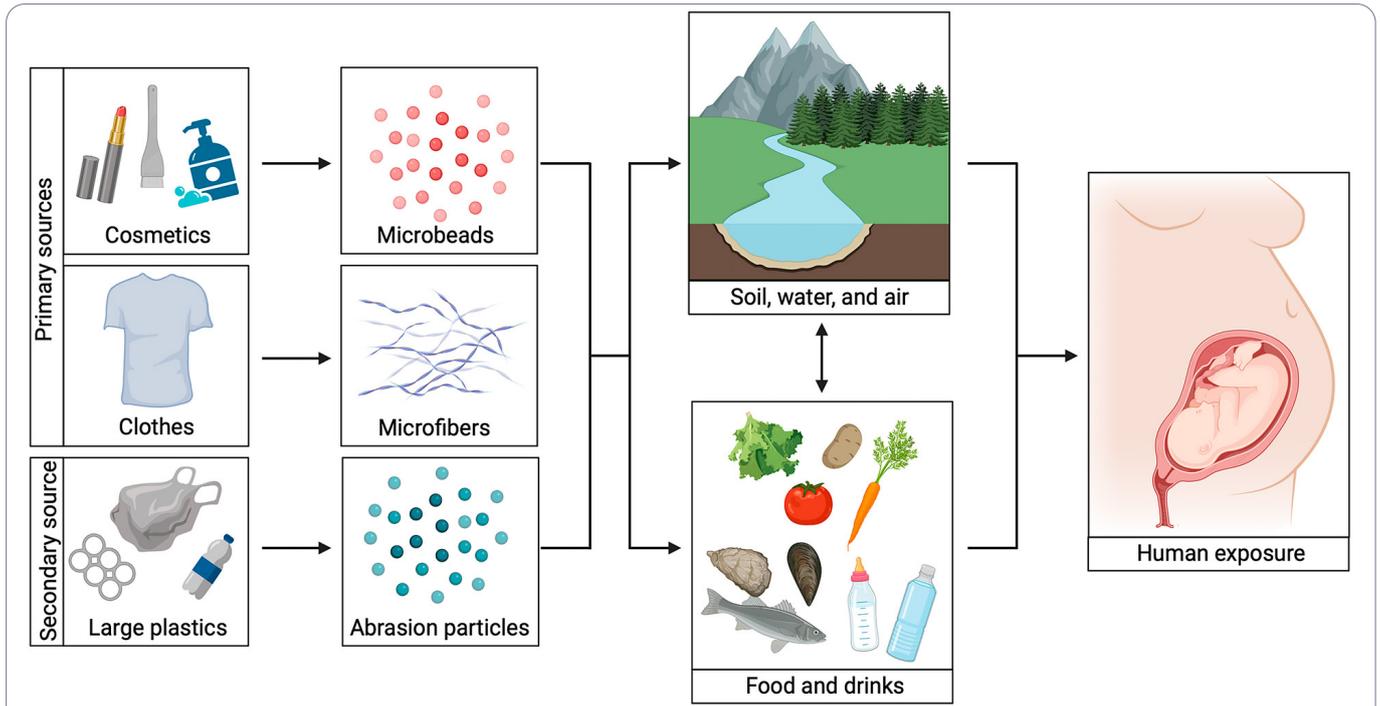


Figura 108: Ingresso delle microplastiche nell'organismo materno

Fonte: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

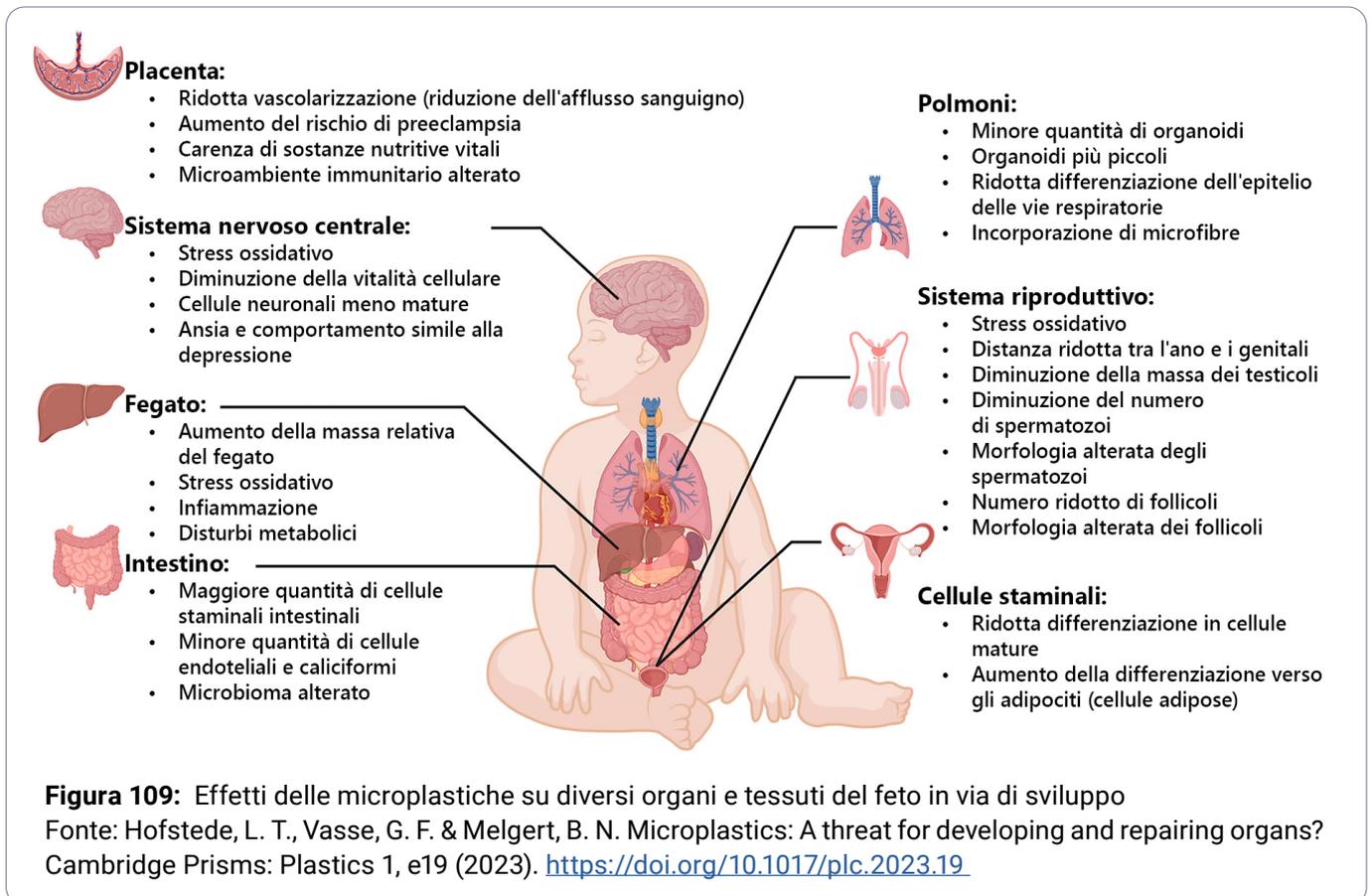


Figura 109: Effetti delle microplastiche su diversi organi e tessuti del feto in via di sviluppo

Fonte: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

Uno studio condotto dall'Università del Nuovo Messico ha dimostrato che la concentrazione di microplastiche e nanoplastiche nelle placente dei neonati prematuri è più alta rispetto a quelle dei neonati a termine. L'analisi di 158 placente mediante spettrometria di massa ha rilevato che, nelle donne che hanno partorito prematuramente, si è verificato un accumulo più elevato di particelle di plastica²⁹⁵.



“Le nanoparticelle sembrano esercitare un effetto indiretto sul feto nell'utero materno, inibendo la formazione dei vasi sanguigni tramite sostanze mediatrici” afferma la biologa Tina Bürki²⁹⁶.

Le particelle di polistirene in scala nanometrica possono provocare disturbi nello sviluppo cerebrale del feto, in particolare deficit cognitivi²⁹⁷.

Secondo le ricerche, l'esposizione alle microplastiche durante la gravidanza e nei primi mesi di vita può causare alterazioni irreversibili nei sistemi riproduttivo e nervoso centrale nella prole di diverse specie²⁹⁸.

Esposizione postnatale alle micro- e nanoplastiche nei neonati

I neonati sono esposti costantemente a micro- e nanoplastiche provenienti dall'ambiente esterno.

Secondo uno studio del 2020²⁹⁹ i lattanti possono ingerire fino a 4,5 milioni di particelle di plastica al giorno semplicemente durante l'allattamento con biberon in polipropilene, che rappresentano la maggior parte dei biberon utilizzati a livello mondiale.

I neonati possono inoltre ingerire microplastiche attraverso il latte materno. Nel 2022, un'analisi del latte di 34 donne sane ha rilevato la presenza di microplastiche nel 76% dei campioni³⁰⁰ (Fig. 110). Le MNP possono avere effetti ritardati, interferendo con lo sviluppo delle cellule riproduttive durante l'infanzia e l'adolescenza, con conseguente possibile riduzione della fertilità in età adulta.

²⁹⁵Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

²⁹⁶Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

²⁹⁷Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

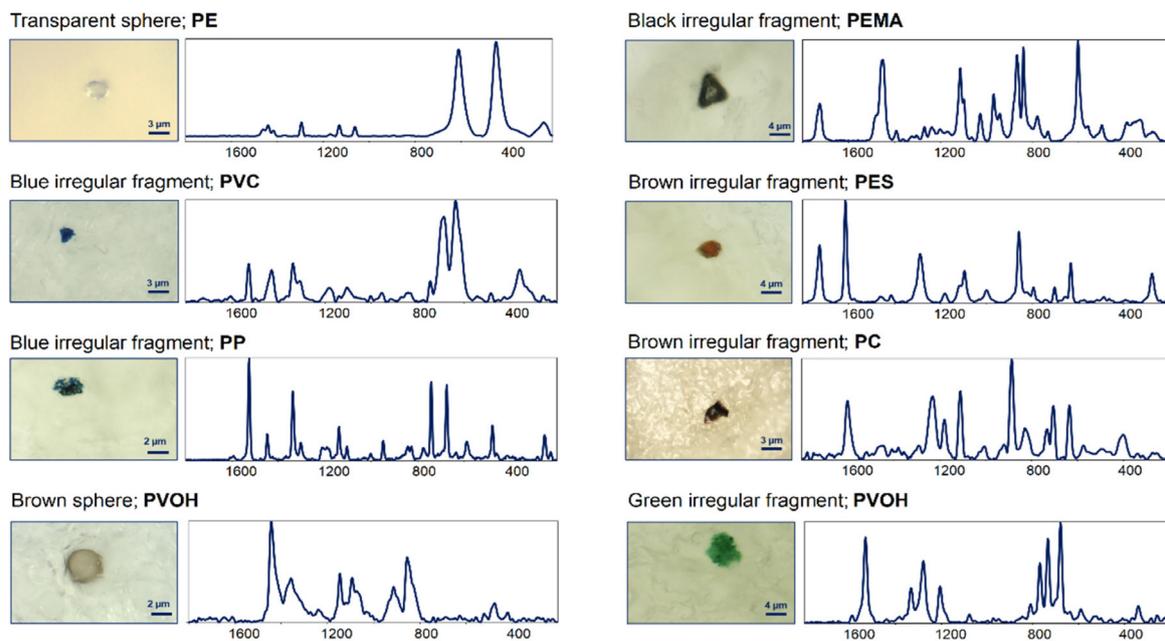


Figura 110: Microfotografie e spettri Raman (numeri d'onda, cm^{-1}) di alcune microplastiche selezionate rilevate nei campioni di latte materno analizzati. PE: polietilene; PVC: cloruro di polivinile; PP: polipropilene; PVA: alcol polivinilico; PEVA: poli (etilene-co-acetato di vinile); PEMA: poli (metacrilato di etile); PES: poliestere; PC: policarbonato.

Fonte: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Dati aggiuntivi mostrano che il livello di MNP nelle feci dei neonati è 14 volte superiore rispetto a quello degli adulti³⁰¹.

Le nanoplastiche e le sostanze chimiche ad essi associate alterano le strutture molecolari e la funzionalità del latte materno. Questi composti possono modificare le proteine presenti nel latte materno umano e nelle formule per bambini, il che potrebbe causare problemi nello sviluppo futuro^{302,303}.

Le alte concentrazioni di MNP esercitano un impatto tossico cumulativo sul corpo in sviluppo. Penetrando nelle cellule, le nanoplastiche possono causare danni strutturali al DNA e alterare i processi metabolici. Questi effetti aumentano i rischi di mutazioni genetiche e patologie a lungo termine, creando una minaccia per la salute delle future generazioni.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

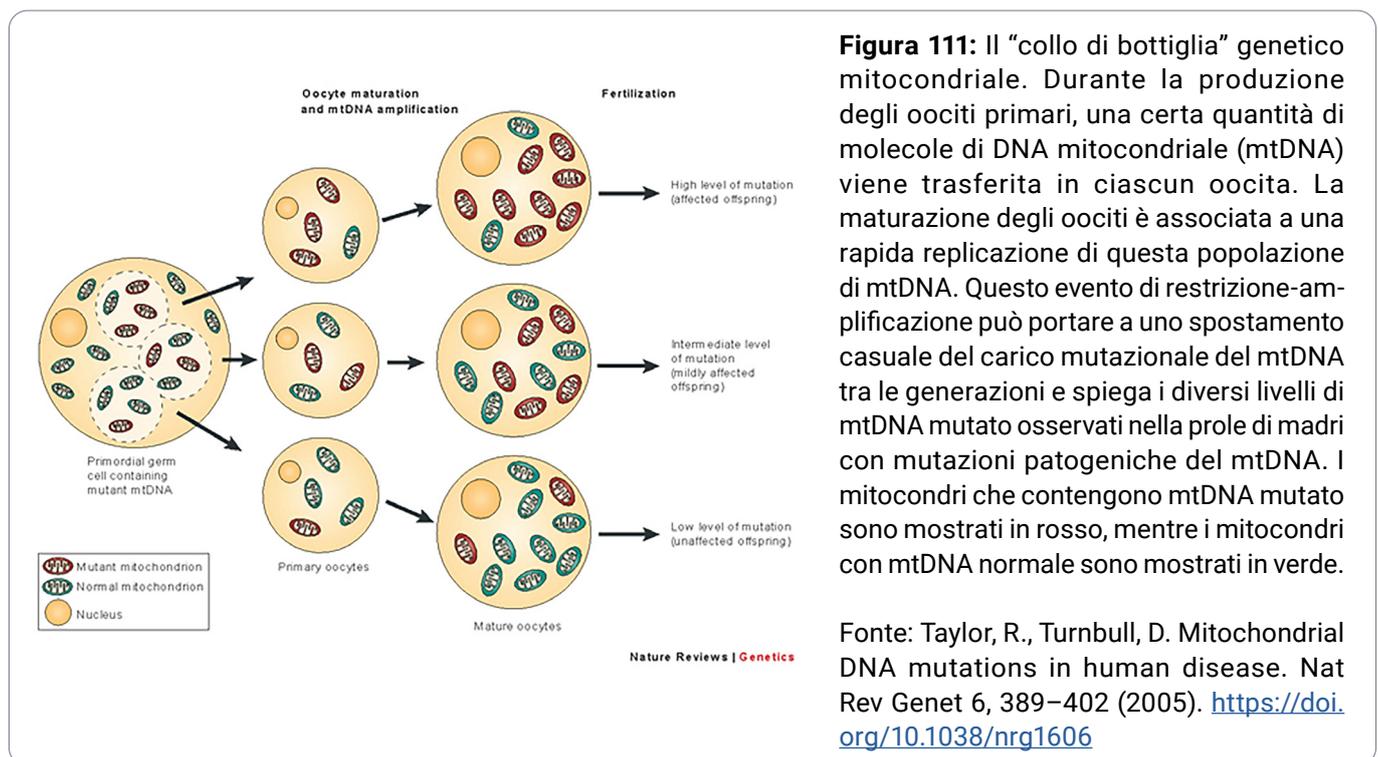
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Conseguenze dell'esposizione postnatale alle MNP e correlazioni con malformazioni congenite

Oltre alla sua capacità di penetrare in modo capillare nei tessuti e nelle cellule, le MNP hanno un'altra pericolosa caratteristica: la possibilità di essere trasmesse "in eredità" alle future generazioni. Durante la divisione cellulare, i frammenti di micro- e nanoplastica passano da una cellula all'altra. Inoltre, grazie alle loro piccole dimensioni e alla carica statica, queste particelle attraversano facilmente la barriera emato-placentare, penetrando nei tessuti e nelle cellule del feto, causando effetti dannosi sullo sviluppo dell'organismo. E, come sottolineato ripetutamente nel rapporto, le MNP causano disfunzioni mitocondriali.

Un recente studio randomizzato mendeliano ha fornito prove convincenti di una connessione causale tra l'espressione delle proteine mitocondriali e il rischio di anomalie congenite. Lo studio ha utilizzato varianti genetiche come variabili strumentali per ridurre i bias tipici dei dati osservazionali. Tra i 66 tratti delle proteine mitocondriali esaminate, sono state trovate associazioni significative con malformazioni del cuore, dell'orecchio, del sistema nervoso, del sistema urinario, sessuale e degli arti. Ciò conferma l'ipotesi del ruolo fondamentale dell'attività mitocondriale nella morfogenesi embrionale³⁰⁴.

Le mutazioni del DNA mitocondriale (mtDNA), sia ereditate che attivate *de novo*, causano una vasta gamma di sindromi cliniche: MELAS, MERRF, NARP, la sindrome di Leigh e altre. Queste malattie colpiscono principalmente gli organi ad alta richiesta energetica – cuore, cervello, muscoli, occhi. La trasmissione avviene esclusivamente per linea materna, a causa dell'origine mitocondriale dell'occita (Fig. 111). Tali disturbi si manifestano frequentemente in età precoce e sono caratterizzati da gravi disturbi neurologici e metabolici.



³⁰⁴Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

I bambini con disturbi mitocondriali si trovano spesso ad affrontare ritardi nello sviluppo, debolezza muscolare, disabilità cognitive e problemi di coordinazione. Sindrome di Kearns-Sayre, sindrome di Barth, malattia di Alpers e altre patologie possono portare a gravi conseguenze, tra cui disabilità permanente o addirittura morte.

Negli ultimi vent'anni, i medici hanno registrato un preoccupante aumento dei difetti congeniti alla nascita. Solo in Cina, la frequenza di tali difetti è aumentata di quasi tre volte, passando da 99,15 su 10.000 nascite nel 2005 a 290,27 su 10.000 nel 2022³⁰⁵ (Fig.112). Una dinamica simile si osserva anche in altri paesi. Le cause di questo aumento sono multifattoriali, ma sempre più dati scientifici suggeriscono una nuova e crescente minaccia: le microplastiche e in particolare le nanoplastiche, che possono penetrare nei tessuti embrionali e interferire nei processi di formazione degli organi e dei sistemi.

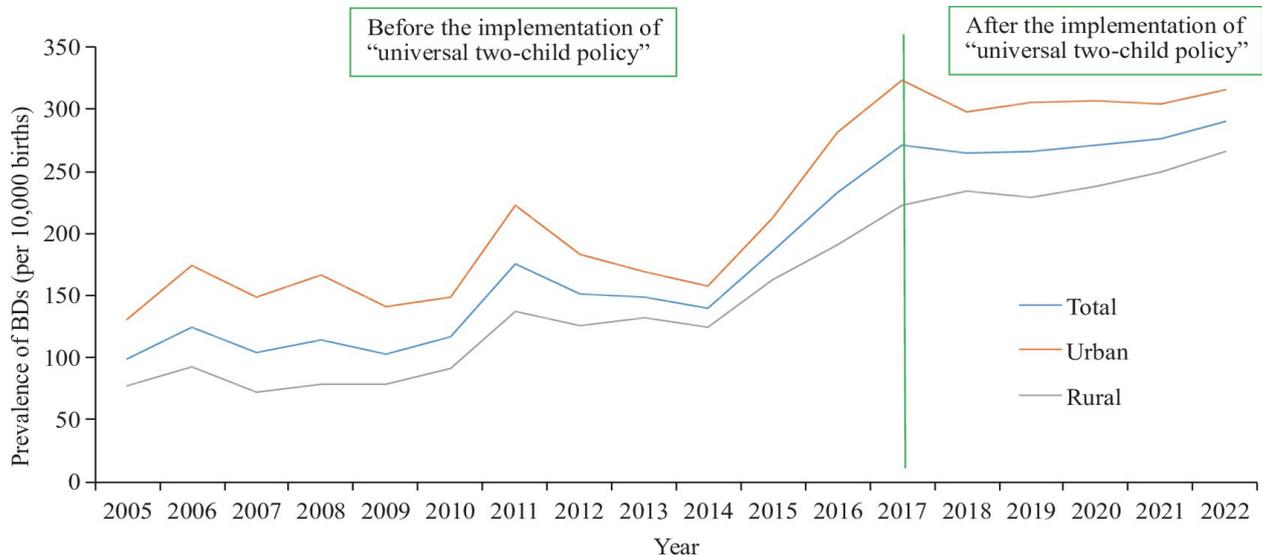


Figura 112: La prevalenza delle malformazioni congenite tra le aree urbane e quelle rurali dal 2005 al 2020. Fonte: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

La carica elettrostatica portata dalla nanoplastica è particolarmente pericolosa nei tessuti embrionali, dove ogni errore può diventare una potenziale anomalia. Tali particelle mostrano un'adesione maggiore alle superfici cellulari, comprese le cellule della cresta neurale, che sono coinvolte nella formazione del cuore, dei vasi sanguigni e delle strutture cranio-facciali. In esperimenti su embrioni di pollo, le nanoplastiche hanno causato gravi malformazioni, tra cui difetti del cuore e dei vasi sanguigni principali. Una delle anomalie in più rapida diffusione è la gastroschisi, un difetto dello sviluppo della parete addominale anteriore, in cui gli organi del feto fuoriuscirebbero attraverso un difetto della pelle e dei muscoli (Figg. 113, 114, 115). Secondo i dati internazionali, la sua prevalenza è aumentata del 161% negli ultimi tre decenni, e tra le madri con meno di 20 anni, è aumentata di diverse volte³⁰⁶. Si ritiene che la nanoplastica interferisca con lo sviluppo della parete addominale nelle prime fasi della gravidanza (4-8 settimane), causando infiammazione e la disfunzione nella chiusura della parte anteriore del corpo.

³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Figura 113-115: Gastroschisi

Un altro difetto congenito, l'ipospadia – un'anomalia in cui l'uretra nei maschi si apre in un punto errato³⁰⁷ – mostra anch'essa un aumento costante (Figg. 116, 117, 118). Ad esempio, negli Stati Uniti, dal 1997 al 2018, l'aumento quantitativo dei casi è stato di circa 1,06 su 1000 neonati maschi vivi (da 6,1 a 7,16 su 1000), con un incremento percentuale di circa il 17%³⁰⁸.

Studi su modelli animali hanno dimostrato che l'esposizione agli ftalati, frequentemente presenti nella microplastica, interferisce con la sintesi del testosterone nei feti maschi.



Figura 116-118: Ipospadi

Questi composti, legati alla superficie carica delle nanoplastiche, sono facilmente trasportati nel flusso sanguigno e nella placenta, accentuando i cambiamenti ormonali durante i periodi critici della differenziazione sessuale. In questo contesto, si osserva un aumento della frequenza della sindrome di Down, della trisomia, dei difetti atrioventricolari cardiaci e di altri gravi disturbi, con un incremento da 12,78 su 10.000 nati vivi nel periodo 1999–2001 a 15,55 su 10.000 nel periodo 2016–2020³⁰⁹.

Allo stesso tempo, si registra un aumento dei problemi psiconeurologici nei bambini, tra cui disturbi d'ansia e deficit cognitivi. Sebbene la relazione causale diretta con le microplastiche sia ancora oggetto di studio, i meccanismi noti, come l'infiammazione, la modulazione epigenetica e le disfunzioni mitocondriali, fanno sospettare che le microplastiche possano essere uno dei fattori contributivi^{307,310}.

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2018.08.024>

³⁰⁸Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

³⁰⁹Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

³¹⁰Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2018.08.024>

Conclusioni e prospettive:

è possibile ridurre l'impatto delle MNP sulla salute umana?

L'analisi dei dati complessivi dimostra che micro- e nanoplastiche rappresentano un fattore di rischio significativo e sottovalutato per la salute umana. I dati scientifici moderni testimoniano in modo convincente che le MNP fanno parte integrante del carico tossico globale esercitato sul corpo umano. Grazie alla capacità di superare le barriere biologiche e accumularsi in vari tessuti, tra cui cervello, cuore, polmoni e placenta, le MNP esercitano un'azione tossica a livello molecolare, cellulare e sistemico. Insieme agli additivi chimici e agli inquinanti ambientali assorbiti, la plastica diventa un fattore in grado di provocare infiammazione cronica, stress ossidativo, disfunzioni mitocondriali e mutazioni del DNA — processi alla base di una vasta gamma di malattie, tra cui disturbi neurodegenerativi, oncologici, cardiovascolari, endocrini e autoimmuni. Ciò che è particolarmente preoccupante è il fatto che le particelle di MNP quasi non vengano eliminate dal corpo, accumulandosi con l'età e aggravando l'effetto cumulativo della loro esposizione.

I dati moderni confermano che evitare il contatto con le MNP non è possibile: esse sono presenti nell'aria, nell'acqua, nel cibo e persino all'interno delle cellule di animali e piante che consumiamo. Di conseguenza, l'esposizione alle particelle di plastica è diventata onnipresente e continua, dall'inizio dello sviluppo embrionale fino alle fasi più avanzate della vita. In particolare, il percorso di esposizione tramite inalazione è particolarmente pericoloso, poiché le nanoparticelle, superando la barriera ematoencefalica, penetrano direttamente nei tessuti del cervello, rendendo il sistema nervoso centrale uno degli obiettivi più vulnerabili.

Il rischio biologico aggiuntivo è legato all'attività elettrostatica delle particelle di MNP, che ne potenzia l'interazione con le strutture biologiche e favorisce la disfunzione dell'omeostasi. Inoltre, viene sottolineato il loro potenziale ruolo nel trasporto di patogeni e microrganismi resistenti agli antibiotici, conferendo al problema dell'inquinamento da micro- e nanoplastiche un carattere interdisciplinare che coinvolge l'ecologia, la tossicologia, l'immunologia, la neurologia e la medicina riproduttiva.

A questo proposito, una delle direzioni strategiche proposte da "ALLATRA", nell'ambito di un più ampio sforzo per contrastare la minaccia delle MNP, è lo sviluppo di metodi per neutralizzare o schermare la carica elettrostatica delle nanoplastiche. La riduzione dell'attività elettrostatica di tali particelle potrebbe diminuire in modo significativo i loro effetti nocivi e rallentarne l'accumulo nell'organismo. Secondo gli autori di questo rapporto, i metodi di schermatura o neutralizzazione della carica potrebbero ridurre i potenziali rischi associati alle MNP di almeno il 50%. Ciò offrirebbe un maggior tempo che potrebbe essere cruciale per sviluppare strategie più complete per la diagnosi, la prevenzione e la rimozione delle MNP dall'organismo. In questo contesto, ulteriori ricerche nei campi della biofisica, della nanotecnologia e della tossicologia molecolare diventano particolarmente importanti.

Nonostante l'aumento delle pubblicazioni scientifiche su questo argomento, l'impatto delle MNP sulla salute umana rimane ancora poco studiato e scarsamente preso in considerazione nella formulazione delle strategie per la protezione della salute e dell'ambiente. Considerando le dimensioni dell'inquinamento da plastica, l'attività biologica di queste particelle e le potenziali conseguenze irreversibili del loro impatto, questo settore richiede una priorità maggiore da parte della comunità scientifica e delle autorità sanitarie, la sistematizzazione dei dati, lo sviluppo di standard per la valutazione dei rischi e l'espansione della cooperazione scientifica internazionale e intergovernativa.

ANALISI DEGLI APPROCCI ATTUALI ALLA RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO DA PLASTICA

Tecnologie di rimozione della plastica di grandi dimensioni dagli ecosistemi acquatici

Le iniziative per mitigare gli effetti dell'inquinamento oceanico si concentrano principalmente sulla rimozione dei rifiuti visibili di grandi dimensioni dalla superficie dell'acqua. Attualmente, uno dei progetti più ambiziosi per la raccolta della plastica e di altri tipi di rifiuti galleggianti è l'iniziativa *The Ocean Cleanup*. I loro sistemi galleggianti catturano i rifiuti superficiali (Fig. 119), che vengono successivamente selezionati e confezionati per il riciclaggio o lo smaltimento.

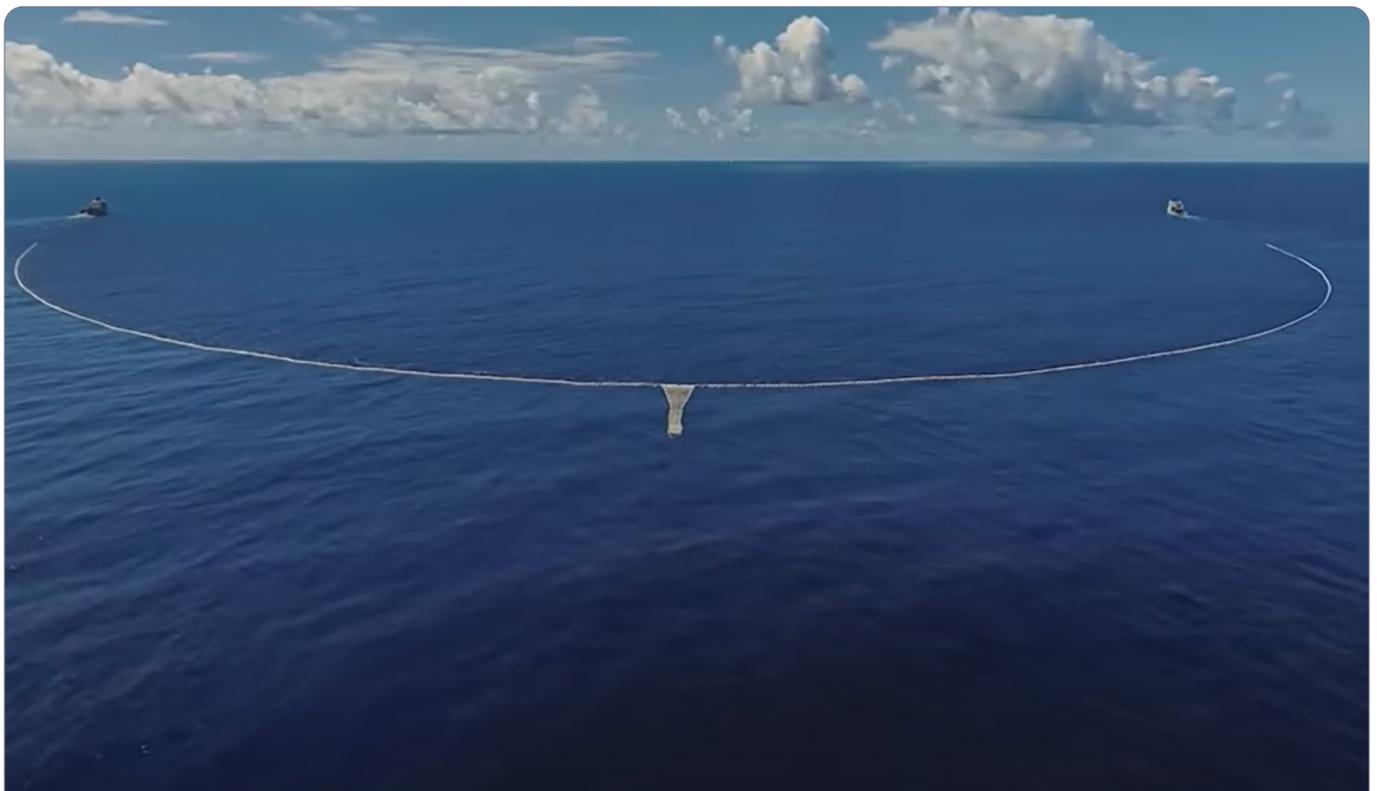


Figura 119: L'immagine mostra la tecnologia *The Ocean Cleanup* in azione. Una lunga barriera galleggiante a forma di U, realizzata con materiale resistente, raccoglie i rifiuti di plastica sulla superficie dell'oceano.
Fonte: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (accessed 1 May 2025)

Sebbene questo metodo sembri promettente, è importante considerare alcuni aspetti che richiedono particolare attenzione:

1. Il processo di raccolta dei rifiuti non è selettivo e, insieme alla plastica, intrappola anche organismi viventi come alghe microscopiche, larve di pesce e meduse. Attualmente mancano stime quantitative sul volume degli organismi finiti nel sistema di raccolta; in ogni caso la loro rimozione su larga scala può avere effetti negativi sugli ecosistemi marini, compromettendo le catene alimentari naturali. Nonostante gli sforzi per garantire la sicurezza della fauna marina, il problema rimane irrisolto.

2. Gli attivisti sono sinceramente impegnati nella pulizia dell'oceano, tuttavia **gli sforzi compiuti non sono sufficienti per ottenere risultati significativi**.

A novembre 2024, l'iniziativa *The Ocean Cleanup* ha rimosso circa 20.000 tonnellate di rifiuti di plastica dagli oceani. Si tratta, senza dubbio, di un risultato importante. Tuttavia, nel contesto del problema globale, rappresenta solo lo 0,01% del totale dei rifiuti di plastica negli oceani, stimato intorno ai 200 milioni di tonnellate. Inoltre, ogni anno si aggiungono circa 11 milioni di tonnellate di nuovi rifiuti di plastica (Fig. 120). Questi dati evidenziano la sproporzione tra gli sforzi di pulizia e l'entità del problema.



Figura 120: Il grafico confronta tre metriche chiave legate all'inquinamento plastico degli oceani: la quantità di rifiuti di plastica galleggianti, la plastica scaricata annualmente negli oceani e il volume raccolto dall'organizzazione *The Ocean Cleanup*.

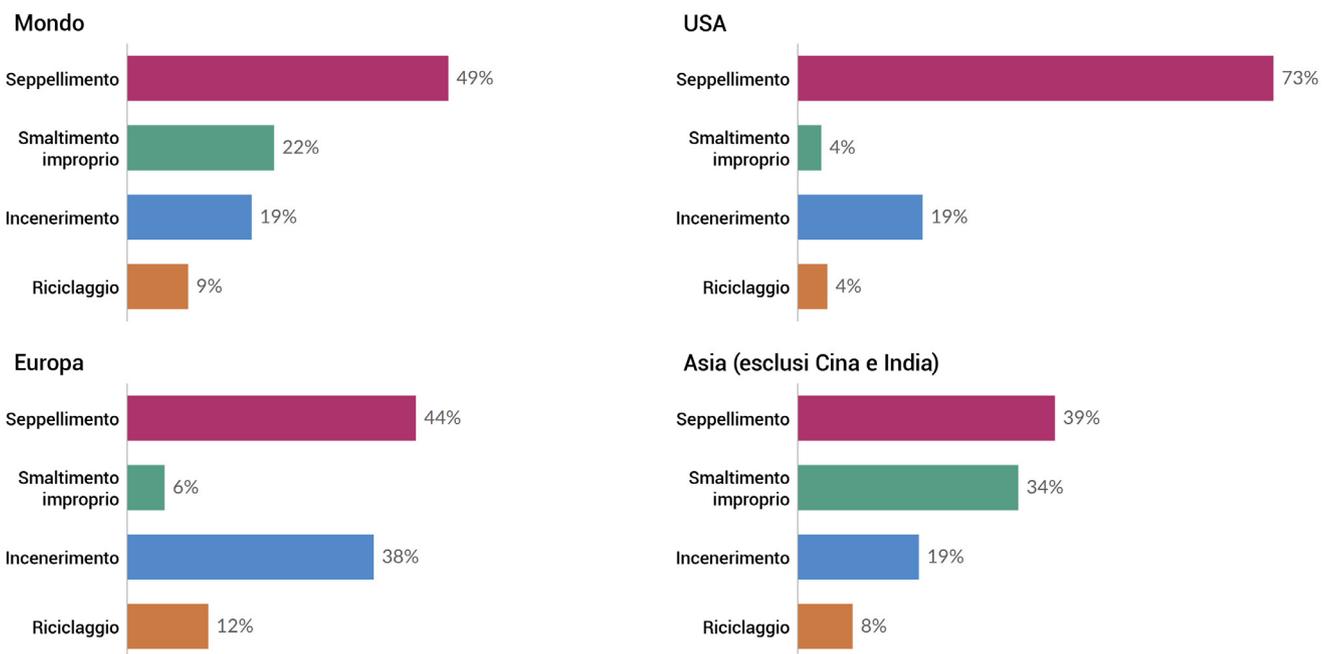
Fonte: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (accessed 1 May 2025).

3. La questione principale rimane il destino della plastica raccolta. Attualmente, i tassi globali di riciclo dei rifiuti di plastica non superano il 9% (Fig. 121). Di conseguenza, è molto probabile che una parte significativa della plastica recuperata finisca in discarica, senza risolvere il problema dell'inquinamento nel lungo periodo.

La percentuale di rifiuti di plastica che vengono riciclati, smaltiti in discarica, inceneriti e smaltiti in modo scorretto. 2019

Our World
in Data

I materiali smaltiti in modo scorretto sono quelli inceneriti in discariche a cielo aperto, scaricati in mare o in bacini idrici aperti o smaltiti in discariche e siti di smaltimento non conformi alle norme igienico-sanitarie.



Fonte dei dati: OCSE (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Nota: i valori complessivi per regione sono stati calcolati dal progetto Our World in Data sulla base dei dati forniti dall'OCSE.

1. OECD regions: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Figura 121: Quota dei rifiuti di plastica che vengono riciclati, destinati alla discarica, inceneriti e gestiti in modo improprio, 2019. I rifiuti di plastica smaltiti in modo improprio includono materiali bruciati in cave aperte, scaricati in mari o corpi idrici aperti, o smaltiti in discariche e siti di deposito insalubri.

Fonte: OECD (2023)

Nota: i dati aggregati regionali sono stati calcolati da *Our World in Data* e si basano sui dati forniti dall'OCSE.

[OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY

<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

Inoltre, le operazioni di pulizia degli oceani comportano costi finanziari significativi. Ad esempio, la lontananza della grande chiazza di immondizia del Pacifico dalle acque territoriali di qualsiasi Stato crea una situazione in cui non è chiaramente definita la responsabilità per il finanziamento e l'esecuzione delle attività di bonifica. Secondo Charles Moore — oceanografo e ricercatore che per primo ha scoperto la grande chiazza di immondizia del Pacifico — una pulizia su vasta scala di quest'area manderebbe in bancarotta qualsiasi Paese che tentasse di intraprendere un simile sforzo. È importante sottolineare che sono stati identificati cinque simili accumuli di rifiuti negli oceani del mondo (Fig. 122), il che aggrava ulteriormente il problema.

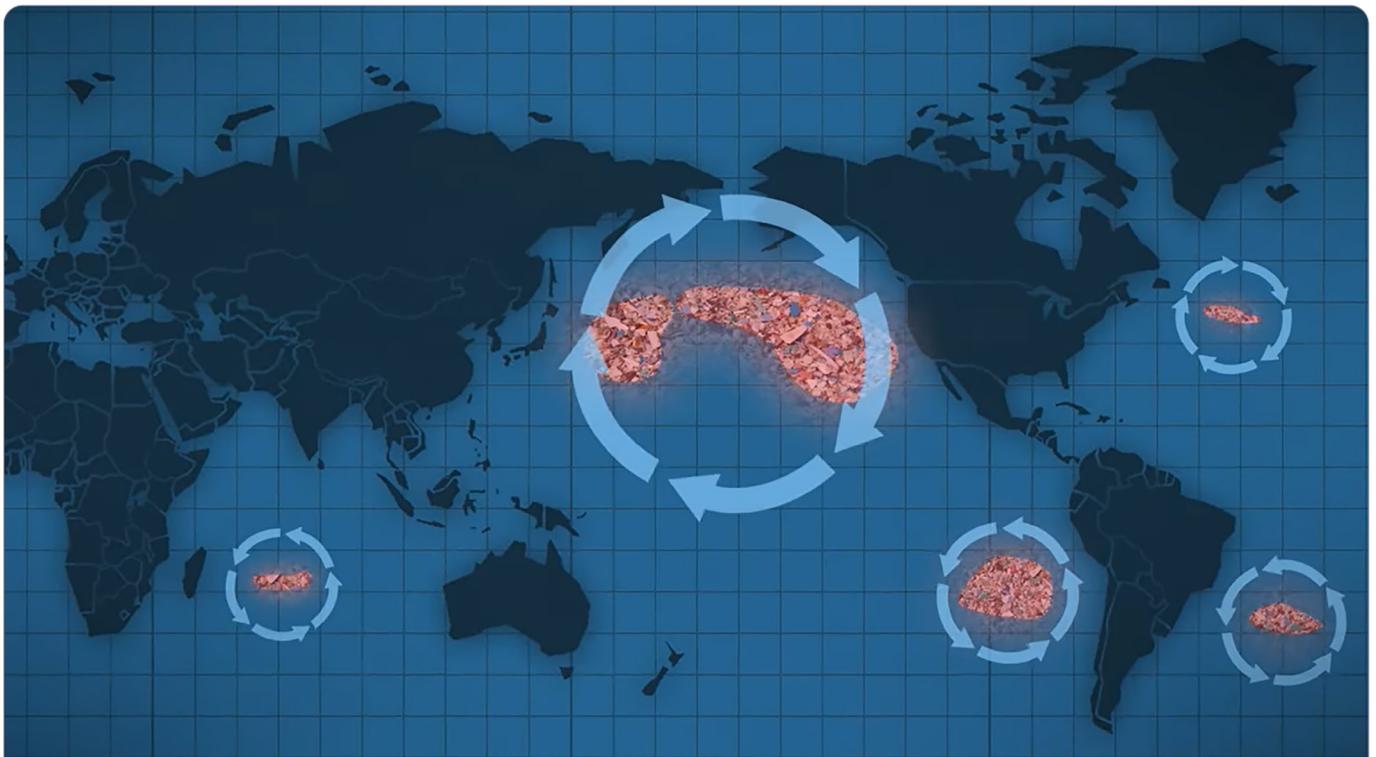


Figura 122: Rappresentazione schematica della posizione dei cinque principali accumuli di rifiuti nell'oceano mondiale

È importante sottolineare che i rifiuti di plastica visibili di grandi dimensioni rappresentano solo una parte del problema complessivo dell'inquinamento da plastica negli oceani. Secondo Melanie Bergmann, biologa marina dell'Istituto Alfred Wegener, *“si tratta solo della plastica presente sulla superficie dell'oceano, che rappresenta una piccola parte — meno dell'1% di quella effettivamente presente negli oceani”*.

Man mano che la plastica si frammenta in micro- e nanoparticelle, il compito di ripulire gli oceani da questo tipo di inquinamento diventa molto più complesso. Esistono già alcune tecnologie sperimentali per la rimozione della microplastica dall'acqua. Ad esempio, ricercatori dell'Università di Sichuan hanno sviluppato un mini robot a forma di pesce (Fig. 123), capace di nuotare nell'ambiente acquatico e assorbire frammenti di microplastica galleggianti nelle vicinanze³¹¹. Questo robot bionico, lungo 13 mm, raccoglie efficacemente le particelle di microplastica grazie a legami chimici forti e interazioni elettrostatiche tra i materiali del suo corpo e i componenti della microplastica, come coloranti organici, antibiotici e metalli pesanti.

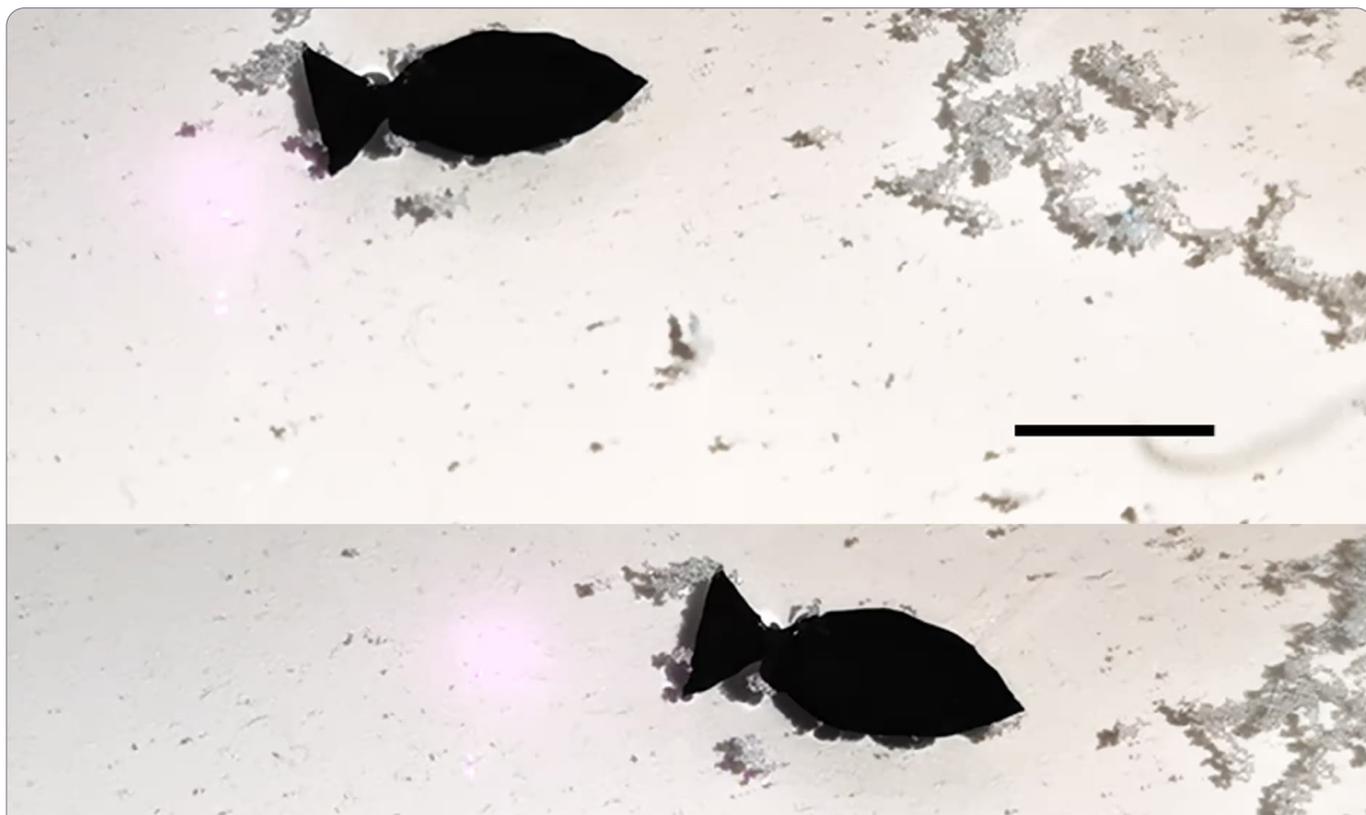


Figura 123: L'immagine mostra un piccolo pesce robot sviluppato dai ricercatori dell'Università del Sichuan. Il dispositivo compatto, simile a un vero pesce, nuota nell'ambiente acquatico, adsorbendo attivamente i frammenti di microplastiche presenti nell'acqua.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Tuttavia, nonostante tali innovazioni, l'applicazione pratica di queste tecnologie su scala globale è attualmente limitata. I robot in miniatura assorbono microplastiche solo nelle immediate vicinanze, il che rende il processo localizzato; anche in grandi quantità, non sono in grado di coprire l'estensione degli oceani del mondo. Inoltre, potrebbero entrare nella catena alimentare marina. Esistono inoltre incertezze riguardo alla loro capacità di funzionare in condizioni oceaniche complesse, come correnti forti, elevata pressione e salinità. Pertanto, le soluzioni attuali non sono ancora sufficientemente efficaci e incontrano ostacoli significativi nella loro scalabilità.

³¹¹Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Metodi attuali per la rimozione di micro- e nanoplastiche

Sempre più attenzione viene rivolta al potenziale utilizzo dei microrganismi, in particolare dei batteri, per la degradazione enzimatica dei polimeri sintetici, soprattutto del polietilene tereftalato (PET). Questa tecnologia viene promossa come un'alternativa potenzialmente ecologica ai metodi tradizionali di smaltimento dei rifiuti di plastica, come l'incenerimento. Tuttavia, i dati empirici attualmente disponibili sollevano dubbi sulla sua efficacia, sicurezza e applicabilità su scala industriale.

Nel 2016, un team di ricercatori giapponesi guidati da Shosuke Oda ha scoperto il batterio *Ideonella sakaiensis*, capace di degradare il PET attraverso la produzione di due enzimi: PETasi e MHETasi. Questa scoperta ha rappresentato un evento significativo nel campo della microbiologia³¹². Tuttavia, gli esperimenti di laboratorio hanno rivelato che il processo di degradazione è estremamente lento: per decomporre una pellicola di plastica del peso di 20 gr, i batteri hanno impiegato circa sette settimane in condizioni ottimali. È evidente che una tale velocità di smaltimento non può essere considerata soddisfacente per affrontare il problema dell'inquinamento da plastica. Su scala globale, dove milioni di tonnellate di plastica vengono rilasciate nell'ambiente ogni anno, questa velocità è paragonabile al tentativo di svuotare l'oceano con un cucchiaino.

Gli sforzi scientifici si sono concentrati sulla modifica dell'enzima PETasi, utilizzato dal batterio per degradare la plastica. Tuttavia, come ammettono gli stessi ricercatori, l'enzima di *Ideonella sakaiensis* si trova ancora nelle prime fasi della sua evoluzione: la sua efficienza è bassa, la stabilità limitata e l'accelerazione della reazione richiede temperature non compatibili con l'ambiente naturale. Anche l'ingegneria genetica, al momento, non è in grado di prevedere con certezza quali mutazioni porterebbero a miglioramenti significativi. Come ha dichiarato Elizabeth Bell del *National Renewable Energy Laboratory* degli Stati Uniti, si tratta di "due passi avanti e uno indietro".

Inoltre, la degradazione enzimatica non è una soluzione universale: solo alcuni tipi di plastica, come il PET, possono essere teoricamente degradati da questi enzimi. Altri materiali comunemente usati, come il polietilene e il polipropilene, risultano ancora praticamente indigeribili per i microrganismi. Gli scienziati di *Nature* hanno affermato che la maggior parte delle plastiche richiede troppa energia per essere efficacemente degradate da vie biochimiche.

Anche nell'ipotesi in cui venga sviluppato un microrganismo altamente efficiente, sorgono preoccupazioni ben più gravi: è sicuro rilasciarlo nell'ambiente? **Qualsiasi batterio geneticamente modificato rappresenta una potenziale minaccia ecologica. Attualmente, quasi tutti i paesi regolamentano severamente — o vietano completamente — il rilascio di tali organismi in natura.**

Le ragioni sono evidenti: non sappiamo come si comporterà il batterio una volta "compiuta la sua missione". Potrebbe attaccare altre molecole organiche importanti? Potrebbe soppiantare altri microrganismi? O causare mutazioni con conseguenze ancor meno prevedibili?

In definitiva, un problema ecologico potrebbe facilmente essere sostituito da un altro — ancora più imprevedibile e distruttivo. Nonostante l'indubbio valore della ricerca di base sulla biodegradazione dei polimeri, allo stato attuale questa tecnologia non può essere considerata una soluzione efficace, scalabile e sicura al problema dell'inquinamento da plastica.

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Studio dell'effetto della bollitura dell'acqua sulla rimozione delle microplastiche: efficacia e rischi

Esperti di ingegneria biomedica e di ricerca sulle microplastiche della Guangzhou Medical University e della Jinan University (Cina) hanno condotto uno studio³¹³. L'esperimento aveva lo scopo di studiare l'effetto della bollitura dell'acqua ad alto contenuto di sali di calcio (acqua dura) sulla rimozione delle microplastiche.

Per lo studio sono stati prelevati campioni di acqua di rubinetto di diversa durezza dalla città di Guangzhou. All'acqua sono stati aggiunti tre tipi di particelle di plastica, polistirene, polietilene e polipropilene, di dimensioni comprese tra 0,1 e 150 micrometri. I campioni sono stati fatti bollire per 5 minuti, poi sono stati raffreddati ed è stato misurato il contenuto residuo di microplastica.

Durante l'ebollizione in acqua dura satura di sali di calcio, si forma del carbonato di calcio insolubile (CaCO_3), noto come calcare. I ricercatori hanno ipotizzato che le particelle di microplastica possano legarsi ai cristalli di carbonato di calcio e precipitare, il che spiega la diminuzione della concentrazione di microplastica nell'acqua bollente.

L'efficienza di pulizia è stata massima nei campioni con elevata durezza (300 mg di CaCO_3 per litro), dove la bollitura ha rimosso fino al 90% delle microplastiche. Nei campioni con acqua dolce (meno di 60 mg di CaCO_3 per litro), l'effetto è stato molto più basso: è stato rimosso solo il 25% delle particelle di plastica.

Tuttavia, nonostante gli effetti positivi della bollitura dell'acqua dura, si pone un problema importante: la possibilità che micro- e nanoplastiche finiscano nell'aria. L'acqua bollente produce vapore acqueo, che rilascia particelle di microplastica nell'aria. L'inalazione di queste particelle è una minaccia più grave rispetto all'ingestione attraverso cibo o acqua.

Gli studi dimostrano che, una volta inalata, la nanoplastica può entrare nel cervello entro 2 ore, mentre la microplastica viene parzialmente espulsa quando viene ingerita attraverso l'apparato digerente. L'ingestione di plastica nel cervello è associata a rischi a lungo termine, poiché l'escrezione di tali particelle dal tessuto cerebrale è impossibile.

Pertanto, il metodo di bollitura dell'acqua aumenta potenzialmente il rischio di inquinamento atmosferico da microplastiche, che potrebbe essere più pericoloso per la salute umana. Ciò sottolinea la necessità di sviluppare metodi di purificazione dell'acqua più sicuri ed efficaci.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

La pirolisi come metodo di riciclaggio della plastica: efficienza e rischi

La pirolisi è una tecnologia di riciclaggio della plastica basata sulla decomposizione termica della plastica ad alte temperature in un ambiente con accesso limitato all'ossigeno. Il processo avviene tipicamente a temperature comprese tra 300 e 800 °C e produce composti idrocarburici gassosi e liquidi, nonché un residuo solido sotto forma di carbonio.

Durante la decomposizione ad alta temperatura, le catene polimeriche della plastica si disintegrano e il residuo viene utilizzato come combustibile. Tuttavia, questo metodo, insieme alla combustione tradizionale della plastica, è accompagnato da significativi rischi ambientali associati all'emissione di nanoplastiche.

L'esposizione alle alte temperature riduce la plastica in minuscole particelle, tra cui la nanoplastica (di dimensioni inferiori a 100 nanometri). Queste particelle sono così piccole che i moderni sistemi di filtraggio non sono in grado di trattenerle completamente, causandone il rilascio nell'atmosfera.

La combustione della plastica è accompagnata anche dal rilascio di diossine e furani, composti altamente tossici con effetti cancerogeni³¹⁴.

Pertanto, l'uso della pirolisi e della combustione della plastica come combustibile è accompagnato da un rischio significativo di emissioni nell'atmosfera, che rappresenta una minaccia non solo per l'ambiente ma anche per la salute umana. Questo metodo di utilizzo della plastica non può essere considerato una soluzione sicura e sostenibile al problema dell'inquinamento ambientale. Il vero costo di questo tipo di combustibile è rappresentato dalla minaccia che esso comporta per la vita e il benessere umano.

³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

APPROCCI DELLA COMUNITÀ SCIENTIFICA “ALLATRA” ALLA LOTTA CONTRO L’EPIDEMIA DI NANOPLASTICHE

Tecnologie di generatori di acqua atmosferica (GAA) per la bonifica ambientale dell’oceano

Il ripristino dell’equilibrio ecologico richiede l’adozione su larga scala di tecnologie innovative, come i generatori d’acqua atmosferica (GAA). Attualmente, questi dispositivi sono disponibili in un’ampia gamma di modelli, da quelli domestici a quelli industriali. Sono in grado di produrre acqua potabile dall’aria, rimuovendo efficacemente le sostanze inquinanti, incluse le microplastiche (Fig. 124). L’acqua può inoltre essere mineralizzata per migliorarne il gusto e apportare benefici alla salute.

Il principio di funzionamento dei generatori si basa sulla condensazione dell’umidità contenuta nell’aria.

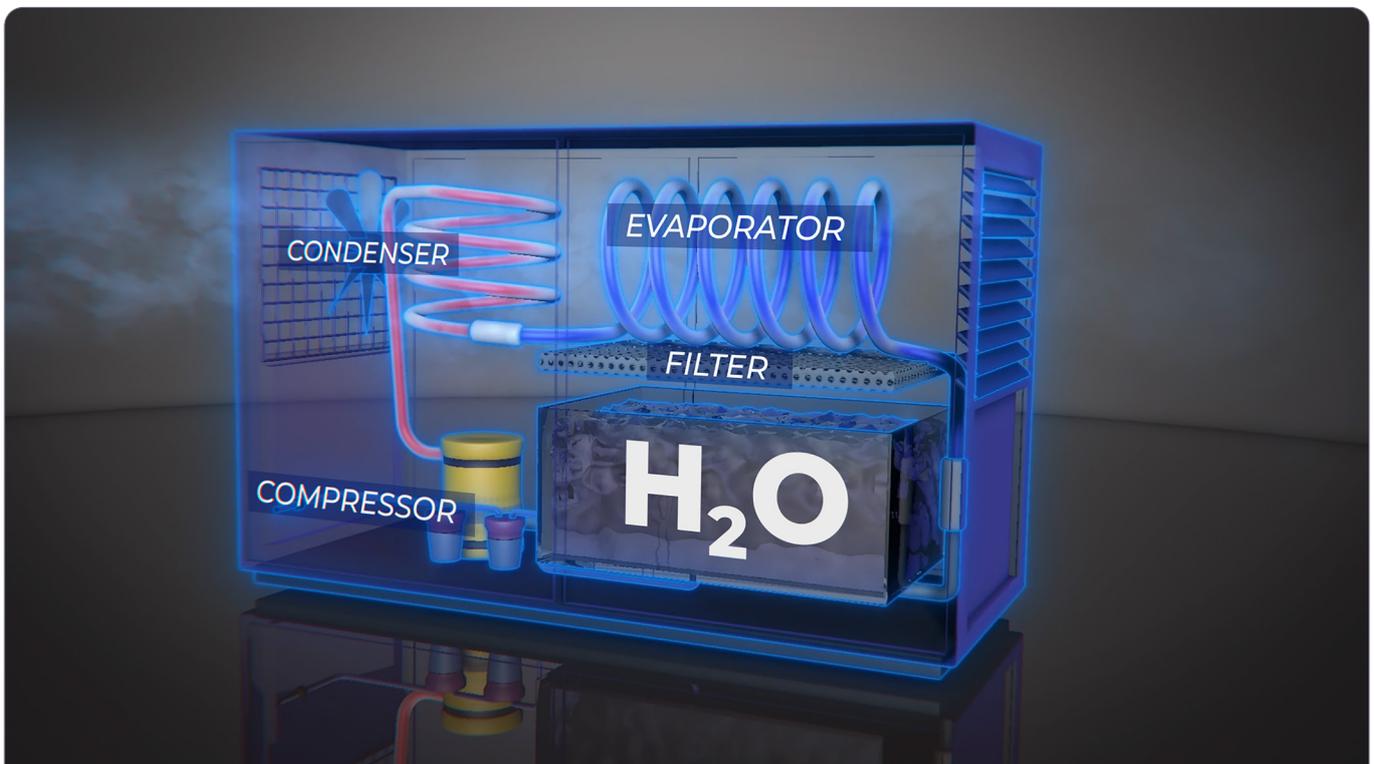


Figura 124: L'immagine mostra una rappresentazione schematica di un generatore di acqua atmosferica, illustrando le sue parti costitutive e il principio di funzionamento

I GAA funzionano secondo due principali tecnologie:

1. **Tecnologia basata sulla condensazione** – questo metodo aspira l'aria circostante all'interno del dispositivo, facendola entrare in contatto con una superficie fredda o una serpentina refrigerante, causando la condensazione del vapore acqueo in forma liquida. Il processo è simile alla formazione di condensa su un oggetto freddo appena tolto dal congelatore. I GAA a condensazione funzionano meglio in ambienti caldi e umidi.

2. **Tecnologia basata sull'adsorbimento** – per catturare l'umidità dall'aria si utilizzano materiali igroscopici come gel di silice, zeoliti o strutture metal-organiche. L'acqua assorbita viene poi rilasciata riscaldando il materiale.

Oggi, questi dispositivi sono impiegati localmente per fornire acqua potabile alla popolazione, anche in situazioni di emergenza climatica.

L'adozione su larga scala dei GAA per soddisfare le esigenze idriche di industrie e popolazioni potrebbe portare, nel giro di pochi anni, a una significativa riduzione dell'inquinamento degli oceani.

Attualmente, le fonti d'acqua utilizzate per usi domestici, incluso il consumo alimentare, sono spesso corpi idrici contaminati da alti livelli di micro- e nanoplastiche. Questo comporta un accumulo di plastica nel corpo umano. Passare alla produzione di acqua dall'aria, anziché da fonti inquinate, potrebbe migliorare notevolmente la qualità dell'acqua consumata.

Recupero degli ecosistemi tramite filtrazione naturale e generatori di acqua atmosferica

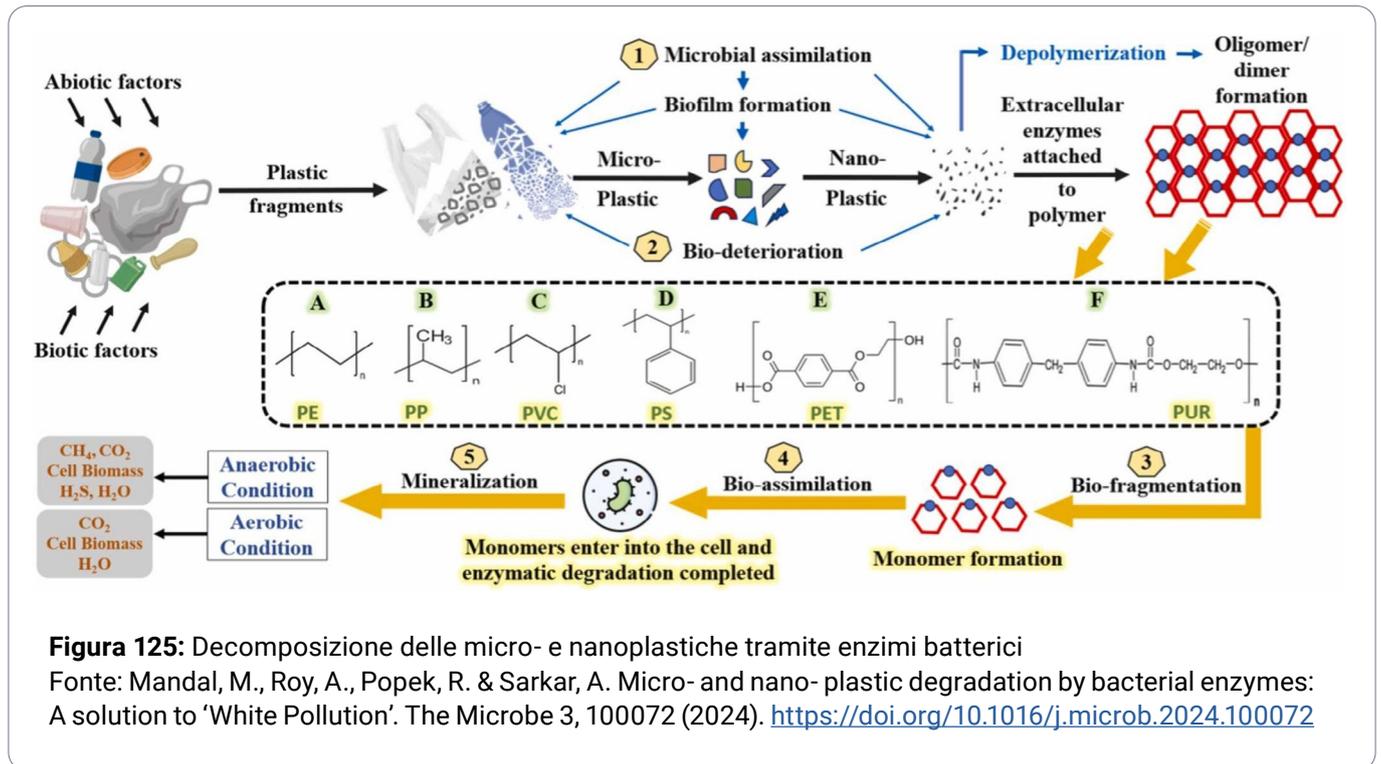
Per una rimozione efficace delle microplastiche dalle acque reflue, è necessario impiegare tecnologie innovative, sistemi moderni di filtrazione e assimilazione. Inoltre, è fondamentale riconvertire gli impianti di trattamento in modo che le acque depurate non vengano scaricate nei bacini idrici, bensì reindirizzate nel suolo, dove vivono microrganismi naturalmente capaci di degradare la plastica³¹⁵.

Questi organismi si distinguono nettamente da quelli geneticamente modificati o creati artificialmente in laboratorio. La loro presenza negli ecosistemi è naturale e non mostrano caratteristiche invasive nell'ambiente in cui si trovano.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Le ricerche³¹⁶ dimostrano che diversi microrganismi del suolo presenti in ambienti naturali³¹⁷ mostrano un'efficienza significativa nella degradazione di polimeri³¹⁸ come il polietilene³¹⁹ e il polietilene tereftalato³²⁰. Ad esempio, la maggiore attività di degradazione fungina – con una riduzione media della massa del polietilene del 36,4±5,53% in 16 settimane – è stata osservata nel ceppo *Aspergillus oryzae* A5,1.

La capacità dei microrganismi di biodegradare i polimeri è dovuta alla produzione di enzimi in grado di scindere le complesse strutture molecolari delle plastiche³¹⁷.



Questi dati, confermati da osservazioni sperimentali, indicano il potenziale utilizzo delle comunità microbiche naturali per ridurre il livello di inquinamento ambientale da micro- e nanoplastiche.

“Tra i vari metodi di bonifica attualmente disponibili, la bonifica microbica mostra le prospettive migliori per la degradazione o la rimozione sostenibile delle microplastiche dall’ambiente” – si afferma in una ricerca di revisione³¹⁷.

Pertanto, il passaggio alla tecnologia di estrazione dell’acqua dall’aria migliorerà notevolmente la qualità dell’acqua consumata e, in combinazione con la bonifica microbica, contribuirà a una significativa riduzione dell’inquinamento ambientale da micro- e nanoplastiche.

³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

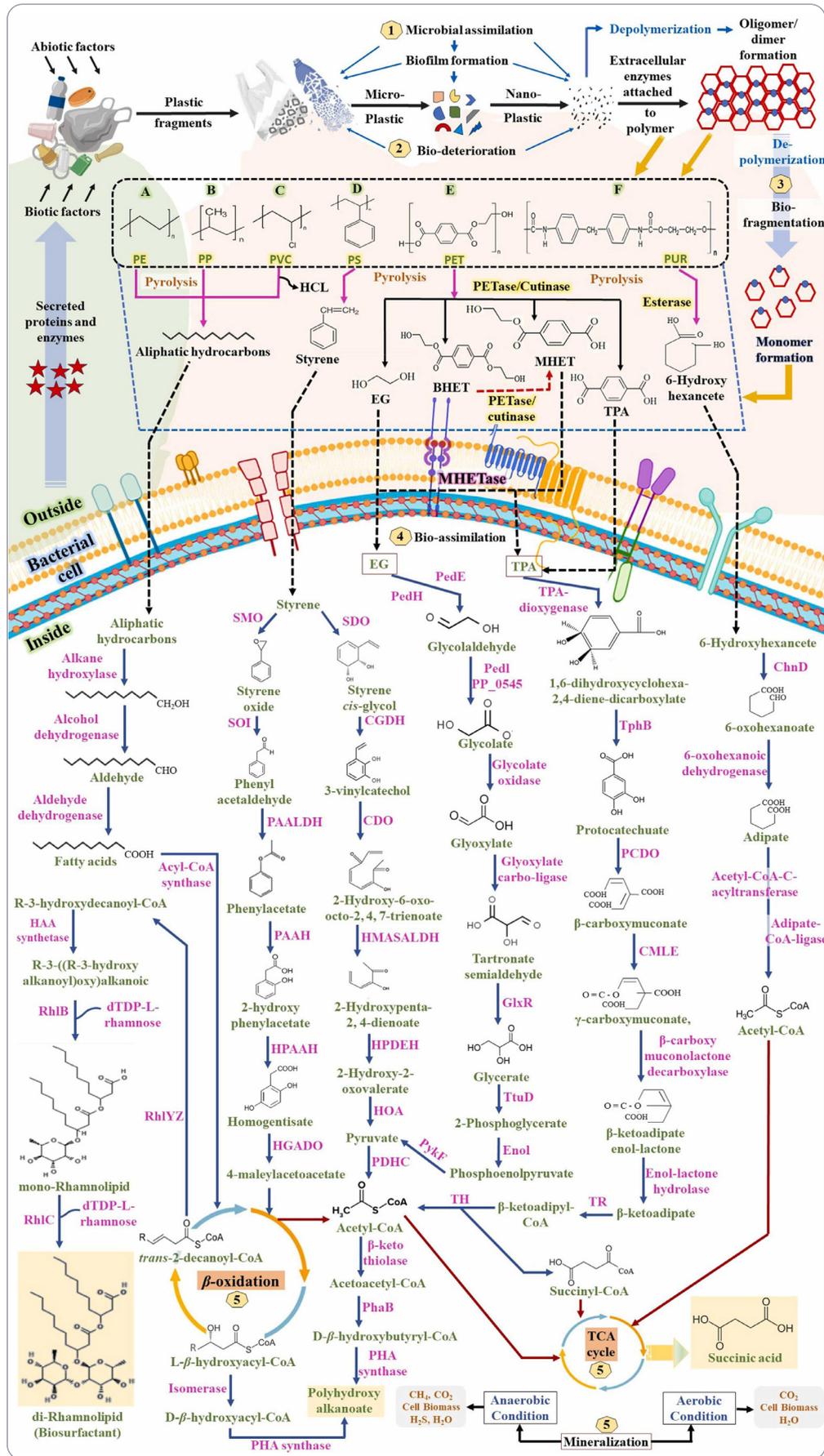


Figura 126: I rifiuti di plastica si degradano in MNP a causa di vari fattori abiotici e biotici

Fonte: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Nello strato superficiale del suolo, così come nei corpi idrici, la concentrazione di plastica rimarrà elevata per un certo periodo. Tuttavia, man mano che l'acqua penetra a profondità maggiori, si verificherà un processo di autodepurazione (Fig. 127). I microrganismi presenti nel suolo contribuiranno alla degradazione delle particelle di nanoplastiche.

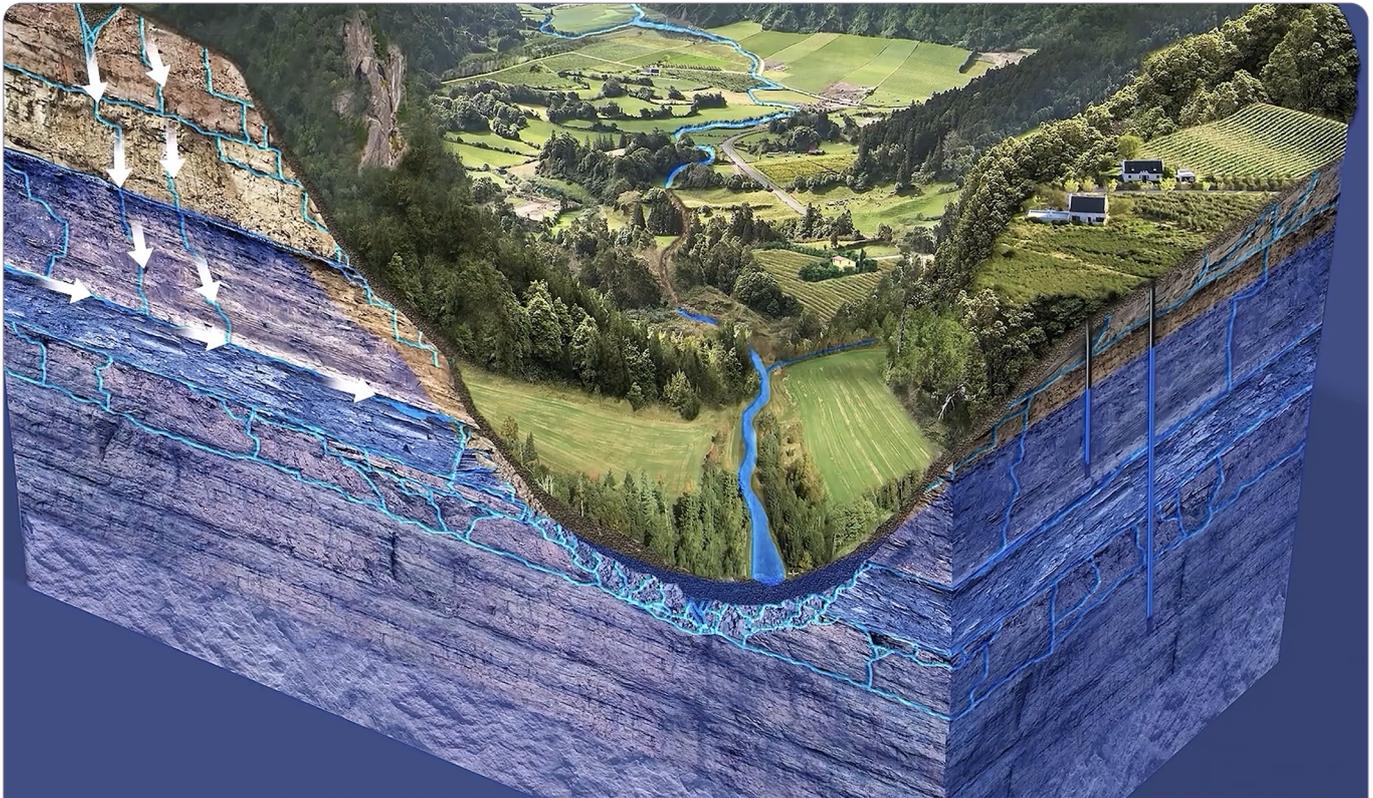


Figura 127: Rappresentazione schematica del processo di depurazione biologica dell'acqua scaricata nel suolo, attraverso formazioni geologiche. Le frecce indicano il percorso delle acque reflue che attraversano gli strati di terreno e rocce, dove i microrganismi e i materiali filtranti rimuovono gli inquinanti. Gli strati del suolo sono indicati con colori diversi: marrone per il terreno, grigio per sabbia e ghiaia.

L'aumento del volume di acqua usata e filtrata negli impianti di depurazione, reimpressa nel suolo, favorisce la proliferazione dei microrganismi, tra cui batteri, funghi e archei, che svolgono un ruolo fondamentale nella formazione di un suolo sano, nel ciclo dei nutrienti e nella resilienza degli ecosistemi. In seguito, l'acqua depurata filtrerà verso strati più profondi e tornerà agli oceani.

L'installazione di generatori d'acqua atmosferica (GAA) nelle regioni desertiche, insieme al ritorno dell'acqua usata nel suolo, rappresenta una soluzione promettente per superare la crisi idrica e combattere la desertificazione, in quanto attiva processi che favoriscono la rigenerazione della vegetazione e degli ecosistemi³²¹. L'uso dei GAA migliorerà la qualità della vita delle popolazioni locali, affrontando il problema della scarsità di acqua potabile.

In combinazione con il biorisanamento microbico, l'impiego dei GAA può rappresentare un passo fondamentale verso una gestione sostenibile delle risorse idriche e la riabilitazione dei terreni degradati.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Il passaggio completo ai GAA prevede l'utilizzo dell'acqua atmosferica per tutte le necessità della popolazione, comprese quelle domestiche, industriali e agricole. L'adozione su scala globale di questa tecnologia porterà a una maggiore evaporazione, che raffredderà gli oceani e ne accelererà il processo di purificazione. Inoltre, la riduzione dell'umidità atmosferica in eccesso tramite i GAA diminuirà la frequenza di precipitazioni estreme e venti intensi, contribuendo così ad attenuare l'impatto distruttivo dei disastri naturali (per ulteriori dettagli, si veda il documentario: *"Acqua dall'aria: La via per salvare l'umanità"*).

Sfide e rischi legati all'impiego dei generatori di acqua atmosferica

Tuttavia, c'è un aspetto negativo nell'applicazione globale dei GAA. Il problema è che l'applicazione della tecnologia di generazione dell'acqua atmosferica non considera direttamente il suo impatto sull'uomo. Se è vero che l'applicazione di questa tecnologia può contribuire alla purificazione delle acque oceaniche e migliorare la conducibilità termica, l'applicazione su larga scala dei GAA può anche portare a un aumento significativo della concentrazione di microplastiche nell'atmosfera. Il meccanismo dei GAA prevede la condensazione dell'umidità dall'atmosfera, che viene successivamente reintegrata dall'evaporazione dalle acque oceaniche. Poiché queste acque contengono alti livelli di microplastiche e nanoplastiche, l'umidità che entra nell'atmosfera durante questo processo può trasportare minuscole particelle di plastica. Di conseguenza, nelle regioni in cui verranno applicate queste tecnologie, comprese le grandi aree metropolitane, i livelli di nanoplastica nell'aria inalata potrebbero raggiungere livelli simili a quelli attualmente riscontrati nelle aree costiere. Ciò comporta il rischio di un aumento delle concentrazioni di nanoplastiche nell'aria, che rappresenta una minaccia per la salute umana. L'inalazione di nanoplastiche contribuisce al loro accumulo nell'organismo, anche nel cervello.

E questo è il punto chiave. Va compreso che l'idea stessa di utilizzare i GAA come mezzo di depurazione delle acque oceaniche è stata avanzata dagli scienziati di "ALLATRA" più di 20 anni fa, quando la concentrazione di microplastiche nell'atmosfera era ancora estremamente bassa. A quel tempo la realizzazione di tali tecnologie poteva davvero portare benefici ecologici tangibili senza gravi rischi per gli esseri umani. Tuttavia, oggi la situazione è cambiata radicalmente. L'applicazione di massa di GAA in condizioni moderne, al contrario, porterà principalmente a un aumento della concentrazione di MNP nell'aria; ora, con livelli già elevati di MNP nell'atmosfera, l'aggiunta di ulteriori volumi attraverso i GAA può essere fatale per la salute umana. Pertanto, una tecnologia un tempo promettente e innovativa ha perso la sua rilevanza. Noi, come umanità, abbiamo perso il momento critico in cui i GAA avrebbero potuto essere un salvavita. Il fattore tempo nei problemi di clima e di inquinamento è cruciale. Ciò che due decenni fa avrebbe potuto salvare la salute di milioni di persone e ripulire veramente il pianeta, ora è diventato potenzialmente pericoloso.

Il GAA non è più una tecnologia del futuro, ma il ricordo di un'opportunità mancata. Nella realtà attuale, la priorità deve essere data agli sviluppi che rimuoveranno le MNP dall'atmosfera e dal corpo umano. Innanzitutto, dobbiamo guadagnare tempo.

Un approccio scientifico innovativo per ridurre la tossicità delle micro- e nanoplastiche

Alla luce dei dati presentati sull'impatto multilivello e cumulativo delle microplastiche e, in particolare, delle nanoplastiche sulla salute umana, diventa evidente che la civiltà moderna affronta una sfida ecologica e biomedica che va oltre le tradizionali concezioni di inquinamento ambientale. Questo problema non riguarda solo singole biosfere, ma anche la sostenibilità della popolazione di *Homo sapiens* a lungo termine.

Oggi, praticamente tutta la plastica prodotta — oltre 9 miliardi di tonnellate — continua ad accumularsi nell'ambiente, subendo frammentazione fino a dimensioni micro e nano, che possiedono alta attività chimica e biologica. Le micro- e nanoplastiche sono state rilevate nel suolo, nell'acqua, nell'aria e in tutte le principali categorie di prodotti alimentari — da frutta e verdura a carne, pesce, miele, latte e sale. Questo indica una penetrazione totale delle particelle di plastica nelle catene alimentari, trasformando sostanzialmente la concezione tradizionale di cibo "sicuro" o "sano".

Il percorso di ingresso delle particelle nell'organismo umano determina in gran parte il loro comportamento biologico e la distribuzione. Mentre la plastica che entra attraverso il tratto digestivo può essere parzialmente eliminata, il percorso inalatorio è caratterizzato da un rischio significativamente più elevato. Le nanoparticelle inalate si depositano nel tessuto polmonare, attraversano le barriere ematogene e possono raggiungere direttamente il cervello, dove possono accumularsi a lungo termine. Inoltre, i meccanismi naturali di detossificazione (fegato, reni) non hanno mezzi efficaci per riconoscere ed eliminare tali particelle.

La densità più alta di microplastiche si registra vicino ai corpi idrici, nelle zone costiere e nelle aree forestali, soprattutto in condizioni di umidità e temperatura elevate. In tali paesaggi, la plastica rimane più a lungo, partecipa al trasporto aerosol e provoca stress ossidativo nelle piante, riducendo l'efficacia dei processi fotosintetici. La permanenza sulla costa, un tempo considerata benefica dal punto di vista salutare, oggi comporta un carico inalatorio aggiuntivo: si stima che la quantità di plastica inalata vicino ai corpi idrici aperti possa superare di molte volte quella presente in ambienti urbani.

Gli studi epidemiologici mostrano un'associazione costante tra i livelli di inquinamento da MNP e la prevalenza di malattie croniche non infettive, tra cui ipertensione, diabete, ictus, disturbi depressivi e cognitivi. Grazie alla capacità di superare le barriere biologiche e accumularsi in vari tessuti, inclusi il cervello, il cuore, i polmoni e la placenta, le MNP esercitano un'azione tossica a livello molecolare, cellulare e organico. La plastica, accumulandosi nell'organismo, esercita effetti immunosoppressivi, infiammatori e genotossici. Nonostante i progressi nel rilevamento dei rischi, al momento non sono stati sviluppati meccanismi efficaci per neutralizzare ed eliminare le MNP dal corpo umano.

Una delle proprietà più critiche delle nanoplastiche, che esercitano un impatto biologico sistemico, è la loro capacità di mantenere una carica elettrostatica. A differenza delle particelle inerti, le nanoplastiche interagiscono attivamente con le superfici cellulari, le proteine, i recettori e anche con il materiale genetico, formando legami stabili a livello molecolare.

Questa proprietà non solo aumenta la penetrazione delle particelle di nanoplastica attraverso le barriere biologiche, incluso la barriera ematoencefalica, ma rende anche difficile la loro successiva eliminazione, favorendo un lungo ristagno nei tessuti, in particolare nel cervello. L'interazione elettrostatica avvia una cascata di anomalie cellulari, tra cui la depolarizzazione delle membrane, disfunzioni mitocondriali, stress ossidativo e apoptosi, aumentando notevolmente la tossicità anche a basse concentrazioni di particelle di nanoplastica.

Gli autori di questo rapporto ritengono che la soluzione per neutralizzare o schermare la carica elettrostatica delle micro- e nanoplastiche potrebbe rappresentare una svolta fondamentale, in grado di ridurre significativamente l'attività biologica delle nanoplastiche e rallentare la velocità con cui si accumulano negli organi vitali. Secondo le stime degli autori del rapporto, l'isolamento o schermatura della carica elettrostatica potrebbe ridurre il pericolo potenziale delle MNP di almeno il 50%, rendendo questa direzione di ricerca di importanza critica. Ciò darebbe alla comunità scientifica una finestra temporale necessaria per sviluppare approcci più complessi alla diagnosi, alla detossificazione e alla prevenzione degli effetti delle MNP. In questo contesto, le ricerche in biofisica, scienza dei materiali nanostrutturati e tossicologia molecolare acquisiscono un'importanza prioritaria. Il ritardo in questo caso significa un potenziale accelerazione dei processi di degradazione.

Parallelamente alle soluzioni biomediche, è necessaria una strategia scientificamente fondata per la gestione sicura dei rifiuti di plastica. L'attuale sistema di smaltimento non è in grado di prevenire la frammentazione ulteriore e l'ingresso delle microplastiche nella biosfera. In un contesto di globalizzazione, è necessaria la creazione di una piattaforma tecnologica internazionale per lo sviluppo, l'implementazione e la diffusione di metodi sicuri di raccolta e riciclo della plastica. Tali misure possono essere realizzate esclusivamente con il supporto istituzionale, una regolamentazione transfrontaliera e la diplomazia scientifica.

Un'importanza particolare assume l'aumento della consapevolezza della comunità scientifica, dei rappresentanti della sanità e del pubblico in generale. Ad oggi, la maggior parte delle persone non è consapevole della portata dell'impatto delle MNP e continua a contribuire inconsapevolmente alla loro diffusione.

Pertanto, il problema delle micro- e nanoplastiche non è più una minaccia potenziale, ma si è trasformato in un fattore di rischio sistemico. Questa questione richiede un'attenzione prioritaria da parte della comunità scientifica e delle autorità sanitarie, la sistematizzazione dei dati, lo sviluppo di standard di valutazione dei rischi e l'espansione della cooperazione interstatale e internazionale. Per sviluppare soluzioni efficaci che garantiscano la sicurezza biologica a breve e lungo termine, è necessario un approccio interdisciplinare, il riconoscimento istituzionale e la consolidazione internazionale degli sforzi.

IL FATTORE X. INFLUENZA DELLE MICRO- E NANOPLASTICHE SULLA DINAMICA DEL CICLO DEI CATACLISMI NATURALI

Come già detto nel capitolo *“Impatto delle micro- e nanoplastiche sul clima”*, le particelle di micro- e nanoplastica riducono la conducibilità termica delle acque oceaniche, portando all'accumulo di calore negli oceani e, di conseguenza, a un aumento critico della temperatura oceanica. Tuttavia, la micro- e nanoplastica non è di per sé una fonte diretta di riscaldamento degli oceani.

Dalla primavera del 2023 e per oltre un anno, la temperatura media della superficie dell'oceano mondiale ha continuato a stabilire nuovi record giornalieri, un fenomeno mai osservato prima (Fig. 128). Gli scienziati di tutto il mondo esprimono forte preoccupazione per questo riscaldamento anomalo.



Il dottor Brian McNoldy, ricercatore senior presso la *Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science* dell'Università di Miami, osserva: **“Non si tratta semplicemente delle temperature record degli oceani, che sono state osservate per un intero anno, ma è importante quanto questi nuovi record superino quelli precedenti. I valori attuali non sono nemmeno lontanamente paragonabili ai precedenti record.”**³²²



Questa preoccupazione è condivisa anche dal dottor Rob Larter, geofisico marino britannico, che afferma: **“Questo è davvero preoccupante, anche perché non sento nessun scienziato che abbia dato una spiegazione convincente sul perché si stia osservando un tale forte scostamento. Ma ora sembra che tutto stia evolvendo molto più rapidamente e intensamente di quanto ci aspettassimo.”**³²³

Secondo le ricerche climatiche, i modelli attuali prevedono un graduale aumento della temperatura della superficie oceanica, ma la velocità osservata di questo processo supera di gran lunga tutte le previsioni.

Gli scienziati ritengono che il cambiamento climatico causato dall'uomo svolga certamente un ruolo, ma non può spiegare da solo il fenomeno in atto.

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)

<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (Accessed May 1, 2025).

Il professor John Abraham dell'Università di Saint Thomas, che studia la temperatura dell'oceano, ha ipotizzato l'esistenza di fattori precedentemente sconosciuti che potrebbero influenzare i cambiamenti a lungo termine della temperatura della superficie oceanica³²². Ha osservato che questi fattori non erano stati considerati nelle previsioni precedenti. Gli autori di questo rapporto avanzano l'ipotesi dell'esistenza di un "fattore X" che potrebbe essere responsabile del riscaldamento aggiuntivo dell'oceano e dell'atmosfera.

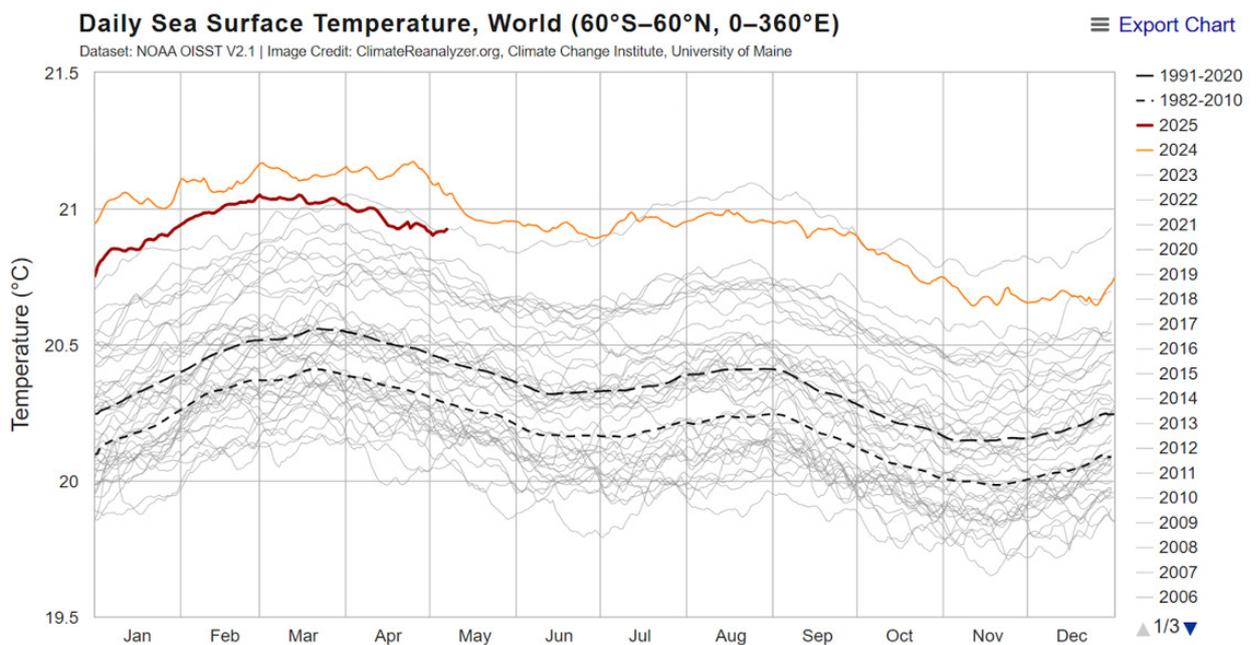


Figura 128: Temperatura media giornaliera della superficie oceanica, 1981–2025.

Fonte dei dati: Dataset NOAA OISST V2.1 | Fonte dell'immagine: [ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.
https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

La micro- e nanoplastica negli oceani potrebbe essere il fattore X ancora non studiato?

Analizzando la possibilità che siano proprio le micro- e nanoplastiche la causa principale dell'attuale riscaldamento degli oceani, ci troviamo di fronte a una seria contraddizione. È vero che le nanoplastiche riducono la capacità dell'oceano di dissipare il calore, tuttavia non generano energia termica: ostacolano semplicemente la sua dispersione.

Negli ultimi 60 anni, gli strati oceanici profondi si sono riscaldati 15 volte più velocemente rispetto ai precedenti 10.000 anni^{324, 325}, e questo processo continua ad accelerare. Questa progressione aumenta ogni anno sempre più velocemente. È necessaria un'enorme quantità di energia per riscaldare le profondità oceaniche, dove i raggi solari non arrivano più^{326, 327}.

A sua volta, l'immissione massiccia di micro- e nanoplastiche negli oceani è iniziata relativamente di recente — circa 30 anni fa — mentre l'accelerazione del riscaldamento delle profondità oceaniche è osservata da oltre 60 anni. Pertanto, il contributo della plastica non può spiegare una tendenza al riscaldamento di lungo termine e crescente, iniziata ben prima della comparsa significativa di questi inquinanti nei mari.

Nemmeno la radiazione solare può spiegare questo riscaldamento, poiché i raggi solari penetrano solo fino a circa 200 metri di profondità. L'acqua può essere riscaldata dal Sole fino a un massimo di 700 metri, ma solo grazie ai fenomeni di rimescolamento³²⁸.

Per riscaldare gli strati profondi dell'oceano — quelli in cui la luce solare non penetra — è necessaria una quantità colossale di energia. Ciò indica che il calore accumulato deve provenire da una fonte diversa, mentre la presenza di nanoplastiche contribuisce a "intrappolare" questo calore all'interno dell'oceano.

Poiché il riscaldamento solare non riesce a spiegare la crescita esponenziale delle temperature oceaniche, è stata avanzata l'ipotesi dell'esistenza di fonti di calore aggiuntive in diverse regioni degli oceani.

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

Distribuzione verticale delle anomalie termiche

L'analisi dei dati del sistema Argo sulle variazioni globali della temperatura a diverse profondità negli ultimi due decenni ha rivelato una serie di anomalie termiche non coerenti con il modello tradizionale di trasmissione del calore discendente dalla superficie verso gli strati profondi dell'oceano^{329, 330}.

Sono stati registrati casi statisticamente significativi di inversione del gradiente termico, in cui masse d'acqua più calde si trovano al di sotto di strati superficiali relativamente più freddi (Fig. 129). Una tale stratificazione delle temperature è fisicamente impossibile nel caso di un trasferimento di calore esclusivamente discendente dalla superficie, poiché l'energia termica non può superare uno strato intermedio freddo dall'alto verso il basso, secondo le leggi della fisica.

I dati ARGO mostrano le variazioni di temperatura a diverse profondità negli ultimi 20 anni.

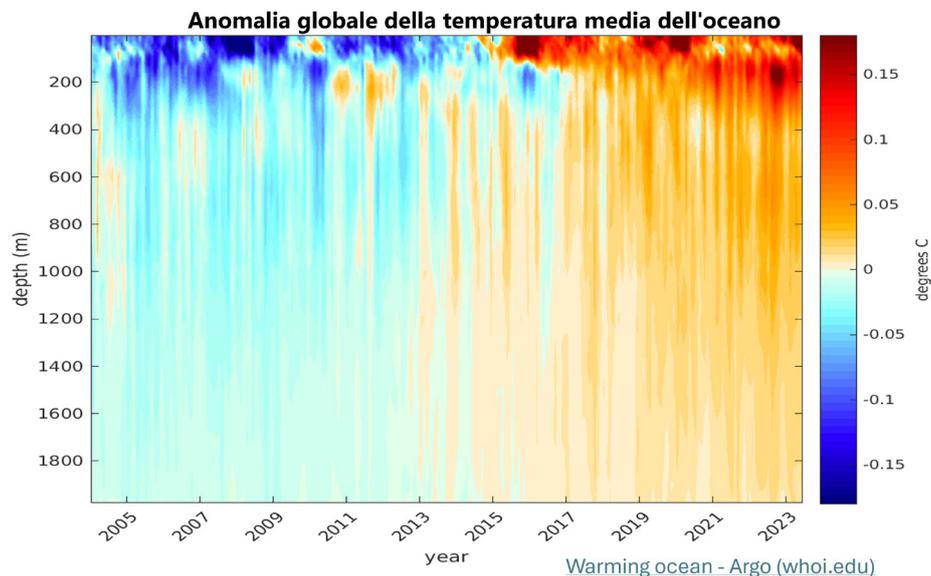


Figura 129: Anomalie globali della temperatura dell'oceano a profondità comprese tra 0 e 1.900 m dal 2004
Fonte: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Nuove ricerche condotte dagli scienziati dell'Università Oceanografica della Cina³³¹ confermano la presenza di anomalie termiche all'interno della colonna d'acqua che non si manifestano sulla superficie dell'oceano. Gli studi hanno dimostrato che un terzo delle ondate di calore marine non si manifesta affatto in superficie, mentre circa la metà non si manifesta in tutte le fasi del loro ciclo vitale. Il numero annuale di queste ondate di calore sottomarine è aumentato significativamente a causa del riscaldamento oceanico negli ultimi tre decenni. Il fatto che una parte rilevante delle ondate di calore marine non sia affatto rilevabile in superficie indica chiaramente che esse non possono essere causate dal calore atmosferico.

³²⁹Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Studio delle fonti di riscaldamento sul fondo oceanico

Le ricerche e il monitoraggio regolare della temperatura sul fondo oceanico sono oggi estremamente rari e limitati. Per lungo tempo, la scienza non si è posta l'obiettivo di osservare i cambiamenti proprio a queste profondità. I moderni sistemi di monitoraggio, come la rete di boe ARGO, permettono di raccogliere dati da appena lo 0,03% della superficie oceanica, e la maggior parte delle boe si immerge solo fino a metà della profondità media, senza raggiungere il fondale oceanico vero e proprio³³².

L'umanità ha realmente esplorato solo circa il 3–3,5% della superficie del fondo oceanico³³³. Ciò è dovuto a diverse ragioni importanti. Innanzitutto, la maggior parte dell'oceano mondiale si trova a profondità comprese tra i 3.000 e i 6.000 metri. La creazione di veicoli subacquei in grado di resistere alla pressione estrema di tali profondità richiede enormi risorse tecnologiche e finanziarie. In secondo luogo, le spedizioni stesse sono estremamente complesse e costose: in tutta la storia sono stati costruiti solo otto veicoli specializzati per questo tipo di esplorazione. Per questo motivo, oggi conosciamo in certi aspetti lo spazio più a fondo di quanto conosciamo gli angoli più remoti dell'oceano mondiale.

Allo stesso tempo, diventa sempre più evidente che i processi geologici sul fondo oceanico possono svolgere un ruolo significativo nei cambiamenti climatici e nell'equilibrio termico degli oceani. Sul fondale si trovano milioni di strutture geologiche uniche – vulcani, faglie e sorgenti idrotermali – che possiedono un'enorme quantità di energia. Tuttavia, a causa della loro difficile accessibilità e del monitoraggio insufficiente, la portata del loro potenziale impatto rimane in gran parte un mistero per la scienza.

Nonostante ciò, alcune ricerche sul fondale oceanico vengono comunque condotte, e numerosi studi indicano un riscaldamento delle acque oceaniche a livello del fondale.

Così, in **due profonde aree del bacino argentino**³³⁴, a profondità superiori ai 4.500 metri, sono state osservate tendenze significative di riscaldamento: $0,02\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ per decennio nel periodo 2009–2019. Si tratta di una quantità colossale di energia necessaria per riscaldare un tale volume di acqua fredda sul fondo oceanico.

Proprio al largo delle coste dell'Antartide Occidentale si registra un riscaldamento anomalo delle acque profonde del Mare di Weddell³³⁵. Mentre i primi 700 metri d'acqua mostrano un riscaldamento minimo, nelle regioni più profonde si osserva un aumento costante della temperatura. Da un lato, il Mare di Weddell è delimitato dalla spaccatura dell'Antartide Occidentale; dall'altro, è affiancato da una dorsale vulcanica sottomarina che include le isole Sandwich Meridionali.

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

³³³Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-02711>

Il ruolo del flusso di calore geotermico, dei processi tettonici e delle eruzioni vulcaniche sul fondo oceanico

Nel contesto delle anomalie osservate nel riscaldamento degli strati profondi degli oceani, dove l'influenza dell'atmosfera è minima, risulta logico considerare il flusso di calore geotermico proveniente dalle profondità della Terra come una potenziale fonte supplementare di energia termica. Tradizionalmente, nei modelli climatici, il flusso geotermico dal basso viene considerato costante e pari a circa $0,09 \text{ W/m}^2$ (ovvero 90 mW/m^2)³³⁶, un valore di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto al flusso solare^{337, 338}.

Tuttavia, un numero crescente di dati scientifici indica che questa fonte di calore, finora sottovalutata, potrebbe avere un ruolo più rilevante. Ampie ricerche geotermiche hanno dimostrato che il flusso di calore attraverso il fondo oceanico dipende dall'età della crosta oceanica: è massimo nelle giovani zone di espansione oceanica e minimo nei bacini oceanici più antichi³³⁹ (Fig.130). Queste anomalie locali possono influenzare la struttura verticale della temperatura dell'acqua, indebolire il termoclino e favorire il rimescolamento delle masse d'acqua, con impatti sulla circolazione, sulla produttività biologica e persino sulla stabilità dei ghiacciai nelle regioni polari.

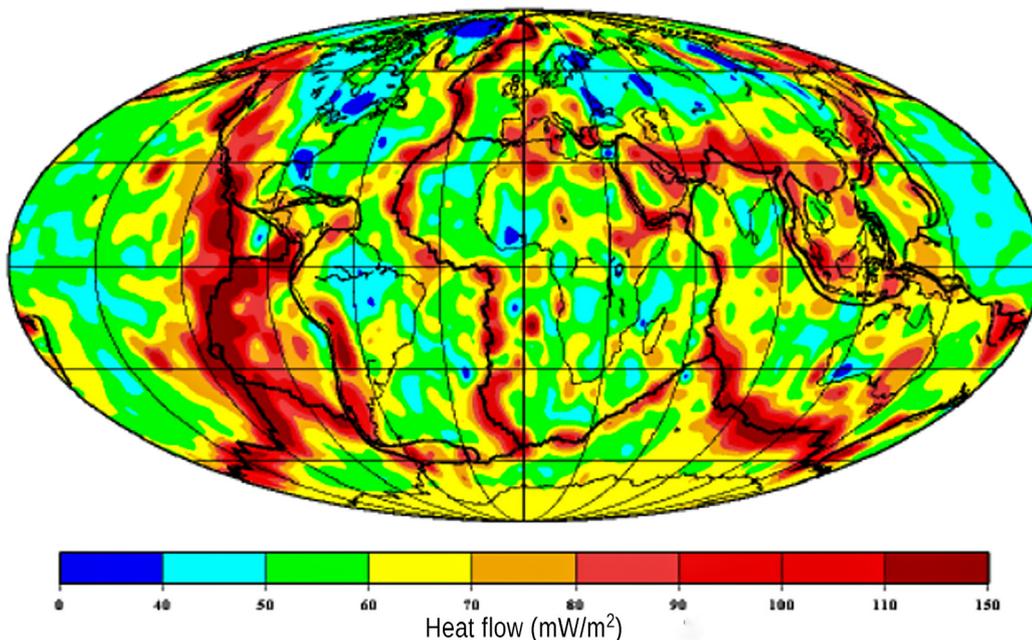


Figura 130: Distribuzione globale del flusso di calore.

Illustrazione tratta dall'articolo: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993).
<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011).
<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (accessed 10 May 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Il flusso geotermico è la quantità di energia termica che proviene dall'interno della Terra e attraversa un'unità di superficie in un'unità di tempo, misurata in milliwatt per metro quadrato (mW/m²).

Mentre l'energia media del flusso geotermico per i continenti è di 40-60 mW/m² e per il fondo oceanico è di circa 100 mW/m², in alcune regioni si registrano valori che superano di diverse volte questi valori. I valori più estremi di flusso geotermico sono stati rilevati in zone tettonicamente e vulcanicamente attive: ad esempio, nelle dorsali medio-oceaniche e nelle aree di spaccature attive, il flusso può superare i 200–1000 mW/m² ³⁴⁰.

Un flusso termico particolarmente elevato si osserva nelle zone dei campi idrotermali — aree in cui fluidi caldi fuoriescono sul fondo oceanico, scaldando l'acqua fino a temperature di 350–400°C. Questi sistemi formano ecosistemi unici e generano anomalie locali del flusso di calore che influenzano in modo significativo il regime termico delle acque sul fondale.

La principale zona ben studiata di elevato flusso geotermico sul fondo oceanico è rappresentata dalle dorsali medio-oceaniche — aree in cui le placche litosferiche si allontanano tra loro e dove avviene la formazione attiva della nuova crosta oceanica. Questo sistema globale di dorsali sottomarine ha una lunghezza complessiva di circa 60.000 chilometri³⁴¹, circondando il pianeta come le cuciture di una palla da baseball. Le dorsali medio-oceaniche sono caratterizzate da un'elevata concentrazione di sorgenti idrotermali, vulcani sottomarini e faglie attive, attraverso le quali una quantità significativa di energia termica proveniente dal mantello terrestre viene rilasciata nell'oceano³⁴².

Il *flusso geotermico* in queste zone supera da 10 a 100 volte i valori medi del resto del fondo oceanico³³², rendendole aree chiave per lo scambio di calore tra gli strati interni della Terra e l'oceano globale.

Il professor Arthur Viterito, dell'Università del Maryland, ha rilevato un aumento del numero di terremoti sul fondo oceanico lungo le dorsali medio-oceaniche a partire dal 1995³⁴³ (Fig.131). Con un coefficiente di correlazione di 0,7, questo aumento corrisponde all'aumento delle temperature globali. Inoltre, l'aumento della temperatura avviene con un ritardo di due anni rispetto all'incremento dell'attività sismica. L'aumento dell'attività sismica in queste zone è legato al sollevamento del magma, che forma una nuova crosta oceanica.

³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (accessed 10 May 2025).

³⁴³Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Aumento del numero di terremoti sul fondo dell'oceano lungo le dorsali medio-oceaniche.

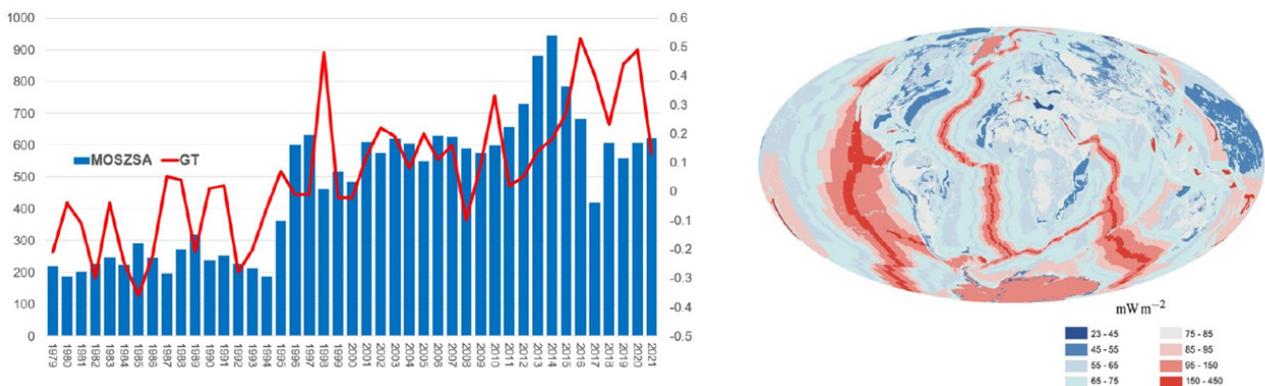


Figura 131: Crescita simultanea del numero di terremoti sottomarini con magnitudo 4,0–6,0 e delle temperature atmosferiche globali.

Fonte: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Sebbene non esistano misurazioni dirette dei volumi di magma in risalita, la rete globale di monitoraggio sismico consente di stimare indirettamente la portata di questi processi sulla base del numero e dell'intensità degli eventi sismici, che aumentano indipendentemente dalla quantità di dati raccolti. Secondo l'ipotesi di Viterito, l'attività sismica e vulcanica lungo le dorsali oceaniche porta a un aumento delle emissioni idrotermali e al riscaldamento delle acque, il che a sua volta contribuisce alle emissioni di gas serra e al riscaldamento dell'atmosfera. Viterito conclude quindi che gli oceani si riscaldano non solo dall'alto, ma anche dal basso, a causa dei processi geologici.

Il vulcanismo sottomarino può inoltre svolgere un ruolo importante nella formazione del regime termico del fondale oceanico. I dati attuali indicano che circa il 75% di tutte le eruzioni vulcaniche della Terra avviene sott'acqua³⁴⁴. In precedenza si supponeva che queste eruzioni fossero principalmente costituite da flussi di lava non esplosivi, e che le eruzioni esplosive fossero impossibili a causa della pressione della colonna d'acqua. Di conseguenza, si pensava che i vulcani sottomarini non potessero riscaldare le acque profonde, poiché la lava che fuoriusciva si solidificava quasi immediatamente. Tuttavia, recenti ricerche hanno cambiato la comprensione del meccanismo delle eruzioni vulcaniche sottomarine.

La pressione del magma varia da 10 a 30 mila bar, mentre la pressione della colonna d'acqua nelle parti più profonde dell'oceano è di soli 1.000 bar. Quando il magma fuoriesce, l'acqua circostante bolle istantaneamente, con la rottura delle molecole di H₂O, formando cavità gassose e acquose ad altissima pressione³⁴⁵, il che provoca violente eruzioni esplosive.

³⁴⁴Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Queste eruzioni sono accompagnate dal rilascio di tefra e idroterme — gigantesche colonne di acqua surriscaldata, il cui volume può essere pari a 40 milioni di piscine olimpioniche. Tali emissioni possono compromettere l'equilibrio termico dell'oceano non solo localmente, ma anche a livello globale.

Le ricerche condotte dall'Università di Leeds hanno individuato campi di tefra vulcanica lunghi chilometri sul fondo dell'Oceano Pacifico³⁴⁶, confermando l'esistenza di potenti eruzioni sottomarine esplosive. Un'unica eruzione di questo tipo può generare una potenza termica dell'ordine di 1 terawatt, pari al doppio del consumo energetico degli Stati Uniti.



Il contributo delle eruzioni esplosive al riscaldamento oceanico è confermato anche dal professor Bernd Zimanowski dell'Università Julius-Maximilian in Baviera³⁴⁷:

*“Durante le eruzioni sottomarine effusive, il calore della lava viene trasferito all'acqua in modo relativamente lento. Tuttavia, durante le eruzioni esplosive, il magma si frammenta in minuscole particelle. Questo può produrre impulsi termici così intensi da alterare le correnti di equilibrio termico negli oceani, sia localmente che su scala globale.”*³⁴⁸

Secondo le stime attuali, il numero di formazioni sottomarine idrotermali attive varia da 100.000 a 10 mln^{349, 350}, il che indica che il contributo dell'attività idrotermale al bilancio termico degli oceani potrebbe essere significativamente sottostimato. Le eruzioni esplosive del magma generano potenti impulsi termici in grado di alterare le correnti termiche oceaniche a livello locale. Tuttavia, considerando le dimensioni dell'oceano, anche tali eruzioni sottomarine molto intense non sono sufficienti a riscaldarlo nel suo complesso. I vulcani non sono distribuiti uniformemente, le loro eruzioni sono episodiche e la loro energia non basta a riscaldare l'intero oceano. Tuttavia, essa può essere sufficiente a generare ondate di calore localizzate nell'oceano.

Un esempio specifico di tali anomalie termiche locali sono le ondate di calore marine, ovvero aree d'acqua oceanica localmente e persistentemente riscaldate. Un altro dei nomi con cui si conoscono è *blob*, cioè gigantesche aree di acqua superficiale con temperature anormalmente elevate. Dal 1995, il numero dei blob è aumentato significativamente³⁵¹ e questi fenomeni compaiono più frequentemente in diverse parti dell'oceano mondiale, tra cui le coste della Nuova Zelanda, del sud-ovest dell'Africa e della parte meridionale dell'Oceano Indiano.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

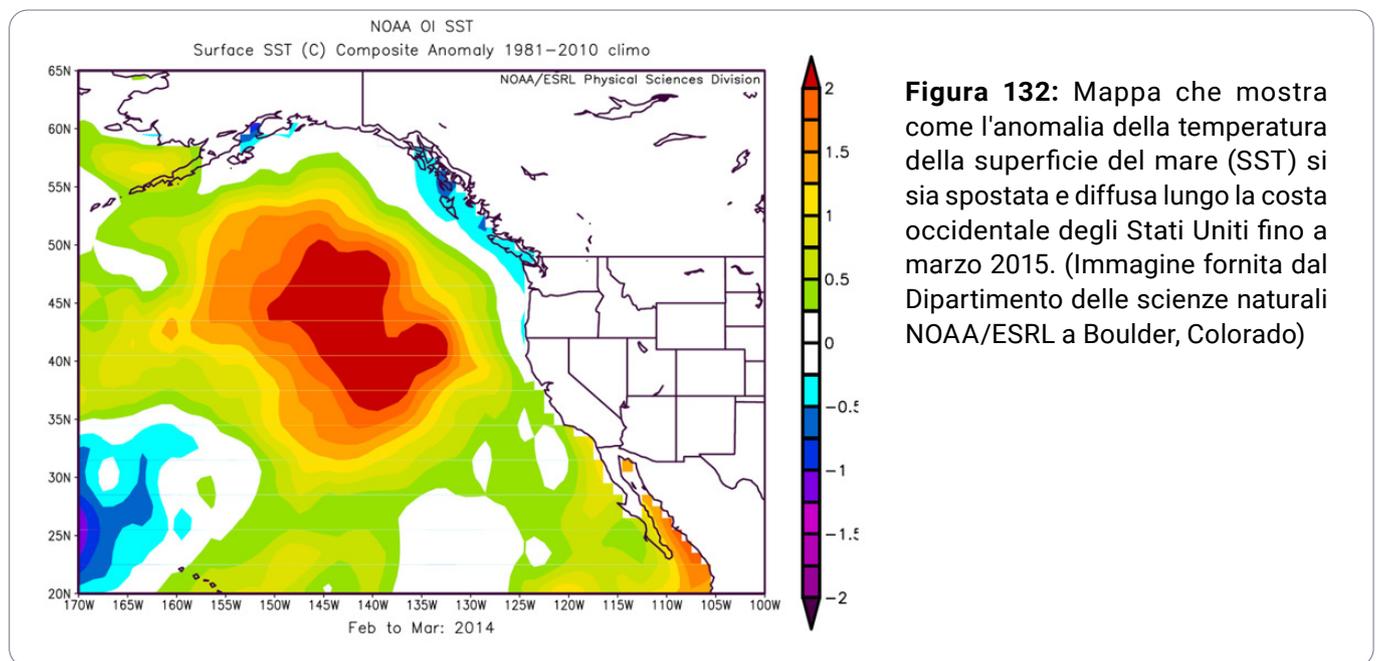
³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (accessed 1 May 2025).

³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

Uno dei blob marini più noti e di maggiore estensione si è formato nel Golfo dell'Alaska nel 2013 e si è rapidamente diffuso attraverso l'Oceano Pacifico. La sua superficie ha superato i 4.000.000 km² (più dell'intera India), e in alcuni punti la temperatura dell'acqua ha superato di 5–6°C la media climatologica (Fig. 132). Il blob si è spostato lungo nell'oceano, dall'Alaska fino al Messico, per un periodo di tre anni, fino al 2016. Questo fenomeno ha avuto un impatto negativo sugli ecosistemi marini e sul clima regionale.

La causa della formazione di questo blob è probabilmente legata al vulcanismo attivo lungo la costa dell'Alaska e al pennacchio magmatico Cobb³⁵², che ha riscaldato l'acqua sul fondo oceanico, spingendola poi verso la superficie in quantità enormi.



A est della Nuova Zelanda, nella parte meridionale dell'Oceano Pacifico, nel dicembre 2019 si è formato un blob marino con temperature che in alcuni giorni hanno superato la media di 6°C. Questo blob ha coperto un'area di oltre un milione di chilometri quadrati, equivalente a una volta e mezza la superficie del Texas o quattro volte quella della Nuova Zelanda (Fig. 133). Al momento della sua comparsa, è stato segnalato come il più grande blob dell'oceano a livello mondiale. Inoltre, si è trattato del secondo evento più esteso mai registrato nella regione.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>



James Renwick, professore di geografia, ecologia e scienze della Terra presso l'Università Victoria di Wellington, ha dichiarato:

*"È la più grande zona di riscaldamento anomalo del pianeta. Di solito, la temperatura dell'acqua in quella zona è di circa 15°C, mentre ora si aggira attorno ai 20°C."*³⁵³

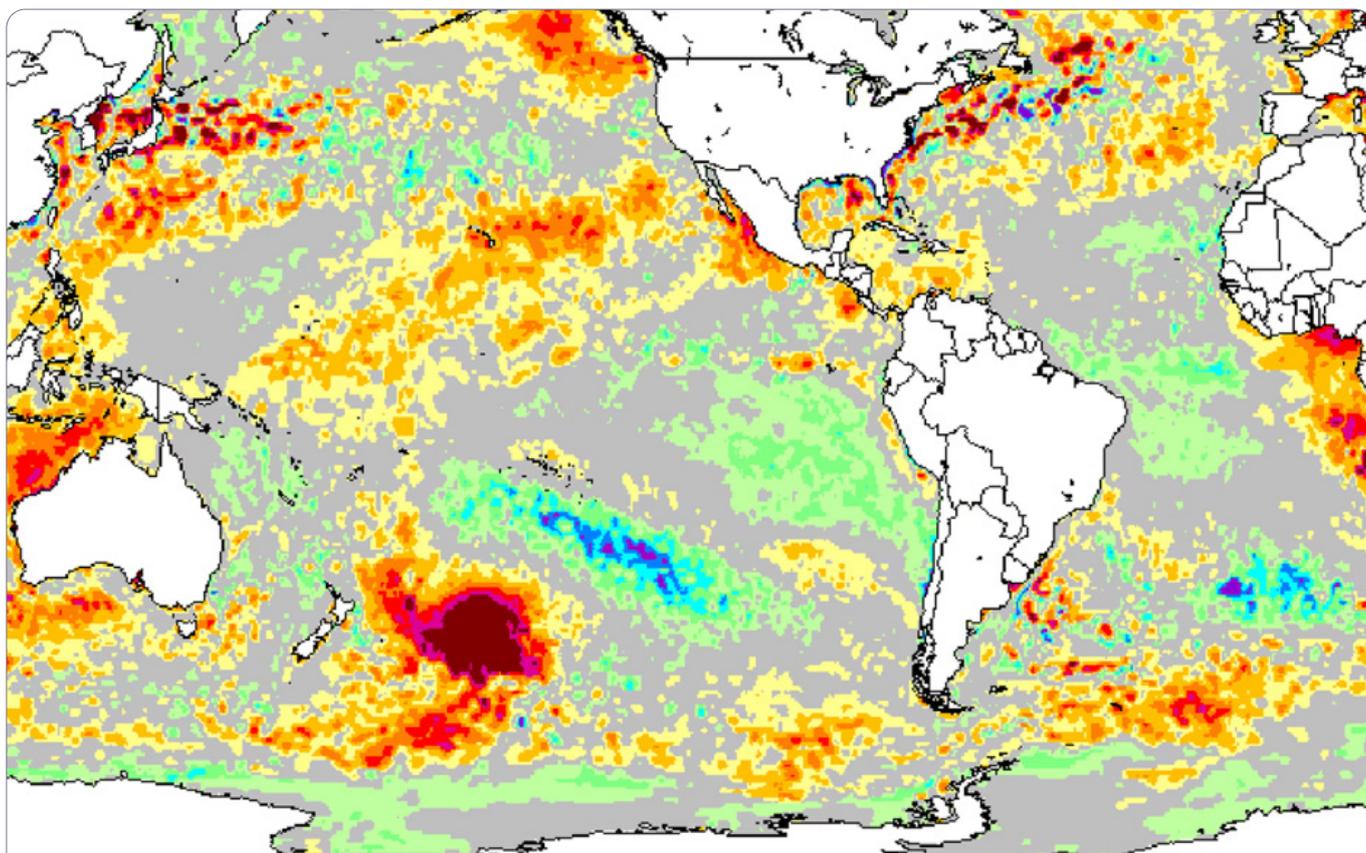


Figura 133: Anomalia della temperatura della superficie del mare nella parte meridionale dell'Oceano Pacifico il 25 dicembre 2019.

Fonte: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (accessed 11 May 2025)

Probabile causa della formazione di questo blob è stata l'attività dell'antico altopiano vulcanico al largo della costa della Nuova Zelanda³⁵⁴.

³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (accessed 10 May 2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Un altro esempio specifico dell'influenza del calore geotermico derivante da processi magmatici sul riscaldamento oceanico è rappresentato dalle anomalie termiche nei mari artici lungo la costa siberiana. Secondo uno studio del 2022, l'Artico Siberiano si riscalda quasi quattro volte più velocemente rispetto alla media globale, un rapporto significativamente più alto rispetto a quanto precedentemente previsto nei modelli climatici, e che ha colto di sorpresa molti scienziati³⁵⁵ (Fig.134).

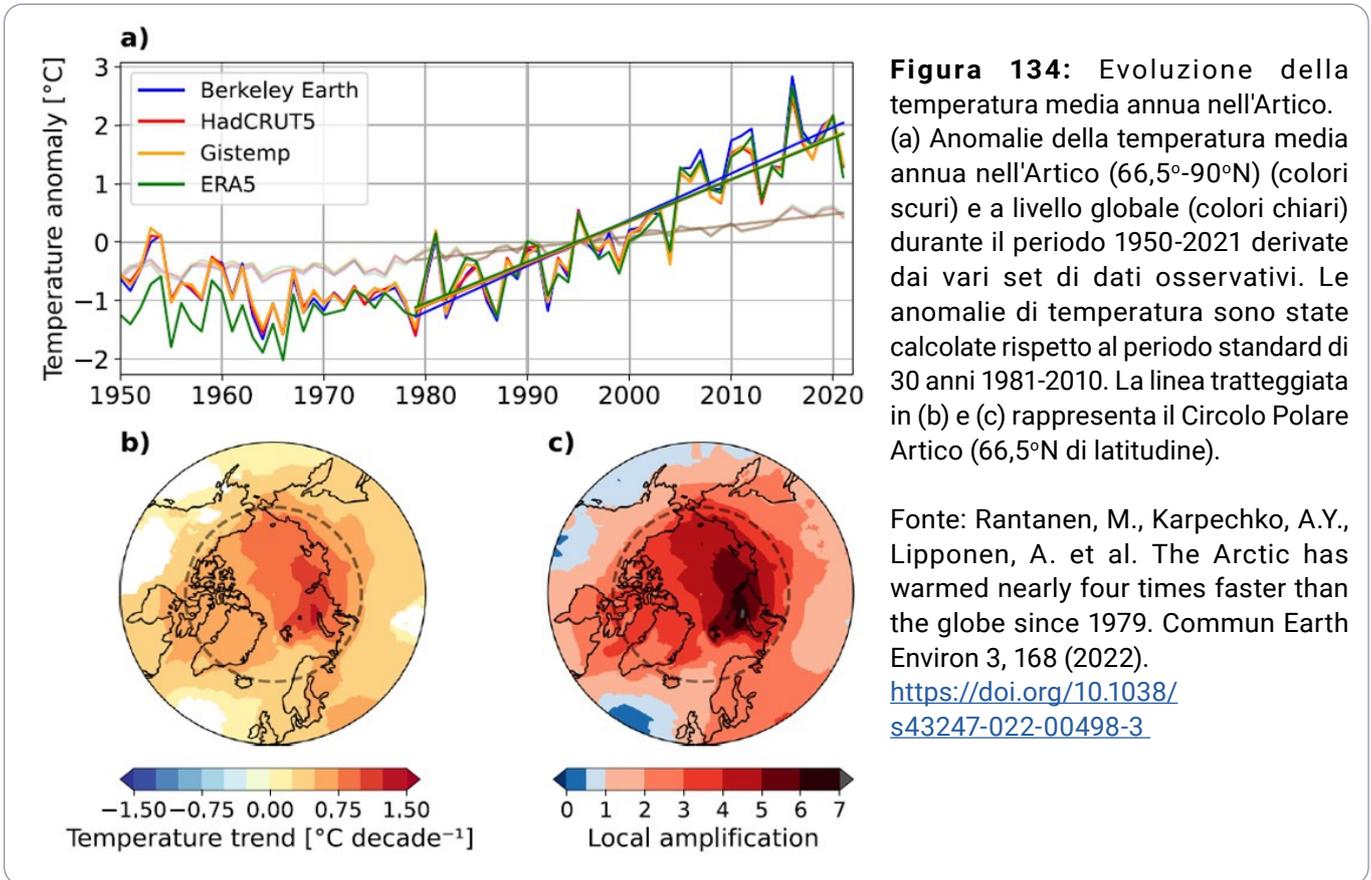


Figura 134: Evoluzione della temperatura media annua nell'Artico. (a) Anomalie della temperatura media annua nell'Artico (66,5°-90°N) (colori scuri) e a livello globale (colori chiari) durante il periodo 1950-2021 derivate dai vari set di dati osservativi. Le anomalie di temperatura sono state calcolate rispetto al periodo standard di 30 anni 1981-2010. La linea tratteggiata in (b) e (c) rappresenta il Circolo Polare Artico (66,5°N di latitudine).

Fonte: Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Proprio in questa regione del pianeta, nella zona della penisola di Tajmyr, gli scienziati hanno osservato la riattivazione del Pennacchio magmatico Siberiano, che ora sta rapidamente salendo nella stessa area in cui circa 250 milioni di anni fa eruttarono gli enormi Trappi Siberiani. Tutti gli indizi indicano che oggi la testa del pennacchio sta attivamente erodendo il cratone della Siberia Orientale, e che il magma si sta diffondendo sotto l'intera sua superficie (Fig.135). Secondo le stime preliminari, l'area di diffusione dei flussi magmatici sotto la Siberia potrebbe raggiungere un diametro di 2500–3000 km, pari alla superficie dell'Australia.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

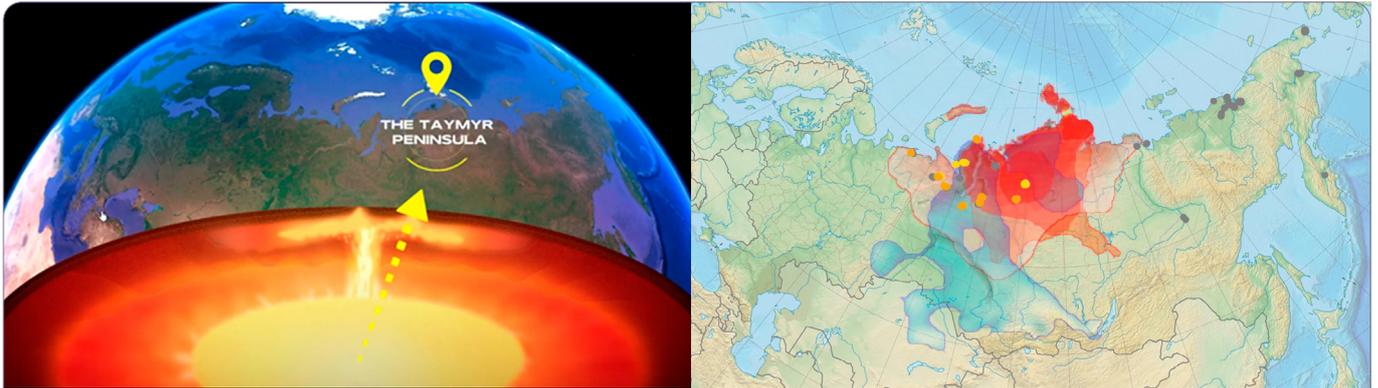


Figura 135: Localizzazione del pennacchio magmatico sulla base dei risultati di diversi studi.

È importante sottolineare che il riscaldamento così intenso dei mari artici avviene proprio nella zona della penisola del Tajmyr. Questa anomalia nella zona acquatica della Siberia può essere spiegata dal fatto che la crosta oceanica è più sottile e conduce il calore più rapidamente, mentre l'acqua possiede una capacità termica maggiore rispetto all'atmosfera. Per questo motivo, è proprio l'acqua oceanica ad accumulare e trattenere intensamente il calore proveniente dal pennacchio magmatico in risalita, nonostante il fatto che tale risalita avvenga sotto la crosta continentale e a una certa distanza dalla costa.



Per approfondire le informazioni sul Pennacchio magmatico Siberiano, il suo impatto sul sistema climatico, i rischi associati a questa struttura geologica e le possibili soluzioni, si rimanda al documento:

“SULLA MINACCIA DI UN’ERUZIONE DI UN PENNACCHIO DI MAGMA IN SIBERIA E STRATEGIE PER AFFRONTARE IL PROBLEMA”

L'insieme di tutti questi dati indica che i processi geologici sul fondo oceanico rappresentano un fattore significativo per il riscaldamento globale. L'aumento dell'attività sismica e vulcanica sul fondo dell'oceano correlata con la crescita delle temperature globali, suggerisce una possibile relazione causale. Le eruzioni sottomarine, soprattutto quelle esplosive, possono generare potenti impulsi termici che disturbano l'equilibrio termico a livello locale e persino globale.

I sistemi idrotermali e i processi vulcanici creano anomalie su larga scala, come i cosiddetti “blob”, che influenzano sensibilmente gli ecosistemi degli oceani e il clima, mentre i processi magmatici sono responsabili di un riscaldamento anomalo dei mari artici. Pertanto, l’oceano si riscalda non solo dall’alto, sotto l’influenza dell’atmosfera, ma anche dal basso, a causa dei processi dinamici che avvengono nelle profondità terrestri. Questo impone una revisione dei modelli climatici attuali e un approfondimento dello studio dell’attività geologica sottomarina come componente importante dell’equilibrio termico globale del pianeta.

Tuttavia, una domanda di fondamentale importanza rimane aperta: perché proprio in questo periodo storico si verifica un’intensificazione dei processi magmatici e tettonici sulla Terra?

Breve descrizione del modello geodinamico dei cambiamenti climatici sulla Terra nel periodo attuale

Negli ultimi 30 anni, la Terra sta vivendo una crescita senza precedenti non solo dei cambiamenti climatici, ma anche di anomalie in tutti gli strati del pianeta e dei suoi parametri geofisici. Questa crescita sta avvenendo in modo esponenziale. Un’analisi complessiva dei dati scientifici mostra che la causa principale di tali cambiamenti sono i cicli astronomici che si ripetono ogni 12.000 anni.

L’ipotesi dell’influenza di fattori cosmici è supportata da cambiamenti simili osservati su altri pianeti del Sistema Solare e sui loro satelliti, che si verificano contemporaneamente ai processi sulla Terra. Ad esempio, su Urano³⁵⁶, Giove³⁵⁷ e Venere³⁵⁸ si registra un aumento della velocità dei venti e un’espansione delle zone di uragani. Su Marte si osserva lo scioglimento delle calotte polari³⁵⁹, mentre l’attività vulcanica su Venere³⁶⁰ e Marte³⁶¹ continua ad aumentare. Inoltre, su Marte, un pianeta considerato morto, si registra un’intensificazione³⁶² dei martemoti, indicando un’anomala attività sismica interna.

I cambiamenti critici nel sistema terrestre hanno cominciato a manifestarsi a partire dal 1995, anno in cui sono state rilevate importanti anomalie geofisiche, come l’improvvisa accelerazione della rotazione terrestre, lo spostamento del suo asse e l’inizio della deriva del Polo Nord magnetico (Fig. 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter’s Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

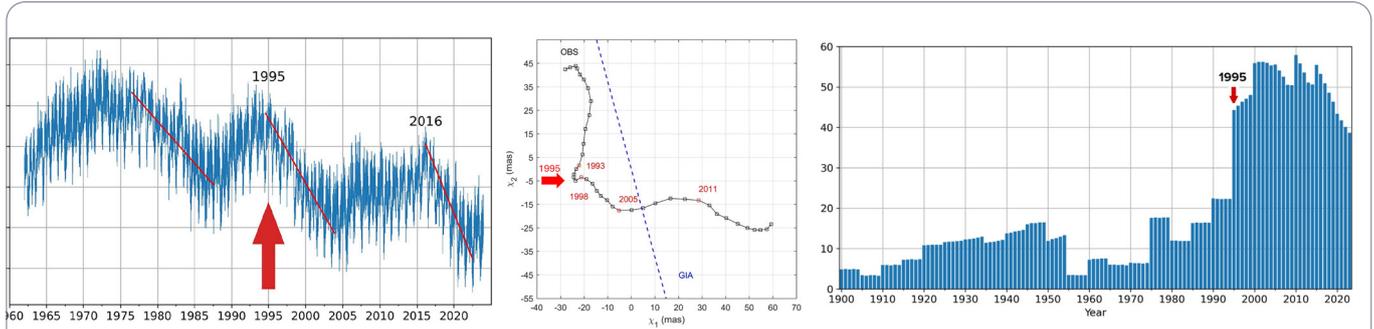
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Improvvisa e brusca accelerazione della rotazione del pianeta, registrata dal Centro di Orientamento della Terra dell'Osservatorio di Parigi.

Fonte: IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot_name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Cambiamenti anomali dell'asse di rotazione terrestre: la direzione del suo spostamento è cambiata bruscamente e la velocità del movimento è aumentata di 17 volte.

Fonte: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Il movimento del Polo Nord magnetico, che in precedenza si muoveva a una velocità di 10 km/anno, ha improvvisamente aumentato la sua velocità a 55 km/anno e ha cambiato traiettoria verso la Penisola di Tajmyr in Siberia.

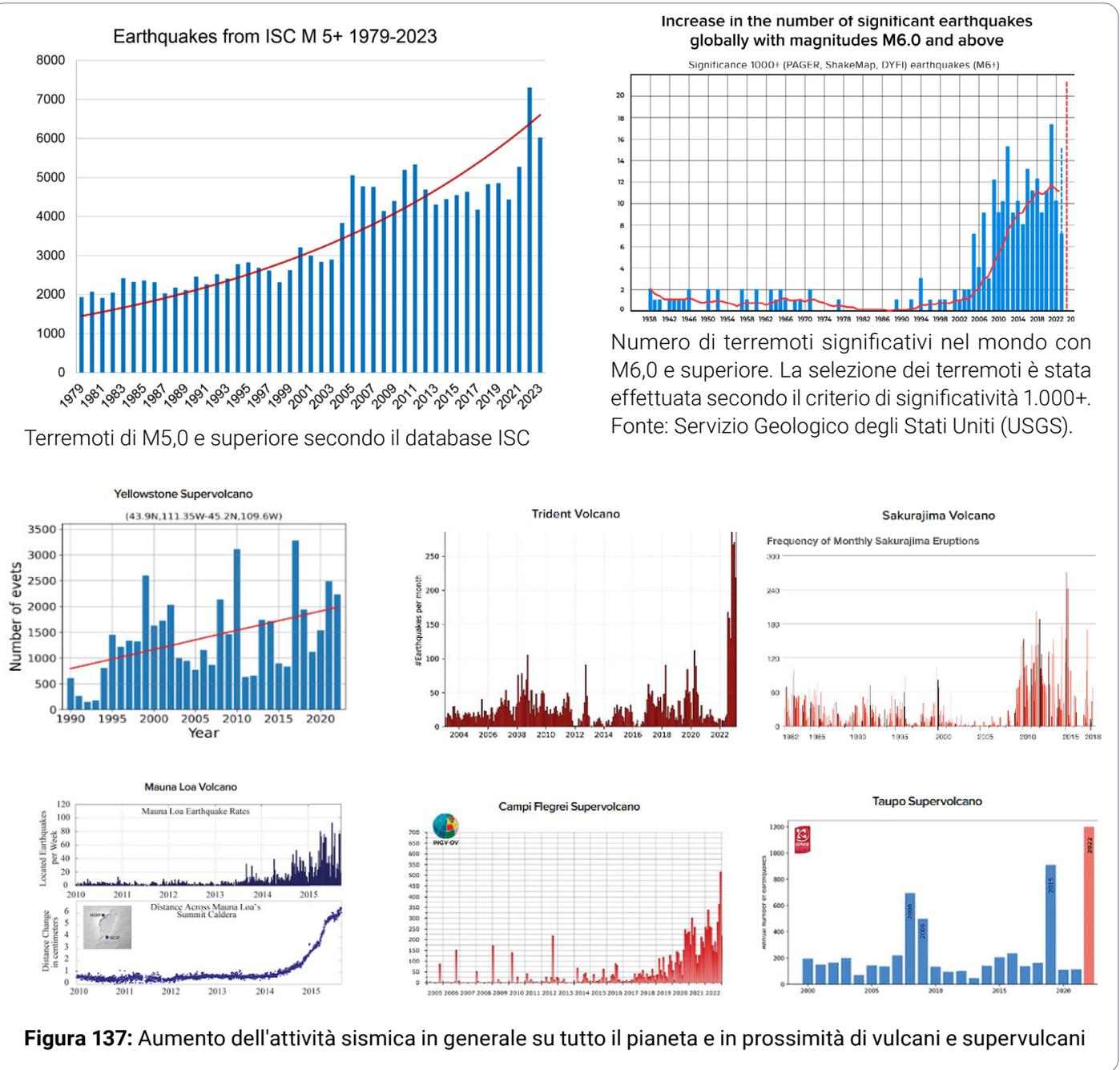
Fonte: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Figura 136: Cambiamenti nei parametri geofisici della Terra nel 1995

Queste anomalie indicano cambiamenti profondi nel nucleo terrestre, che richiedono un'energia quadrilioni di volte superiore a quella prodotta dall'umanità durante tutta la sua storia. La causa di tali cambiamenti è da attribuire a un'influenza cosmica esterna che agisce non solo sul nucleo della Terra, ma anche su quelli degli altri pianeti del Sistema Solare. Questo influsso esterno intensifica la fusione del mantello, portando alla risalita di materiale fuso verso la superficie. Di conseguenza si innesca una reazione a catena: aumenta l'attività vulcanica e sismica, cresce il quantitativo energetico/ di calore interno della Terra e di conseguenza crescono il numero e l'intensità dei cataclismi naturali in tutto il mondo.

Dal 1995 si osserva un aumento significativo dell'attività sismica, caratterizzata da una maggiore frequenza, intensità ed energia dei terremoti. Questa tendenza è evidente sia sulla terraferma che negli oceani, compresi i territori che in precedenza erano considerati a bassa sismicità. Tutto ciò indica un cambiamento su scala globale. È importante sottolineare che l'aumento del numero di terremoti con magnitudo superiore a 5,0 non è legato all'espansione della rete di rilevamento o alla maggiore sensibilità degli strumenti, ma riflette effettivamente cambiamenti nella geodinamica terrestre. Secondo i dati complessivi del Centro Sismologico Internazionale, il numero di tali terremoti è aumentato notevolmente negli ultimi 25 anni e continua a crescere (Fig. 137).

Inoltre, si registra un aumento dell'attività sismica nei pressi dei vulcani, inclusi supervulcani come Yellowstone negli Stati Uniti, i Campi Flegrei in Italia³⁶³ e Taupo in Nuova Zelanda³⁶⁴, così come altri vulcani che hanno eruttato durante i precedenti cicli di 12.000 anni (Fig. 137).



Si registra un numero sempre maggiore di giorni all'anno con eruzioni vulcaniche, e la lava espulsa presenta spesso caratteristiche anomale: è surriscaldata e ha una composizione chimica insolita, tipica del magma proveniente dagli strati profondi del mantello terrestre.

³⁶³Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (accessed 1 May 2025).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnJaYDG0LYSgl> (accessed 1 May 2025).

Particolare preoccupazione desta l'aumento dei terremoti a focalizzazione profonda, che si verificano a profondità superiori ai 300 chilometri, talvolta raggiungendo anche i 750 chilometri sotto la superficie terrestre. Questi eventi non si producono nella crosta terrestre, ma nel mantello, dove il materiale tende normalmente a deformarsi in modo plastico anziché fratturarsi, rendendo la natura di tali terremoti insolita. Poiché questi terremoti si verificano in condizioni di pressioni estreme e alte temperature, si può concludere che si tratta di potenti esplosioni nel mantello, paragonabili per energia alla detonazione simultanea di numerose bombe atomiche all'interno del mantello terrestre.

Inoltre, i terremoti profondi spesso innescano forti terremoti nella crosta terrestre, amplificandone l'impatto distruttivo. Dal 1995 si osserva un rapido aumento del numero di questi eventi sismici profondi, in coincidenza con altre anomalie geodinamiche iniziate nello stesso periodo (Fig. 138). L'aumento della frequenza di tali esplosioni interne al mantello indica un incremento dell'energia nelle profondità del pianeta e una fusione intensificata del mantello, che potrebbe portare a eruzioni vulcaniche su vasta scala.

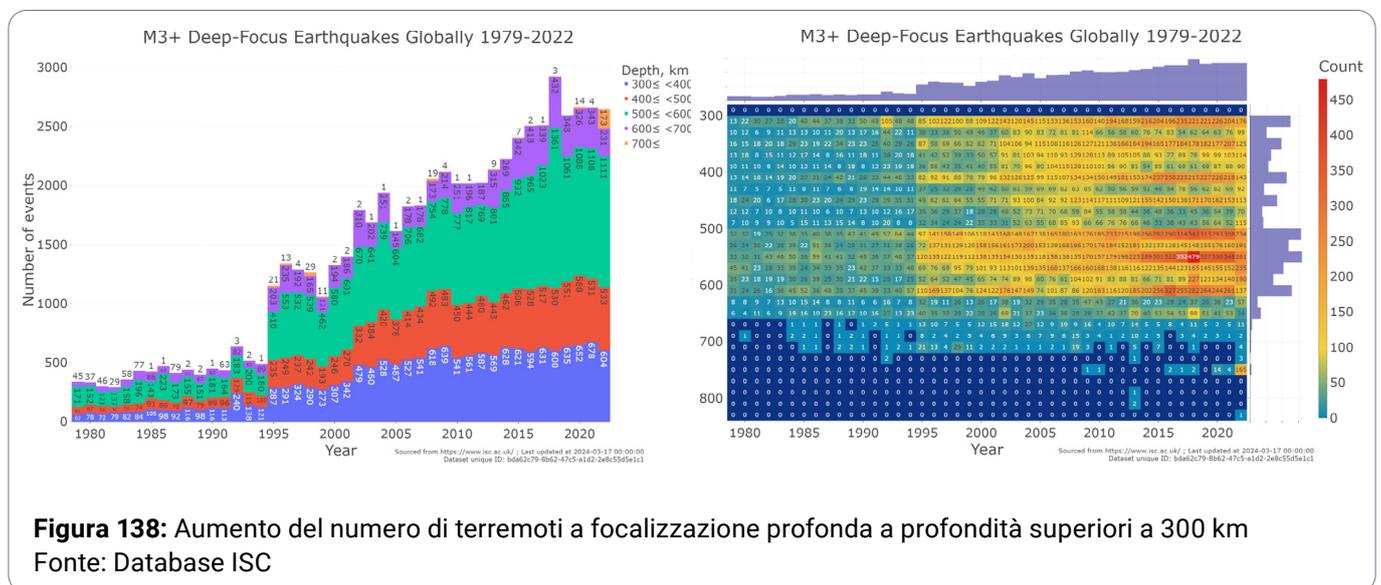


Figura 138: Aumento del numero di terremoti a focalizzazione profonda a profondità superiori a 300 km
Fonte: Database ISC

Sotto l'influenza delle forze centrifughe, il magma fuso nel mantello a partire dal 1995 ha iniziato a risalire attivamente verso la superficie terrestre, erodendo e riscaldando la litosfera dall'interno più intensamente del normale. Questa risalita del magma porta ad un aumento del flusso geotermico proveniente dalle profondità del pianeta e attiva i pennacchi magmatici sotto i ghiacciai dell'Antartide occidentale, della Groenlandia centrale e della Siberia. Di conseguenza, i ghiacciai e il permafrost iniziano a sciogliersi rapidamente dal basso verso l'alto^{365, 366, 367}.

Pertanto, la causa del riscaldamento degli oceani è rappresentata dalla risalita del magma, che riscalda in modo particolarmente intenso la crosta oceanica, più sottile e vulnerabile rispetto a quella continentale. I dati storici provenienti da carote geologiche e di ghiaccio indicano che la Terra ha affrontato cicli catastrofici simili ogni 12.000 anni. Ogni secondo ciclo, cioè ogni 24.000 anni, le catastrofi planetarie risultano ancora più intense (Fig. 139).

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016).

<https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

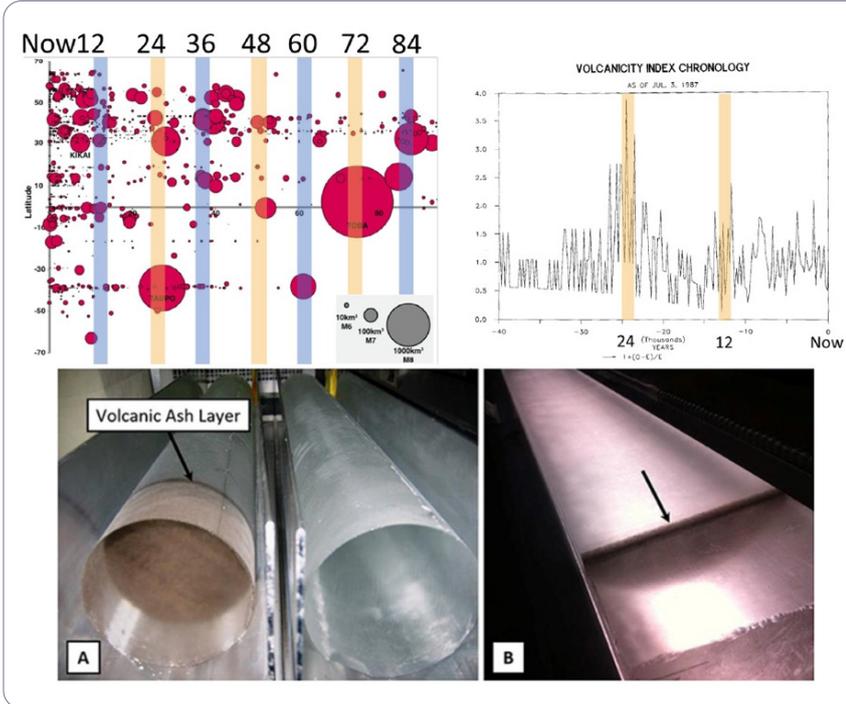


Figura 139: I grafici illustrano l'attività vulcanica catastrofica ogni 12.000 anni e eventi ancora più intensi ogni 24.000 anni.

Fonte: Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
Bryson, R. A. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

La Terra sta attualmente entrando in una di queste fasi cicliche. Tuttavia, questa volta, a causa dell'inquinamento antropogenico degli oceani da micro- e nanoplastiche, si è intensificato lo squilibrio termico nel mantello, il che porta a un aumento del numero di terremoti a focalizzazione profonda, alla formazione di nuovi focolai magmatici e a un'instabilità generale del pianeta. È proprio per questo che le catastrofi stanno crescendo molto più rapidamente e intensamente rispetto ai cicli precedenti. Di fatto, l'inquinamento degli oceani è diventato la causa principale per cui la Terra potrebbe non riuscire a superare questo ciclo. È importante comprendere che risolvere il problema dell'inquinamento oceanico da micro- e nanoplastiche può rallentare significativamente lo sviluppo dei cataclismi, ma non potrà fermarli del tutto.



Per approfondire le informazioni sull'attuale attivazione geodinamica delle profondità terrestri, sul ciclo catastrofico di 12.000 anni e sulle possibili soluzioni a questo problema, si rimanda al rapporto

“SULLA PROGRESSIONE DEI DISASTRI CLIMATICI SULLA TERRA E LE LORO CONSEGUENZE CATASTROFICHE”

Come hanno dimostrato anni di ricerche interdisciplinari sui cambiamenti geodinamici nel ciclo di 12.000 anni, la causa primaria del riscaldamento oceanico è la risalita del magma, che colpisce in modo particolarmente intenso la crosta oceanica — più sottile e vulnerabile rispetto a quella continentale. L'inquinamento da plastica degli oceani e l'accumulo di particelle di micro- e nanoplastiche rappresentano un fattore critico che altera le proprietà termofisiche dell'oceano. La presenza di queste particelle sintetiche nelle acque oceaniche riduce significativamente la capacità dell'acqua di condurre il calore, interrompendo i processi naturali di scambio termico tra gli strati profondi dell'oceano e la superficie. A peggiorare il tutto, viene compromessa la dispersione del calore dalle placche litosferiche. Durante un ciclo di crescente attività geodinamica, come quello dei 12.000 anni, l'alterazione critica della funzione conduttiva dell'acqua oceanica non solo aumenta il riscaldamento dell'oceano e dell'atmosfera, ma anche quello delle profondità terrestri. Ciò porta a una maggiore fusione del mantello e, di conseguenza, a un'intensificazione dell'attività geodinamica.

Ciò provoca l'accumulo di energia in eccesso nelle profondità della Terra, portando a un aumento del numero di terremoti a focalizzazione profonda e a una formazione accelerata di nuovi focolai magmatici. Questi processi, a loro volta, aggravano ulteriormente l'instabilità del pianeta e accelerano il riscaldamento degli oceani.

Si forma un pericoloso circolo vizioso:

l'attività geodinamica riscalda l'oceano → il riscaldamento accelera la decomposizione della plastica → l'aumento della concentrazione di microplastica riduce la conducibilità termica dell'acqua → viene ostacolato il rilascio di calore dalle profondità → si intensifica l'attività geodinamica e la frequenza dei terremoti → l'oceano si riscalda ulteriormente, accelerando ancora di più la frammentazione della plastica in micro- e nanoparticelle.



Ciò contribuisce all'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi e delle catastrofi naturali: inondazioni, uragani e cicloni tropicali, che si stanno verificando nel presente come mai prima d'ora.

L'inquinamento degli oceani con micro- e nanoplastiche non solo ha un impatto distruttivo sull'organismo umano, sugli ecosistemi, sulla biosfera e sul sistema climatico intensificando il riscaldamento oceanico, ma è anche un fattore che amplifica le già potenti catastrofi del ciclo di 24.000 anni, nel quale la Terra è ora entrata. Ciò crea rischi senza precedenti non solo per la sopravvivenza dell'umanità, ma anche per quella del pianeta Terra stesso.

La soluzione alla crisi globale ecologica, climatica e geodinamica richiede la cooperazione internazionale degli scienziati di diverse discipline per sviluppare e implementare urgentemente soluzioni complesse, che comprendano non solo la bonifica dell'oceano dalla contaminazione da micro- e nanoplastiche e la riduzione dell'impatto negativo di queste particelle sulla salute umana, ma anche soluzioni fondamentali in risposta alle minacce geodinamiche. Le soluzioni proposte sono disponibili nei relativi rapporti:



RAPPORTO

“SULLA PROGRESSIONE DEI DISASTRI CLIMATICI SULLA TERRA E LE LORO CONSEGUENZE CATASTROFICHE”



RAPPORTO

“SULLA MINACCIA DI UN'ERUZIONE DI UN PENNACCHIO DI MAGMA IN SIBERIA E STRATEGIE PER AFFRONTARE IL PROBLEMA”

CONCLUSIONI. LE NANOPLASTICHE SONO UNA SFIDA CHE NON PUÒ ESSERE IGNORATA

Il problema dell'inquinamento da plastica, specialmente sotto forma di micro- e nanoplastiche (MNP), ha da tempo superato la circoscrizione localizzata delle sue conseguenze ecologiche e si è trasformato in una minaccia globale e multi-sfaccettata. Le ricerche moderne confermano sia gli effetti diretti che indiretti delle MNP sul sistema climatico, sulla resilienza degli ecosistemi e sulla salute umana. Le particelle di microplastica sono in grado di penetrare negli organismi viventi, causando reazioni infiammatorie, alterando l'equilibrio ormonale, le funzioni del sistema immunitario e riproduttivo, nonché modificando le proprietà fisico-chimiche dell'ambiente circostante — dall'acqua marina all'atmosfera.

Più di dieci anni fa, i rappresentanti della comunità scientifica internazionale "ALLATRA" hanno avanzato l'ipotesi dell'incremento dell'influenza dell'inquinamento da plastica sulle anomalie climatiche e sul peggioramento dei problemi di salute pubblica. Oggi queste ipotesi trovano conferma in ricerche indipendenti condotte dalle principali istituzioni scientifiche. Il rapido accumulo di dati sugli effetti ecologici e biologici delle MNP apre nuovi orizzonti di analisi, inclusa la trasformazione dei modelli climatici, i cambiamenti nell'idrosfera e l'aumento dei rischi sistemici per lo sviluppo sostenibile. Preoccupa in particolare il fatto che anche concentrazioni microscopiche di nanoplastica possano innescare effetti a cascata nella biosfera e nel clima. La plastica ha smesso di essere un semplice rifiuto solido: sta diventando un agente attivo di trasformazione dell'ambiente e dell'organismo umano. Le conseguenze della sua diffusione sono già visibili. Il problema delle MNP riguarda non solo l'ecologia e la medicina, ma richiede anche una riflessione nel contesto della sicurezza nazionale, della macroeconomia e delle relazioni internazionali.

Nel quadro della strategia per contrastare questa minaccia, il movimento "ALLATRA" ha proposto due direzioni chiave, che possiedono sia potenzialità applicative che predittive. La prima di queste è l'introduzione su larga scala delle tecnologie di generatori di acqua atmosferica (GAA), che sono in grado di risolvere contemporaneamente il problema della scarsità di acqua dolce e contribuire alla pulizia dell'atmosfera e degli oceani dalle particelle di microplastica. Tuttavia, la realizzazione delle tecnologie GAA richiede la considerazione dei possibili rischi — in particolare, l'aumento della concentrazione di MNP nell'aria e, di conseguenza, l'intensificazione dell'impatto inalatorio sull'uomo. Questo impone la necessità di sviluppare parallelamente sistemi di filtrazione e protezione altamente efficienti.

La seconda direzione strategica, anch'essa proposta da "ALLATRA", riguarda lo sviluppo di metodi per la neutralizzazione o la schermatura della carica elettrostatica delle nanoplastiche, uno dei principali fattori della loro patogenicità una volta accumulate nell'organismo umano. Le particelle di nanoplastica cariche interagiscono attivamente con le membrane cellulari, le proteine e il materiale genetico, formando legami molecolari stabili. Tali particelle penetrano attraverso le barriere biologiche, incluso quella ematoencefalica, si accumulano nei tessuti e innescano una cascata di danni cellulari, dallo stress ossidativo all'apoptosi. La riduzione dell'attività elettrostatica delle micro- e nanoplastiche potrebbe ridurre significativamente la loro nocività e rallentare l'accumulo nell'organismo.

Secondo le stime degli autori del rapporto, la schermatura o la neutralizzazione della carica elettrostatica potrebbe ridurre il potenziale pericolo delle MNP di almeno il 50%, rendendo questa direzione di ricerca estremamente importante. Ciò creerebbe il necessario margine temporale per sviluppare strategie più complesse per la diagnosi, la prevenzione e l'eliminazione delle MNP dal corpo umano e per la pulizia della biosfera. In questo contesto, acquisiscono particolare importanza gli studi nei settori della biofisica, delle nanotecnologie e della tossicologia molecolare.

Pertanto, una risposta efficace alla minaccia delle MNP non richiede misure isolate, ma un approccio globale e interdisciplinare. È necessaria una coordinazione degli sforzi nel campo della ricerca scientifica, delle soluzioni tecnologiche, della regolamentazione normativa e della cooperazione internazionale. L'inquinamento da plastica dovrebbe essere considerato non come un problema ecologico limitato, ma come una sfida sistemica che coinvolge la salute, la sicurezza, la disponibilità di risorse e la resilienza delle infrastrutture sociali.

L'unicità di questo rapporto risiede nell'approccio interdisciplinare complesso che unisce dati provenienti dalla fisica, dalla chimica, dalla biologia e dalla medicina. Tale sintesi consente di considerare il problema delle MNP come una sfida civile, che richiede soluzioni su più livelli. Attualmente, la comunità mondiale sta lentamente prendendo coscienza delle vere dimensioni di questa minaccia. Nonostante l'assenza di una soluzione universale, sono proprio la ricerca e lo sviluppo della cooperazione scientifica che possono determinare il percorso per superare la crisi. La principale sfida non è l'assenza di una soluzione, ma la capacità di trovarla prima che si raggiunga il punto critico di non ritorno.

Fonti

- Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (accessed 1 May 2025).
- Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>
- Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>
- Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (accessed 1 May 2025)
- Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>
- AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (accessed 1 May 2025).
- Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLoS ONE* 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. *Front. Toxicol.* 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials* 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (accessed 1 May 2025).
- Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (accessed 1 May 2025).

- Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (accessed 10 May 2025).
- Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>
- Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (accessed 1 May 2025).
- Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
- Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (accessed 1 May 2025).
- Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>
- Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>
- Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>
- Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (accessed 1 May 2025).
- Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>
- Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).
- Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (accessed 1 May 2025).

Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (accessed 1 May 2025).

- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (accessed 1 May 2025).
- [Climate.gov](https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming). 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (accessed 10 May 2025).
- [ClimateReanalyzer.org](https://climatoreanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatoreanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (accessed 1 May 2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (accessed 10 May 2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807-3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (accessed 1 May 2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (accessed 1 May 2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (accessed 1 May 2025)

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (accessed 1 May 2025).

[Fanpage.it](https://www.fanpage.it). At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (accessed 1 May 2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (accessed 1 May 2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. *Birth Defects Research* 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (accessed 1 May 2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329-340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (accessed 1 May 2025)

Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (accessed 1 May 2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (accessed 1 May 2025).

Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (accessed 1 May 2025)

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (accessed 1 May 2025)

Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (accessed 1 May 2025).

lizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (accessed 1 May 2025).

IPCC. *Global Warming of 1.5°C*. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (accessed 1 May 2025).

Irigoiien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. *Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives*. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. *Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function*. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8y-jNFxkALjIC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (accessed 1 May 2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (accessed 1 May 2025)

Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). *Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects*. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10
- Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>
- Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>
- Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>
- Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>
- Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
- Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (accessed 1 May 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abysal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (accessed 1 May 2025).

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (accessed 1 May 2025).

NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (accessed 1 May 2025).

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (accessed 1 May 2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (accessed 1 May 2025).

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (accessed 1 May 2025).

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (accessed 10 May 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (accessed 1 May 2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (accessed 1 May 2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (accessed 1 May 2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

[Nippon.com](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (accessed 1 May 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (accessed 10 May 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (accessed 10 May 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (accessed 1 May 2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (accessed 1 May 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (accessed 1 May 2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (accessed 1 May 2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (accessed 1 May 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (accessed 1 May 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (accessed 1 May 2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (accessed 1 May 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (accessed 1 May 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (accessed 1 May 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (accessed 1 May 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (accessed 1 May 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (accessed 1 May 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (accessed 10 May 2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (accessed 1 May 2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingrassia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (accessed 1 May 2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (accessed 1 May 2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneshwari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snews.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (accessed 10 May 2025).

ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (accessed 1 May 2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (accessed 1 May 2025).

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (accessed 1 May 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (accessed 1 May 2025).

Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (accessed 1 May 2025).

Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (accessed 10 May 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (accessed 1 May 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (accessed 1 May 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (accessed 10 May 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (accessed 1 May 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (accessed 1 May 2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (accessed 1 May 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed 1 May 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed 1 May 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (accessed 1 May 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (accessed 1 May 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? *Science* 386, ead12746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (accessed 1 May 2025).

United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (accessed 1 May 2025).

United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (accessed 1 May 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (accessed 1 May 2025)

United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (accessed 1 May 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (accessed 1 May 2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (accessed 1 May 2025)

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (accessed 1 May 2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf> (accessed 1 May 2025)
- Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>
- Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>
- Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (accessed 1 May 2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>

Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (accessed 1 May 2025).

World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (accessed 10 May 2025).

World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (accessed 1 May 2025).

World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (accessed 1 May 2025).

World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (accessed 1 May 2025).

World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (accessed 1 May 2025).

- World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (accessed 10 May 2025).
- World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (accessed 1 May 2025).
- World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (accessed 1 May 2025).
- World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (accessed 1 May 2025).
- World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (accessed 1 May 2025).
- Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>
- WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (accessed 1 May 2025).
- Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>
- Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. *Science of The Total Environment* 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>
- Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>
- Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *Nanomaterials* 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>
- Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. *Cambridge Prisms: Plastics* 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>
- Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enccco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>