



INCONTRI DI STUDIO

Collana dell'Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e Lettere

**CHIMICA, SOCIETÀ
E AMBIENTE**

a cura di
STEFANO MAIORANA, CARLO GATTI

FrancoAngeli 



INCONTRI DI STUDIO

Collana dell'Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e Lettere

NUOVA SERIE

n. 5

La collana “Incontri di Studio” nasce nel 1992 con lo scopo di pubblicare in una cornice unitaria gli atti di convegni tenuti presso l'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere di Milano, sino ad allora editi in monografie autonome. Nel corso degli anni sono stati pubblicati oltre 100 “Incontri di Studio”, caratterizzati da varietà di discipline e temi affrontati, secondo quella che è la natura dell'Accademia milanese e degli incontri che promuove.

La collana adotta un sistema di valutazione anonima (*blind peer review*) dei saggi.

Le opere della collana sono pubblicate con licenza *Creative Commons* non commerciale e sono disponibili in perpetuo e in modo completo su *Repository* certificati.

COMITATO SCIENTIFICO

Prof. Stefano Maiorana, Presidente

(Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere – Università degli Studi di Milano)

Prof.ssa Cinzia Bearzot, Vicepresidente

(Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere – Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano)

Prof. Carlo Enrico Bottani, Segretario della Classe di Scienze matematiche e naturali

(Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere – Politecnico di Milano)

Prof. Giovanni Iamartino, Segretario della Classe di Scienze morali

(Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere – Università degli Studi di Milano)

Dott.ssa Rita Pezzola, Cancelliere

(Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere)

CHIMICA, SOCIETÀ E AMBIENTE

a cura di
STEFANO MAIORANA, CARLO GATTI

Atti dai Convegni
“La Chimica nella sfida energetica”, 13 ottobre 2022
“La sfida chimica e ambientale”, 12 ottobre 2023
Milano, Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e Lettere

INCONTRI DI STUDIO
Collana dell'Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e Lettere

FrancoAngeli®

Pubblicato con il contributo di: Università degli Studi di Milano, Politecnico di Milano, Università degli Studi di Pavia, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Università degli Studi dell'Insubria di Varese, Università Commerciale L. Bocconi di Milano, Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, Università degli Studi di Brescia, Università degli Studi di Bergamo.

Per la collaborazione al ciclo di convegni, si ringraziano: Società Chimica Italiana (SCI) - Sezione Lombardia, Ordine interprovinciale dei Chimici e dei Fisici (OCF) della Lombardia, Federazione delle Associazioni Scientifiche e Tecniche (FAST).

La presente pubblicazione rientra tra le iniziative dell'Istituto Lombardo realizzate nell'ambito del Protocollo Lombardo per lo Sviluppo sostenibile.

Impaginazione e cura redazionale: Viola Bianchi

Progetto grafico di copertina: Elena Pellegrini

Copyright © 2025 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

Pubblicato con licenza *Creative Commons*
Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale
(CC-BY-NC-ND 4.0).

Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM), AI training e tutte le tecnologie simili.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore.
L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

Indice

<i>Prefazione</i> , di Stefano Maiorana e Carlo Gatti	pag.	7
Massimo Beccarello, <i>Stima costi di impatto scenario Fit For 55 per l'Italia</i>	»	9
Alessandro Abbotto, <i>Idrogeno: un combustibile verde e rinnovabile per la mobilità sostenibile</i>	»	41
Roberto Zoboli, <i>Rifiuti e materiali secondari nel paradigma industriale dell'economia circolare</i>	»	55
Gianfranco Pacchioni, <i>CO₂: da problema a risorsa</i>	»	95
Carlo Barbante, <i>Scritto nel ghiaccio: la lezione che viene dal passato</i>	»	113
Laura Riva, Ilaria Corsi, Carlo Punta, <i>Le nanotecnologie per la bonifica ambientale: un rischio o un'opportunità?</i>	»	123
Roberta Bettinetti, <i>Nuovi contaminanti emergenti negli ambienti lacustri: le microplastiche</i>	»	141
Abstracts e Keywords	»	169

Prefazione

Stefano Maiorana, Carlo Gatti*

Il presente volume raccoglie alcuni dei contributi conferiti ai primi due convegni dei tre previsti con cadenza annuale, organizzati dall'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere sotto il titolo generale *Chimica, società e ambiente* e dedicati rispettivamente al tema *La Chimica nella sfida energetica* (ottobre 2022) e al tema *La sfida chimica e ambientale* (ottobre 2023).

Il terzo convegno a chiusura della trilogia sulla transizione energetica e ambientale, si è tenuto il 10 ottobre 2024 e ha avuto il titolo *Chimica, agricoltura e alimentazione sostenibili*.

Con questi incontri si intende fare il punto, da un rigoroso punto di vista scientifico, sullo stato dell'arte della ricerca chimica in campo energetico e ambientale e sulle prospettive concrete di tempi, costi, e modi di realizzazione di possibili soluzioni anche in vista del considerevole aumento della popolazione mondiale previsto nei prossimi anni.

L'Istituto Lombardo ha ben chiara l'importanza della formazione di una *opinione pubblica* coscientemente *informata e critica*. Per questo, nei convegni dell'Istituto Lombardo, sono sempre coinvolti attori con vario ruolo. Questa volta, trattandosi di convegni di chimica, ci si è indirizzati verso la partecipazione di importanti istituzioni quali: la Federazione delle Associazioni Scientifiche e Tecniche (FAST), la Società Chimica Italiana (SCI), l'Ordine dei chimici e dei fisici, l'Università e la scuola, in particolare gli insegnanti. Con tutti loro, l'Istituto Lombardo intende portare in rilievo i temi complessi della transizione ecologica e ambientale nell'ambito di uno sviluppo civile e industriale compatibile e non recessivo. L'auspicio e l'obiettivo è di apportare nuovi, oggettivi e – si spera – significativi *contri-*

* Stefano Maiorana: Presidente dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere. Professore emerito di Chimica organica presso l'Università degli Studi di Milano. Carlo Gatti, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (m.e.). Già Dirigente di Ricerca presso il CNR. E-mail: carlo.gatti@scitec.cnr.it.

buti di conoscenza riguardanti forse le sfide più impegnative che l'uomo abbia mai dovuto affrontare nella lunga storia della sua evoluzione.

L'epico e tradizionale confronto dell'uomo con la natura si configura oggi come una *sfida globale e complessa* perché concerne in modo integrato aria-acqua-suolo e, quindi, la vita sulla terra. La difficoltà di comprensione e di gestione di alcuni fenomeni deriva dalle molte variabili implicate, non tutte ancora note e soprattutto controllabili dall'uomo. Una sfida quindi, quella con la natura, che continua con aspetti completamente nuovi concettualmente e tecnologicamente, ma di grande impatto economico, politico sociale e culturale.

Stefano Maiorana, Carlo Gatti
Coordinatori del ciclo triennale di incontri Chimica, società e ambiente
e curatori scientifici del presente volume

Stima costi di impatto scenario Fit For 55 per l'Italia

Massimo Beccarello*

1. Premessa

Nel luglio 2021 la Commissione Europea ha presentato il nuovo pacchetto di misure chiamato *Fit For 55*, con il quale l'UE intende raggiungere la neutralità climatica nel 2050, definendo nuovi obiettivi più ambiziosi per il 2030.

Il pacchetto delinea un percorso di decarbonizzazione preciso, con una forte promozione dell'efficienza energetica e specifici *target* per una maggiore penetrazione di fonti rinnovabili elettriche e combustibili alternativi in determinati settori.

In questo intervento viene riportato una sintesi relativa agli effetti di impatto economico del pacchetto *Fit For 55* che è stata sviluppata nello studio Confindustria RSE *Scenari e valutazioni di impatto economico degli obiettivi "Fit For 55" per l'Italia*¹.

Con il *Green Deal*, la Commissione Europea ha reso più ambiziosi gli obiettivi climatici dell'UE per il 2030, portando il *target* di riduzione netta delle emissioni di gas serra al 2030 a -55% rispetto i livelli del 1990, un'accelerazione rispetto al precedente obiettivo del -40% e ha reso legalmente vincolante l'obiettivo della neutralità climatica al 2050. Per raggiungere questo traguardo più sfidante di decarbonizzazione accelerata, il 14

* Professore associato di Economia dei Settori produttivi presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca. E-mail: massimo.beccarello@unimib.it.

¹ In questo contributo viene riportata una sintesi dello studio che l'autore ha curato nell'ambito della collaborazione con Confindustria e la Società di Ricerca sul Sistema Energetico, di seguito RSE (RSE S.p.A., è una società indirettamente controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze attraverso il suo azionista unico GSE S.p.A. Lo studio è disponibile al seguente link: <https://www.confindustria.it/home/notizie/Fit-for-55-PRENTAZIONE-DELLO-STUDIO-SCENARI-E-VALUTAZIONI-DI-IMPATTO-ECONOMICO-DEGLI-OBIETTIVI-FF55-PER-L-ITALIA> [consultato il 15 gennaio 2025].

luglio 2021 la Commissione ha presentato un pacchetto di proposte, il cosiddetto “pacchetto *Fit For 55*”, una serie di azioni legislative che mira ad assicurare il raggiungimento di tale obiettivo e favorire una transizione adeguata verso la decarbonizzazione totale al 2050.

Il pacchetto contiene proposte di modifica per otto atti legislativi esistenti sui temi energia e clima e presenta cinque nuove iniziative che combinano:

- il rafforzamento del sistema ETS² (*Emissions Trading System*) esistente e la sua applicazione a nuovi settori;
- un incremento dei *target* sull’efficienza energetica e l’uso di energie rinnovabili;
- una maggiore penetrazione di mezzi di trasporto a basse emissioni accompagnata da uno sviluppo accelerato di infrastrutture di ricarica e rifornimento e carburanti alternativi;
- misure per prevenire la delocalizzazione delle emissioni (il cosiddetto *carbon leakage*³);
- modifiche delle politiche fiscali per allinearle maggiormente agli obiettivi del *Green Deal*;
- azioni per preservare e incrementare i *carbon sink* naturali come le foreste e altri ecosistemi.

Questo contributo riporta, in sintesi, una valutazione di scenario che ha l’obiettivo di stimare il fabbisogno di investimenti necessari, per l’Italia, al fine di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 previsti dal pacchetto *Fit For 55*. Accanto alla stima del fabbisogno di investimenti l’analisi effettua un primo tentativo di valutare gli effetti di questi investimenti in termini di effetti sul piano della crescita e dell’occupazione. Infine, poiché le dimensioni della spesa per investimenti richiederanno di valutare il ricorso a misure di sostegno pubblico, sono stati considerati i possibili ritorni, in termini di finanza pubblica derivati dalla spesa per investimento.

² Il meccanismo ETS è lo strumento economico adottato dalla Commissione Europea con la Direttiva 2003/87/CE per valorizzare in termini di costo le emissioni di gas climalteranti. Questa componente di costo viene sostenuta dagli operatori che gestiscono gli impianti che causano le emissioni.

³ Il *carbon leakage* definisce il rischio che i settori *emission intensive* in relazione all’applicazione del meccanismo delocalizzino le attività produttive in aree geopolitiche che non adottano queste misure di contenimento delle emissioni con il duplice effetto: 1) di deindustrializzate in contesto industriale europeo; 2) di aumentare il livello di emissioni, producendo in aree non sottoposte ad adeguate misure di contenimento.

2. Scenari di riferimento per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione

Per effettuare le valutazioni di impatto economico sono stati sviluppati tre scenari di riferimento: 1) scenario BASE a politiche di intervento esistenti; 2) Scenario RSE; 3) scenario denominato “Confindustria” che include valutazioni specifiche dei settori industriali. L’analisi dello scenario Confindustria è basata sul confronto con uno scenario di riferimento (BASE) e uno scenario di *Policy* (FF55).

Gli scenari energetici sono realizzati da RSE con il ricorso al modello tecnico economico TIMES⁴-RSE, che consente di descrivere l’intero sistema energetico nazionale dalle fasi di approvvigionamento delle fonti primarie, alla trasformazione e generazione elettrica, fino ai dispositivi di uso finale dei diversi settori di impiego. I tre scenari sono così definiti:

1. Lo scenario BASE è costruito su ipotesi omogenee con quelle dello scenario di riferimento della CE (EUref2020⁵) e rappresenta l’aggiornamento dello scenario BASE del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima⁶ (di seguito PNIEC) in funzione degli ultimi dati statistici disponibili e degli ultimi avvenimenti che hanno influenzato il sistema energetico. Si considerano implementate tutte le politiche energetiche già concordate a livello dell’UE e degli Stati membri entro il dicembre 2020.

2. Lo scenario energetico FF55⁷ è stato costruito con l’obiettivo di raggiungere contemporaneamente i nuovi *target* vincolanti per l’Italia, secondo quanto proposto dal pacchetto *Fit For 55* con il quale la Commissione Europea ha aggiornato i nuovi obiettivi di riduzione delle emissioni al 2030 riducendo il livello di gas climalteranti del -55% rispetto al 2005.

⁴ TIMES (*The Integrated Markal-Efom System*) è un modello di analisi economica sviluppato dalla Commissione e adottato dagli Stati membri per valutare gli effetti impatto economici delle politiche di decarbonizzazione. Il modello integra al suo interno il collegamento con i modelli di simulazione degli scenari energetici. Per ulteriori approfondimenti si veda il link: <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-jrc-eu-times/> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁵ Ministero dello Sviluppo economico 2020.

⁶ Il PNIEC è il documento programmatico redatto ai sensi del Regolamento Comunitario sulla *Governance* dell’Energia (Reg. 2018/1999/EU) con il quale ogni Stato membro comunica alla Commissione la strategia di intervento per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione fissato per il 20230.

⁷ Gaeta *et al.* 2021.

I due scenari si differenziano sostanzialmente per i vincoli e gli obiettivi che devono riguardare al 2030, e per una diversa crescita economica settoriale. Nello scenario FF55 sono stati inseriti tutti i vincoli e *target* previsti nel pacchetto *Fit For 55* mentre lo scenario Confindustria è stato costruito mantenendo solo un *target* di riduzione generale delle emissioni, senza vincoli settoriali, pari al valore ottenuto dalla combinazione delle proposte di direttive dello scenario FF55 (Tab.01). Lo scenario Confindustria considera altresì una diversa evoluzione di crescita economica rispetto al FF55 includendo gli impatti sull'economia del PNRR e di una azione di decarbonizzazione frammentata a livello globale sulle crescite dei valori aggiunti settoriali. Nel testo verranno mostrati i risultati degli scenari con *focus* 2030, ma tutti gli scenari sono stati realizzati con l'obiettivo di neutralità climatica al 2050.

FF55	Confindustria
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Target</i> ETS: -61% (obiettivo valido solo a livello EU) • <i>Target</i> ESR (<i>Effort Sharing Regulation</i>): -43,7% • <i>Carbon price</i> nei segmenti di trasporto stradale e climatizzazione edifici: -43% • <i>Target</i> FER (Fonti Energie Rinnovabili) <ul style="list-style-type: none"> • FER_TOT: 36,5% • FER_trasporti: <i>emissions savings</i> \geq 13% • FER_buildings: 49% consumi finali totali • <i>Target</i> efficienza energetica <ul style="list-style-type: none"> • Obiettivo Formula: FEC (<i>Final Energy Consumption</i>) (2030) = 94 Mtep • Risparmi secondo misure attive (art. 8 EED, <i>Energy Efficiency Directive</i>) • Settore pubblico: 1,7% annuo consumi totali • <i>Target</i> idrogeno verde ed <i>e-fuel</i>: 2,6% consumi trasporti, 50% consumi idrogeno nell'industria 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Target</i> GHG (<i>Green House Gas</i>, gas a effetto serra) lordo minimo: -50% (equivalente a riduzione totale scenario FF55). • Sottovincoli settoriali: mantenuti solo i principali vincoli PNIEC (no pacchetto FF55). • Aggiornamento proiezioni PIL e VA settoriali: maggiore crescita nel 2020-2030 per effetto del PNRR, in parte mitigata da effetto politiche <i>Green Deal</i>. • Aggiornamento prezzi gas e CO₂ (sistema) • Introduzione di nuovi processi per la produzione di <i>biofuel</i> (tra cui bioGPL e di-metil-etero rinnovabile rDME) e prodotti rinnovabili (tra cui <i>recycled carbon fuels</i>). • Introduzione di <i>input</i> tecnici e di <i>policy</i> delle associazioni di Confindustria (piani industriali, elettrificazione, CCS (<i>Carbon Capture and Sequestration</i>))

Tab.01. Vincoli e obiettivi modellati al 2030: differenze tra lo scenario Confindustria e lo scenario FF55.

3. Obiettivi di riduzione delle emissioni e implicazioni di politica energetica

La politica comunitaria di lotta ai cambiamenti climatici è molto chiara sul piano metodologico. Si identificano gli obiettivi di riduzione dei gas climalteranti (-55%) e da questo si fanno derivare le politiche energetiche necessarie al raggiungimento degli obiettivi. L'esigenza di disporre di scenari alternativi è importante per evitare rigidità sul piano metodologico e avere una valutazione complessivamente ampia sull'insieme di opzioni necessarie a individuare le linee di intervento più adeguate sul piano della relazione costi-efficacia.

L'efficienza energetica e il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili, nonché il *phase-out* del carbone e la diffusione delle tecnologie di *Carbon Capture and Sequestration* (di seguito CCS), rappresentano le leve di intervento per ridurre le emissioni del sistema energetico del Paese nella evoluzione prospettata dal Piano Energia e Clima. Le emissioni di CO₂ del settore energetico, infatti, riflettono il diverso mix e il differente modo di produrre e consumare energia. Quanto più ampio e argomentato è lo scenario di valutazione tanto maggiori saranno le possibilità di agire da parte del Governo per individuare le linee di politica energetica funzionali agli obiettivi minimizzando i costi di sistema.

Nel grafico seguente sono riportati gli scenari emissivi obiettivo per il nostro Paese, il quale dovrà ridurre il livello di emissioni al 2030 di una misura tendenzialmente pari al 55% rispetto al livello di emissioni del 2005. Nello scenario Confindustria, per costruzione, è stata vincolata la riduzione delle emissioni totali in linea con i risultati ottenuti nello scenario FF55. In termini di contributi settoriali (ETS e non-ETS) nello scenario Confindustria si ottiene una maggiore riduzione delle emissioni nei settori attualmente nel *Effort Sharing Regulation*¹⁰ (di seguito ESR) o settore non-ETS che si riducono del 45% rispetto al 2005 (-44% nello scenario FF55). Nel settore ETS, invece, le emissioni si riducono del 68% rispetto al 2005 (-69% nello scenario FF55). A giocare un ruolo determinante in questi cambiamenti è la spinta verso opzioni di decarbonizzazione che interessano maggiormente i settori ESR, in particolare la diffusione di *green fuel*.

¹⁰ Il Regolamento ESR (*Regulation* EU 2018/842) interviene fissando degli obiettivi di riduzione delle emissioni per tutti i settori che non sono inclusi nel meccanismo ETS (quali, ad esempio, trasporti residenziale terziario) lasciando a ogni Stato membro la facoltà di adottare le misure necessarie al raggiungimento degli obiettivi. Il livello delle emissioni per settori ESR concorre alla determinazione complessiva del livello di decarbonizzazione per ogni Stato membro.

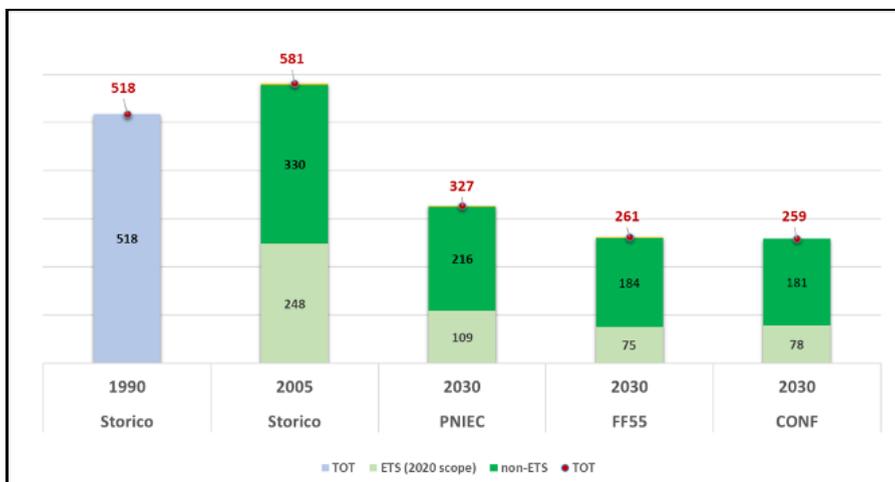


Fig.02. Riduzione delle emissioni di GHG Mln/tons, confronto tra scenario Confindustria, FF55 e PNIEC. Fonte: Confindustria 2023.

Le principali linee di intervento in termini di politica energetica richiedono un'azione di politica energetica, sia con riferimento al mix energetico accelerando la produzione da fonti rinnovabili, sia sul piano dell'efficiamento dei consumi dei diversi settori dell'economia.

Il settore civile si presenta come il principale settore per gli interventi di efficientamento anche nello scenario Confindustria, con una riduzione dei consumi di energia di 7,2 Mtep (Milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) rispetto allo scenario BASE al 2030, a conferma che il civile è un settore con un potenziale di efficienza molto elevato e ancora da sfruttare.

Il settore industriale consegue una riduzione dei consumi di circa 1,3 Mtep, mentre nell'FF55 si raggiungeva una riduzione di 2,2 Mtep. Il settore industriale va però analizzato in maniera differente rispetto agli altri: è infatti un settore che, oltre alle leve tradizionali di decarbonizzazione (efficienza, elettrificazione e rinnovabili), nello scenario Confindustria presenta 2,1 Mton CO₂ catturate da tecnologie di *Carbon Capture and Sequestration* (CCS) a complemento delle altre soluzioni, in particolare nei settori *Hard to Abate*¹¹.

¹¹ I settori *Hard to Abate* rappresentano tipicamente i settori *energy intensive* per i quali, come abbiamo visto all'inizio, sono adottate delle misure "protettive" di aiuto, quali ad esempio *carbon leakage*, che tendono a mitigare l'impatto in termini di costo delle emissioni.

Un altro apporto rilevante all'efficientamento nello scenario Confindustria proviene dal settore Trasporti che riesce a contribuire al *gap* al 2030 per 3,4 Mtep, contro i 4,1 Mtep del FF55, grazie all'utilizzo dei *green fuel* di origine biologica inclusi nello scenario Confindustria.

Negli scenari, per perseguire l'obiettivo di decarbonizzazione, si evolve anche il mix di fonti che soddisfano i consumi finali: questi ultimi si contraggono di circa il 19% rispetto alla situazione del 2019 nel caso dello scenario FF55 e del 16% nel caso dello scenario Confindustria.

Lo scenario Confindustria presenta maggiori consumi dell'FF55 (*Fig.03*) legati principalmente alle fonti rinnovabili (+2,4 Mtep) e in secondo luogo ai prodotti petroliferi (+0,5 Mtep). Anche il consumo di energia elettrica cresce anche se limitatamente (+0,1 Mtep).

Per le fonti rinnovabili l'incremento principale dei consumi si ha nel settore trasporti con +1,1 Mtep, dovuto alla costruzione dello scenario Confindustria che promuove biocarburanti tradizionali e avanzati, bioGPL e rDME. Per i prodotti petroliferi la crescita principale riguarda il settore dell'agricoltura con un incremento di 0,3 Mtep seguito da civile e industria (+0,1 Mtep in entrambi i settori).

Osservando i consumi complessivi settoriali (*Fig.04*) i maggiori consumi si riflettono in tutti i settori: industria (+0,9 Mtep), trasporti (+0,8 Mtep), residenziale (+0,6 Mtep), agricoltura (+0,3 Mtep) e terziario (+0,3 Mtep).

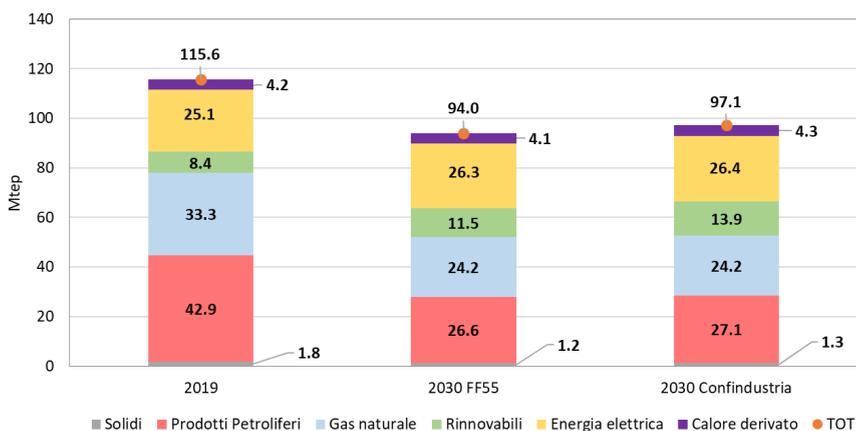


Fig.03. Consumi finali di energia per fonte, confronto tra scenario Confindustria, FF55 e dato storico 2019. Fonte: Confindustria 2023.

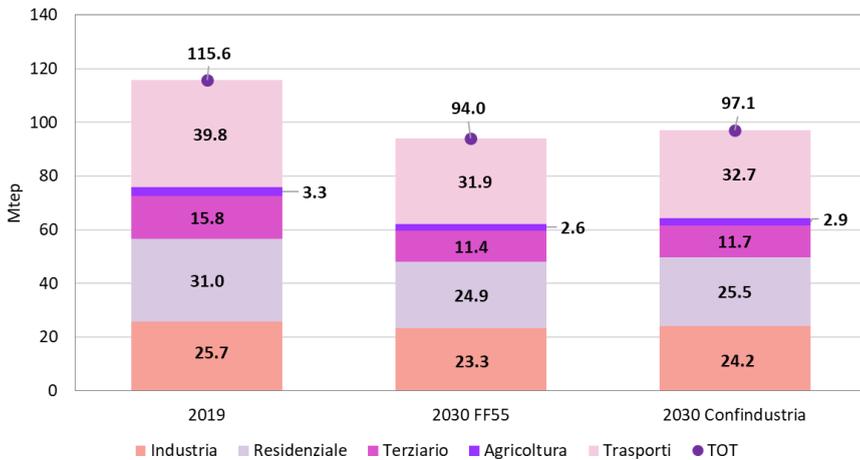


Fig.04. Consumi finali di energia per settore, confronto tra scenario Confindustria, FF55 e dato storico 2019. Fonte: Confindustria 2023.

Quando si parla di efficienza energetica, non basta considerare solamente i consumi finali di energia ma occorre approfondire anche l'evoluzione dei consumi in termini di energia primaria. Grazie al ruolo determinante dell'efficienza energetica e dei nuovi *target* emissivi al 2030, l'evoluzione del fabbisogno nello scenario Confindustria, così come nel FF55, non prevede inversioni di marcia, anzi tende ad amplificare il ricorso a tecnologie e strumenti di efficienza energetica e a ridurre il fabbisogno di energia primaria nazionale. Rispetto al 2019, lo scenario FF55 presenta, infatti, circa 34 Mtep in meno di richiesta primaria, mentre lo scenario Confindustria raggiunge 30 Mtep in meno, evidenziando in entrambi i casi un disaccoppiamento sempre più marcato tra il Consumo Interno Lordo di energia primaria¹² (di seguito CIL) e la crescita del PIL.

La Fig.05 mostra la variazione dei consumi primari nello scenario Confindustria rispetto allo scenario FF55. Nello scenario è richiesta una minor riduzione dei consumi primari di circa 4 Mtep dovuta rispettivamente ai prodotti petroliferi (+1,8 Mtep), rinnovabili (+1,2 Mtep), gas naturale (+0,7 Mtep) e solidi (+0,3 Mtep). La presenza delle tecnologie CCS nei settori della generazione elettrica e dell'industria permette di

¹² Consumo interno lordo di energia primaria (CIL): Somma di produzione primaria fonti, recupero prodotti, importazioni nette e variazione degli stoccaggi ai quali si sottraggono i *bunkeraggi*.

raggiungere i medesimi risultati di riduzione delle emissioni dello scenario FF55 richiedendo uno sforzo meno sfidante sul fronte dell'efficienza energetica (-20% vs -22,5%).

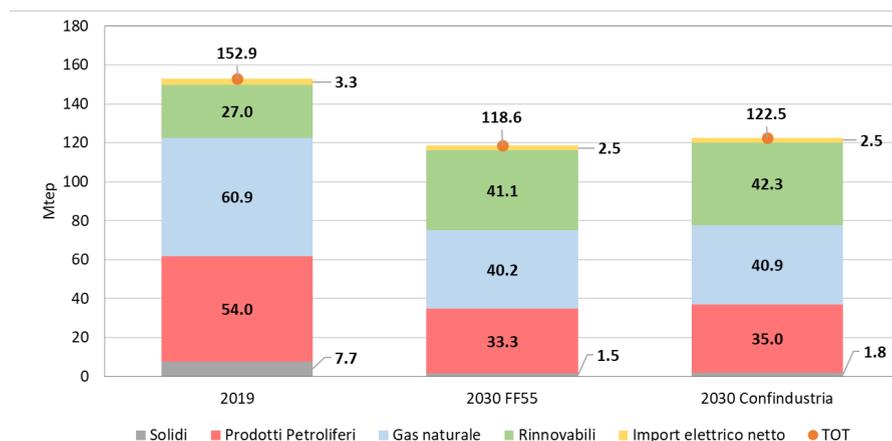


Fig.05. Consumi primari di energia, confronto tra scenario Confindustria, FF55 e dato storico 2019. Fonte: Confindustria 2023.

4. Stima fabbisogno investimenti diretti per la transizione energetica italiana al 2030 su base macro-settoriale

Sia il conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione del pacchetto *Fit For 55*, che lo scenario Confindustria richiedono un rilevante impegno in termini di investimenti incrementali rispetto a una evoluzione tendenziale (scenario BASE) del sistema energetico e produttivo nazionale. Bisogna considerare che, anche senza ulteriori misure di *policy* rispetto a quanto già esiste oggi, senza alcun obiettivo di decarbonizzazione, il sistema energetico dovrà sostenere investimenti per poter svolgere le sue normali funzioni, a causa del fine vita di tecnologie e impianti che dovranno essere sostituiti. Il vero costo imputabile alla decarbonizzazione rimane, perciò, il costo aggiuntivo per investimenti più costosi, o per interventi non previsti nella evoluzione tendenziale.

La *Tab.02* riporta la stima del fabbisogno complessivo di investimenti diretti nei tre scenari di riferimento assunti per le valutazioni. Si stima che, nel periodo 2020-2030, occorrono circa 974 miliardi di euro di investimenti nello scenario BASE (a *policy* esistenti *ex* PNIEC 2020) mentre, per realiz-

zare i nuovi obiettivi del pacchetto *Fit For 55*, sono necessari 1.126 miliardi per realizzare lo scenario RSE-FF55 e 1.120 miliardi di euro nello scenario Confindustria.

Lo scenario Confindustria presenta un fabbisogno di investimenti inferiori in relazione ad alcune ipotesi effettuate su in alcuni settori. Ad esempio, la diffusione di biocarburanti e prodotti rinnovabili alternativi al posto di auto più efficienti rende sicuramente più contenuti gli investimenti del settore trasporti, che è quello che richiede maggiori investimenti rispetto agli altri.

Rispetto allo scenario BASE gli investimenti cumulati del settore trasporti si riducono di circa 13 miliardi di euro (*Tab.02*) perché gli investimenti includono i costi sostenuti da cittadini e imprese per il periodico rinnovo del parco veicolare, ma non le infrastrutture stradali, ferroviarie e navali, con l'esclusione di circa 3,6 miliardi aggiuntivi per le colonnine di ricarica. La presenza di *shift*-modale dal trasporto passeggeri privato verso forme di modalità di trasporto collettive, riducendo il parco circolante, permette di contenere gli investimenti, indirizzandoli verso automobili più efficienti e ad alimentazione elettrica.

Nel sistema elettrico, i maggiori costi sostenuti stimati nello scenario Confindustria, derivano dall'esigenza di maggiori investimenti nei sistemi di accumulo (batterie) necessari per garantire la stabilità e la sicurezza della rete elettrica. Nel settore trasformazione, invece, sono dovuti ai maggiori investimenti stimati per garantire la conversione delle raffinerie in bioraffinerie.

<i>Mid/€</i>	<i>BASE</i>	<i>F55</i>	<i>Confindustria</i>
Residenziale	116	157	154
Terziario	89	123	118
Industria	18	24	26
Trasporti	683	674	670
Settore elettrico- impianti	41	102	99
Sistema elettrico	23	41	44
Settore trasforma- zione	3	6	7
Totale investimenti diretti	974	1126	1120

Tab.02. Investimenti cumulati nel periodo 2020-2030 nello scenario Confindustria confrontato con il BASE. Dati in miliardi di euro.

5. Risultati delle valutazioni di impatto macroeconomico del pacchetto FF55 sull'economia italiana al 2030

L'analisi quantitativa dei vantaggi che derivano dalla realizzazione degli investimenti attivati dagli obiettivi di decarbonizzazione per l'Italia include una valutazione d'impatto che viene condotta attraverso l'utilizzo delle matrici *input-output*, grazie alle quali è possibile avere una fotografia istantanea delle interdipendenze settoriali che caratterizzano il sistema produttivo economico nazionale, rappresentato dai flussi di beni e servizi in un contesto di equilibrio economico generale¹³.

Il beneficio derivante dall'utilizzo di un tale strumento analitico permette di effettuare simulazioni che classicamente vengono svolte per valutare gli impatti di uno *shock* esogeno di domanda sui principali aggregati che compongono una tavola *input-output* (produzione, valore aggiunto, *input* intermedi, *input* primari) o che è possibile collegare a essa (occupazione, PIL).

I modelli di analisi economica *input-output* che si avvalgono degli aggiornamenti statici prodotti periodicamente dall'ISTAT¹⁴ descrivono le caratteristiche intrinseche del sistema economico italiano. Il modello *input-output* sostanzialmente misura gli effetti sul sistema economico nazionale di una variazione della domanda di investimenti in termini di attivazione di nuova produzione, aumento del valore aggiunto ed effetti sull'occupazione. Nel caso specifico, applicato alla domanda di investimenti necessaria a raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione (investimenti ad esempio in rinnovabili, in tecnologie per l'efficienza energetica etc.), il modello stima come una variazione della domanda di investimenti necessari per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione producano effetti sulla crescita del prodotto interno lordo, del valore aggiunto e degli effetti in termini occupazionali.

Dal punto di vista metodologico, l'unico limite dei modelli *input-output* è rappresentato dal fatto che i parametri che identificano le relazioni tra i diversi comparti del sistema economico sono aggiornati sulla base di rilevazioni di ISTAT su base periodica: quindi un limite che bisogna considerare nelle valutazioni prospettiche, è il fatto che il modello

¹³ Il processo produttivo si risolve in un prodotto finale, il cui valore è esattamente uguale alla somma dei redditi corrisposti ai fattori produttivi impiegati. Le tavole vanno dunque lette avendo chiara la dicotomia: vengono riportati i flussi di beni e servizi intermedi affluiti dalle branche di origine (righe), come *input* produttivi, a quelle di impiego (colonne) come *output* produttivi.

¹⁴ Per ulteriori approfondimenti e specificazioni sui modelli *input-output* si veda il [link](#): *Il sistema di tavole input-output – Anni 2015-2020 – Istat* [consultato il 15 gennaio 2025].

utilizza delle relazioni statiche riferite a dati pregressi che potrebbero essere oggetti di variazioni nei periodi successivi considerati¹⁵.

Appare dunque evidente come le diverse simulazioni che verranno presentate nel paragrafo vadano lette in chiave di statica comparata: a parità di altre condizioni, si valuta l'impatto di variazioni della domanda finale per effetto di nuovi investimenti sulla quantità prodotta (ma non sui prezzi).

A ciò si aggiungono altri limiti quali, ad esempio, l'assunzione di coefficienti tecnici costanti, sia per effetto di una relazione lineare costante, escludendo quindi l'ipotesi di rendimenti di scala crescenti o decrescenti, cioè di indipendenza dei coefficienti dalla scala di produzione, sia per effetto di tecnologie in essere che si mantengano costanti nel periodo di tempo considerato¹⁶. Inoltre, si considera anche l'assunzione che gli *shock* implementati siano completamente assorbiti dalla domanda nazionale.

È opportuno sottolineare, infatti, che il prodotto finale dell'analisi matriciale non identifica necessariamente valori aggiuntivi in termini di valore aggiunto, produzione e occupazione, dato il vincolo di sistema che vede escludere, in presenza di una capacità produttiva del 100%, l'effetto netto. Soltanto in presenza di risorse inutilizzate infatti è possibile il completo assorbimento da parte del sistema produttivo.

Sebbene i vantaggi dell'utilizzo delle tavole *input-output* siano evidenti, un tale strumento, per le considerazioni appena fatte, contiene dei limiti che vincolano l'utilizzo e/o quantomeno rischiano di distorcere in minima misura le stime nel medio-lungo periodo. È dunque opportuno individuare e specificare nel dettaglio tali limiti:

1. L'impiego dei modelli *input-output* va inteso in termini di analisi statica comparata, nel senso che si valutano gli impatti differenziali di variazioni della domanda finale sui livelli di produzione o d'impiego dei fattori primari, *ceteris paribus*.

2. I parametri relativi all'interdipendenza settoriale sono riferiti a un singolo anno, al 2018. L'ipotesi sottostante alle analisi di impatto è che tale grado di integrazione sia costante in tutto il periodo di riferimento (2020-2030). In altre parole, non si tiene conto dei cambiamenti tecnologici e strutturali che si potrebbero verificare nel sistema produttivo

¹⁵ Per approfondire queste criticità si veda Galasso-Infantino 2008.

¹⁶ L'assunzione di un progresso tecnico che si mantiene costante è plausibile in un arco di tempo limitato, poiché al crescere della variabile tempo l'accumulazione di conoscenza diventa non trascurabile, specialmente in sistemi produttivi particolarmente dinamici.

italiano. L'impossibilità di tenere in considerazione tali cambiamenti si potrebbe tradurre in una sovrastima dell'impatto occupazionale che è riferito, nelle nostre valutazioni, a tecnologia invariata. Cambiamenti tecnologici, infatti, portano a una redistribuzione a favore del capitale dell'intensità di utilizzo del fattore lavoro. C'è da sottolineare, tuttavia, che cambiamenti tecnologici e strutturali si verificano molto lentamente nei sistemi industriali maturi quale quello italiano. Gli effetti finali sulle stime al 2030 potrebbero dunque anche essere piuttosto contenuti.

3. Purtroppo, l'utilizzo di una matrice delle tavole *input-output* a sessantatré settori non consente di effettuare le stime di impatto su attività produttive a un maggior livello di dettaglio.

La valutazione dell'impatto macroeconomico delle *policy* climatiche declinate nei diversi scenari esposti nei paragrafi precedenti, sfrutta le matrici *input-output*. Il perseguimento dei *target* richiede, a sua volta, una rideterminazione dei piani di sviluppo al 2030 delle fonti rinnovabili, dell'efficienza energetica e delle tecnologie elettriche in quanto fattori determinanti per abbassare la produzione di gas serra secondo i tempi accordati, recepiti dal recente pacchetto *Fit For 55*, e si sostanzia in un preciso ammontare di investimenti in un arco temporale nel periodo 2020-2030.

Ciò comporta che gli investimenti fissi lordi necessari a raggiungere tali obiettivi di *policy*, abbiano impatto sul vettore della domanda finale, per cui tutto l'indotto del settore risente dell'aumento della domanda e, nel complesso, l'intero sistema economico nazionale.

L'applicazione del modello produzione-domanda consente in sostanza di esaminare in dettaglio, secondo lo schema di Leontief, la scomposizione del vettore di domanda nelle sue componenti settoriali e la reazione produttiva, offrendo la possibilità di valutare l'effetto moltiplicativo dal lato dell'offerta e non della domanda.

L'impatto degli investimenti richiesti per il raggiungimento dei *target* sull'economia reale è quindi valutato sulla produzione: nel vettore della domanda finale ricostruita sulla base delle tavole *input-output* è stato imputato l'aumento della spesa per investimenti nel settore di produzione del bene/tecnologia oggetto di incentivi.

Si è ottenuto così uno schema sugli effetti di tale aumento della domanda nel sistema economico. L'impatto è stato valutato su alcune significative variabili riferite all'intera economia:

- valore della produzione
- occupazione, misurata in migliaia di ULA (Unità di Lavoro standard)
- valore aggiunto

L'analisi costi-benefici si è concentrata sui seguenti ambiti:

- residenziale
- terziario
- industriale
- trasporti
- elettrico
- sistema elettrico
- teleriscaldamento

I maggiori investimenti in tecnologia efficiente e in innovazione producono una consistente crescita del prodotto interno lordo, con positivi effetti sul saldo occupazionale.

L'analisi di impatto è stata condotta attraverso l'utilizzo di una matrice *input-output* a sessantatré settori/prodotti, riferita all'anno 2018, l'ultimo disponibile.

5.1. Gli effetti sull'economia nazionale

Come riportato nella *Tab.01*, la realizzazione degli investimenti, ai fini della valutazione di impatto economico, è prevista secondo due differenti scenari: uno scenario BASE e uno scenario Confindustria. La *Tab.03* di seguito riportata evidenzia i principali risultati della simulazione di impatto.

La realizzazione degli investimenti previsti nei diversi ambiti considerati comporterebbe, secondo le valutazioni condotte da RSE, un incremento della domanda finale pari a circa 974,2 miliardi di euro tra il 2020 e il 2030 nello scenario BASE. L'impatto complessivo sul sistema produttivo sarebbe di 1.753,6 miliardi di euro, espressi in valori nominali, rispetto al 2018 (1.435,8 miliardi al netto dei beni intermedi importati), pari al +4,3% medio annuo; in termini occupazionali invece, l'effetto vedrebbe un aumento di unità di lavoro standard pari a 9,6 milioni (+2,6% medio annuo). Infine, l'incremento in termini di valore aggiunto nominale ammonterebbe a 595,3 miliardi di euro (+3,2% medio annuo).

Nello scenario Confindustria, la realizzazione degli investimenti volti a sostenere la domanda e gli incentivi promossi al fine di rilanciare l'offerta di tecnologie ammonterebbe a 1.120,7, con un incremento valore della produzione pari a 1.976,1 miliardi di euro (+4,7% medio annuo, 1.645,3 mi-

liardi al netto dei beni intermedi importati), un'occupazione più elevata di 11,5 milioni di ULA (+3,1%) e un incremento di valore aggiunto di 689,1 miliardi di euro (+3,7% medio annuo).

L'incremento riconducibile agli investimenti addizionali in tecnologie per efficienza energetica nello scenario Confindustria sarebbe di circa 147 miliardi di euro, con aumenti (rispetto allo scenario di BASE) di quasi 222,5 miliardi di euro in termini di produzione, di occupazione per 1.876 milioni di ULA e di valore aggiunto per circa 93,8 milioni di euro.

Un'analisi più dettagliata a livello settoriale consente di effettuare una valutazione del contributo di ciascun settore all'impatto macroeconomico complessivo (*Tab.04*).

<i>Scenario BASE</i>			
Investimenti cumulati: 974.200			
	<i>Livello di base</i>	<i>Impatto % a seguito di una variazione della domanda finale</i>	<i>Impatto in valore</i>
Produzione a prezzi base	3.365.584	52	1.753.596
Impieghi intermedi importati	340.733	93	317.772
VA per branca	1.589.576	37	595.294
Occupazione per settore (migliaia di ULA)	32.351	31	9.607

<i>Scenario Confindustria</i>			
Investimenti cumulati: 1.120.700,0			
	<i>Livello di base</i>	<i>Impatto % a seguito di una variazione della domanda finale</i>	<i>Impatto in valore</i>
Produzione a prezzi base (Mil/€)	3.365.584	59	1.976.100
Impieghi intermedi importati (Mil/€)	340.733	97	330.816
VA per branca (Mil/€)	1.589.576	43	689.107
Occupazione per settore (migliaia di ULA)	32.351	37	11.483

Tab.03. Effetti sull'economia nazionale. Note: Il totale generale non coincide con la somma degli incrementi stimati per i singoli progetti in quanto la valutazione complessiva è stata fatta imputando contemporaneamente l'aumento della domanda annua dal 2020 al 2030 in tutti i comparti interessati e ciò ha accentuato gli effetti diretti e indiretti sul sistema nazionale rispetto a quelli derivanti dalla somma dei singoli interventi settoriali. Elaborazioni basate su modello input-output ISTAT dell'Economia Italiana dal Centro Studi Confindustria su dati ISTAT e RSE.

<i>Impatto complessivo sul sistema economico nazionale (2020-2030)</i>									
	<i>Hp aumento della domanda – Scenario CONF (Mil/€)</i>	<i>Produzione a prezzi base (Mil/€)</i>	<i>Impieghi intermedi importati (Mil/€)</i>	<i>VA per branca (Mil/€)</i>	<i>Occupazione per settore (migliaia di ULA)</i>	<i>Produzione a prezzi base %</i>	<i>Impieghi intermedi importati %</i>	<i>VA per branca %</i>	<i>Occupazione per settore %</i>
Residenziale	153.854	264.376	39.575	100.080	1.696	8	12	6	5
Industriale	26.292	48.136	6.629	17.273	257	1	2	1	1
Terziario	118.434	198.443	33.477	73.981	1.183	6	10	5	4
Trasporti	670.264	1.175.507	226.944	384.312	6.055	35	66	24	19
Elettrico	99.350	191.181	14.323	75.967	1.578	6	4	5	5
Sistema	51.800	95.340	9.588	36,390	706	3	3	2	2
Teleriscaldamento	1.500	3.116	280	1.103	9	0	0	0	0
Totale	1.121.494	1.976.100	330.816	689.107	11.483	58	96	43	37

Tab.04. Impatto complessivo sul sistema economico nazionale (2020-2030). Note: Il totale generale non coincide con la somma degli incrementi stimati per i singoli progetti in quanto la valutazione complessiva è stata fatta imputando contemporaneamente l'aumento della domanda annua dal 2020 al 2030 in tutti i comparti interessati e ciò ha accentuato gli effetti diretti e indiretti sul sistema nazionale rispetto a quelli derivanti dalla somma dei singoli interventi settoriali. Elaborazioni basate su modello input-output ISTAT dell'Economia Italiana dal Centro Studi Confindustria su dati ISTAT e RSE.

5.2. Effetti sul bilancio pubblico e impatto complessivo

A ulteriore integrazione delle elaborazioni già riportate e commentate, è possibile stimare anche i potenziali effetti sul bilancio pubblico. Tale impatto è stato stimato assumendo l'ipotesi che:

1. Tutti gli investimenti derivano da produzione interna (nessuna produzione importata);
2. Gli effetti devono essere coerenti con il conto del PIL (quindi seguendo lo schema delle entrate del conto della Pubblica Amministrazione – fonte DEF 2022);

Alla luce dei meccanismi di incentivazione ipotizzati nella realizzazione dei diversi investimenti, le conseguenze sul bilancio dello Stato potrebbero essere molto significative, in particolare con riferimento ai flussi delle entrate tributarie (imposte dirette e indirette).

Relativamente alle imposte dirette, a fronte di una diminuzione di quelle pagate dalle compagnie del settore energetico (che vedono ridursi i propri ricavi) si registrerebbe un aumento del gettito fiscale delle so-

cietà manifatturiere che producono beni e tecnologie efficienti e dei soggetti (forza lavoro e fornitori) che vi lavorano.

L'effetto netto complessivo in termini di maggiori entrate sarebbe di 168,7 miliardi di euro. Per quanto riguarda le imposte, il maggior gettito dell'IVA legato all'aumento ipotizzato della domanda sarebbe stimabile in 163,1 miliardi di euro. Marginale sarebbe l'impatto misurato sui contributi sociali e sulle categorie residuali di entrate correnti e in conto capitale. Inoltre, si registra una riduzione del gettito dell'IVA e delle accise pagate sull'energia risparmiata per un ammontare di 12,1 miliardi di euro.

Tenuto conto degli effetti netti sulle componenti delle entrate tributarie sopra ricordati, quello netto complessivo sul bilancio statale è positivo per un importo totale di 529,5 miliardi di euro cumulati nel periodo 2020-2030 (*Tab.05*).

<i>Effetti complessivi sul sistema economico italiano</i>			
<i>(Valori cumulati 2020-2030)</i>			
			Totale
Costi diretti complessivi stimati			1.120,70
Effetti sul bilancio statale	Entrate Tributarie	Mln/€	332.868
	Imposte Indirette	Mln/€	163.139
	Imposte Dirette e occupazione		168.717
	Accise e IVA (-consumi)	Mln/€	-12.146
	Imposte c/capitale		1.012
	Contributi sociali	Mln/€	154.750
	Altre entrate correnti	Mln/€	50.480
	Altre entrate c/capitale	Mln/€	3.556
	Totale	Mln/€	529.508

Tab.05. Effetti complessivi sul sistema economico nazionale. Fonte: elaborazione Centro Studi Confindustria su dati MEF e RSE.

5.3. Effetti in termini di costi evitati di energia ed emissioni di CO₂

Come già mostrato nel paragrafo 3 nella proiezione dello scenario Confindustria emerge una significativa riduzione dei consumi primari rispetto al livello del 2019 pari a circa 30 Mtep al 2030, e pari a 135 Mtep cumulati nel periodo 2020-2030 (*Fig.06*). La riduzione dei consumi primari è guidata dalla contrazione di tutte le fonti fossili in particolare:

- Contrazione dei consumi di carbone e prodotti petroliferi, grazie principalmente al *phase-out* del carbone dal settore elettrico.
- Anche il gas naturale contribuisce alla riduzione dei consumi totali grazie all'efficientamento degli usi termici nei settori d'uso finale e l'elettificazione dei consumi finali, nonostante esso acquisti maggiore rilevanza nel settore del trasporto merci. La riduzione dei consumi di Gas naturale al 2030 nello scenario Confindustria è pari a circa 25 Bcm (*Billion cubic metres*), (nel 2021 abbiamo importato dalla Russia rispettivamente 29 Bcm, per cui considerando un incremento della produzione nazionale di 2 Bcm, i nuovi rigassificatori per LNG, *Liquefied Natural Gas*, e nuovi contratti di fornitura gas, con questa configurazione si potrebbe evitare la dipendenza dalla Russia) .
- La diffusione di alimentazioni alternative nel settore trasporti (elettrico, metano, GPL, biocombustibili) contribuisce, insieme con l'efficientamento energetico dei veicoli, a ridurre il ricorso ai prodotti petroliferi di circa il 35% rispetto al 2019).

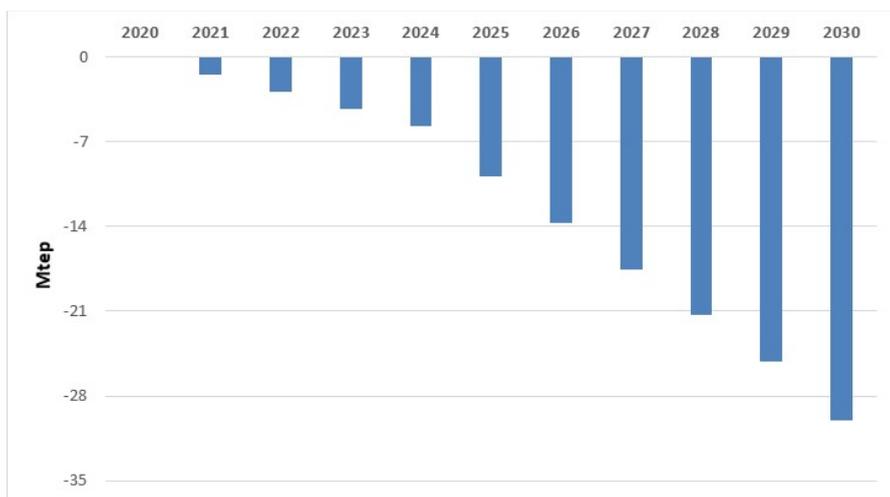


Fig.06. Consumi evitati (Mtep) dello scenario Confindustria rispetto a una evoluzione BASE. Fonte: Confindustria 2023.

Per effetto dell'efficienza energetica e del trasferimento della domanda dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili, nello scenario Confindustria si

riduce, così, la dipendenza energetica dai combustibili fossili (si passa dal 78% del 2019 al 59% nel 2030, cfr. Fig.07) e di conseguenza la spesa per le importazioni di energia si contrae in maniera significativa: le azioni delineate da Confindustria consentono al 2030 di tagliare la fattura energetica del nostro Paese, ovvero la spesa nazionale per l’approvvigionamento di energia dall’estero.

Per valutare gli effetti della configurazione mostrata dallo scenario Confindustria sulla fattura energetica è stata considerata l’evoluzione dei prezzi dei combustibili utilizzati per la realizzazione dello scenario, sia in *import* che in *export*. Nella Tab.06 sono riportati i prezzi internazionali delle tre principali fonti fossili.

	2020	2025	2030
Petrolio	33,5	52,8	72,2
Gas (GCV)	20,8	29,9	38,1
Carbone	8,9	12,3	15,6

Tab.06. Evoluzione del prezzo internazionale delle commodity energetiche (euro anno base 2015 per boe).

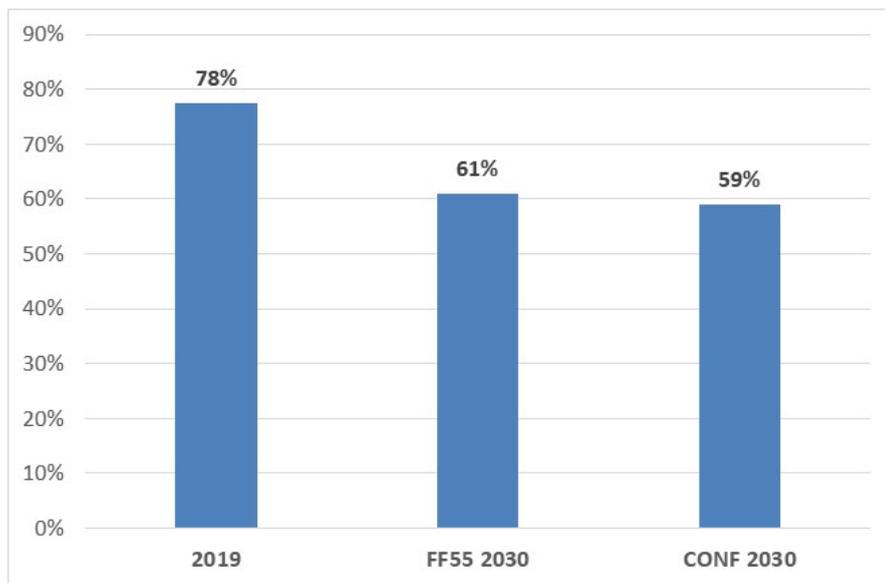


Fig.07. Evoluzione della dipendenza energetica al 2030 negli scenari FF55 e CONF. Fonte: Confindustria 2023.

Naturalmente l'incremento dei prezzi di *import*, in particolare del gas, di questi ultimi due anni sono stati presi in considerazione nello studio insieme alla ipotesi di una breve persistenza di questa situazione "straordinaria". Per il gas, in particolare, sono state considerate le proiezioni dello scenario *Stated Policies* del *World Energy Outlook 2021* della IEA (International Energy Agency), mentre per le altre fonti sono state prese a riferimento le proiezioni dello scenario di Riferimento della Commissione Europea (EURef2020).

La fattura energetica nazionale al 2030 si contrae di quasi il 50% rispetto al valore del 2019 nonostante la crescita economica e l'incremento dei prezzi delle principali *commodity* in esame. La riduzione della dipendenza energetica del Paese è il principale *driver* di questa contrazione, ed è guidata da efficienza energetica, *fuel switch* verso le rinnovabili prodotte *in loco*, maggiore capacità di produzione delle bioraffinerie nazionali e da una ripresa dell'apporto nazionale del gas naturale.

La riduzione principale registrata nella fattura energetica è legata ai prodotti petroliferi, con oltre 13 miliardi di euro in meno in fattura: andamento legato sia alla riduzione dei consumi nazionali e sia alle ipotesi di un mantenimento dell'*export* più o meno simile a quello degli ultimi anni (voce di ricavo nella fattura).

La spesa per il *net import* di gas si contrae di 4 miliardi di euro (circa il 30% in meno) a fronte di una riduzione del 37% dei consumi di gas, mentre a quasi azzerare la spesa per il carbone è principalmente il *phase out* da questa fonte nel settore elettrico al 2025.

La contrazione delle fonti fossili nello scenario produce un altro effetto quantificabile economicamente: la mancata emissione dei gas climalteranti prodotti dalla combustione di queste *commodity* (Fig.08). Considerando il prezzo dei permessi di emissione del settore ETS, pari a 100 euro alla tonnellata al 2030 in questo scenario, ma applicato a tutte le emissioni evitate (circa 70 Mega tonnellate di CO₂, Mt CO₂), potremmo considerare come evitato un costo annuo pari a 7 miliardi di euro al 2030 rispetto allo stesso anno di una evoluzione tendenziale senza alcuna politica o intervento rispetto a oggi.

L'impatto economico sul sistema energetico delle emissioni di CO₂ evitate e della riduzione dei consumi in ottica fattura energetica può essere stimato intorno ai 66 miliardi di euro, risparmio cumulato nel periodo 2020-2030.

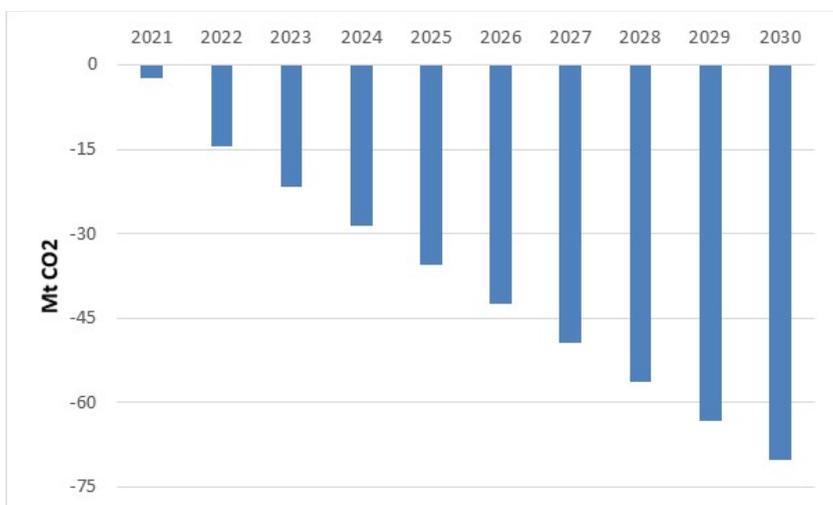


Fig.08. Emissioni evitate (Mt/CO₂) dello scenario Confindustria rispetto a una evoluzione BASE. Fonte: Confindustria 2023.

5.4. Sintesi benefici e costi evitati 2020-2030

A completamento delle analisi già effettuate in precedenza abbiamo sintetizzato nella *Tab.07* una prima valutazione complessiva costi benefici monetari. Nella tabella sono riportati e confrontati i costi degli investimenti diretti complessivi (1.120,7 miliardi di euro) per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 con i benefici economici per la collettività, derivanti dagli effetti positivi sul bilancio dello Stato in termini di maggiori entrate (stimati in 541 miliardi di euro), i benefici in termini di valore dell'energia risparmiata (stimabile in 28 miliardi di euro) e, infine, i benefici derivanti dal costo della CO₂ evitata (stimabili in circa 36 miliardi di euro).

*Sintesi effetti complessivi sul sistema economico italiano
(Valori cumulati 2020-2030)*

			Totale
Costi diretti complessivi stimati		Mln/€	1.120.707
Effetti sul bilancio statale	Entrate tributarie	Mln/€	320.722
	Imposte indirette	Mln/€	163.139
	Imposte dirette	Mln/€	168.717
	Accise e IVA (min. cons.)	Mln/€	-12.146

	Imposte c/capitale	Mln/€	1.012
	Contributi sociali	Mln/€	154.750
	Altre entrate correnti	Mln/€	50.480
	Altre entrate c/capitale	Mln/€	3.556
	Totale	Mln/€	529.508
Effetti quantitativi sul sistema energetico	Energia risparmiata (Consumi di energia primaria)	Mtep	135
	CO ₂ risparmiata	Mt	380
Impatto economico sul sistema energetico	Energia risparmiata (1)	Mln/€	29.925
	CO ₂ risparmiata (2)	Mln/€	36.100
	TOTALE	Mln/€	66.025
Benefici: entrate e costi evitati		Mln/€	595.533
Effetto netto costi benefici macro			-527.174

Tab.07. Effetti complessivi sul sistema economico italiano (valori cumulati 2020-2030).

Questa valutazione, per quanto sintetica, consente tuttavia di mettere in evidenza lo spazio di manovra in termini di risorse delle politiche economiche di intervento per sostenere gli obiettivi *Fit For 55*.

Lo spazio di manovra sul piano fiscale è strettamente legato a un ritorno potenziale per le casse dello Stato di oltre 529 miliardi di euro. Questa grandezza può essere interpretata come una stima delle disponibilità finanziarie per adottare politiche di incentivazione della domanda di investimenti attraverso la fiscalità e/o le misure di intervento a compensazione dei costi indiretti – riqualificazione dei settori industriali, rafforzamento della scala dimensionale dei settori della green-economy e delle competenze professionali – per attenuare il costo sociale della trasformazione indotta dal pacchetto FF55.

Inoltre, è importante stimare anche i benefici in termini di costi evitati derivanti dal minor costo associato alla riduzione dei consumi energetici pari a 30 miliardi di euro e il costo evitato relativo alla riduzione delle emissioni nel periodo pari a 36 miliardi di euro.

Il beneficio complessivo considerando sia le potenziali entrate per il bilancio dello Stato, i costi evitati in termini di energia risparmiata e CO₂ evitata, ammontano complessivamente a circa 594 miliardi di euro. Il costo complessivo netto degli investimenti per il sistema economico-sociale italiano risulta in circa 527 miliardi di euro.

6. Considerazioni conclusive

L'obiettivo di questo studio, riportato in sintesi, era di fornire un primo contributo per valutare le principali implicazioni economiche per il sistema economico italiano, in relazione al fabbisogno di investimenti necessari a raggiungere gli obiettivi del pacchetto *Fit For 55*.

L'analisi condotta si basa sul confronto di tre scenari di decarbonizzazione. Il primo scenario è definito scenario "BASE", il quale si limita a considerare l'evoluzione del processo di decarbonizzazione nazionale sulla base delle politiche energetiche e ambientali in essere. Lo scenario BASE viene confrontato con due ulteriori scenari costruiti per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione previsti dal pacchetto *Fit For 55* per l'Italia. I due scenari si differenziano in quanto identificano due diversi percorsi denominati "Confindustria" e "FF55", ognuno dei quali agisce in modo differente sulle leve dell'efficienza energetica (riduzione dei consumi) e sulle decisioni di mix energetico attraverso le ipotesi sullo sviluppo della produzione di energia rinnovabile. Dal confronto dei due scenari con lo scenario BASE sono stati determinati i fabbisogni di investimento incrementali rispetto al *trend* previsto a politiche energetiche e ambientali esistenti.

Osservando i risultati dello studio, lo scenario associato alle proposte di Confindustria porta a una configurazione al 2030 con obiettivi meno sfidanti in termini di efficienza energetica e a un maggiore sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili rispetto al percorso tracciato per lo scenario FF55. Per lo scenario Confindustria sono state inoltre aggiornate al rialzo le proiezioni del prodotto interno lordo (PIL) e del valore aggiunto (VA) settoriali rispetto al FF55 (coerentemente con previsioni e consuntivi disponibili nel 2022): questo aggiornamento mira a considerare una stima più accurata dell'impatto del PNRR sul sistema industriale italiano. Le nuove stime di crescita del PIL tengono maggiormente conto del forte rimbalzo di crescita economica atteso entro il 2025, dovuto alla ripresa delle attività produttive e ai fondi stanziati con il PNRR, e proiettano una crescita comunque più sostenuta fino al 2030, grazie alle riforme strutturali previste e all'effetto espansivo degli investimenti del Piano. È bene precisare che i risultati delle simulazioni contengono implicitamente l'assunzione che il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza sia realizzato, diversamente, il mancato sostegno dei fondi comunitari previsti per la transizione energetica, pari a circa 40 miliardi di euro, potrebbe ridurre l'entità degli investimenti. I risultati dello scenario Confindustria, considerando una strategia che si basa prevalentemente su investimenti in produzione da fonti rinnovabili, i quali evidenziano una minore esigenza di investimenti di efficienza

energetica per decarbonizzare, portano a maggiori consumi finali pari a +3 Mtep rispetto allo scenario FF55.

Per quanto riguarda lo sviluppo delle fonti rinnovabili, nello scenario Confindustria lo *share* sui consumi finali lordi supera il 37% con un contributo più rilevante della produzione rinnovabile nel settore termico e nei trasporti. Nel settore termico l'incremento è riconducibile a una maggiore diffusione delle pompe di calore e soprattutto all'utilizzo di biometano nel settore civile. In questo scenario, nel settore dei trasporti (responsabile per circa il 30% delle emissioni complessive di gas climalteranti) si prevede, al fine del raggiungimento degli obiettivi comunitari di decarbonizzazione, un maggiore utilizzo di *green fuel*.

Per gli impatti sul settore elettrico lo studio tiene conto del percorso transitorio al 2026 (anno di riferimento per il completamento del PNRR) per la definizione della configurazione del sistema al 2030. Il PNRR dà infatti un impulso allo sviluppo della produzione di H₂ verde già prima del 2030 in una situazione in cui le eccedenze di fonti di generazione rinnovabile non programmabile (di seguito FRNP) nel sistema elettrico non risultano ancora sufficientemente rilevanti. Per il 2026 la soluzione maggiormente perseguibile risulterebbe quella di produrre idrogeno verde con impianti rinnovabili dedicati (ovvero produzione elettrica rinnovabile ed elettrolizzatori). Lo scenario sviluppato è in linea con gli obiettivi del PNRR e prevede quindi circa 1 GW di elettrolizzatori dedicati al 2026.

Dopo il 2026 la produzione da FRNP dello scenario diventa rilevante rendendo interessante la soluzione di investire in elettrolizzatori su rete che utilizzano produzioni eccedentarie della generazione da FRNP. A partire dalla configurazione del 2026 sono state quindi individuate diverse varianti in termini di mix di soluzioni di flessibilità (impianti P2X¹⁷ e accumuli elettrici); tutte le soluzioni individuate garantiscono la produzione di idrogeno verde e un livello accettabile di *over generation* residua.

Dopo aver considerato le ipotesi principali sul piano tecnologico per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione, lo studio ha sviluppato uno scenario di impatto economico al fine di valutare il costo degli investimenti necessari per implementare le tecnologie ipotizzate.

I due scenari di riferimento, Confindustria e FF55, hanno stimato un fabbisogno di investimenti, nel periodo 2023-2030, funzionale a raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione del pacchetto *Fit For 55*, pari rispettivamente a 1.126 miliardi di euro (Confindustria) e 1.120 miliardi di

¹⁷ P2X è un termine generale utilizzato per indicare le tecnologie di conversione che trasformano l'elettricità in combustibili sintetici a zero emissioni di carbonio, come idrogeno, gas naturale sintetico, combustibili liquidi o prodotti chimici.

euro (FF55). Entrambi gli scenari, rispetto allo scenario BASE, evidenziano un fabbisogno di investimenti superiore di circa 150 miliardi di euro. Per comprendere le dimensioni di impatto economico della sfida dettata dagli obiettivi di decarbonizzazione, è sufficiente dividere per anno l'importo complessivo stimato per il periodo 2023-2030. Ne emerge un fabbisogno di risorse per investimenti di circa 140 miliardi di euro per anno. Si tratta di una somma significativa se consideriamo che l'Italia, a causa dei problemi connessi alla dimensione del debito pubblico, presenta forti vincoli alla possibilità di "sussidiare" questi investimenti con risorse pubbliche e, pertanto, dovranno essere allocati come costi prevalentemente sul sistema delle imprese e delle famiglie con potenziali effetti sulla competitività e sul potere di acquisto.

Per questa ragione era necessario approfondire ulteriormente gli effetti allocativi di ripartizione tra le diverse parti sociali degli investimenti necessari a raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione. Lo studio ha quindi considerato gli effetti del fabbisogno di investimenti (nei tre scenari considerati) al 2030 in termini di impatto macroeconomico sulla base di un modello per valutare gli effetti sul prodotto interno lordo, sul valore aggiunto e sul piano occupazionale.

Con riferimento agli effetti sul valore della produzione (al netto dei beni importati) per l'economia italiana, nei due scenari si avrebbe un aumento medio annuo al 2030 compreso tra il 4,3% (scenario BASE 1.435,8 miliardi cumulati al 2030) e il 4,7% (scenario Confindustria 1.645,3 miliardi cumulati al 2030). Con riferimento al valore aggiunto, l'impatto sull'economia nazionale nel periodo considerato è compreso tra il 3,2% (scenario BASE 595,3 miliardi cumulati al 2030) e il 3,7% (scenario Confindustria 689,1 miliardi cumulati al 2030). Infine, sul piano occupazionale, i due scenari evidenziano un potenziale positivo in termini di crescita occupazionale che espresso in media annua varia tra il 3,2% (scenario BASE 9,6 milioni di ULA al 2030) e il 3,7% (scenario Confindustria 11,5 milioni di ULA al 2030). Le valutazioni effettuate in termini di impatto macroeconomico non considerano gli effetti netti derivanti dai costi diretti e indiretti che potrebbero derivare dalla perdita di capacità produttiva e dagli effetti di sostituzione settoriale che potrebbero derivare per effetto della trasformazione di importanti comparti industriali.

Questi risultati evidenziano un effetto positivo degli investimenti sul piano della crescita (PIL e VA) e sul piano occupazionale. Tuttavia, l'implicazione centrale ai fini delle conclusioni, è che questa domanda di investimenti sia soddisfatta prevalentemente da capacità produttiva di tecnologie *green* italiane. Questi risultati sono centrali per evidenziare la rilevanza strategica da parte dell'Italia e, più in generale dell'Europa,

di dare attuazione al Regolamento *Net Zero Industry Act*, con il quale la Commissione prevede delle misure per sviluppare capacità produttiva europea nelle tecnologie chiave per la decarbonizzazione. Diversamente, la domanda di queste tecnologie sarà soddisfatta da impianti di produzione che si trovano fuori dall'Italia (o dall'Europa) e i risultati sperati sul piano della crescita economica e occupazionale difficilmente potranno essere raggiunti.

Poiché il fabbisogno di investimenti risulta particolarmente significativo e, per essere attivato, potrebbe richiedere “sussidi” in termini di risorse pubbliche, lo studio ha considerato sul piano macroeconomico gli effetti complessivi sul bilancio statale nel periodo considerato (utilizzando lo scenario Confindustria). Queste valutazioni sono rilevanti non solo per comprendere gli effetti positivi sul debito pubblico ma consentono anche di comprendere il margine di manovra per adottare politiche fiscali per la promozione degli investimenti.

L'impatto complessivo in termini di entrate sul bilancio statale ammonta a oltre 529 miliardi di euro nel periodo considerato suddivisi in oltre 332 miliardi di euro di maggiori entrate tributarie, oltre 154 miliardi di euro di contributi sociali e quasi 50,5 miliardi di euro di altre entrate correnti e in conto capitale. Questo risultato rappresenta un valore di riferimento importante rispetto all'adozione di politiche di sostegno pubbliche. Infatti, se lo scenario di investimenti ha considerato nel periodo 1.126 miliardi di euro di investimenti, la simulazione evidenzia che in termini di entrate pubbliche, tra le diverse voci, “ritornano” allo Stato circa 529 miliardi di euro: ovvero per ogni euro di investimento ritornano circa 0,46 euro. Questo significa, sul piano potenziale, che lo Stato potrebbe utilizzare una defiscalizzazione per gli investimenti in decarbonizzazione fino al 46%.

Accanto ai ritorni diretti per il settore pubblico, devono essere considerati i costi evitati di interesse generale. Per questa ragione, per completare la valutazione degli impatti economici della transizione energetica al 2030, sono stati valutati i benefici in termini di costo evitato sia sulle esternalità ambientali (ovvero il costo della CO₂ evitata) sia i costi evitati di consumo energetico (riduzione della bolletta energetica nazionale). Nel periodo considerato i costi evitati in termini di CO₂ ammontano complessivamente a 36 miliardi di euro (pari a 380 milioni di tonnellate) mentre il costo evitato in termini di energia risparmiata ammonta a quasi 30 miliardi (pari 132 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio).

L'effetto complessivo di ritorno per l'interesse pubblico, in termini di entrate per lo Stato e in termini di costi evitati, è di circa 595 miliardi

di euro. Complessivamente considerati gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030, pur attivando una mole di investimenti senza precedenti nel nostro Paese, potrebbero rappresentare una forte leva di attivazione del sistema economico italiano. Il potenziale positivo dei risultati dipenderà soprattutto dalla capacità del Paese di attivare una capacità produttiva nazionale, a fronte della importante domanda di investimenti, e dall'uso razionale delle risorse pubbliche per le politiche di incentivo.

Bibliografia

- Bazzocchi *et al.* 2021 F. Bazzocchi, M. Borgarello, R. Bernante, S. Maggiore, S. Moscarelli, A. Realini, C. Zagano, *Transizione energetica nel sistema produttivo italiano: impatto e governance*, RSE, Rapporto RdS n° 21008958, 2021.
- Commissione Europea 2018 Commissione Europea, *Direttiva UE 2018/2001 del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione)*, 11 dicembre 2018.
- Commissione Europea 2019 Commissione Europea, *Regolamento UE del 2019/631 del Parlamento Europeo e del Consiglio che definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO₂ delle autovetture nuove e dei veicoli commerciali leggeri nuovi e che abroga i regolamenti (CE) n. 443/2009 e (UE) n. 51*, 17 aprile 2019.
- Commissione Europea 2021 Commissione Europea, *Allegati della proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sull'efficienza energetica*, COM(2021) 558 final, disponibile al link: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a214c850-e574-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0020.02/DOC_2&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].
- Confindustria 2023 Confindustria, *Scenari e valutazioni di impatto economico degli obiettivi "Fit for 55" per l'Italia*, a cura di M. del Fanti e M. Beccarello, testo disponibile al link: <https://www.confindustria.it/home/notizie/Fit-for-55-PRENTAZIONE-DELLO-STUDIO-SCENARI-E-VALUTAZIONI-DI-IMPATTO-ECONOMICO-DEGLI-OBIETTIVI-FF55-PER-L-ITALIA> [consultato il 15 gennaio 2025].
- D.L. 199/2021 Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199, *Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*, GU n. 285 del 30 novembre 2021 – Suppl. Ordinario n. 42.

E3M 2021	E3M (European Commission), <i>Reference Scenario 2020</i> , 2021.
European Commission 2014	European Commission, <i>DAFI (Directive alternative fuel initiative) 2014/94/UE</i> , 2014.
European Commission 2019	European Commission, <i>Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions “The European Green Deal”</i> , COM/2019/640 final.
European Commission 2021a	European Commission, <i>Fit For 55: delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality</i> , COM/2021/550 final, 2021.
European Commission 2020b	European Commission, <i>Impact Assessment accompanying document of COM(2020) 562 final – Stepping up Europe’s 2030 climate ambition</i> , SWD(2020) 176 final, available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:749e04bb-f8c5-11ea-991b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2020a	European Commission, <i>Impact Assessment</i> , SWD(2020) 176 final, available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:749e04bb-f8c5-11ea-991b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2021b	European Commission, <i>Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for GHG allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the market stability reserve</i> , COM(2021) 551 final, 14 July 2021.
European Commission 2021c	European Commission, <i>Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999, and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources</i> , COM(2021) 557, 2021.
European Commission 2021d	European Commission, <i>Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on energy efficiency (recast)</i> , COM(2021) 558 final, available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a214c850-e574-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2021e	European Commission, <i>Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles</i> , COM(2021) 556 final, available at:

https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].

- European Commission 2021f European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission*, COM(2021) 555 final 2021/0200 (COD), available at: *EUR-Lex - 52021PC0555 - EN - EUR-Lex* [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Commission 2021g European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism*, COM(2021) 564 final, 14 July 2021.
- European Commission 2021h European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council*, COM/2021/559 final, 2021.
- European Commission 2021i European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport*, COM(2021) 561 final, available at: *EUR-Lex - 52021PC0562 - EN - EUR-Lex* [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Commission 2021j European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC*, «COM(2021) 562 final, available at: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Commission-Directorate-General for Energy and Transport 2008 European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, *European Energy and Transport: trends to 2030 update 2007*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities 2008.
- European Parliament-Council 2012 European Parliament and Council, *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN> [consultato il 15 gennaio 2025].

- European Parliament-
Council 2018 European Parliament and Council, *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2002&from=EN> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Gaeta *et al.* 2021 M. Gaeta, C. Nsangwe Businge, F. Odifreddi, L. Tagliabue, F. Lanati, A. Gelmini, *Studi a supporto della Governance del sistema energetico nazionale*, RSE, Rapporto RDS n° 21009850, 2021.
- Galasso-Infantino
2008 A. Galasso, G. Infantino, *Analisi input-output presupposti teorici e possibili applicazioni*, Note Tematiche n° 7, Ministero dell’Economia e delle Finanze, novembre 2008.
- Lanati-Gaeta 2019 F. Lanati, M. Gaeta, *Studi a supporto della Governance del sistema elettrico ed energetico nazionale*, RSE, Rapporto RDS n° 20000116, 2019.
- Leontief 1986 W. Leontief, *Input-Output economics*, New York, Oxford University 1986.
- Ministero dello
Sviluppo economico
2020 Ministero dello Sviluppo economico, *Strategia Nazionale Idrogeno, Linee Guida Preliminari*, 2020, disponibile al link: <https://www.mise.gov.it/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- MISE-MATTM-MIT MISE, MATTM, MIT, *Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima*, dicembre 2019, disponibile al link: <https://www.mise.gov.it> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Presidenza del
Consiglio 2021 Presidenza del Consiglio, *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*, 2021, disponibile al link: <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf> [consultato il 15 gennaio 2025].

Idrogeno: un combustibile verde e rinnovabile per la mobilità sostenibile

Alessandro Abbotto*

1. Introduzione

L'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'universo, del quale rappresenta tre quarti dell'intera materia. È l'elemento principale delle stelle e del pianeta più grande del Sistema Solare, Giove. Sulla Terra invece, se ci riferiamo alla superficie, è *solo* il quarto elemento più abbondante (come numero di atomi), dopo ossigeno, silicio e alluminio. L'elemento idrogeno non è presente nella sua forma molecolare se non in tracce (< 0,0001%) ma lo si trova sempre combinato in molecole, tra cui naturalmente l'acqua, l'ammoniaca e gli idrocarburi (tra i quali il componente principale del gas naturale, il metano CH₄), sostanze alle quali sono associati molto dei suoi utilizzi¹.

L'idrogeno è un “materiale” estremamente versatile. Può essere utilizzato come materia prima, come combustibile e come vettore e stoccaggio di energia. Le applicazioni sono anch'esse molteplici e vanno dall'industria chimica alle applicazioni emergenti, quali il trasporto o il *power-to-gas* (immagazzinamento di energia elettrica). Negli ultimi anni ha attirato l'attenzione del mondo scientifico, politico ed economico per quella che probabilmente rimane la sua principale caratteristica: a differenza dei combustibili tradizionali, l'idrogeno per combustione, ovvero per reazione di ossidazione con ossigeno, non genera CO₂, ma acqua. Se la reazione viene svolta in aria – ovvero in presenza di azoto – vengono prodotte anche piccole quantità di ossidi di azoto (NO_x).

Le emergenze ambientali hanno portato negli ultimi anni a importanti decisioni e programmi a livello internazionale, l'*Agenda 2030* dell'ONU

* Professore ordinario di Chimica organica presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca. E-mail: alessandro.abbotto@unimib.it.

¹ Abbotto 2021.

per lo sviluppo sostenibile del pianeta (2015) e l'accordo di Parigi (COP21, 2015) per limitare il riscaldamento globale a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. A fine 2019 la Commissione Europea, presieduta da Ursula von der Leyen, ha varato il *Green Deal*, il cui passaggio chiave è l'azzeramento delle emissioni nette di gas serra entro il 2050². Questi obiettivi sono stati più di recente ribaditi nel pacchetto *Fit For 55*, un insieme di proposte per rivedere e aggiornare la legislazione dell'UE e per mettere in atto nuove iniziative con l'obiettivo di garantire che le politiche dell'UE siano in linea con gli obiettivi climatici concordati dal Consiglio e dal Parlamento Europeo. In particolare, *Fit For 55* si riferisce all'obiettivo dell'UE di ridurre le emissioni nette di gas serra di *almeno* il 55% entro il 2030³.

Sulla scorta dei programmi europei, il governo italiano ha pubblicato, nel gennaio 2020, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), che verrà aggiornato nel corso dei prossimi mesi con i nuovi *target* europei al 2030, che prevedono il taglio del 55% delle emissioni di gas serra (rispetto ai livelli 1990), almeno il 32% di energia rinnovabile e almeno il 32,5% di incremento di efficienza energetica⁴.

Nell'ambito di questi piani è stato assegnato all'idrogeno un ruolo chiave, delineato nella "Strategia dell'Idrogeno" europea, varata l'8 luglio 2020⁵. Con questo piano l'UE mira a promuovere la produzione di idrogeno verde nei suoi molteplici utilizzi, al fine di contribuire alla riduzione delle emissioni climalteranti.

Il piano strategico europeo è solo uno dei tasselli sviluppati attorno all'idrogeno negli ultimi anni, che includono programmi di ricerca e sviluppo, *vision documents*, *roadmaps* e piani strategici nazionali. Nei prossimi anni sono attesi i piani strategici dell'idrogeno di molte altre nazioni, tra cui l'Italia, che nell'autunno 2020, a opera del Ministero dell'Università e della Ricerca e del Ministero dello Sviluppo economico, ha varato le linee guida preliminari⁶.

L'idrogeno rappresenta una delle priorità di investimento del "*Recovery Plan*" europeo per la ripresa post-Covid che, tra lo stanziamento "*Next Generation EU*" (807 miliardi di euro) e il bilancio a lungo termine, ammonta a oltre 2.000 miliardi di euro. In questo contesto la *hydrogen economy* contribuirà alla crescita economica e alla creazione di posti di lavoro.

² European Commission 2019.

³ European Council 2023.

⁴ Ministero dello Sviluppo economico 2020a.

⁵ European Commission 2020.

⁶ Ministero dello Sviluppo economico 2020b.

2. Utilizzo dell'idrogeno

Oggi la produzione globale di idrogeno è di oltre 70 milioni di tonnellate all'anno. La produzione di idrogeno ha subito negli ultimi anni una crescita impressionante, passando dai meno di 20 milioni di tonnellate del 1975 ai 70 milioni di oggi (*Fig.01*). I vari piani strategici internazionali prevedono per i prossimi anni una crescita annua del 2-3%, raggiungendo la quota 100 milioni tra soli 10-15 anni.

I principali usi attuali dell'idrogeno sono due: raffinazione del petrolio e sintesi dell'ammoniaca. Altri utilizzi non trascurabili comprendono la sintesi del metanolo, intermedio per l'industria chimica. In particolare, oggi, attraverso il processo Haber-Bosch, vengono prodotte oltre 200 milioni di tonnellate di ammoniaca, utilizzata tal quale o in derivati azotati come fertilizzanti sintetici. Il processo Haber-Bosch utilizza idrogeno e azoto ad alte temperature e pressioni, consumando da solo quasi il 2% dell'energia globale ed emettendo circa 1,5% di tutte le emissioni di gas serra. È quindi evidente come la produzione sostenibile di ammoniaca sia al centro dei piani strategici internazionali.

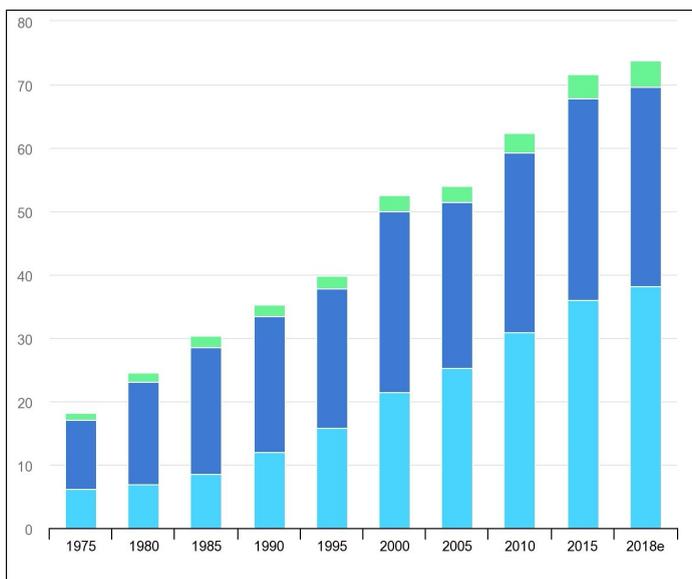


Fig.01. Domanda mondiale di idrogeno dal 1975 al 2018 in milioni di tonnellate (azzurro: per la raffinazione del petrolio; blu: per la sintesi dell'ammoniaca; verde: altro). Fonte: IEA, The Future of Hydrogen, 2019, available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> [consultato il 15 gennaio 2025]. © IEA. Licenze: CC BY 4.0.

3. Utilizzi emergenti: la mobilità sostenibile

Ma sono gli utilizzi emergenti che oggi attirano l'interesse del mondo politico, economico e industriale e dell'opinione pubblica, grazie alla proprietà di reagire in modo pulito via combustione o per via elettrochimica.

Nel secondo caso, il più interessante, l'idrogeno reagisce con ossigeno in un dispositivo elettrochimico – la “cella a combustibile” – producendo energia elettrica, calore e, come unico sottoprodotto, acqua. Gli utilizzi emergenti comprendono l'uso come combustibile, come vettore di energia e come accumulatore di energia (*power-to-gas*). I settori coinvolti sono molteplici e variegati, dai trasporti all'industria pesante e all'ambito residenziale.

Il campo dei trasporti è quello che richiama il maggior interesse non solo degli enti governativi ma anche dei cittadini e dei *mass media*⁷. L'idrogeno è infatti un combustibile totalmente *carbon-free*. Va tuttavia subito chiaramente sottolineato che l'idrogeno è da considerarsi sostenibile o meno a seconda di come viene prodotto. L'utilizzo come combustibile richiede alcune considerazioni a livello di densità energetica (o volumetrica, Wh/L) ed energia specifica (o ponderale, Wh/kg) (*Fig.02*).

L'idrogeno ha un'elevata densità energetica ponderale, essendo una molecola estremamente leggera, ma una bassissima densità energetica volumetrica, essendo un gas (meno molecole per unità di volume rispetto a un liquido). Detto in altri termini, a parità di energia conservata l'idrogeno pesa molto meno ma occupa volumi molto più grandi di altri vettori energetici. Per fare un confronto con il petrolio e i suoi derivati in fase liquida, l'idrogeno pesa circa un terzo ma occupa un volume oltre 3500 volte maggiore (a pressione atmosferica). Anche rispetto al gas naturale l'idrogeno a pressione atmosferica ha una densità di energia volumetrica inferiore a un terzo (rapporto = 0,28).

È pertanto di fatto impossibile usare l'idrogeno in forma gassosa come combustibile in condizioni standard. Per dare l'idea, considerando che 1 kg di idrogeno consente circa 100 km di autonomia di un'automobile, nel volume a disposizione in una vettura sarebbe possibile stivare idrogeno gassoso per poco più di 1 km di autonomia, a pressione atmosferica. Oggi i principali utilizzi nel campo del trasporto prevedono l'uso di idrogeno compresso a elevate pressioni, circa 700 atm per il trasporto leggero e circa 350 atm per il trasporto pesante. A 700 atm l'idrogeno occupa, a parità di energia, *solo* 7,6 volte il volume di un derivato del petrolio come la benzina.

⁷ Abbotto 2022, 2024.

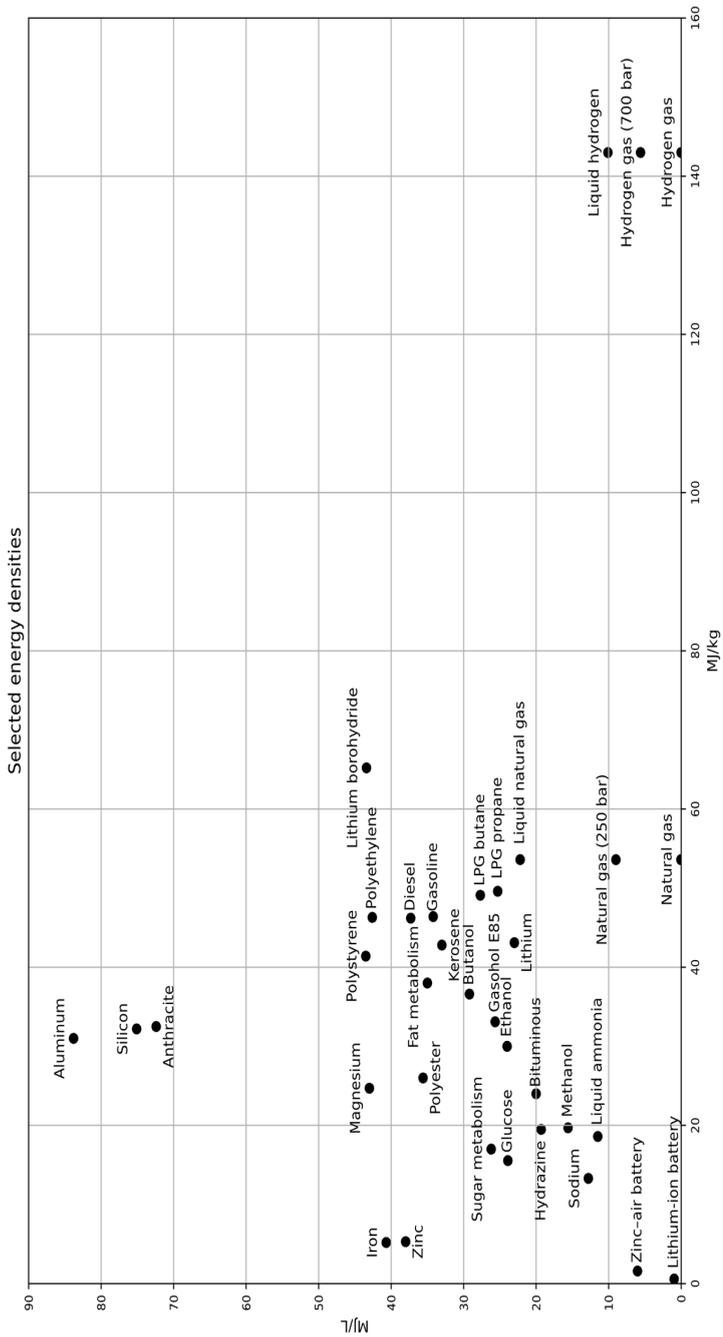


Fig.02. Valori di densità energetica (o volumetrica, MJ/L) ed energia specifica (o ponderale, MJ/kg) di specie chimiche e dispositivi a base chimica impiegati nel settore energetico. Fonte: D. Scott, Energy density, Lithium-ion battery, tratta da: Wikipedia (Public Domain).

Ancora meglio se si ricorre all'idrogeno in forma liquida, che occupa approssimativamente la metà del volume dell'idrogeno a 700 atm. In questo caso la densità energetica volumetrica dell'idrogeno scende a circa un quarto rispetto a quella del petrolio. L'idrogeno, tuttavia, diventa liquido a temperatura estremamente basse, -253 °C, particolarmente dispendiose dal punto di vista energetico da raggiungere e, soprattutto, mantenere.

Pur in presenza di varie eccezioni anche significative (ad esempio le flotte di veicoli commerciali e taxi, come Copenaghen e Parigi, che adesso conta oltre 500 vetture, previste diventare diecimila per le Olimpiadi del 2024) l'uso dell'idrogeno per l'autotrasporto leggero non è competitivo con la modalità elettrica a batteria. La Fig.03 mostra l'efficienza energetica *Tank-to-Wheels* (letteralmente, dal serbatoio alle ruote, ovvero la percentuale di energia trasferita al movimento dopo che è arrivata nella vettura), che sottolinea il primato della tecnologia a batteria. Tuttavia, la tecnologia a idrogeno rimane comunque più efficiente di quella a base di combustibili fossili, per non parlare del fatto che si tratta di una tecnologia pulita. Inoltre, consente già oggi autonomie superiori a 600 km e tempi di rifornimento inferiori a cinque minuti.

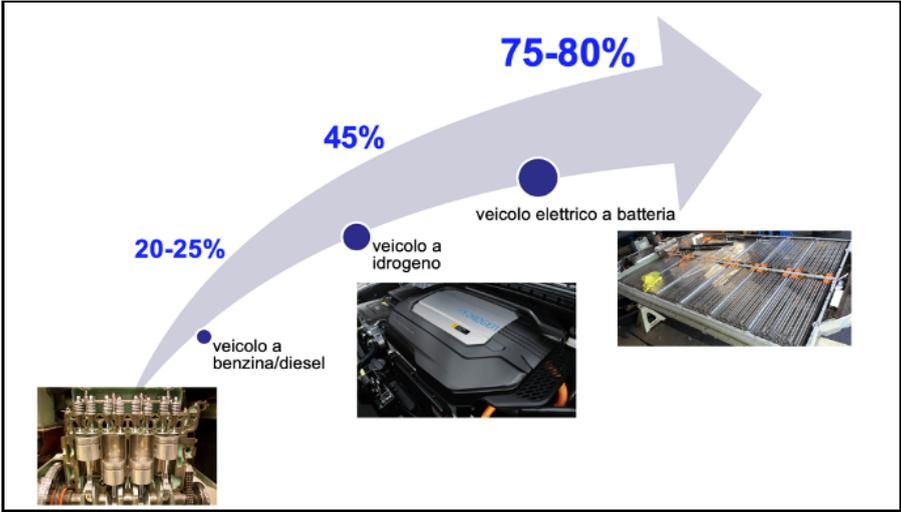


Fig.03. Efficienza energetica Tank-to-Wheels di tre diverse tecnologie disponibili per il trasporto leggero su strada.

È comunque in altri settori dove l'idrogeno può diventare il combustibile sostenibile di riferimento, come nel trasporto pesante su strada, su rotaia, marittimo e aereo, ovvero in tutti quei comparti dove la tecnologia elettrica a batteria non risulta percorribile e dove le esigenze legate all'idrogeno – ad esempio grandi volumi – non rappresentano un impedimento.

L'ambito dei treni è uno dei più interessanti. La Commissione Europea riporta che oggi il 46% delle ferrovie non è elettrificato. Queste linee sono percorse oggi da treni *diesel*, spesso con parecchi anni di anzianità e pertanto molto inquinanti.

Nell'autunno del 2018 è entrato in servizio in Germania, nella Bassa Sassonia, il primo treno a idrogeno al mondo, della francese Alstom, con un'autonomia di 1000 km (Fig.04). Nel 2022 è terminato il periodo sperimentale e i treni a idrogeno sono adesso parte a tutti gli effetti del sistema ferroviario tedesco.

Nel corso del biennio 2020-2021 i treni a idrogeno sono stati introdotti anche in Austria, Polonia, Svezia e Francia. In Italia le prime vetture entreranno in servizio nel primo semestre del 2024 nella tratta Brescia-Edolo, in Lombardia, nell'ambito delle nuove infrastrutture previste per le Olimpiadi Milano-Cortina 2026.



Fig.04. Il primo treno a idrogeno al mondo (Germania, 2018). Fonte: Alstom. Creative Commons CC 1.0 Universal Public Domain Dedication.

Anche nel campo del trasporto pesante su strada l'idrogeno sta già presentando soluzioni mature. La Hyundai è partita a fine 2020 con le consegne in Svizzera dei primi TIR a idrogeno prodotti in serie ed entro il 2030 prevede di produrre alcune decine di migliaia di veicoli. La strategia dell'idrogeno coinvolge anche gli autobus, con molte città e Paesi europei fortemente coinvolti. In Italia, nell'estate del 2021, Bolzano ha inaugurato la propria flotta di bus a idrogeno per il trasporto pubblico.

I programmi della Commissione Europea assegnano all'idrogeno un ruolo anche nel processo di decarbonizzazione del settore aereo e marittimo, inizialmente attraverso la produzione di combustibili sintetici (già adatti agli attuali motori) e poi, a lungo termine, tramite l'accoppiamento di motori elettrici e celle a combustibile. Questo approccio richiede una completa riprogettazione dei motori e dei mezzi di trasporto. Il principale produttore al mondo, Airbus, ha in programma la prima flotta di aerei a idrogeno per il medio-lungo raggio per il 2035 (progetto ZEROe). Una *start-up* anglo-americana, ZeroAvia, ha già effettuato i primi test di volo con i suoi aerei elettrici a idrogeno e celle a combustibile e conta di effettuare il primo volo commerciale a corto raggio entro il 2025 e a lungo raggio entro il 2030.

La compagnia aerea EasyJet ha annunciato nel corso del 2022 che l'idrogeno rappresenta la tecnologia più promettente per raggiungere la decarbonizzazione del trasporto aereo. ENI, sempre nello stesso anno, ha annunciato un progetto di mobilità a idrogeno, incluso il trasporto aereo, in *partnership* con Air Liquide, per potenziare nel suo complesso la filiera dell'idrogeno in Italia.

Anche in campo marittimo gli esempi non mancano e alcuni di questi sono già operativi. Lungo i fiordi meridionali della Norvegia nel 2021 è entrato in servizio il primo traghetto a idrogeno e successivamente il mercato si estenderà anche ad altri ambiti, tra cui quello delle navi da crociera.

4. Metodi di produzione dell'idrogeno: i colori dell'idrogeno

L'idrogeno che viene utilizzato per produrre energia è nella sua forma molecolare, H_2 , che è praticamente assente come tale nella Terra. L'idrogeno molecolare deve quindi essere prodotto a partire dalle molecole che lo contengono, come metano (CH_4) e acqua (H_2O). L'idrogeno è un gas incolore ma spesso ci si riferisce a esso con un colore che è associato al suo metodo di produzione. Questo approccio, sostenibile o meno, diventa di fondamentale importanza per definire l'impatto ambientale nell'intero ciclo di produzione e utilizzo dell'idrogeno.

Esistono sostanzialmente due approcci per produrre idrogeno: da fonti fossili e da acqua via elettrolisi (Fig.05).

Oltre il 96% dell'idrogeno è prodotto oggi direttamente da fonti fossili, principalmente gas naturale (metano). A questo metodo è associato il colore *grigio*. Si tratta infatti di un metodo a forti emissioni di gas serra. La quantità di CO₂ che viene prodotta è, in peso, circa 10 volte la quantità d'idrogeno. Se si parte da carbone la quantità di gas serra prodotta per chilogrammo di idrogeno diventa addirittura quasi il doppio. Pertanto, tenendo conto dell'attuale produzione mondiale annuale, questo processo immette nell'ambiente quasi un miliardo di tonnellate di CO₂ all'anno, una quantità enorme se si pensa che un Paese come l'Italia produce complessivamente una quantità di circa 300 milioni di tonnellate. Si noti che anche la produzione da elettrolisi è in gran parte non pulita, dipendendo dal mix energetico nella generazione di energia elettrica. Questo fa sì che, direttamente o indirettamente, l'idrogeno grigio in realtà arriva a oltre il 98% della produzione attuale.

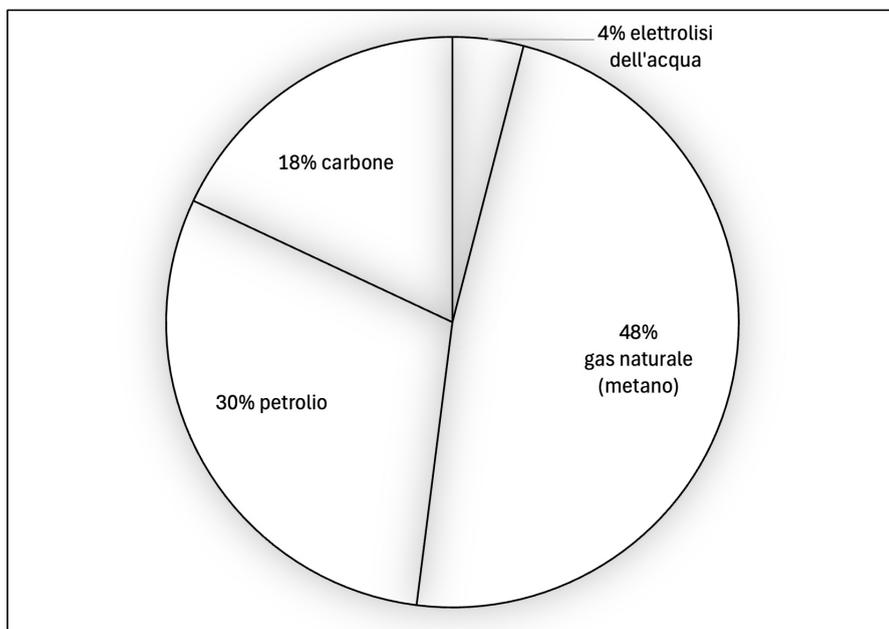


Fig.05. Fonti di produzione idrogeno: 96% fonti fossili, 4% elettrolisi dell'acqua. Fonte dati: IEA.

I piani strategici internazionali prima descritti prevedono la graduale sostituzione con altre tipologie di produzione. Nel breve-medio termine si punta all'*idrogeno blu*, il quale si differenzia da quello grigio per il fatto che la CO₂ prodotta viene catturata. È il metodo al quale stanno puntando per i prossimi anni molte imprese del comparto energetico ma, pur avendo una certa giustificazione nel transitorio perché limita l'emissione di gas a effetto serra, non rappresenta una soluzione ottimale in quanto la cattura della CO₂ è un processo complesso e non sempre efficiente. Inoltre, ancora più importante, continua a tenere intrecciata la tecnologia dell'idrogeno alle fonti fossili, con tutto ciò che questo implica in termini di disponibilità, fluttuazioni di prezzo, tensioni internazionali, dipendenza dai Paesi produttori. Il terzo colore, l'*idrogeno verde*, è associato all'elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili. Dei metodi descritti è quindi l'unico a basso impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita. I principali problemi legati alla produzione dell'idrogeno verde sono il costo, attualmente almeno 2-3 volte superiore a quello dell'idrogeno blu o grigio, e la disponibilità di energia elettrica rinnovabile per assicurare l'intera produzione.

Per quanto riguarda il primo punto, Snam, la società attiva nel trasporto, stoccaggio e rigassificazione del metano in Italia, prevede che entro il 2030 il costo dell'idrogeno verde possa eguagliare quello dell'idrogeno grigio, grazie alla diminuzione del costo dell'elettricità da fonti rinnovabili e all'aumento del costo delle fonti fossili⁸. La recente crisi energetica, e in particolare del gas naturale, e il rilancio delle fonti rinnovabili dovrebbe catalizzare questo processo. Al momento nella maggior parte delle borse europee viene utilizzato, per fissare il costo dell'elettricità, il sistema del prezzo marginale, che incrocia la domanda e l'offerta dai vari produttori.

Questo sistema fissa il costo sulla base dell'offerta più costosa, che in questo momento è quella corrispondente al gas naturale, indipendentemente dal mix energetico utilizzato complessivamente per produrre l'energia elettrica. Il risultato è che, con questo sistema, il costo dell'elettricità ha seguito fedelmente l'andamento del gas naturale, portando a forti aumenti anche nel caso di energia prodotta, ad esempio, da fotovoltaico ed eolico. Nei Paesi dove non vige questo sistema già ora il costo dell'idrogeno verde è diventato competitivo con quello dell'idrogeno grigio. Se anche in Europa verrà disaccoppiato il costo dell'energia elettrica da quello del gas naturale è prevedibile che la competitività dell'idrogeno verde ne risulti fortemente avvantaggiata.

⁸ Snam 2019.

Per quanto riguarda invece la disponibilità di elettricità da fonti rinnovabili è possibile effettuare alcune stime. Tenendo conto che il contenuto energetico di 1 kg di idrogeno LHV (*Lower Heating Value*) è di 33,3 kWh e ipotizzando un'efficienza media di conversione energetica degli elettrolizzatori alcalini del 65% (in realtà le nuove generazioni a membrana a scambio protonico, PEM, e a ossidi solidi, SOEC, consentono di raggiungere e superare l'80% di efficienza), si ricava che per produrre 1 kg di idrogeno è necessario utilizzare circa 50 kWh di energia elettrica. Pertanto, si stima che già da subito sarebbe possibile convertire in idrogeno verde il 10% della produzione mondiale con un fabbisogno di 350 TWh, corrispondente a meno del 5% della quantità di energia elettrica da fonti rinnovabili prodotta nel mondo nel 2020 (7500 TWh) e coincidente, per intenderci, con l'incremento di energia rinnovabile registrato nel corso del 2020 rispetto all'anno precedente. Un traguardo, quindi, a portata di mano. Anche per l'Italia si prevede che per convertire il 10% di produzione nazionale (480.000 t/anno) all'idrogeno verde sono sufficienti 2,5 TWh/anno, corrispondenti a solo il 2% dell'attuale produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Inoltre, è possibile sfruttare la sovrapproduzione di energia da fonti rinnovabili, ovvero l'energia prodotta in eccesso dovuta alle fluttuazioni orarie, giornaliere e stagionali delle fonti rinnovabili che, nei momenti di flessione della domanda, andrebbe persa. Solo in Italia Terna prevede, grazie al crescente ruolo di fotovoltaico ed eolico, un *surplus* al 2030 di 5 TWh, equivalente a un mese di produzione⁹. Questa quantità sarebbe da sola sufficiente per coprire il 20% dell'attuale produzione nazionale di idrogeno.

Naturalmente il discorso cambia se si vuole convertire in verde il 100% della produzione di idrogeno, a maggior ragione se si considera il previsto aumento della produzione legata agli utilizzi emergenti. In un recente commento su «Nature Italy», Armaroli e Barbieri hanno stimato che al 2030 la produzione nazionale di idrogeno, per rispondere alle esigenze dell'industria *Hard to Abate* (ad esempio il polo industriale di Taranto) e alle richieste energetiche legate al trasporto e al riscaldamento, passerà da circa 500 kt/anno a 1630 kt/anno¹⁰. In tal caso per produrre il 100% di idrogeno verde sarà necessario utilizzare 85 TWh/anno, corrispondente al 30% dell'attuale produzione complessiva di energia elettrica in Italia. Per ottenere questa quantità aggiuntiva di elettricità verde sarebbe necessario installare 75 GW di potenza fotovoltaica, un obiettivo arduo se si pensa che com-

⁹ Terna 2019.

¹⁰ Armaroli-Barbieri 2021.

pletivamente in Italia fino a oggi sono stati installati solo 20 GW. Se da una parte è vero che le previsioni di potenza fotovoltaica installata sono sempre state largamente sottostimate, anche da organismi prestigiosi come la International Energy Agency¹¹, non vi è dubbio che per raggiungere questi *target* è necessaria una forte accelerazione delle nuove installazioni fotovoltaiche ed eoliche in Italia nei prossimi anni. Certamente, almeno fino al 2030, la produzione di idrogeno verde sarà limitata anche se, come abbiamo visto, obiettivi del 10% sono raggiungibili senza particolari difficoltà. La strategia europea dell'idrogeno mira a produrre nella UE un milione di tonnellate entro il 2024 e 10 milioni di tonnellate entro il 2030 di idrogeno verde.

Infine, esiste un altro metodo, probabilmente il più elegante e sostenibile di tutti dal punto di vista scientifico e tecnico: la fotosintesi artificiale. In questo caso l'idrogeno viene prodotto *direttamente* da acqua e sole, senza il passaggio intermedio della generazione di energia elettrica, utilizzando dispositivi fotocatalitici o fotoelettrochimici e opportuni materiali (antenne fotoattive e catalizzatori). Il concetto di base è semplice. Opportune antenne molecolari (che possiamo definire, in analogia al processo naturale, "clorofille artificiali") catturano efficacemente la luce solare e innescano dei processi di trasferimento di elettroni che portano, con la mediazione di opportuni catalizzatori di reazione (ossidazione e riduzione dell'acqua), alla scissione dell'acqua nelle sue componenti, generando idrogeno e ossigeno.

Pur rappresentando un processo estremamente ambizioso, diversi gruppi di ricerca in tutto il mondo stanno concentrando gli sforzi per sviluppare sempre più efficienti "foglie artificiali". Il termine temporale è nel lungo periodo, con l'obiettivo di arrivare per la scadenza del 2050 a rendere disponibili sistemi locali di produzione in piccola scala.

5. Conclusioni

Come abbiamo visto l'idrogeno rappresenta una risorsa estremamente versatile. Funge da materia prima (sintesi dell'ammoniaca), da combustibile (in celle a combustibile per la produzione di energia elettrica e calore) e da vettore e stoccaggio di energia elettrica (ad esempio per bilanciare offerta e domanda di elettricità da fonti rinnovabili). I settori di applicazione sono molteplici e di primaria importanza, dall'industria pesante fortemente energivora ai trasporti.

Tutti i principali organismi internazionali e nazionali hanno inserito negli ultimi mesi l'idrogeno al centro delle strategie legate alle energie sostenibili.

¹¹ IEA 2000, 2010.

L'occasione per la crescita sostenibile dell'Europa è eccezionale, grazie ai fortissimi investimenti introdotti da *Next Generation EU* e, in Italia, dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Ma è anche un'occasione unica, probabilmente irripetibile. Sfruttarla nel modo corretto è quindi quanto mai indispensabile. Una società sempre più elettrificata, con un ruolo crescente delle fonti rinnovabili, rimane la strada maestra. Ma dobbiamo tenere conto che oggi la domanda energetica si affida ai combustibili per tre quarti del suo fabbisogno. Quindi, almeno per i prossimi decenni e certamente per alcuni settori (ad esempio il trasporto marittimo e aereo), dovremo ancora ricorrere ai combustibili per produrre energia. Qui entra in gioco l'idrogeno, un combustibile sostenibile e rinnovabile, nella misura in cui viene prodotto da acqua ed energia pulita (idrogeno verde). A questo riguardo diventa quanto mai essenziale mettere a punto le strategie più attente, sia per quanto riguarda le politiche relative all'idrogeno blu – una soluzione che non può che essere considerata solo transitoria – sia per quanto riguarda la ricerca e sviluppo di nuovi sistemi efficienti di generazione di idrogeno verde (nuove generazioni di elettrolizzatori e di sistemi di fotosintesi artificiale), accompagnata da un deciso e rapido sviluppo delle fonti energetiche pulite, in particolare fotovoltaico ed eolico.

Bibliografia

- Abbotto 2021 A. Abbotto, *Idrogeno. Tutti i colori dell'energia*, Bari, Edizioni Dedalo 2021.
- Abbotto 2022 A. Abbotto, *La mobilità elettrica. Storia, tecnologia, futuro*, Roma, Carocci 2022.
- Abbotto 2024 A. Abbotto, *Perché l'auto elettrica?*, Scienza Express 2024.
- Armaroli-Barbieri 2021 N. Armaroli, A. Barbieri, *The hydrogen dilemma in Italy's energy transition*, Nature Italy, *Comment*, 2021.
- European Commission 2019 European Commission, *A European Green Deal*, 2019, available at: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Commission 2020 European Commission, *Hydrogen Strategy*, 2020, available at: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en#eu-hydrogen-strategy [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Council 2022 European Council, *Fit For 55*, 2022, available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [consultato il 15 gennaio 2025].

IEA 2000, 2010	IEA, <i>World Energy Outlook</i> , previsioni al 2020 contenute nei report 2000 e 2010.
Ministero dello Sviluppo economico 2020a	Ministero dello Sviluppo economico, <i>Piano Energia e Clima (PNIEC)</i> , 2020, disponibile al link: https://www.mise.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/pniec2030 [consultato il 15 gennaio 2025].
Ministero dello Sviluppo economico 2020b	Ministero dello Sviluppo economico, <i>Strategia Nazionale Idrogeno. Linee Guida Preliminari</i> , 2020.
Snam 2019	Snam, <i>The hydrogen challenge: the potential of hydrogen in Italy</i> , 2019.
Terna 2019	Terna, <i>Contesto ed evoluzione del sistema elettrico</i> , 2019.

Rifiuti e materiali secondari nel paradigma industriale dell'economia circolare

Roberto Zoboli*

1. Introduzione

I concetti e le visioni di economia circolare (*Circular Economy*, CE) sono entrati con forza nel dibattito tecnico-scientifico e nelle politiche ambientali come capaci di generare un nuovo paradigma industriale. La loro fortuna è dovuta a diversi fattori.

Innanzitutto, il *policy making* europeo è alla continua ricerca di contenitori attrattivi e ispirativi con cui veicolare le politiche ambientali. L'ampio lavoro condotto da diversi studiosi e organismi, come la Ellen MacArthur Foundation¹, gli ha offerto tale opportunità accreditando la CE come un grande beneficio industriale su vasta scala. Perciò, anche se è discutibile che la CE generi forte crescita macroeconomica netta, essendo largamente un'economia di sostituzione e risparmio², la CE è divenuta il *framework* concettuale per riconfigurare le politiche europee dei rifiuti, che diventano questione industriale, o vengono più chiaramente riconosciuti come tali. Allo stesso tempo, la CE è entrata tra le categorie dell'innovazione industriale, sia quella effettiva sia quella comunicata, prospettando percorsi e modelli di *business* che uniscono innovazione di processo per l'efficienza e innovazioni di prodotto per nuovi mercati³.

* Professore ordinario di Politica economica, presso l'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, Ricercatore associato SEEDS – *Sustainability Environmental Economics and Dynamics Studies*, e IRCrES – Istituto di Ricerca sulla Crescita Economica Sostenibile, CNR. E-mail: roberto.zoboli@unicatt.it.

¹ Si vedano i diversi documenti, rapporti e analisi disponibili al sito web: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/> [consultato il 15 gennaio 2025].

² Zoboli 2018.

³ Si veda, tra i numerosi, il caso Renault come esempio di adozione delle CE come paradigma di innovazione industriale, al link: <https://www.renaultgroup.com/en/our-commitments/environment-circular-economy/> [consultato il 15 gennaio 2025].

Questo processo di riconoscimento della CE come paradigma innovativo l'ha portata a essere, attraverso il *Circular Economy Action Plan*⁴ dello *European Green Deal* (EGD), che rappresenta il più strutturato e ampio progetto di transizione alla sostenibilità introdotto nel mondo⁵.

Questo positivo allargamento di prospettiva, che porta da una “vecchia economia circolare”, legata alla gestione dei rifiuti, a una “nuova economia circolare”, intensiva di innovazioni industriali, organizzative e sociali, rischia d'altro canto di essere fin troppo ampia, tanto che l'inclusione di certi processi, innovazioni, prodotti, *business model* nello spazio dell'economia circolare risulta discutibile, e fa parte di una bolla comunicativa sull'ambiente e la sostenibilità che appare ormai caotica e fuori controllo.

In questo saggio, si cercherà quindi di mantenere un approccio sobrio alla CE, anche utilizzando esperienze di ricerca sull'economia dei rifiuti e del riciclo svolte per organismi di supporto alle politiche europee⁶.

Verrà dapprima fornita una minima e selettiva concettualizzazione della CE come emergente dalla letteratura (paragrafo 2). Si guarderà poi al fatto che sono in campo strategie di risparmio ed efficienza d'uso dei materiali industriali (ad esempio minerali e metalli) che non sembrerebbe profittevoli, perché questi materiali, date le loro alte riserve globali e i loro bassi prezzi internazionali in termini reali, non sono scarsi (paragrafo 3). La ragione di questo apparente paradosso verrà indicata nella nascita e nel continuo sviluppo di politiche pubbliche per i rifiuti che, a partire dagli anni '70 in Europa, hanno imposto già da tempo un paradigma di tipo circolare attraverso un imponente flusso di legislazioni e politiche, fino alle strategie di CE del 2015 e del 2020. La dominanza delle politiche come *driver* di CE ha però comportato anche alcuni fallimenti delle politiche stesse, sia da un punto di vista economico-industriale che ambientale, specie quando le politiche hanno mancato di assumere un'impostazione in termini di catene di valore e hanno invece riguardato solo fasi specifiche, in particolare la raccolta dei rifiuti. Esempi di questi fallimenti sono i rifiuti plastici, alcuni materiali secondari, l'uso energetico dei materiali biologici (paragrafo 4).

Siamo ora di fronte a nuovi scenari per la CE, quelli aperti dalla virata dell'Unione Europea verso la cosiddetta “autonomia strategica aperta”, che, per fare fronte alle crisi e ai rischi internazionali di questa fase storica, per-

⁴ European Commission 2020.

⁵ European Commission 2019a. Per un'ampia analisi dello *European Green Deal* come macro-strategia di sostenibilità si veda Barbieri *et al.* 2021.

⁶ In particolare, il lavoro svolto nell'ambito dei *Topic Centre* della EEA (*European Environment Agency*), attualmente lo *European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use – ETC CE*, 2022-2026, al link: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/consortium> [consultato il 15 gennaio 2025].

segue il supporto ai settori industriali per la neutralità climatica (*Net Zero*) e persegue inoltre strategie per la sicurezza di approvvigionamento dei necessari “materiali critici” (paragrafo 5). Infine, osserveremo come l’Italia sia un Paese di avanzata *performance* circolare, sia per ragioni storiche sia per la sua specializzazione produttiva, ma il percorso italiano di CE come paradigma industriale combina grande vivacità innovativa e perduranti barriere (paragrafo 6).

2. Una concettualizzazione minima della CE

A partire dallo scorso decennio, la CE ha stimolato un gran numero di lavori accademici, spesso all’incrocio tra diverse prospettive disciplinari. Invece di convergere verso un consenso concettuale, questi lavori hanno condotto a un grande pluralismo di definizioni e interpretazioni. Ciò contrasta con la apparente semplicità dell’idea di circolarità dei materiali nei processi di produzione, consumo e post consumo (rifiuti), idea su cui esistevano lavori fondamentali già negli anni ’60 (ad esempio Kneese *et al.* 1970).

Nella letteratura non c’è convergenza circa gli scopi delle CE, che vanno dai miglioramenti ambientali, alla sicurezza di approvvigionamento di materiali, all’occupazione e all’efficienza di risorse. In molti lavori, non emerge una specifica relazione tra CE e sostenibilità, oppure la relazione non è resa esplicita⁷. Spesso le definizioni sono vaghe e imprecise⁸ e non vengono collegate a quelle precedenti. Inoltre, la stessa chiusura dei cicli dei materiali e dell’energia viene spesso trascurata nelle definizioni presentate in letteratura⁹, mentre altri contributi pongono i flussi di materiali al centro¹⁰.

Similmente, la relazione tra CE e principi della termodinamica è spesso trascurata, con poche eccezioni¹¹. I limiti dei lavori accademici, anche in relazione all’economia ecologica e i principi della termodinamica, sono esaminati in Zotti-Bigano 2019.

Un diverso approccio di definizione e concettualizzazione emerge dal lavoro di organismi, *think tank* e istituzioni. La definizione di Ellen MacArthur Foundation (EMF) vede la CE come:

⁷ Kirchherr *et al.* 2017; Geissdoerfer *et al.* 2017.

⁸ Haas *et al.* 2015.

⁹ Kirchherr *et al.* 2017.

¹⁰ Bocken *et al.* 2016; Geissdoerfer *et al.* 2017.

¹¹ Fischer-Kowalski *et al.* 2011; Allwood 2014; Rammelt-Crisp 2014; Ghisellini *et al.* 2016; Winans *et al.* 2017.

an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the ‘end-of-life’ concept with restoration, shifts towards the use of renewable energy, eliminates the use of toxic chemicals, which impair reuse, and aims for the elimination of waste through the superior design of materials, products, systems, and, within this, business models¹².

Più in generale, EMF si riferisce a una combinazione di idee e proposte generate spesso da pensatori ispirativi anche estranei al *mainstream* scientifico, come *Cradle to Cradle*, *Performance Economy*, *Biomimicry*, *Industrial Ecology*, *Natural Capitalism*, *Blue economy*, *Regenerative design*¹³.

Gli elementi essenziali di tale impostazione sono: (i) il ruolo centrale dei “*Circular Business Models*” (CBM) generati o adottati dalle imprese e dai sottosistemi di cui fanno parte; i protagonisti dei CBM sono imprese innovative che dalla circolarità possono trarre vantaggi microeconomici interni (risparmio di costi) oppure vantaggi di creazione di *lead market* per i loro prodotti (ad esempio in settori *bio-based*, come chimica verde e modelli integrati di bioraffineria), capaci di generare alto valore aggiunto da innovazioni applicate a *feedstock* molto poveri (rifiuti, residui); (ii) i benefici economici del paradigma circolare a livello macroeconomico, con alta creazione di valore aggiunto e occupazione netta.

Mentre è disponibile evidenza sul primo livello di benefici, quello microeconomico, l’evidenza sul secondo livello è dibattuta e debole perché la CE è, in molti casi, “economia di sostituzione”, dove imprese e catene di valore di tipo CE guadagnano a scapito di quelle tradizionali, che perdono, con un effetto netto che può essere neutrale o solo parzialmente positivo a livello di sistema economico. Le stime dei modelli macroeconomici, seppure con limiti metodologici e informativi, vanno verso tale conclusione¹⁴.

Una più interessante visione della CE è quella elaborata da Bocken *et al.* 2016 e adottata da OECD 2017, che colloca la CE in una più ampia visione di efficienza d’uso delle risorse. La CE può essere vista a livelli concentrici ciascuno con un diverso grado di ampiezza e diverse implicazioni economiche (*Fig.01*). Il primo livello più interno, denominato “*Closing resource loops*” corrisponde alla più convenzionale dimensione delle CE, quella di riciclo e recupero di materiali (ed energia), di aumento del riuso e della rim manifattura dei prodotti (ad esempio parti di ricambio auto). Include anche

¹² EMF 2012, p. 7.

¹³ Si veda il link: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought> [consultato il 15 gennaio 2025].

¹⁴ OECD 2017.

la componente preventiva attraverso il “*design for recycling*”. La natura di questo livello come “*economia di sostituzione*” appare chiara se si osservano gli effetti attesi (box di destra in Fig.01), vale a dire una diminuzione di domanda di materiali vergini e di prodotti finali a favore dei materiali riciclati e dei prodotti in riuso.

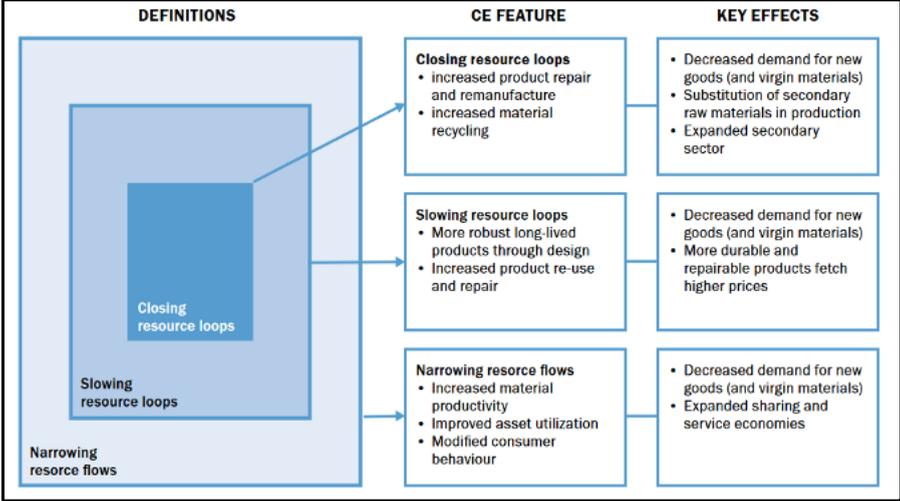


Fig.01. Una visione della Circular Economy (CE). Fonte: OECD 2017. © OECD (2018).

Un secondo più ampio livello di circolarità, definito “*Slowing resource loops*”, aggiunge la dimensione della durata di vita dei prodotti. La CE è infatti attesa contrastare l’obsolescenza accelerata, o programmata, determinata da strategie di segmentazione di mercato, o dalla rapida innovazione di prodotto, o dai comportamenti che portano allo scarto di beni tecnicamente funzionanti. Gli esempi abbondano per i beni di consumo dell’elettronica. L’allungamento della vita dei prodotti contribuisce a ridurre sia i rifiuti sia l’estrazione di risorse per la produzione di beni sottoutilizzati. L’implicazione economica è riduzione di attività ma con risparmi di risorse e costi che possono essere destinati ad altri settori di produzione e consumo, o risparmiati per alimentare investimenti. Questo livello può sconfinare nella “*sharing economy*” in quanto prefigura un uso più intensivo di beni, come abitazioni e auto, tipicamente sottoutilizzati nel modello normale di consumo, ma la sha-

ring economy ha una sua autonomia quando se ne considerino gli aspetti, e i possibili effetti, già osservati, di congestione e di “*rebound*”¹⁵.

Il terzo e più generale livello (“*Narrowing resource flow*”), oltre a comprendere gli altri, sfocia nei più generali processi di efficienza d’uso delle risorse associati all’innovazione industriale, in particolare quella verso la dematerializzazione, e alla riduzione delle risorse incorporate nella fornitura di servizi. È questo guadagno di efficienza che, portato alla scala di sistema economico, può favorire crescita economica netta poiché libera risorse che diventano disponibili per aumenti dell’attività economica.

Positivo da un punto di vista economico, questo meccanismo di “rilancio” della crescita dovuto all’efficienza (“*rebound effect*”, o “effetto Jevons”) è spesso criticato dal punto di vista dei suoi effetti ambientali da una vasta letteratura che non verrà qui esaminata (ma si veda ad esempio, in connessione alla CE, Metic-Pigosso 2022).

3. Cosa guida l’economia circolare? Deboli spinte dai mercati delle materie prime

L’evidenza storica e di ricerca mostra che alti prezzi delle materie prime industriali e dell’energia stimolano innovazioni rivolte all’efficienza nel loro uso e alla sostituzione con fonti meno costose¹⁶. Nell’esperienza degli ultimi cinquant’anni, il principale stimolo di estesi processi di decarbonizzazione e risparmio di materiali è stata l’impennata dei prezzi dell’energia e delle materie prime degli anni ’70.

Quella fase di prezzi alti, e ritenuti stabilmente tali, ha avviato dinamiche innovative che sono all’origine dell’attuale paradigma tecno-economico per energia e risorse materiali¹⁷. A partire dagli anni ’80, i segnali di prezzo come incentivo alle innovazioni di efficienza per l’energia e i materiali sono stati deboli, anche se poi, nello scorso decennio, vi è stata una fase di prezzi relativamente elevati.

Nella fase più recente, la combinazione di fattori geo-politici culminati con la guerra in Ucraina ha spinto i prezzi dell’energia, specie del gas in Europa, e quelli delle materie prime a livelli molto alti nel corso del 2022. Il rientro verso livelli bassi è però già avvenuto nel 2023.

¹⁵ Maggioni 2017.

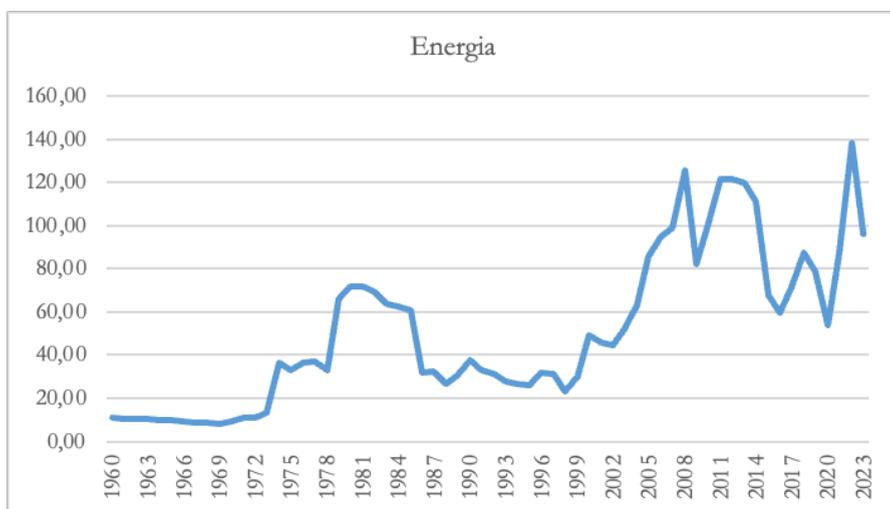
¹⁶ Quadrio Curzio-Zoboli 2020.

¹⁷ Quadrio Curzio *et al.* 1994; Quadrio Curzio-Zoboli 1995.

Guardando quindi agli indicatori dei prezzi internazionali in termini reali, generalmente considerati come indicatori di scarsità, quelli delle materie prime energetiche erano, nel 2023, circa ai livelli di vent'anni prima e lo stesso avveniva per i prezzi reali dei minerali e metalli, mentre quelli dei materiali industriali (gomma, legno, etc.) erano addirittura inferiori ai livelli dei primi anni '60 (Fig.02).

Gli stessi prezzi reali del gas naturale in Europa, che erano esplosi nel 2022, sono rientrati nel 2023 a livelli simili a quelli già toccati un decennio prima nel 2012-2013.

In breve, nonostante la loro grande instabilità e imprevedibilità, i mercati e i prezzi internazionali di energia e materiali non indicano che siamo entrati in un'era di scarsità di risorse naturali produttive, e danno quindi deboli stimoli economici a innovazioni di risparmio e di efficienza d'uso delle stesse risorse.



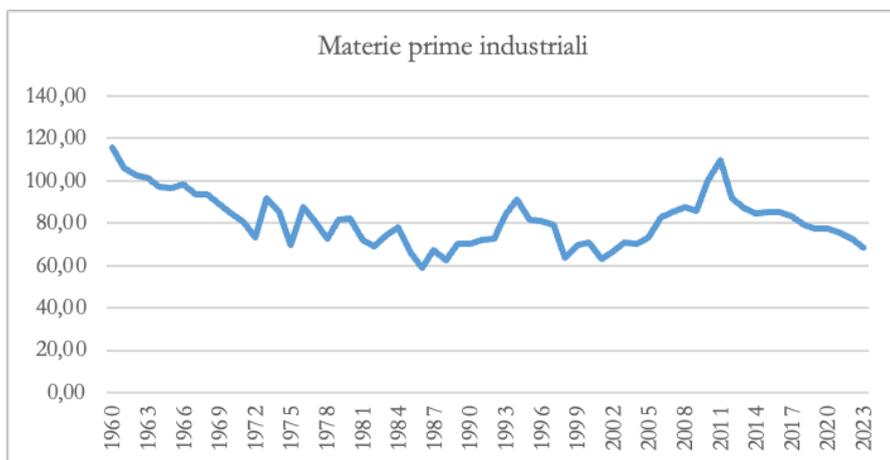
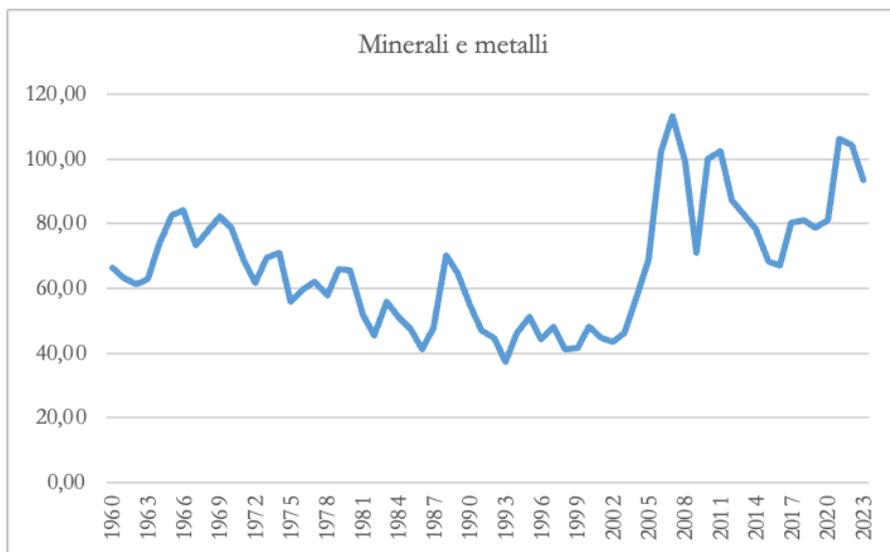


Fig.02. Prezzi internazionali reali delle materie prime energetiche e industriali e dei minerali e metalli, 1960-2023 (indici annuali, 2010 = 100, prezzi nominali deflazionati per gli indici dei prezzi dei beni manufatti).
 Fonte: elaborazioni dell'autore su dati World Bank, dati disponibili al link:
<https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets> [consultato il 15 gennaio 2025].

Questa indicazione di non scarsità è confermata guardando allo stato globale delle riserve di materie prime energetiche e di minerali e metalli. Nel caso di petrolio e gas, le riserve totali mondiali provate sono cresciute continuamente durante gli ultimi decenni, tanto che il rapporto riserve/consumo, cioè il numero di anni di consumo (dell'anno) coperti dalle riserve di petrolio, è passato da 30 anni nel 1980 a 53 anni nel 2020. Lo stesso rapporto è di 43 anni per il gas naturale, ed è lo stesso livello del 1980 (Fig.03).

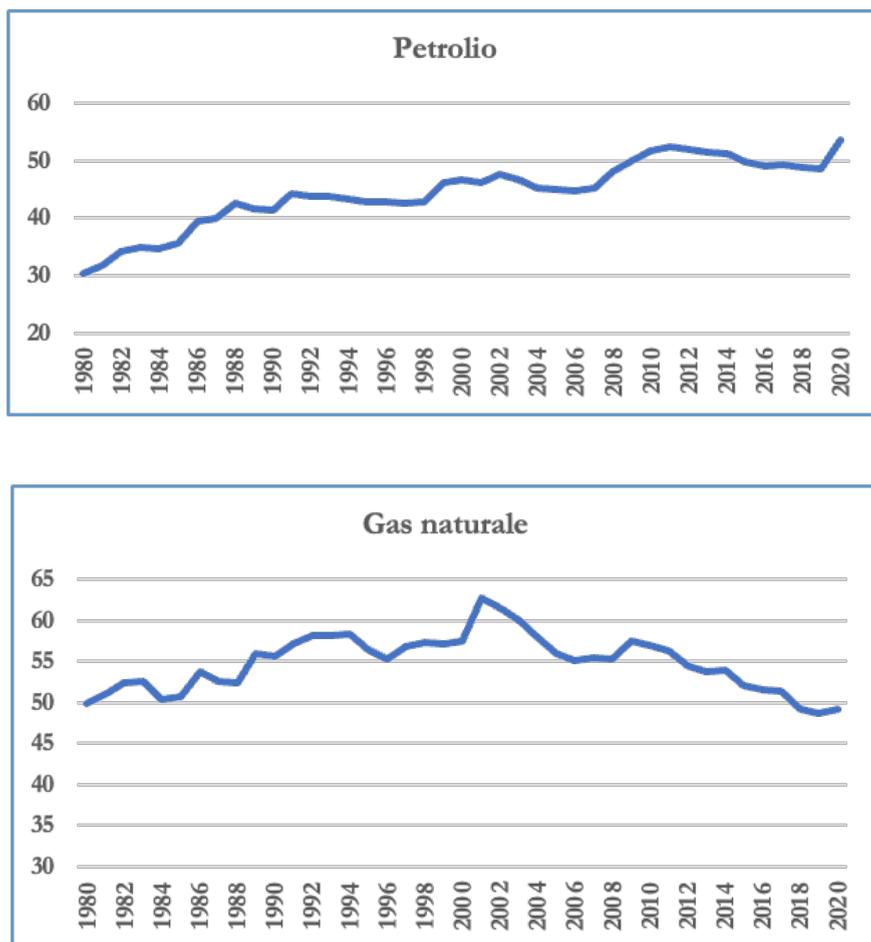


Fig.03. Petrolio e gas naturale: rapporto tra riserve provate e consumo mondiale (anni di consumo coperti dalle riserve), 1980-2020. Fonte: elaborazioni dell'autore su dati BP.

Guardando alle riserve mondiali provate di un campione di 33 minerali e metalli, secondo i dati di *US Geological Survey*, nel 2019 il rapporto riserve/produzione era superiore a 40 anni per 19 di essi, ed era superiore a 100 anni per dieci di essi, mentre era inferiore a 20 solo per 8 minerali e metalli. Rispetto al 1994, le riserve sono cresciute più del 100% per 12 minerali e metalli, mentre si sono ridotte solo per 5 di essi (*Tab.01*). La disponibilità di riserve mondiali non appare “critica” neppure per minerali considerati “critici”, come il litio, per il quale le riserve mondiali coprivano 244 anni di produzione al livello del 2019. Nonostante la domanda mondiale sia cresciuta 13 volte dal 1994 al 2019, le riserve sono cresciute di 8 volte nello stesso periodo. Le dinamiche tecno-economiche rendono evolutive le riserve e le risorse delle risorse non-rinnovabili, e ciò è avvenuto ancora negli ultimi decenni anche con prezzi reali bassi che poco stimolano la ricerca di nuovi giacimenti.

Naturalmente, se non è la geologia che rende scarse le materie prime, lo possono fare la geo-economia e la geopolitica, che generano, come nelle crisi degli anni '70 e in tutta la storia successiva fino alla crisi energetica del 2021-2023, azioni di embargo, interruzioni di fornitura e approvvigionamento, processi speculativi su vasta scala. Più semplicemente, come nel caso del litio, fisicamente abbondante su scala globale, vi è scarsità per Paesi come quelli europei che hanno poche riserve note, e dipendono criticamente da Paesi che detengono buona parte delle riserve mondiali, come Cile e Cina.

È rilevante notare che anche i segnali di prezzo provenienti dalle politiche climatiche sono deboli. Da molto tempo, gli economisti hanno indicato i vantaggi degli strumenti di *pricing* del carbonio, e più in generale dei *Market-Based Instruments* (MBI), per le politiche climatiche. Questi strumenti di *pricing* sono attesi indurre riduzioni delle emissioni di gas serra a un minor costo economico complessivo, fatti salvi i *target* di riduzione, rispetto ai tradizionali approcci di *policy* basati su standard di emissione e regolamentazioni. L'orientamento favorevole all'uso dei MBI è stato fatto proprio da tutte le organizzazioni internazionali, dal Fondo Monetario Internazionale alla Banca Mondiale, dall'OCSE alla Commissione Europea.

Nella realtà, nel sistema fiscale dei Paesi europei, la tassazione ambientale ed energetica, che riceve un forte sostegno dalla Commissione Europea ma è ancora nelle mani dei singoli Stati membri, rappresenta una voce marginale nelle entrate fiscali, generando meno del 6% delle entrate fiscali totali dei 27 Stati membri, e tale quota non tende a crescere¹⁸.

¹⁸ EEA 2019.

In sostanza, né i segnali di prezzo e di quantità (riserve) provenienti dai mercati dell'energia e dei materiali industriali, né quelli generati dai nuovi mercati del carbonio stanno dando segnali di scarsità globale di risorse naturali non rinnovabili, e quindi non sono uno stimolo economico potente per le transizioni energetiche e per le innovazioni di uso efficiente dei materiali. Le spinte più forti alla CE devono quindi venire da altri fronti.

4. La spinta dominante alla CE: le politiche e i loro limiti

Vi è esperienza fattuale ed evidenza di ricerca che le politiche possono innescare rilevanti processi di innovazione ed efficienza per energia e risorse¹⁹. Perciò, in assenza di forti spinte dei mercati e dei prezzi delle materie prime, le politiche pubbliche possono divenire un sostituto di mercati e prezzi nello spingere i processi di CE, se le “scelte collettive” che si esprimono attraverso le politiche pubbliche la considerano un obiettivo.

A partire dalle prime politiche dei rifiuti, avviate in Europa già negli anni '70, la moltitudine di direttive, regolamenti e strumenti normativi sulla gestione dei rifiuti e del riciclo/recupero ha determinato, negli ultimi decenni, un lento ma inesorabile successo nel raggiungere gli obiettivi fondamentali, primo fra tutti la diversione dei rifiuti dalla discarica e lo sviluppo del riciclo materiale e del recupero energetico.

Nel caso dei rifiuti urbani, secondo dati Eurostat, mentre nel 1995 la discarica copriva circa il 61% della gestione dei rifiuti solidi urbani nella EU27, nel 2022 la quota della discarica era il 23%. Restano però 53 milioni di tonnellate di soli rifiuti urbani che vanno in discarica in Europa, con grandi differenze tra Paesi dovute anche alle diverse capacità amministrative²⁰. È tuttavia in atto un processo di convergenza chiaro e continuo verso un modello a “discarica zero”²¹.

Per quanto di forte approccio legislativo/regolamentare, lo sviluppo delle politiche dei rifiuti è stato coerente con quello che può essere considerato l'antesignano dell'economia circolare, vale a dire la “gerarchia comunitaria” dei rifiuti.

¹⁹ Zoboli 2012.

²⁰ Pronti-Zoboli 2024.

²¹ Marin *et al.* 2018.

	Rapporto riserve/produzione 2019 (= N. anni di produzione coperti da riserve)	Rapporto riserve/produzione 1994 (= N. anni di produzione coperti da riserve)	Variazione della produzione mondiale 2019/1994 (%)	Variazione delle riserve mondiali 2019/1994 (%)	Variazione degli anni di produzione coperti dalle riserve (numero)
Antimonio (ton)	11,73	39,62	52,83	-54,76	-27,89
Bauxite (000 ton)	225,56	214,95	24,30	30,43	10,61
Cromo (000 ton)	12,72	386,62	368,13	-84,59	-373,90
Cobalto (ton)	49,31	216,22	678,38	77,50	-166,91
Rame (000 ton)	42,65	32,87	116,33	180,65	9,77
Gold (ton)	16,06	19,13	43,48	20,45	-3,07
Grafite naturale (ton)	290,91	29,21	52,99	1423,81	261,70
Minerali di ferro (grezzi, 000 ton)	55,26	65,00	52,00	29,23	-9,74
Piombo (000 ton)	18,64	24,29	68,57	29,41	-5,64
Litio (ton)	244,19	360,66	1309,84	854,55	-116,47
Manganese (000 ton)	66,33	94,58	172,60	91,18	-28,25
Molibdeno (ton)	61,22	52,88	182,69	227,27	8,34
Nickel (ton)	36,02	51,88	188,08	100,00	-15,86
Rocce fosfatiche (000 ton)	312,78	85,94	77,34	545,45	226,84
Metalli del gruppo platino (kg)	167,07	246,48	81,78	23,21	-79,41
Terre rare (ton)	545,45	155,04	241,09	1100,00	390,42
Argento (ton)	18,87	20,14	90,65	78,57	-1,28
Stagno (ton)	14,53	38,04	60,87	-38,57	-23,52
Tungsteno (000 ton)	40,57	80,77	222,31	61,90	-40,20
Vanadio (ton)	253,46	294,99	156,05	120,00	-41,53
Zinco (000 ton)	19,69	20,56	86,49	78,57	-0,87

Tab.01. Riserve prouate e rapporto riserve-produzione per alcuni minerali e metalli, 1994 e 2019. Fonte: Elaborazioni dell'autore su dati di US Geological Survey.

La gerarchia assegna priorità alla prevenzione dei rifiuti, per poi passare al riuso e quindi al riciclo materiale, per finire con il recupero energetico e la discarica, ed è riferimento di tutte le politiche dei rifiuti. In realtà, la robusta evidenza di ricerca accademica sul ruolo delle politiche come *driver* della circolarità materiale mette in evidenza che, *ex post*, le politiche europee hanno avuto, e ancora hanno, più successo nello sviluppare riciclo e recupero energetico rispetto alla loro stessa principale priorità, cioè la prevenzione²².

Nella fase più recente, la spinta delle politiche ambientali e climatico-energetiche è, se possibile, aumentata. Nel 2019, prima dello *European Green Deal* (EGD), nelle politiche dell'Unione erano presenti 157 *target* legalmente vincolanti in 11 aree ambientali, e 87 *target* non vincolanti fino al 2050²³. Le aree con il maggior numero di *target* erano il clima (51 *target*), l'inquinamento chimico, (23 *target*), e l'area rifiuti e materiali aveva 23 *target* legalmente vincolanti. Novantasette erano i *target* riferibili al settore industriale. Con lo EGD, è arrivato un nuovo flusso di impegni vincolanti di *policy*, con l'attesa di 177 documenti, direttive e strategie, di cui 15 per i rifiuti e le risorse che sono inglobati nel secondo *Action Plan* per la CE (2020).

Un quadro così intenso di politiche, molte di natura puramente legislativa e regolamentare, non può non avere difetti e limiti, specie se è ispirato alla visione dei rifiuti come problema ambientale, proprio mentre larga parte dei rifiuti e materiali secondari sono, o possono essere, delle *commodity* riferibili a catene di valore, mercati e industrie²⁴.

Evidenzierò questi problemi delle politiche dei rifiuti in tre casi: plastiche, materiali secondari, materiali biologici.

4.1. La crisi dei rifiuti plastici

Le plastiche sono state, negli scorsi decenni, tra le famiglie di materiali con più alta crescita di consumo, ma sono entrate negli ultimi anni in un cono di forte attenzione negativa da parte dell'opinione pubblica. In Europa, circa il 40% delle plastiche è utilizzato nel *packaging*. I sistemi di gestione dei rifiuti di *packaging* sono, in generale, di successo. Sistemi come CONAI in Italia e altri simili in Europa, che si reggono sul principio della "responsabilità estesa del produttore" (*Extended Producer Responsibility*, EPR), hanno costruito dei circuiti a cui concorrono

²² Mazzanti-Zoboli 2008.

²³ Paleari-Reichel 2019.

²⁴ EEA 2022.

tutti gli attori delle catene di valore del materiale, e hanno consentito, nel caso italiano, di raggiungere in anticipo quei *target* di riciclo e recupero stabiliti dalle direttive europee che erano sembrati irraggiungibili. Ciò è avvenuto per quasi tutti i rifiuti di *packaging*, ma non per le plastiche, che nella EU27 segnano il passo sia per il recupero ma soprattutto per il riciclo materiale.

Le ragioni sono tecniche, ad esempio il mix di plastiche nel confezionamento che rende difficile la selezione post-consumo, ed economiche, a causa di scale minime efficienti non raggiungibili in bacini di raccolta troppo ampi per essere economicamente (e ambientalmente) sostenibili.

È questo il risultato di politiche dei rifiuti e del *packaging* che, per evitare la discarica o l'incenerimento, hanno puntato ad aumentare la raccolta differenziata ma non la domanda dei materiali da riciclo generati dalla raccolta, determinando così una pressione di offerta di rifiuti plastici a cui non corrisponde adeguata domanda.

L'Europa aveva tamponato questo squilibrio con ampi flussi di esportazione, specie di plastiche miste, tanto che, fino al 2017, circa metà dei rifiuti plastici europei veniva esportata all'estero, in larga parte verso la Cina²⁵. Ciò è stato possibile fino a quando, nel 2018, la Cina ha introdotto un bando all'importazione di rifiuti plastici. La saturazione del mercato cinese, e di altri mercati prima molto aperti, è tra i fattori alla base di quella dispersione di rifiuti plastici negli ecosistemi di tutto il mondo che ha spinto l'opinione pubblica contro le plastiche. I flussi di rifiuti plastici europei sono stati in parte ridiretti in altri Paesi extra-EU e anche internamente all'Unione, ma l'Europa è in ogni caso entrata in una vera propria crisi delle plastiche²⁶.

La reazione delle politiche europee si è sviluppata attraverso tre risposte. La prima è stata la *Plastic Strategy* del 2018²⁷, che prevedeva, tra l'altro, che tutti gli imballaggi di plastica diventassero riusabili o riciclabili, e che più della metà di tutti i rifiuti in plastica fosse riciclata entro il 2030. Prevedeva inoltre di arrivare a un *design* dei prodotti in plastica in funzione del riciclo. Nell'ambito di tale strategia, gli *stakeholder* del sistema plastiche hanno presentato un impegno volontario per usare dieci milioni di tonnellate di plastica riciclata nella produzione di nuovi prodotti. Per capire il cambio di passo sulle plastiche è interessante leggere *A vision for Europe's new plastics economy*²⁸ che, con retorica evocativa, prefigura un ridisegno

²⁵ European Commission 2018b.

²⁶ D'Amato *et al.* 2019.

²⁷ European Commission 2018b.

²⁸ European Commission 2018a.

completo dell'economia delle plastiche: «A smart, innovative and sustainable plastics industry, where *design* and production fully respect the needs of reuse, repair, and recycling, brings growth and jobs to Europe and helps cut EU's greenhouse gas emissions and dependence on imported fossil fuels».

La seconda risposta è stata la direttiva *Single-use Plastics* del 2019²⁹. Prevede un insieme dettagliato di misure, tra cui, a seconda del prodotto, la proibizione di immissione sul mercato, obiettivi di raccolta differenziata, introduzione di *EPR*, *target* obbligatori su contenuto di plastiche riciclate nei nuovi prodotti, obblighi di marchiatura per riconoscimento del materiale, una misurabile riduzione del consumo, un aumento della durabilità, una riduzione del cosiddetto *over-packaging*.

La terza risposta è stato il *Circular Economy Action Plan* (CEAP) del 2020³⁰, veicolato dallo *European Green Deal*³¹. I rifiuti plastici sono tra le aree prioritarie del CEAP. L'approccio generale è quello di risalire a monte puntando sull'*ecodesign* come ambito dove ottimizzare anche la *performance* ambientale delle plastiche, ad esempio evitando mix non riciclabili, aumentando la presenza di plastiche riciclate nei materiali/prodotti di nuova produzione, aumentando la durabilità dei prodotti che contengono plastiche, ed estendendo l'approccio di *EPR* al di là del suo attuale campo di applicazione.

Leggendo assieme le tre risposte delle politiche europee, emerge un bivio cruciale per le plastiche come materiali e per le loro industrie.

Alcune previsioni dei tre provvedimenti vanno chiaramente nella direzione di restringere lo spazio di mercato delle plastiche come materiale, aprendo la possibilità di una diminuzione del loro ruolo nel sistema industriale. Altre previsioni degli stessi provvedimenti vanno invece nella direzione di aumentare il riciclo materiale delle plastiche che, se raggiunto, può favorire il mantenimento del mercato delle plastiche come materiale. Se non si raggiunge un adeguato sviluppo del riciclo, potrà quindi prevalere la tensione verso una riduzione del mercato delle plastiche, come prefigurata dagli altri contenuti delle *policy* sopra descritte. È chiaramente un bivio per l'industria delle plastiche che, se non investe nella creazione di un'industria del riciclo, introducendo risorse economiche significative, rischia di vedere ristretto il proprio spazio di mercato.

Un'analisi di McKinsey³² mette chiaramente in luce questo dilemma. Esaminando un'ampia gamma di soluzioni tecniche diverse, essa conclude

²⁹ European Commission 2019b.

³⁰ European Commission 2020.

³¹ European Commission 2019a.

³² McKinsey & Company 2020.

che, a un prezzo del petrolio di 60 dollari/barile, solo un numero limitato di opzioni di riciclo delle plastiche è economicamente sostenibile. In pratica, circa il 20% soltanto delle soluzioni (in quantità di materiali processabili) può garantire un ritorno minimo accettabile del 15% sull'investimento, mentre il restante 80% rende meno del 15%, e una parte significativa, circa il 30%, ha ritorno economico negativo. Lo studio conclude che: «there are also applications for which the cost incurred in recycling, with no possibility of earning a profitable return, could be deemed acceptable because the plastic used there simply does the most economical, as well as the most carbon-efficient, job». Ciò significa che, in una prospettiva di conservazione del mercato del materiale, l'industria dovrebbe accettare di promuovere soluzione di riciclo a un costo economico netto negativo.

Lo strumento di *policy* che può più efficacemente spingere l'industria in questa direzione, sgradita ma potenzialmente vantaggiosa per l'industria stessa, è l'EPR. Tra gli strumenti di *policy*, l'EPR è una forma particolare di “strumento economico”. Nato dall'idea che il produttore dei beni è il “miglior risolutore” dei problemi ambientali anche nella fase post-consumo dei beni stessi, la sua applicazione impone dei costi economici ai produttori. Ci si attende quindi che questi ultimi adotteranno strategie di *design* e configurazione dei beni (ad esempio facilità di disassemblaggio) e innovazioni organizzative di filiera tali da minimizzare i costi di gestione dei rifiuti nella fase post consumo di cui sono “responsabili”³³. L'esperienza di applicazione di EPR, oltre che nel settore *packaging*, dove però fatica a raggiungere i *target* proprio per le plastiche, è risultata efficace in altri settori, dalle auto a fine vita³⁴ ai RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) e alle batterie, ed è applicata in Francia dal 2015 per tessile, mobili e carta grafica. L'EPR è inoltre prevista, come ricordato, dal CEAP del 2020 quale approccio applicabile in molti settori dell'economia circolare. È utile ricordare che molti schemi EPR consentono, di fatto, di trasferire i costi di raccolta e riciclaggio post-consumo ai consumatori, come ad esempio nel caso dei RAEE, complicando così gli esiti effettivi della responsabilità assegnata ai produttori.

Dall'altro lato, le stesse politiche pubbliche possono supportare l'industria delle plastiche nel cammino verso il riciclo. È il caso dei fondi PNRR destinati in Italia a impianti di riciclo delle plastiche. Si tratta di oltre cento nuovi impianti ammessi a finanziamento nel 2022 e 2023 nell'ambito della Missione 2, Componente 1, in particolare: (a) 32 impianti, per un contributo PNRR di 150 milioni di euro, nell'ambito

³³ Bio by Deloitte 2014; Massarutto 2014; OECD 2014; OECD 2016; OECD 2024.

³⁴ Mazzanti-Zoboli 2006.

dell'Investimento 1.2 *Progetti faro di economia circolare*, Linea di intervento C *Realizzazione di nuovi impianti per il riciclo dei rifiuti plastici*; (b) 75 nuovi progetti per impianti di riciclo dei rifiuti plastici, finanziati con 115 milioni di euro di contributo PNRR attraverso il bando di aprile 2023. Aumentando la capacità di riciclo, questi investimenti potrebbero anche ridurre il pagamento della tassa europea sulle plastiche non riciclate, messa in campo dell'Unione per aumentare le cosiddette “risorse proprie” di bilancio ma anche per dare ulteriore spinta a risolvere la “crisi delle plastiche”³⁵. Nella fase attuale, grande attenzione industriale sta poi ricevendo la revisione della direttiva *packaging* che prevede dei *target* obbligatori di riuso, con prevedibili difficoltà per lo sviluppo industriale del recupero e riciclo.

4.2. *Carente domanda di materiali secondari*

Le carenze nella creazione di mercati per il riciclo è stato un limite importante delle politiche dei rifiuti, che hanno spesso mancato di adottare una prospettiva di filiera o catena di valore. Vi è un limite concettuale originario nelle politiche che vedono i rifiuti come danni ambientali, effettivi o potenziali, e non come materiali secondari, come merci, come *commodity* con propri mercati industriali, effettivi o potenziali. Anche se l'idea dei rifiuti come materiali o come “materie prime seconde”, e i processi di cosiddetto “*End-of-Waste*”, sono ben presenti da tempo nelle politiche europee e italiane, la loro effettiva affermazione incontra molte barriere, diverse da materiale a materiale.

L'analisi condotta da ETC CE (*European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use*) sui mercati dei materiali secondari³⁶ utilizza una griglia di criteri per definire “mercati ben funzionanti”, e mette in evidenza come vi sia grande differenza nella maturità tecnico-economica dei diversi mercati di materiali secondari. È soprattutto nei mercati più vecchi, come metalli, carta, vetro che si possono ritrovare, a scala europea e nazionale, le caratteristiche di veri propri mercati di materiali, dove quelli secondari sono capaci di competere con quelli primari. Invece, i mercati secondari di più recente creazione da parte delle politiche, come quelli dei rifiuti plastici, rifiuti da costruzione e demolizione, rifiuti tessili, sono lontani dall'aver raggiunto un buon funzionamento. Sono quindi caratterizzati da

³⁵ La tassa è in campo dal 2021 e richiede agli Stati membri il pagamento di 0,80 centesimi di euro per chilo di rifiuto di *packaging* plastico non riciclato, si veda il *link*: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_en [consultato il 15 gennaio 2025].

³⁶ EEA 2022.

forti squilibri tra domanda e offerta e da una perdurante incapacità di competere con i materiali primari (Tab.02).

Il lavoro di ETC CE indica possibili politiche di potenziamento della domanda di materiale secondario, che comprende requisiti minimi di riciclato come *input* nella produzione degli stessi o di altri materiali, sviluppo più veloce dell'*End-of-Waste*, standardizzazione tecnica, e un ruolo potenzialmente grande del *Green Public Procurement* (Tab.03). Su questo fronte, l'Italia è uno dei Paesi considerati più avanzati in Europa anche se, a un quadro normativo completo, che include l'introduzione dei CAM (Criteri Ambientali Minimi) per il *procurement* pubblico, non sempre corrisponde un'adeguata prassi di *Green Public Procurement* da parte delle amministrazioni³⁷.

4.3. Uso energetico dei biomateriali

Un altro ambito problematico associato alla dominanza delle politiche riguarda i materiali e rifiuti biologici, in particolare l'interazione tra CE e bioeconomia attraverso le politiche di incentivo delle fonti energetiche rinnovabili. In Europa, vi è un'ampia disponibilità di residui, scarti e rifiuti di biomateriali provenienti dalle attività agricole e agroforestali e dal consumo, circa 440 milioni di tonnellate/anno³⁸. È un potenziale produttivo ampio che, da un lato, è sottoutilizzato mentre, dall'altro lato, presenta aree di forte pressione di domanda, come nel caso dei residui forestali e legnosi. Secondo le stime di EEA³⁹ ampi flussi di biomateriali in Europa non sono gestiti o vanno in discarica, oppure sono usati in processi di basso valore economico. La combustione è il 72% degli impieghi di questi residui e scarti, quattro volte l'uso degli stessi residui come materiali in processi di riciclo, ad esempio nei pannelli truciolari, e il riciclo rappresenta solo il 28% dei flussi totali. I rifiuti biologici non riciclati sono il doppio di quelli importati in Europa e sono il 38% dell'estrazione interna. È chiaro che vi è una cattiva allocazione di queste risorse, spesso di qualità equiparabile, come nel caso dei residui legnosi da foresta o segheria, alla materia prima vergine.

³⁷ Ghisetti 2021.

³⁸ Camia *et al.* 2018.

³⁹ EEA 2018.

Key	GREEN LIGHT= criterion verified			YELLOW LIGHT = criterion partly verified				RED LIGHT = criterion not verified			
	Aluminium	Paper	Wood	Glass	Plastics	Biowaste	C&D waste	Textiles			
High share of supply and demand with respect to total market size											
Enough stable or increasing supply and demand											
Open international trade and high tradability											
High industrial capacity based on secondary material inputs											
Non-policy-driven supply and demand											
Included in compliance schemes for packaging waste or EPR schemes						Not relevant	Not relevant				
No competition from energy use							Not relevant				
Reference international or national prices											
'Organised markets' for trading (c.g. futures)											
Sufficient information available to both demand and supply actors											
Product specifications are standardised											
No regulatory barriers to using SRMs as inputs in manufacturing						No information		No information			
Overall result	Well-functioning	Well-functioning	Not well-functioning	Well-functioning	Not well-functioning	Not well-functioning	Not well-functioning	Not well-functioning			

Tab.02. Grado di maturità per diversi mercati di materiali secondari. Fonte: adattato da EEA 2022. © European Environment Agency, 2022. Reproduction is

<i>Product manufacture and design</i>	<i>Supply of SRM</i>	<i>Demand for SRM</i>
- Eco-modulated extended producer responsibility fees	- Recycling targets	- Recycled content requirements
- Design for environment measures	- Waste export restrictions	- Ecolabel/product passports
- Restrictions on substances inhibiting recycling	- Harmonizing collection schemes	- Tax on primary raw materials
- Green public procurement	- Promoting material recovery over energy recovery	- VAT reduction on SRMs
	- Standardizing SRMs	
	- End of waste criteria	

Tab.03. Orientamenti di policy per migliorare i mercati dei materiali secondari (SRM, Secondary Raw Materials). Fonte: EEA 2022. © European Environment Agency, 2022.

Particolarmente importante è il ruolo della domanda energetica. Attualmente, nonostante la crescita forte del solare e dell'eolico, ancora circa la metà del consumo di energia rinnovabile in Europa è soddisfatta dalla combustione di biomassa, ed è questa una conseguenza dei generosi incentivi per le rinnovabili introdotti dalle politiche europee, che trovano nella combustione di biomassa, tecnologia semplice, una facile risposta.

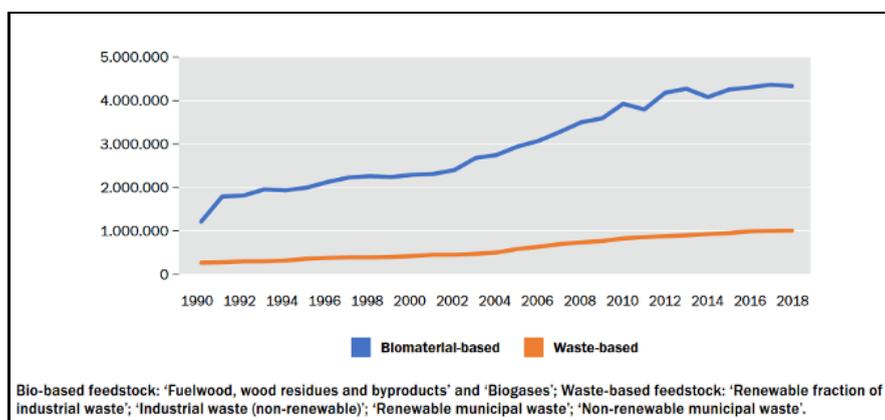


Fig.04. Produzione di energia rinnovabile da materiali biologici e rifiuti, EU27, 1990-2018, Terajoule. Fonte: Zoboli et al. 2020.

La maggior parte della produzione di energia da biomassa è basata su biomateriali di scarto che non sono rifiuti, mentre è limitata la parte da combustione di rifiuti bio. Il quadro è quello di un eccesso di produzione di energia da residui di biomassa vergine e poca produzione energetica da biomassa-rifiuto, anche per lo scarso supporto, se non avversione, che la

conversione energetica di tutto ciò che è definito rifiuto riceve dalle politiche a tutti i livelli. Il paradosso è che, da un lato, si aderisce di fatto alla “gerarchia comunitaria” bruciando pochi rifiuti bio, ma, dall’altro lato, la si contraddice perché una gran quantità di residui e scarti con le stesse proprietà della biomassa vergine finiscono in combustione nelle centrali a biomassa. In tal modo, oltre a violare di fatto la “gerarchia comunitaria”, ci si allontana dal buonsenso economico e ambientale.

In modo complementare, il canale degli usi industriali dei biomateriali di scarto è molto inferiore al potenziale. Oltre ai tradizionali usi nell’industria del legno, dove già si è manifestata anche in Italia una concorrenza tra centrali a biomassa e produzione di pannelli, esistono delle opzioni economicamente e ambientalmente migliori per gli scarti bio rispetto alla loro conversione energetica. È il caso di molti sviluppi, effettivi o potenziali, della cosiddetta “chimica verde”, dei biopolimeri, dei modelli di *business* definiti di “*biorefinery*”. Anche se la definizione non può essere precisa, gli impianti di bioraffinazione processano una varietà di biomateriali, in particolare scarti e rifiuti (o definiti legalmente tali), e attualmente muovono verso i *feedstock* di seconda generazione, come legno ed erba, residui di raccolto, sottoprodotti di frutta e verdura, alghe e rifiuti organici. Secondo il progetto BIO-TIC del 2015⁴⁰, in Europa sarebbero necessari, per uno sviluppo circolare della bioeconomia, 310 bioraffinerie entro il 2030, tra cui 185 per etanolo di seconda generazione, 50 per combustibile *jet* a base bio, 30 per prodotti chimici *bio-based*, 45 per bioplastiche. Altri rapporti, in particolare OECD del 2018⁴¹, indicavano la necessità di 400 bioraffinerie per avere una bioeconomia di successo basata su approcci di economia circolare. Esistono poi, tra i *business model* circolari veicolati da *start-up* e nuove imprese, molti esempi di prodotti di valore basati su scarti bio, ad esempio manufatti derivati da foglie di ananas, bucce di patate, gusci di nocciole, conchiglie e molto altro.

Anche se le opzioni industriali sono più difficili di quelle energetiche, perché in molti casi richiedono ancora R&S per avere fattibilità tecnico-economica, la dominanza dell’uso energetico dei materiali biologici è problematica, e configura un paradosso economico e ambientale indotto dalle politiche, in questo caso dalle politiche climatiche attraverso alti *target* per le energie rinnovabili. Come detto, la combustione in presenza di alternative d’uso e riciclo materiale, viola la gerarchia comunitaria dei rifiuti, e inoltre rilascia gas serra, mentre l’uso non energetico degli stessi materiali ha spesso un più alto valore aggiunto e trattiene più a lungo carbonio. Non ci si può aspettare che la pressione di domanda da parte delle energie rinnovabili de-

⁴⁰ BIO-TIC 2015.

⁴¹ OECD 2018.

cresca con un obiettivo EU27 del 42,5% di rinnovabili nel consumo finale di energia al 2030.

5. La CE e i rischi per le materie prime critiche

Senza politiche europee non avremmo un significativo macro-processo di CE, ma i modelli di *design* e implementazione delle stesse politiche hanno aperto, come abbiamo visto, varchi di inefficacia e possibili paradossi ambientali ed economici.

La “lezione” è da cogliere perché ora la CE affronta in Europa una nuova complicata frontiera in risposta ai rischi internazionali di approvvigionamento di energia e materiali, rischi che si sono aperti, forse in modo strutturale, con la guerra in Ucraina.

Nel 2023, la Commissione ha lanciato il *Green Deal Industrial Plan* (GDIP)⁴². È il primo atto importante della virata verso quella “*Open strategic autonomy*” che è attesa costituire la strategia guida dell’Unione dei prossimi anni. Il GDIP mira a creare capacità manifatturiera e competitività internazionale per tecnologie e prodotti definiti di *Net Zero*, in linea con le politiche energetico-climatiche.

Si tratta di una strategia selettiva e preferenziale per queste industrie che si basa su quattro pilastri: (i) semplificare la regolazione per lo sviluppo di catene di valore per la transizione elettrica, a cui sono dedicati (si veda oltre) il *Net Zero Industry Act*, il *Critical Raw Materials Act*, e la riforma del mercato elettrico; (ii) accelerare accesso ai finanziamenti, con nuovo regime di aiuti di Stato, e facilitare l’accesso ai fondi EU esistenti per finanziare le *Clean Tech* (innovazione, manifattura), anche attraverso la costituzione di uno *European Sovereignty Fund* per investimenti strategici in questi settori; (iii) creare *skills* e competenze, attraverso programmi di *up-skilling* e *re-skilling* e riqualificazione del capitale umano nelle industrie *Net Zero*; (iv) facilitare l’apertura commerciale sviluppando la cooperazione con Paesi partner per le *Clean Tech* e i materiali.

I primi atti del GDIP sono le proposte per il *Net Zero Industry Act* (NZIA)⁴³ e il *Critical Raw Materials Act* (CRMA)⁴⁴.

Il *Net Zero Industry Act* (NZIA) punta allo sviluppo di capacità manifatturiera interna per prodotti, componenti e impianti necessari per la manifattura delle tecnologie *Net Zero*. Identifica quindi le “*Net Zero technologies*” e le

⁴² European Commission 2023b.

⁴³ European Commission 2023a.

⁴⁴ European Commission 2023c.

“*Strategic Net Zero Technologies*”, adottando un obiettivo per la capacità interna delle strategiche di almeno il 40% del fabbisogno annuale di capacità produttiva entro il 2030. I progetti strategici *Net Zero*, identificati dai Paesi, avranno priorità a livello nazionale, *fast-track* nelle procedure di permesso e nelle altre procedure amministrative, saranno favoriti nelle procedure di *Public Procurement*.

Verrà creata una *Net Zero Europe Platform*, a cui partecipano gli stakeholder industriali, che collabora alle decisioni di finanziamento dei *Net Zero Strategic Projects*, e verranno costituite le *Net Zero Industry Academies*, sul modello dell’Accademia dell’Alleanza Europea per le Batterie. Saranno finanziati da aiuti di Stato e fondi europei, se non ricadono nell’area del costituendo *EU Sovereignty Fund*⁴⁵.

Le industrie *Net Zero* dipendono da materiali per i quali l’Europa soffre di una dipendenza fortissima dall’estero e da fornitori rischiosi, ad esempio Cina⁴⁶. La *Fig.05* illustra la dipendenza europea per questi materiali.

Perciò, il *Critical Raw Materials Act* (CRMA), intende rispondere ai rischi di offerta per i materiali strategici/critici aumentando la produzione, la raffinazione e il riciclo interni, fino alla creazione di catene di valore europee. Viene definita una lista di materiali “strategici” e “critici”, che sono tali in generale ma lo sono soprattutto per la produzione di *Clean-Tech* e tecnologie di difesa. Vengono adottati *target* di capacità interna EU27 al 2030 che sono: per l’estrazione, almeno il 10% del consumo annuale; per la trasformazione, almeno 40% del consumo annuale; per il riciclo, almeno il 15% del consumo annuale. Inoltre, non più del 65% del consumo annuale deve provenire, per ogni stadio di produzione, da un singolo Paese extra-EU. I progetti strategici CRMA beneficiano di accesso prioritario a finanziamenti e procedure di permesso accelerate (24 mesi per permessi di estrazione e massimo 12 mesi per i permessi di progetti di trasformazione e riciclo).

È prevista una quantificazione delle risorse interne attraverso prospezioni geologiche e analisi dei contenuti di CRM nei rifiuti. Verranno create delle *partnership* EU con Paesi fornitori emergenti e in via di sviluppo, fino alla costituzione di un *Critical Raw Materials Club* con Paesi “*like-minded*” per rafforzare le catene di valore per la EU⁴⁷.

⁴⁵ Le *Strategic net-zero technologies* sono: *Solar photovoltaic and solar thermal technologies; Onshore wind and offshore renewable technologies battery/storage technologies; Heat pumps and geothermal energy technologies; Electrolysers and fuel cells; Sustainable biogas/biomethane technologies; Carbon Capture and Storage (CCS) technologies; Grid technologies.*

⁴⁶ European Parliament 2024.

⁴⁷ I sedici materiali strategici (sui 34 critici) sono: *Bismuth; Boron – metallurgy grade; Cobalt; Copper; Gallium; Germanium; Lithium – battery grade; Magnesium metal; Manganese – battery grade; Natural Graphite – battery grade; Nickel – battery grade; Platinum Group Metals; Rare Earth Elements for magnets; Silicon metal; Titanium metal; Tungsten.*

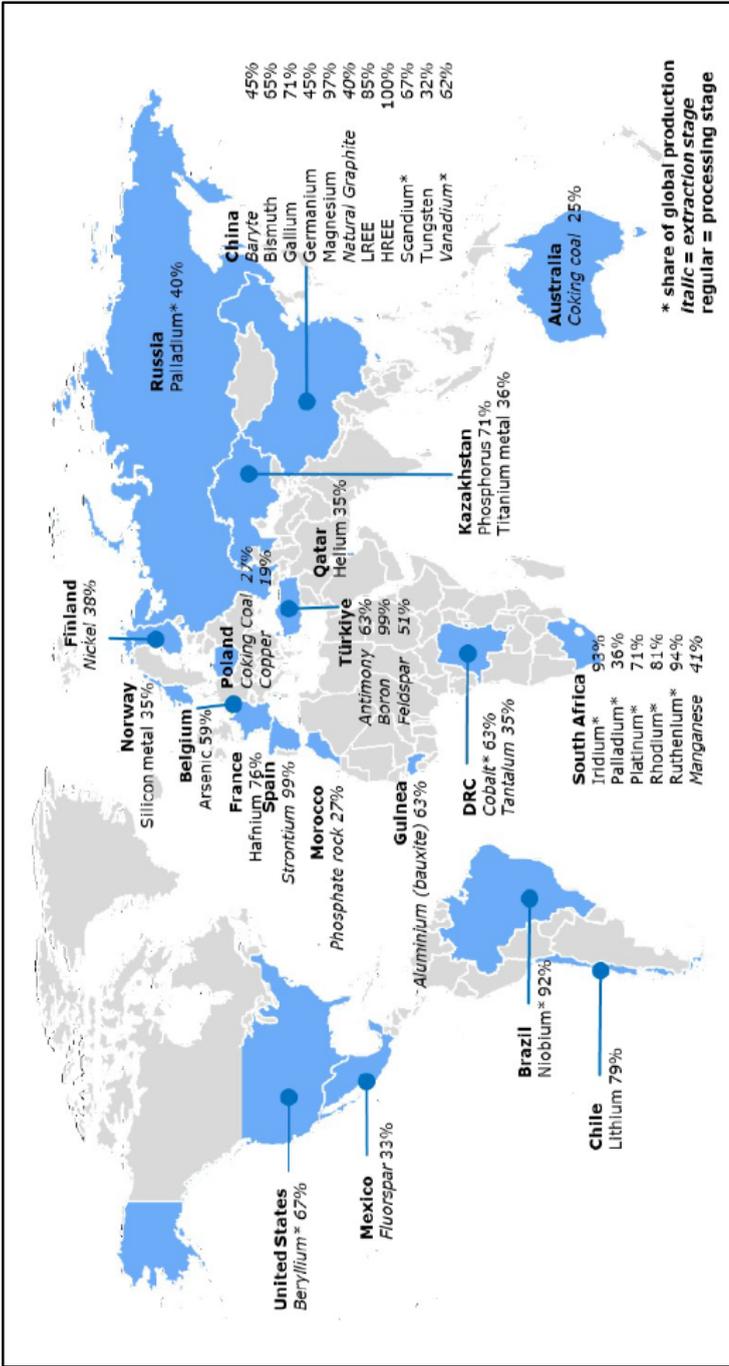


Fig.05. Mappa dei principali fornitori di materiali critici all'Unione Europea (2024). Fonte: European Parliament 2024 su dati European Commission.

In questa nuova politica del *Green Deal*, selettiva e mirata, che cerca di supplire alla mancanza storica di una politica industriale europea e arrivare a una “*New European industrial policy*”⁴⁸, la CE trova un importante fronte legato sia alla massima valorizzazione dei materiali critici contenuti nei flussi di rifiuti industriali e post-consumo, sia alle innovazioni di prodotto e processo rivolte al *design* per la massima facilità di riciclo e il massimo risparmio di materiali, specie se critici.

In tal modo, la CE manifesta anche la sua caratteristica di essere, da un lato, rivolta alle risorse primarie e secondarie interne e, dall’altro lato, di poter essere un paradigma di innovazioni industriali efficienti per le risorse.

La CE assume così un ruolo importante nel contribuire a rispondere ai rischi di approvvigionamento in un sistema internazionale anarchico e instabile⁴⁹. Al netto delle sue difficoltà tecniche e dei suoi (non quantificati) costi di investimento, il percorso per le materie prime critiche basato sulla CE può alleviare il carico sull’altro percorso previsto dal CRMA, quello di rilancio delle estrazioni minerarie in Europa.

Quest’ultimo troverà sicuramente ostacoli fortissimi dal lato dei costi di investimento, delle barriere amministrative e dell’opposizione delle popolazioni nei possibili siti minerari, sia in Europa sia in Italia, dove la sindrome NIMBY è particolarmente acuta anche nei casi in cui i costi ambientali non sono così alti e permanenti come è il caso delle attività minerarie ed estrattive.

6. Uno sguardo all’Italia

L’Italia è un Paese con ottime *performance* per gli indicatori di CE⁵⁰. Il flusso dei materiali nell’economia italiana, secondo il *Sankey Diagram* di Eurostat, è presentato in *Fig.06*. L’Italia ha una alta dipendenza dall’estero per i materiali in ingresso nel sistema produttivo.

Di questo flusso, una significativa quota diventa materiale accumulato nell’economia (*stock*), mentre la restante parte è costituita da rifiuti che vanno minimamente in discarica e incenerimento, mentre vanno, per ampie quantità, a diverse tipologie di riciclo.

Di conseguenza, l’Italia ha una *performance* elevata per i principali indicatori di efficienza materiale e circolarità. Ha un *Material Footprint* (tonnellate

⁴⁸ Tagliapietra *et al.* 2023.

⁴⁹ Di Francesco *et al.* 2024.

⁵⁰ ETC CE 2022.

pro capite), come calcolato da Eurostat, stabilmente e crescentemente più basso della media EU27 (Fig.07a). Allo stesso modo, ha un indicatore di *Resource Productivity*, cioè il PIL per unità di *input* materiale, che è più alto e crescentemente tale rispetto alla media di EU27 (Fig.07b). Infine, l'Italia ha un *Circular Material Use Rate*, che rappresenta la percentuale di *input* nei processi produttivi coperta da rifiuti o materiali classificati statisticamente tali, che è stabilmente e crescentemente più alta della media EU27 (Fig.07c). Ci sono evidentemente ragioni di storia e struttura economica italiana dietro questi indicatori. Sono ragioni riferibili sia al tipo di specializzazione industriale “leggera” sia alla cultura di un Paese poco dotato di risorse primarie in rapporto alla sua economia e che ha quindi imparato a risparmiare materiali e utilizzare scarti e rifiuti come *input* nei processi produttivi. In tal modo, sono molto alte le *performance* di riciclo/recupero di rifiuti industriali, soprattutto nelle regioni più industrializzate del Nord.

Nella fase più recente, in linea con lo sviluppo delle politiche europee di CE di cui abbiamo detto, l'Italia, come e forse più di altri Paesi, è una fucina di idee imprenditoriali e *business models*, innovazioni di processo e prodotto con caratteristiche di circolarità. Per avere un'idea di questi sviluppi, è utile guardare alla *Circular Economy European Stakeholder Platform*⁵¹. I casi di *good practice* di imprese italiane presentati nella piattaforma erano 172 su un totale di 767 per la EU27 nel 2023, e vanno dallo sviluppo di applicativi per la gestione dei flussi di materiali fino a nuovi prodotti fatti con materiali di scarto. Molte di queste innovazioni sono originate da piccole imprese e *start up* innovative, che non hanno ancora sviluppato un proprio mercato. Molte altre esperienze esistono che non sono raccolte nella piattaforma⁵².

Oltre a tale fermento dal basso, c'è un esteso impegno dei grandi gruppi industriali italiani per lo sviluppo di CE sia internamente, sia per innovazioni di prodotti o servizi da fornire al mercato⁵³. È questo il caso anche dei grandi attori dell'energia e della chimica, ad esempio ENI e Versalis, che stanno investendo molto in CE, ad esempio sui biocarburanti di seconda generazione da rifiuti e su modelli di *biorefinery* come quelli prima menzionati⁵⁴.

⁵¹ Si veda il link: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁵² Fondazione Symbola 2022.

⁵³ Caroli 2021.

⁵⁴ Zoboli *et al.* 2020.

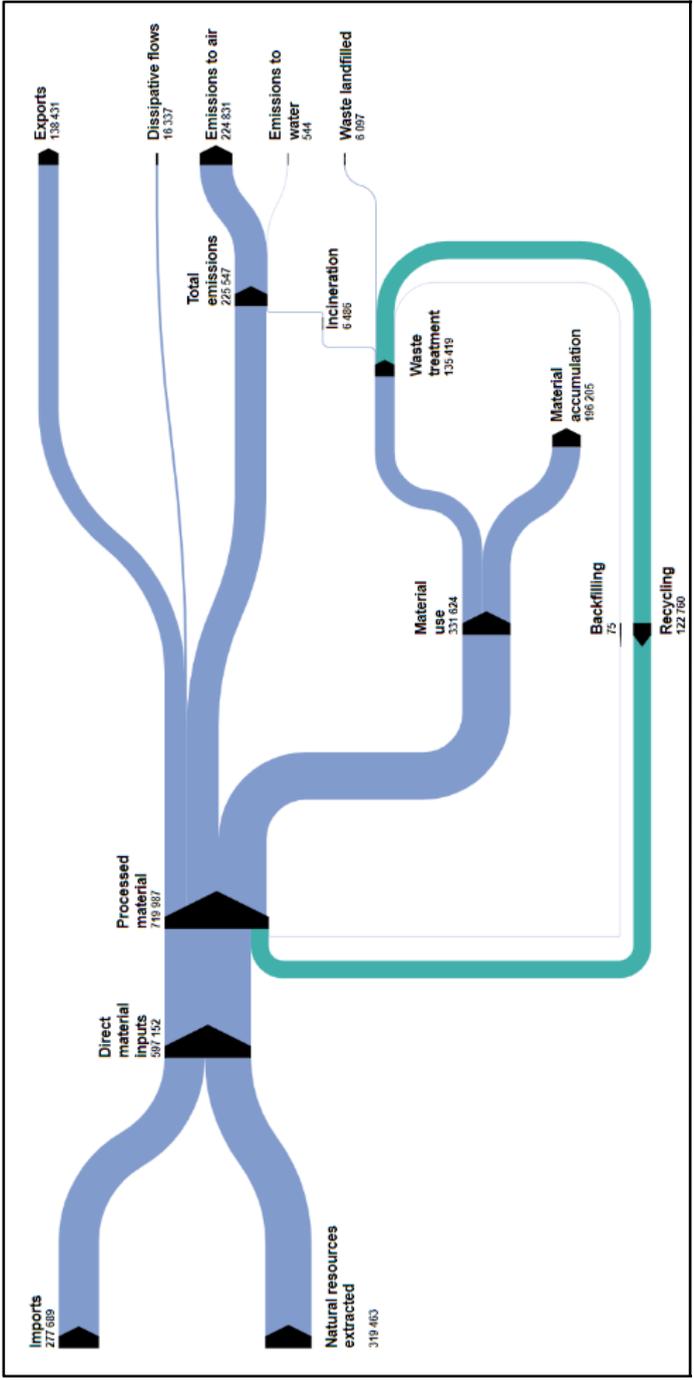
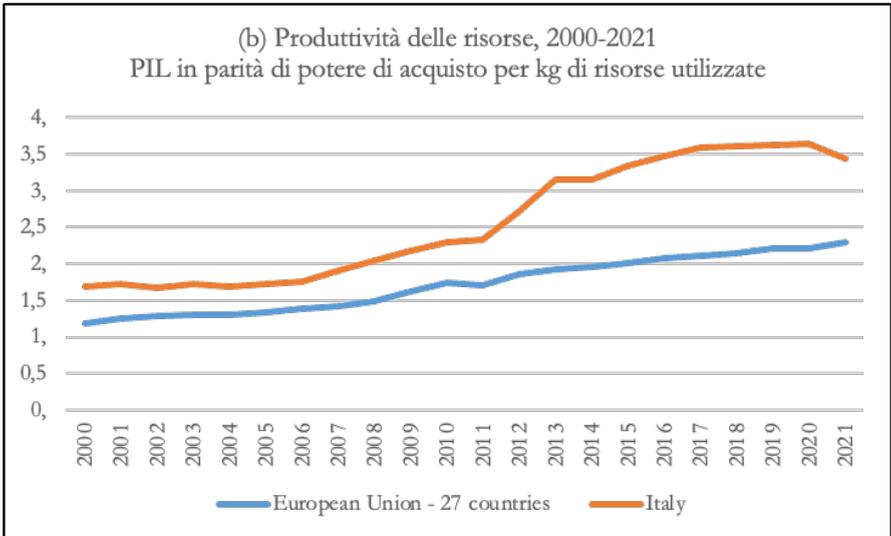
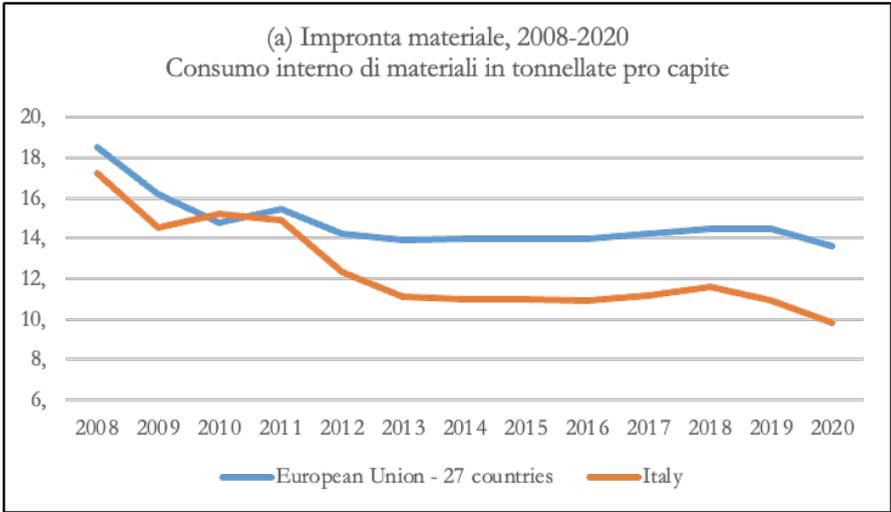


Fig.06. Flussi dei materiali in Italia, 2020. Fonte: ETC CE 2022. © European Topic Centre on Circular economy and resource use, 2022. Reproduction is authorized



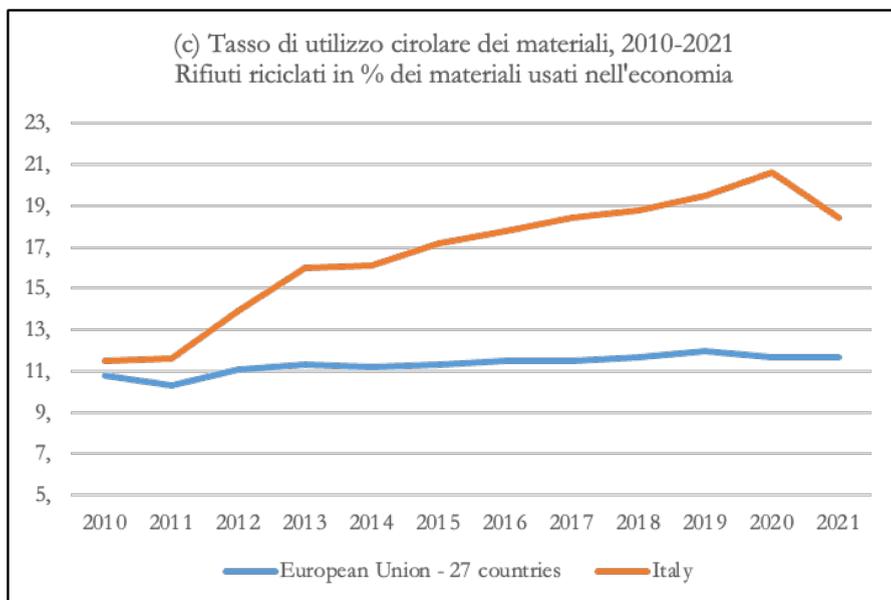


Fig.07. Indicatori di circolarità ed efficienza materiale dell'Italia in confronto con la media EU27. Fonte: elaborazioni dell'autore su dati Eurostat.

Questa immagine di un Paese con grande attività innovativa per la CE, va tuttavia confrontata con i risultati della ricerca empirica su grandi campioni di imprese. Ne emerge una visione più prudente sulla traiettoria di CE nelle imprese italiane, specie nelle PMI. Alcuni lavori⁵⁵ mettono in evidenza, anche in ambito europeo comparato, che l'adozione delle innovazioni riferibili alla circolarità materiale è lenta, che esistono barriere di varia natura, ad esempio di conoscenza, che le innovazioni circolari non sono difficilmente isolabili da strategie complessive di innovazione o eco-innovazione, ad esempio su energia, che le dimensioni di impresa contano, con un chiaro vantaggio per le medio-grandi o per quelle che appartengono a gruppi di imprese e sono aperte al commercio internazionale. Inoltre, emerge che la formazione del personale è importante e che *Industria 4.0* ha favorito l'adozione di innovazioni di circolarità. Infine, emergono altri due aspetti: le politiche pubbliche contano per spingere alle innovazioni circolari, ma tali innovazioni, tuttavia, non sono sempre di adeguato ritorno economico.

⁵⁵ Pronti *et al.* 2023, Cainelli *et al.* 2020.

Queste barriere potranno essere in parte ridotte, e le capacità circolari potranno essere aumentate, con gli investimenti finanziati dal PNRR. Nell’ambito della Missione “*Rivoluzione verde e transizione ecologica*”, dotata di oltre 55 miliardi di finanziamenti, largamente allocati alla transizione energetica, l’economia circolare nel senso ristretto di “*Economia circolare e gestione dei rifiuti*” riceve finanziamenti per i “*Progetti ‘faro’ di economia circolare*” (600 milioni) e per la “*Realizzazione di nuovi impianti di gestione rifiuti e ammodernamento di impianti esistenti*” (1,5 miliardi)⁵⁶. Altri investimenti del PNRR possono avere contenuti di CE nel senso più ampio quando includono innovazioni industriali di processo o prodotto che aumentano l’efficienza d’uso dei materiali. Dal lato ricerca e innovazione, diversi progetti di CE come innovazione industriale emergono o emergeranno dalla Missione 4, in particolare dalla Componente 2 “*Dalla ricerca all’impresa*”, dotata di circa 6 miliardi. Risultati di CE potranno infatti emergere dai “*Campioni Nazionali*” (in particolare Agritech), dai Partenariati Estesi (in particolare GRINS, *3A-Italy* sul *Made in Italy* circolare e sostenibile e *ON-Foods*), e dagli “*Ecosistemi dell’innovazione*” (in particolare ECOSISTER, NODES, MUSA)⁵⁷. Altro potrà emergere dallo straordinario flusso di contratti di ricerca e dottorati, in particolare quelli definiti “*green*”, e di progetti PRIN finanziati su linee PON *ReactEU* e PNRR a partire dal 2022, oltretutto dai finanziamenti per le infrastrutture di ricerca. Sempre su fondi europei, sono investiti 50 milioni di *RePowerEU* per “*Approvvigionamento responsabile, riciclabile e sicuro di materie prime critiche*”, una cifra molto bassa a fronte della grande crescita di importanza strategica che, come abbiamo visto, il tema sta assumendo.

Sul fronte delle politiche va segnalato che l’Italia, ha adottato una Strategia Nazionale per l’Economia Circolare nel 2022⁵⁸. I punti centrali sono: nuovo sistema digitale di tracciabilità dei rifiuti per lo sviluppo dei mercati delle materie prime seconde e per la prevenzione della gestione illecita dei rifiuti; sviluppo di sistemi di incentivazione fiscale per supportare l’utilizzo di materiali derivanti dalle filiere del riciclo; revisione del sistema di tassazione per rendere il riciclo più conveniente dello smaltimento in discarica; promozione del diritto al riuso e alla riparazione; riforma dei sistemi di EPR (*Extended Producer Responsibility*) e dei consorzi (ad esempio CO-

⁵⁶ Si veda il sito *PNRR Italia Domani* al link: <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogeing/it/it/home.html> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁵⁷ Si veda il sito MUR al link: <https://www.mur.gov.it/it/infografiche/pnrr-iniziative-di-sistema-focus-territoriale> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁵⁸ MASE 2022. Si veda il link: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/PNRR/SEC_21.06.22.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].

NAI) per supportare il raggiungimento degli obiettivi comunitari; rafforzamento degli strumenti normativi esistenti (legislazione *End of Waste*, Criteri Ambientali Minimi) e l'applicazione di questi strumenti a settori strategici (costruzioni, tessile, plastiche, RAEE); supporto allo sviluppo di progetti di simbiosi industriale. Si tratta di una strategia certamente allineata all'*Action Plan* europeo, in particolare in tema di *eco-design* e EPR.

L'Italia è dunque, per storia e capacità, un terreno fertile per lo sviluppo della CE. Tuttavia, se da un lato si avvantaggia della sua struttura industriale leggera di PMI e *start-up* e della diffusa imprenditorialità che innova con fantasia, dall'altro lato può soffrire limitazioni proprio a causa della piccola dimensione delle imprese. Il mondo della ricerca può dare il suo contributo anche sulla base delle irripetibili opportunità offerte da *Next Generation EU* e *REPowerEU*, e dalla crescente attenzione della ricerca europea, attraverso *Horizon Europe*, per queste dinamiche industriali.

7. Conclusioni

L'economia circolare è un paradigma industriale di importante prospettiva che mantiene una centralità del sistema rifiuti ma lo colloca in una prospettiva integrata di flussi dei materiali e di innovazioni per l'efficienza d'uso delle risorse. Si tratta di un paradigma che, nonostante la fioritura di elaborazioni concettuali degli ultimi anni, sfugge a un definitivo confinamento i termini di logiche, modelli di *business*, settori, processi e materiali, e riguarda invece l'intero sistema produttivo, configurando un "sistema di innovazione" nel senso definito dagli economisti dell'innovazione⁵⁹. Unico elemento certo è la persistente importanza del sistema rifiuti come snodo di chiusura, o di non chiusura, dei cicli dei materiali.

In questa fase storica, nonostante la breve crisi energetica e delle materie prime indotta dai drammatici eventi geopolitici e militari nel 2022-2023, non vi sono segnali di scarsità globale di energia e materie prime che, registrando bassi prezzi reali e alte riserve mondiali, non possono indurre segnali di mercato per risparmiare materiali, innovare per l'efficienza e aumentare la circolarità attraverso riciclo e recupero o riuso.

In Europa sono quindi le politiche pubbliche a spingere l'economia circolare. A partire dagli anni '70, le politiche dei rifiuti hanno ottenuto rilevanti successi, seppure non definitivi e differenziati tra Paesi, nel mantenere i materiali nei cicli produttivi attraverso gradualmente ma persistenti spostamenti verso il riciclo, il recupero e il riuso. Gli sviluppi più recenti delle po-

⁵⁹ Zoboli *et al.* 2019.

litiche, in particolare lo EGD e il suo *Action Plan* per l'economia circolare, hanno ulteriormente rafforzato le spinte delle politiche rendendole pervasive e centrali per le dinamiche industriali indotte⁶⁰.

All'alta intensità di politiche, spesso di impostazione strettamente normativa e regolativa, sono associati insufficienze, insuccessi e contraddizioni delle politiche stesse. Lo abbiamo evidenziato attraverso gli esiti, contraddittori o inefficaci, nel caso delle plastiche, di alcuni grandi mercati dei materiali secondari, e della competizione tra usi energetici e usi industriali dei materiali biologici.

Ora le stesse politiche europee del clima, dell'energia e della circolarità devono affrontare il nuovo scenario internazionale dove, nonostante il permanere di bassi prezzi reali e alte riserve globali di risorse, la geopolitica e la geo-economia generano scarsità di risorse per l'Europa, con rischi sia per la traiettoria industriale delle *Clean-Tech* e delle *Net Zero Industries* sia per l'approvvigionamento di materiali strategici e critici. La CE verrà quindi spinta a contribuire alla sicurezza di approvvigionamento attraverso sempre più ambiziosi obiettivi di riciclo e riuso e attraverso innovazioni di dematerializzazione efficiente, a salvaguardia della "miniera interna" dei materiali a uso industriale.

Con ciò, la CE assume anche un ruolo di strategia geo-economica per l'Europa, e quindi gode e godrà di risorse pubbliche significative, comprese quelle dei programmi europei di ricerca e innovazione. Questi sviluppi rendono la CE parte integrante di auspicabili progressi verso una vera politica industriale a scala europea⁶¹.

In tale quadro, l'Italia è dotata di un sistema produttivo altamente circolare rispetto agli altri Paesi europei. Sono fattori storici e strutturali a determinare questo risultato, alimentato anche da un fiorire di innovazioni circolari da parte di PMI e *start up* e da significativi investimenti di grandi attori industriali. In Italia sono disponibili, in questi anni, significative risorse finanziarie pubbliche per innovazioni circolari nel sistema produttivo, ma sulla stabilità futura di queste risorse pubbliche non è prudente scommettere.

⁶⁰ Díaz López *et al.* 2023.

⁶¹ Tagliapietra *et al.* 2023.

Bibliografia

- Allwood 2014 J.M. Allwood, *Squaring the circular economy: the role of recycling within a hierarchy of material management strategies*, in E. Worrell, M. Reuter (eds.), *Handbook of Recycling: State-of the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, 2014, pp. 445-477.
- Barbieri *et al.* 2021 N. Barbieri, A. Bassi, I. Beretta, V. Costantini, A. D’Amato, M. Gilli, G. Marin, M. Mazzanti, S. Paleari, S. Speck, S. Tagliapietra, R. Zoboli, M. Zoli, *Sustainability transition and the European Green Deal: A macro-dynamic perspective*, Eionet Report – ETC/WMGE 2021/8, available at: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/sustainability-transition-and-the-european-green-deal-a-macro-dynamic-perspective> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Bio by Deloitte 2014 Bio by Deloitte, *Development of guidance on extended producer responsibility – final report prepared for the European Commission*, 2014, available at: <https://www.ecologic.eu/15139> [consultato il 15 gennaio 2025].
- BIO-TIC 2015 BIO-TIC, *The bioeconomy enabled – A roadmap to a thriving industrial biotechnology sector in Europe*, 2015, available at: <https://www.pnoconsultants.com/wp-content/uploads/2017/09/BIO-TIC-roadmap.pdf> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Bocken *et al.* 2016 N.M.P. Bocken *et al.*, *Product design and business model strategies for a circular economy*, *Journal of Industrial and Production Engineering* 33(5), 2016, available at: <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Cainelli *et al.* 2020 G. Cainelli, A. D’Amato, M. Mazzanti, *Resource efficient eco-innovations for a circular economy: evidence from EU firms*, *Research Policy* 49, 1, 2020, 103827.
- Camia *et al.* 2018 A. Camia, N. Robert, R. Jonsson, R. Pilli, S. García-Condado, R. López-Lozano, M. van der Velde, T. Ronzon, P. Gurría, R. M’Barek, S. Tamosiunas, G. Fiore, R. Araujo, N. Hoepffner, L. Marelli, J. Giuntoli, 2018, *Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment*, EUR 28993 EN, Joint Research Centre, Ispra.
- CPLC 2017 CPLC (Carbon Pricing Leadership Coalition), *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, Washington D.C., 2017.

- Caroli 2021 G.M. Caroli (a cura di), *L'Italia sostenibile. L'economia circolare per la politica industriale del Paese*, Roma, Luiss University Press 2021.
- D'Amato *et al.* 2019 A. D'Amato, S. Paleari, M. Pohjakallio, I. Vanderreydt, R. Zoboli, *Plastics waste trade and the environment*, Eionet Report – <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/plastics-waste-trade-and-the-environment> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Di Francesco *et al.* 2024 E. Di Francesco, R.S. Gilli, P. Jensen, S. Manoochehri, G. Marin, A. Specker, S. Tagliapietra, R. Zoboli, *Environmental Impact of Material Supply Chain Disruptions*, ETC CE Report 2024/3, available at: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-report-2024-3-environmental-impact-of-material-supply-chain-disruptions> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Díaz López *et al.* 2023 F.J. Díaz López, M. Mazzanti, R. Zoboli, *Towards a sustainable, circular, innovative and socially fair economy: An introduction*, in F.J. Díaz López, M. Mazzanti, R. Zoboli (eds.), *Handbook on Innovation, Society and the Environment*, Cheltenham, Edward Elgar 2023, pp. 2-22.
- EEA 2018 EEA (European Environment Agency), *The circular economy and the bioeconomy. Partners in sustainability*, EEA Report No 8/2018.
- EEA 2019 EEA (European Environment Agency), *The sustainability transition in Europe in an age of demographic and technological change: an exploration of implications for fiscal and financial strategies*, EEA Report No. 23/2019, available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-transition-in-europe> [consultato il 15 gennaio 2025].
- EEA 2022 EEA (European Environment Agency), *Investigating Europe's secondary raw material markets*, EEA Report No. 12/2022 (edited by M. zu Castell-Rudenhause, M. Wahlström, D. Nelen, Y. Dams, S. Paleari, R. Zoboli, Henning Wilts, Ioannis Bakas), available at <https://www.eea.europa.eu/publications/investigating-europes-secondary-raw-material> [consultato il 15 gennaio 2025].
- EMF 2012 EMF (Ellen MacArthur Foundation), *Towards the Circular Economy*, vol. I, *An economic and business rationale for an accelerated transition*, 2012, available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an> [consultato il 15 gennaio 2025].

ETC CE 2022	ETC CE, <i>Circular economy country profile – Italy</i> , ETC CE Report 2022/5 – Italy, EEA, available at: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-products/etc-ce-report-5-2022-country-profiles-on-circular-economy/italy-ce-country-profile-2022_for-publication.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2018a	European Commission, <i>A European Strategy for Plastics in a Circular Economy</i> , 2018, available at: https://www.europarc.org/wp-content/uploads/2018/01/Eu-plastics-strategy-brochure.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2018b	European Commission, <i>Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A European Strategy for Plastics in a Circular Economy</i> , COM(2018) 28 final, available at: https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2018-28-final-a [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2019a	European Commission, <i>Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, The European Green Deal</i> , COM(2019)640, final, available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52019DC0640 [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2019b	European Commission, <i>Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment</i> , OJ L 155, 12 June 2019, pp. 1-19, available at: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2020	European Commission, <i>Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe</i> , COM(2020)98, final, available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN [consultato il 15 gennaio 2025].
European Commission 2023a	European Commission, <i>Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe’s net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net-Zero Industry Act)</i> , COM(2023) 161, available at: https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6448c360-c4dd-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF [consultato il 15 gennaio 2025].

- European Commission 2023b European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*, COM(2023) 62 final, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0062> [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Commission 2023c European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/102*, COM(2023)160, available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en [consultato il 15 gennaio 2025].
- European Parliament 2024 European Parliament, *Critical raw materials act*, 2024, available at: <https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Fischer-Kowalski *et al.* 2011 M. Fischer-Kowalski, F. Krausmann, S. Giljum, S. Lutter, A. Mayer, S. Bringezu, H. Weisz, *Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting*, *J Ind Ecol.* 15(6), 2011, pp. 855-876.
- Fondazione Symbola 2022 Fondazione Symbola, *Green Italy 2022*, 2022, available at: <https://symbola.net/ricerca/green-italy-2022/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Geissdoerfer *et al.* 2017 M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. Bocken, E.J. Hultink, *The Circular Economy: A new sustainability paradigm?*, *Journal of Cleaner Production* 143, 2017, pp. 757-768.
- Ghisellini *et al.* 2016 P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*, *J. Clean. Prod.* 114, 2016, pp. 11, 32, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ghisetti 2021 C. Ghisetti, *Consumi pubblici, 'green public procurement' ed economia circolare*, in Zoboli R. (a cura di), *Consumi e consumatori sostenibili*, Milano, Vita e Pensiero 2021.
- Haas *et al.* 2015 W. Haas, F. Krausmann, D. Wiedenhofer, M. Heinz, *How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005*, *Journal of Industrial Ecology* 19(5), 2015, pp. 765-777.

- IMF 2021 IMF, *Five things to know about carbon pricing*, available at: <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/five-things-to-know-about-carbon-pricing-parry> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Kirchherr *et al.* 2017 J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, *Conceptualizing the circular economy: An analysis of definitions*, *Resources, Conservation & Recycling* 127, 2017, pp. 221-232.
- Kneese *et al.* 1970 A.V. Kneese, R.U. Ayres, R.C. d'Arge, *Economics and the Environment, A Materials Balance Approach*, London, Routledge 1970.
- Maggioni 2017 M.A. Maggioni, *La Sharing Economy. Chi guadagna e chi perde*, Bologna, il Mulino 2017.
- Marin *et al.* 2018 G. Marin, F. Nicolli, R. Zoboli, *Catching-up in waste management. Evidence from the EU*, *Journal of Environmental Planning and Management* 61, 2018 - 11, pp. 1861-1882.
- MASE 2022 MASE, *Strategia nazionale per l'economia circolare*, 2022, disponibile al link: <https://www.mase.gov.it> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Massarutto 2014 A. Massarutto, *The Long and Winding Road to Resource Efficiency – An Interdisciplinary Perspective on Extended Producer Responsibility*, *Resource Conservation and Recycling* 85, 2014, pp. 11-21.
- Mazzanti-Zoboli 2006 M. Mazzanti, R. Zoboli, *Economic Instruments and Induced Innovation: The European Policies on End-of-Life Vehicles*, *Ecological Economics* 58(2), 2006, pp. 318-337.
- Mazzanti-Zoboli 2008 M. Mazzanti, R. Zoboli, *Waste generation, waste disposal and policy effectiveness: Evidence on decoupling from the European Union*, *Resource, Conservation and Recycling* 52(10), 2008, pp. 1221-1234.
- McKinsey & Company 2020 McKinsey & Company, *Plastics recycling: Using an economic-feasibility lens to select the next moves*, March 2020, available at: <https://www.mckinsey.com/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Metic-Pigosso 2022 J. Metic, D.C.A. Pigosso, *Research avenues for uncovering the rebound effects of the circular economy: A systematic literature review*, *Journal of Cleaner Production* 368, 2022, p. 133.
- OECD 2014 OECD, *The State of Play on Extended Producer Responsibility: Opportunities and Challenges*, *Global Forum for the Environment: Promoting Sustainable Materials Management through EPR*, Issues Paper, 17-19 June 2014.

- OECD 2016 OECD, *Extended producer responsibility – updated guidance for efficient waste management*, Paris, OECD Publishing 2016.
- OECD 2017 OECD, *The macroeconomics of the circular economy transition: A critical review of modeling approaches*, Paris, OECD Publishing 2017 (OECD Working Paper, 130).
- OECD 2018 OECD, *Meeting Policy Challenges for a Sustainable Bioeconomy*, 2018, available at: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264292345-en> [consultato il 15 gennaio 2025].
- OECD 2024 OECD, *Extended Producer Responsibility, Basic facts and key principles*, Paris, OECD Publishing 2024, available at: <https://www.oecd.org/env/extended-producer-responsibility-67587b0b-en.htm> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Paleari-Reichel 2019 S. Paleari, A. Reichel, *EU environmental targets and objectives 2015–2050*, Eionet Report – ETC/WMG 2019/2.
- Pronti *et al.* 2023 A. Pronti, E. Zecca, D. Antonioli, *Micro is beautiful. Adoption of eco-innovations in micro-firms*, *Business Strategy and the Environment* 33(2), 2023, pp. 1341-1368.
- Pronti-Zoboli 2024 A. Pronti, R. Zoboli, *Institutional Quality, Trust in Institutions, and Waste Recycling Performance in the EU27*, *Sustainability* 16, 2024, 892.
- Quadrio Curzio *et al.* 1994 A. Quadrio Curzio, M. Fortis, R. Zoboli, *Innovation, resources and economic growth*, Berlin, Springer-Verlag. 1994, p. 308.
- Quadrio Curzio-Zoboli 1995 A. Quadrio Curzio, R. Zoboli, *Ambiente e dinamica globale. Scienza, tecnologia ed economia a confronto*, Bologna, Il Mulino 1995.
- Quadrio Curzio-Zoboli 2020 A. Quadrio Curzio, R. Zoboli, *Decarbonization: The next grand transition*, *Balzan Papers III*, 2020, pp. 219-230.
- Rammelt-Crisp 2014 C. Rammelt, P. Crisp, *A systems and thermodynamics perspective on technology in the circular economy*, *Real-World Econ Rev* 68, 2014, pp. 25-40.
- Tagliapietra *et al.* 2023 S. Tagliapietra, R. Veugelers (eds.), *Sparking Europe's New Industrial Revolution: A policy for net-zero, growth and resilience*, Bruegel Blueprint Series 33, 2023, available at: <https://www.bruegel.org/system/files/2023-08/Bruegel%20Blueprint%2033%20080823%20web.pdf> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Winans *et al.* 2017 K. Winans, A. Kendall, H. Deng, *The history and current applications of the circular economy concept*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 2017, pp. 825-833.
- Zoboli 2012 R. Zoboli, *Scarsità naturali e dinamica economica*, in G. Antonelli, M.A. Maggioni, F. Pellizzari, R. Scazzieri, G. Pegoretti, R. Zoboli (a cura di), *Economia come scienza sociale. Teoria, istituzioni, storia. Studi in onore di Alberto Quadrio Curzio*, Bologna, Il Mulino 2012.
- Zoboli 2018 R. Zoboli, *L'economia circolare per riusare anche i saperi?*, in L. Paolazzi, T. Gargiulo, M. Sylos Labini (a cura di), *Le sostenibili carte dell'Italia*, Venezia, Marsilio 2018, pp. 139-166.
- Zoboli *et al.* 2019 R. Zoboli, N. Barbieri, C. Ghisetti, G. Marin, S. Paleari, *Towards an Innovation-intensive Circular Economy. Integrating research, industry, and policy*, FEEM Report, edited by S. Pareglio, June 2019, available at: https://www.feem.it/m/publications_pages/rpt-economiacircolare.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].
- Zoboli *et al.* 2020 R. Zoboli, M. Mazzanti, S. Paleari, L. Bonacorsi, E. Chioatto, A. D'Amato, C. Ghisetti, M.A. Maggioni, E. Zecca, *Energy and the Circular Economy: Filling the gap through new business models within the EGD*, FEEM Report, edited by S. Pareglio, December 2020, available at: <https://www.feem.it/en/publications/reports/energy-and-the-circular-economy-filling-the-gap-through-new-business-models-within-the-egd/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Zotti-Bigano 2019 J. Zotti, A. Bigano, *Write circular economy, read economy's circularity. How to avoid going in circles*, Economia Politica, Journal of Analytical and Institutional Economics 36(2), 2019, pp. 629-652.

CO₂: da problema a risorsa

Gianfranco Pacchioni*

Non ce ne rendiamo conto, ma nel breve viaggio da Milano alla casa di vacanza in Liguria una normale auto *diesel* emette 30 chili di anidride carbonica (CO₂), come il peso delle valigie che ci portiamo appresso. Nel corso dei 200.000 chilometri di vita, la stessa auto avrà emesso 32 tonnellate di CO₂. Noi stessi, con la respirazione emettiamo ogni giorno un chilo di CO₂, il che equivale a 2,5 miliardi di tonnellate emesse dall'intero genere umano ogni anno. Ma la CO₂ è una molecola strana, non ha odore, non è colorata, è impalpabile. I nostri sensi non la percepiscono e quindi per noi semplicemente non esiste.

Da quando ci si è resi conto che un aumento progressivo della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera provoca danni ambientali e climatici, la CO₂ è divenuta un nemico da combattere, un pericoloso inquinante da eliminare. Ma la CO₂ è vita, è la sorgente insostituibile del carbonio di cui è fatta la biomassa del pianeta, è la riserva di materia prima di cui è fatto il mondo vivente, ed è pure quello che di noi resterà una volta che avremo concluso il nostro percorso su questa terra. Sì, perché la maggior parte del nostro corpo è fatta di acqua ma poi viene il carbonio, l'elemento fondamentale di cui sono fatte le proteine, i carboidrati, i lipidi, e tutte le sostanze essenziali per l'esistenza di un organismo vivente. Esistiamo grazie all'azione fondamentale di quel processo che è la fotosintesi, un insieme estremamente complicato di reazioni chimiche attraverso cui due sostanze semplici e fondamentali per la vita, l'acqua e l'anidride carbonica, si combinano grazie all'azione della luce a formare catene complesse di atomi di carbonio. È parte fondante del ciclo del carbonio, un processo

* Gianfranco Pacchioni: Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere (m.e.). Professore ordinario di Chimica generale e inorganica presso l'Università degli Studi Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali, e-mail: gianfranco.pacchioni@unimib.it. Gli argomenti riportati in questo articolo sono stati trattati dall'autore in modo esteso nel libro *W la CO₂. Possiamo trasformare il piombo in oro?*, Bologna, Il Mulino 2021.

che dura da 3,5 miliardi di anni e in cui la CO₂ si forma e si consuma in un ciclo continuo ma essenziale, senza il quale la vita sul pianeta sarebbe destinata a spegnersi in brevissimo tempo.

1. Un po' di storia

Con l'avvento della rivoluzione industriale, il crescente fabbisogno di energia determina un consumo crescente di combustibili fossili, carbone prima, petrolio e gas naturale poi, i cui prodotti finali sono proprio CO₂ e acqua. È inevitabile che prima o poi questa CO₂ finisca per accumularsi nell'atmosfera. La CO₂ non è tossica, almeno alle basse concentrazioni, altrimenti non potremmo bere birra, acqua gassata e prosecco. Ma ha un altro problema, meno evidente e per questo più insidioso: tende a catturare la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre, e riemetterla, impedendone la dissipazione. È il famoso "effetto serra".

Il primo a realizzare che la CO₂ ha un effetto "riscaldante" fu il giovane e brillante matematico Joseph Fourier che nel 1824 sviluppò dei calcoli la cui spiegazione poteva stare solo in un effetto riscaldante dei gas presenti in atmosfera. Ma per lungo tempo l'effetto del modesto accumulo di CO₂ in eccesso venne ritenuto poco rilevante ai fini climatici. Per avere una vera e propria svolta bisogna aspettare la metà degli anni '50. Protagonista indiscusso è un chimico americano, Charles David Keeling (1928-2005). Keeling conseguì la laurea all'Università dell'Illinois nel 1948 e il dottorato alla Northwestern University nel 1953. Il suo supervisore, Malcolm Dole, aveva forti connessioni con l'industria petrolifera dove piazzava la maggior parte dei suoi allievi. Keeling però faticava a vedere per sé un futuro in questo settore, e iniziò a interessarsi di geologia, tanto da cercare posizioni di post-dottorato come chimico praticamente solo in dipartimenti di geologia. Per qualche tempo lavorò in questa veste presso il California Institute of Technology, il celebre Caltech, dove sviluppò uno strumento in grado di misurare con grande precisione e affidabilità l'anidride carbonica in campioni atmosferici.

Fu durante quei mesi che Keeling si accampò a Big Sur, una delle località mitiche della California di quegli anni. Keeling usava il suo nuovo dispositivo per misurare il livello di anidride carbonica, e trovò che era decisamente aumentato rispetto ai valori di un secolo prima. Venuto a conoscenza delle nuove misure, Roger Revelle (1909-1991), direttore della Scripps Institution of Oceanography, convinse Keeling a continuare il lavoro nel suo gruppo di ricerca. Revelle si era dedicato allo studio della chimica degli oceani e degli scambi di CO₂ con l'atmosfera, e le conoscenze di

Keeling cascavano a fagiolo. Keeling accettò, e nel 1956 iniziò la sua nuova carriera. Nel 1958 Keeling ricevette un finanziamento per effettuare regolarmente misure di concentrazione della CO₂ nell'aria. Per i suoi esperimenti scelse una base sul Mauna Loa, un vulcano di oltre 4.000 metri di altezza sull'isola di Hawaii. Scelta dettata dall'assenza di vegetazione e dalla distanza da emissioni dirette di CO₂. Le misurazioni dell'anidride carbonica presso l'Osservatorio Mauna Loa venivano effettuate con uno spettrofotometro a infrarossi calibrato secondo ben precisi standard.

Keeling iniziò a raccogliere campioni di anidride carbonica nel 1958. Le misurazioni non sembravano particolarmente stabili e in un paio d'anni di osservazioni fu chiaro che ci sono forti variazioni stagionali nei livelli di anidride carbonica, con picchi nel tardo inverno e un minimo tra la primavera e l'inizio dell'estate. Considerando però i valori medi, risultava chiaro che i livelli di anidride carbonica aumentavano costantemente di anno in anno. Già nel 1961 Keeling riportò la prima serie di misure di quella che in seguito divenne nota come "curva di Keeling", Fig. 01. I dati mostravano chiaramente un aumento medio della concentrazione di CO₂ di circa l'1% all'anno.

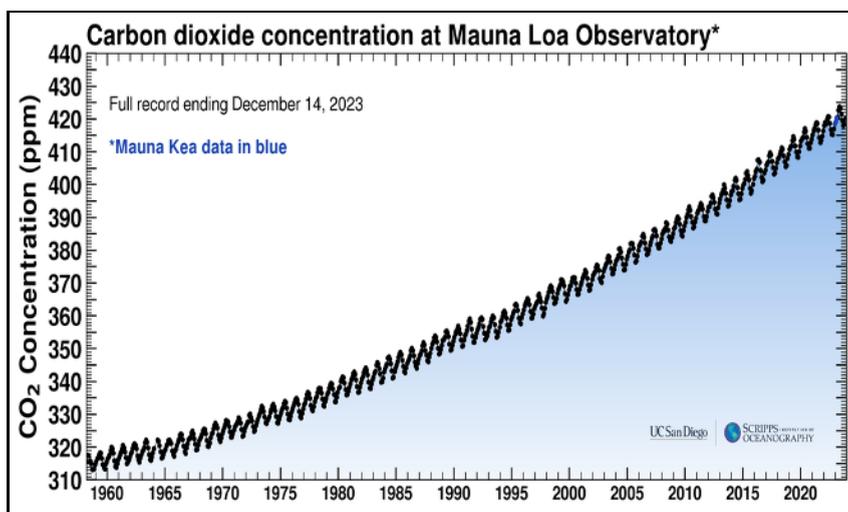


Fig.01. La curva di Keeling con gli andamenti della concentrazione di CO₂ misurati all'osservatorio di Mauna Loa nelle Hawaii dal 1958 al 2023. L'andamento seghettato della curva è dovuto alle variazioni stagionali. Fonte: <https://keelingcurve.ucsd.edu/> [consultato il 15 gennaio 2025]. © the Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego.

All'inizio degli anni '60 la National Science Foundation smise di finanziare la ricerca, definendo il risultato ormai acquisito e "di routine". Ma le conseguenze delle misure di Keeling erano chiare: c'era un aumento di gas che intrappola il calore, il che avrebbe comportato un innalzamento della temperatura della Terra. Fortunatamente furono trovati altri fondi, e le misure continuarono, e continuano tuttora in diverse parti del mondo. La raccolta di dati avviata da Keeling a Mauna Loa costituisce la sequenza più lunga di misure di concentrazione di CO₂ atmosferica al mondo, ed è considerata un indicatore affidabile dell'andamento globale nella troposfera. I dati della curva di Keeling mostrano che la concentrazione atmosferica di anidride carbonica è cresciuta da 315 ppm nel 1958 al valore record di 422 ppm nel 2023. L'aumento medio è di circa 2 ppm all'anno, ma ha subito una accelerazione negli ultimi anni (salvo ovviamente nel 2020 per la ben nota crisi economica determinata dalla epidemia del virus Covid-19).

Come dicevamo, la curva di Keeling mostra anche una variazione ciclica di circa 5 ppm dovuta ai cambiamenti stagionali nell'assorbimento di CO₂ da parte della vegetazione che in gran parte si trova nell'emisfero settentrionale del pianeta. Da un massimo che si riscontra a maggio, il livello diminuisce durante la primavera e l'estate per via di una accelerata fotosintesi per poi raggiungere il minimo a settembre, dopo di che aumenta nuovamente in autunno e in inverno quando le piante perdono le foglie che si decompongono, rilasciando CO₂. Per questo la curva di Keeling appare come una sega con dentini molto affilati, *Fig.01*.

Alla scoperta di Keeling seguirono anni di intensi dibattiti, e anche di campagne di controinformazione orchestrate soprattutto dalle grandi compagnie petrolifere in America, ma non solo. A lungo la questione restò in dubbio. Una vera e propria svolta avvenne tra la fine degli anni '90 e i primi anni del nuovo secolo. Iniziò in quegli anni una serie di misure fatte sui ghiacci profondi dell'Antartide. Quando la neve si deposita, ingloba al suo interno minuscole particelle di aria. Gli strati di neve e poi di ghiaccio che si formano forniscono quindi una sorta di stratigrafia dove ai livelli più profondi si trovano campioni di atmosfera terrestre vecchi di centinaia di migliaia di anni. Grazie a nuove tecnologie divenne possibile estrarre campioni di ghiaccio a 3-4000 metri di profondità e analizzare la composizione dell'aria e la variazione della temperatura media su un arco di 800.000 anni. Con un risultato sorprendente e preoccupante al tempo stesso: in 800.000 anni la concentrazione di CO₂ è rimasta sempre tra 180 e 300 ppm, molto inferiore a quella attuale (422 ppm). Dalla comparsa dei *Sapiens*, 200.000 anni fa, la concentrazione di CO₂ non è mai salita al di sopra delle 300 ppm. Da qui l'allarme, giustificato, e finalmente raccolto anche a livello internazionale dai vari protocolli di Tokio, Parigi etc. Le emissioni di CO₂ vanno bloccate prima che sia troppo tardi.

2. Gli scenari

Oggi i combustibili fossili, la causa principale del riscaldamento globale, producono l'80% della nostra energia e l'86% di tutte le emissioni antropiche di CO₂, oltre 35 miliardi di tonnellate ogni anno (il resto, circa 5,5 miliardi di tonnellate, è dovuto al consumo di suolo). Se con azioni drastiche riusciremo ad arrivare a emissioni zero di CO₂ entro il 2050, la temperatura media del pianeta a fine secolo aumenterà comunque di 1°C; con azioni forti l'aumento di CO₂ sarà contenuto in 540 ppm, e la temperatura salirà di 1,5-1,8 °C; con azioni blande potremo arrivare a 670 ppm con un aumento di 2,2 °C, mentre se non facciamo nulla raggiungeremo 1000 ppm con un aumento di temperatura media di 4°C, *Fig.02*. Catastrofico. Ed è bene sapere che un terzo della CO₂ prodotta oggi sarà ancora in atmosfera tra 100 anni, un quinto tra 1000 anni e una parte la troveremo ancora dopo 10.000 anni. Inoltre, la CO₂ disciolta in acqua produce un aumento di acidità e già sono stati osservati effetti molto negativi su una parte della fauna e flora acquatiche.

3. Emissioni zero?

Sin qui il problema, ben noto ma che è bene riassumere nelle sue forme generali. Importante però per far capire due cose. Da una parte dovremo smettere di produrre CO₂ nei prossimi decenni, cosa che però è molto difficile e forse impossibile, come spiegherò tra poco; dall'altra dovremo cominciare a cercare di ripulire l'aria da tutta la CO₂ che si è accumulata in due secoli di utilizzo massiccio dei combustibili fossili. La sfida è gigantesca. Circa il primo punto, anche quando saremo riusciti a effettuare una transizione energetica completa alle fonti rinnovabili, resteranno varie attività umane che producono CO₂. Innanzitutto, il consumo di suolo. Una popolazione mondiale crescente e sempre più urbanizzata sottrae terreno alle foreste, fondamentali nel recupero della CO₂ dall'aria grazie alla fotosintesi; poi la produzione di cemento, in costante aumento, una delle attività umane con la maggiore produzione di CO₂; inoltre, ci potrebbe volere molto tempo prima di avere navi e aerei in grado di viaggiare con batterie. L'aviazione civile dovrà utilizzare il cherosene ancora molto a lungo, sicuramente ben oltre il fatidico 2050; infine, la produzione di molti dei beni che utilizziamo, dalle fibre sintetiche ai farmaci, dai fertilizzanti alle materie plastiche, si basa su processi che partono dal petrolio e dai suoi derivati e producono inevitabilmente CO₂. Quindi, azzerare le emissioni di CO₂ è di fatto impossibile. Potremo ridurle fortemente, ma non andare a zero.

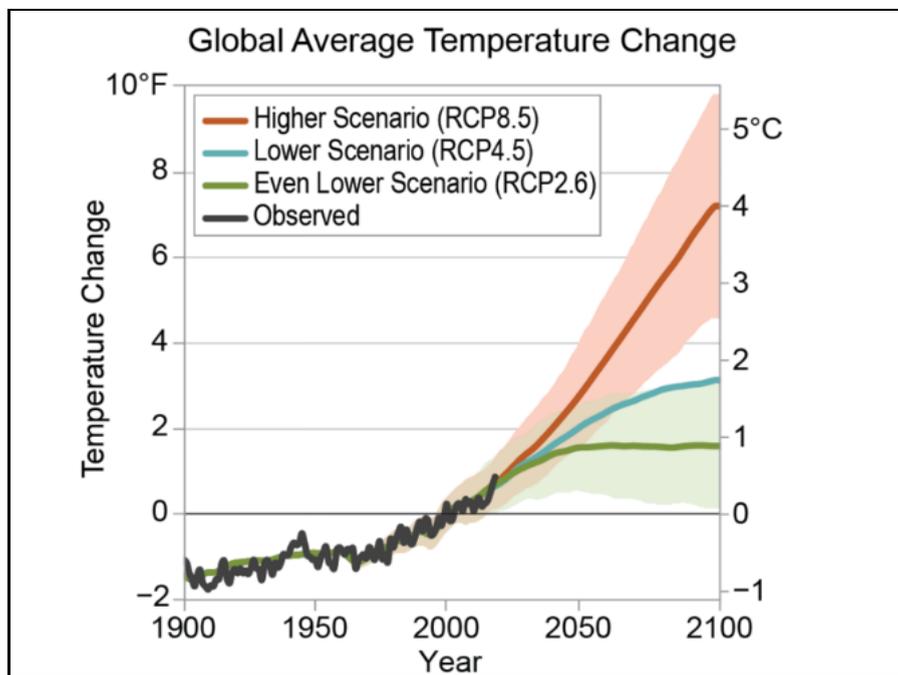


Fig.02. Principali scenari relativi all'aumento della temperatura da qui a fine secolo. Fonte: <https://sites.uci.edu/energyobserver/2018/11/23/summary-of-us-climate-assessment-impacts-risks-and-adaptation/> [consultato il 15 gennaio 2025]. © Southern California Energy.

4. La fotosintesi artificiale

Ecco che si pone il problema del riutilizzo. In fin dei conti la CO_2 è una “preziosa” materia prima. Come fare? Una via possibile, a lungo esplorata e ancora oggetto di studio, è quella di simulare i processi di fotosintesi naturale attraverso dei sistemi artificiali, dei fotocatalizzatori in grado di catturare la luce solare e usarla per trasformare CO_2 e acqua in prodotti utili come metanolo (CH_3OH), o addirittura metano o altri idrocarburi. Esempi di successo e prototipi esistono da un po' di anni ma per ora l'efficienza dei processi di fotosintesi artificiale è troppo bassa per essere competitiva sul piano economico. Non è così sorprendente: anche la fotosintesi naturale non è poi tanto efficiente, essendo in grado di convertire solo lo 0,1% dell'energia radiante catturata, ma il tutto è compensato dalla enorme quantità di biomassa presente sul pianeta. La ricerca nel campo della fotosintesi artificiale, quindi, continua nella speranza di trovare nuovi materiali in grado di migliorare sensibilmente le efficienze del processo.

5. L'idrogeno

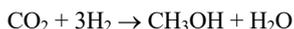
La possibilità di riutilizzare la CO₂ oggi si basa su un'altra sostanza di importanza strategica: l'idrogeno. Combinando la CO₂ con l'idrogeno attraverso reazioni ben note di cui parleremo tra poco è possibile produrre sostanze utili, inclusi veri e propri combustibili. Ma c'è un problema. Oggi si producono al mondo circa 70 milioni di tonnellate di idrogeno ogni anno per varie applicazioni industriali, la principale delle quali è la sintesi dell'ammoniaca (NH₃), alla base dei fertilizzanti e quindi dei prodotti agricoli. Ma l'idrogeno oggi viene prodotto a partire dal metano con un processo chiamato *steam reforming*, in cui alla fine oltre a idrogeno si produce anche CO₂. È l'idrogeno grigio di cui ogni tanto si parla, che diventa blu se la CO₂ prodotta viene poi sequestrata e non immessa in atmosfera. Ma è un circolo vizioso. Per riutilizzare la CO₂ serve l'idrogeno, l'idrogeno lo ricaviamo dai combustibili fossili generando CO₂, e siamo daccapo. Ma tutto cambia se l'idrogeno viene prodotto per un'altra via, totalmente sostenibile e davvero green: l'elettrolisi dell'acqua. Si tratta di un processo scoperto per caso all'inizio dell'Ottocento da due chimici inglesi, Anthony Carlisle e William Nicholson: applicando una differenza di potenziale a due elettrodi si può scindere l'acqua nei suoi componenti, idrogeno e ossigeno. Se l'energia elettrica necessaria proviene da fonti rinnovabili (solare, eolico, etc.) l'idrogeno viene prodotto in modo sostenibile, senza generare CO₂. È il cosiddetto idrogeno verde, l'unico che potrà veramente cambiare il paradigma¹. Grazie alla crescita costante della produzione di energia elettrica con fonti rinnovabili e al miglioramento dei processi, il costo di produzione dell'idrogeno verde sta scendendo dai 4-5 euro al chilo di qualche anno fa ai 2,50 euro al chilo, avvicinandosi a quello del tradizionale idrogeno grigio che si aggira attorno a 1-1,5 euro al chilo. Ma attenzione: nel costo dell'idrogeno grigio non sono inclusi i costi ambientali, ma solo quelli della materia prima, metano o altri idrocarburi. È ora invece di mettere in conto tutti i costi, non solo quelli estrattivi.

Oggi gli analisti ritengono che fino al 2030 produrre idrogeno grigio resterà più vantaggioso economicamente (senza contare ovviamente i costi ambientali). Sino a quella data, la tecnologia dell'idrogeno blu, con lo stoccaggio della CO₂ nel sottosuolo, è considerata la tecnologia dell'idrogeno a basse emissioni di carbonio economicamente più vantaggiosa. Ma col passare del tempo l'idrogeno verde diventerà competitivo e la parità dei costi con l'idrogeno grigio prodotto da combustibili fossili dovrebbe arrivare nel 2050.

¹ Hermesmann *et al.* 2022; Oliveira *et al.* 2021.

6. Verso gli *e-fuels*

Una volta ottenuto l'idrogeno, resta l'ultimo passaggio, forse il più difficile: usarlo per trasformare la CO₂ in combustibile. Come vedremo per fare questo serve altra energia, ma se questa viene da fonti pulite e rinnovabili, allora anche benzina, cherosene e metano prodotti in questo modo lo saranno, e potremo parlare di combustibili “solari”, *solar fuels*, o *e-fuels*². Il carbonio della CO₂, perdendo i suoi elettroni a favore dell'ossigeno, si è ossidato e ha sceso sino al termine la strada che lo ha spinto nel fondo valle energetico, portandolo a far parte di una molecola stabile, una sorta di batteria scarica. Ora si tratta di ricaricarla, di risalire la china, e ritrasformare la CO₂ in molecole ad alto contenuto energetico. Per far questo occorre rompere la molecola, liberare il carbonio da almeno uno dei suoi legami con l'ossigeno, meglio ancora se tutti e due, e sostituirli con nuovi legami con l'idrogeno. Ecco perché ci serve l'idrogeno, una molecola ad alto contenuto energetico, un vettore di energia. In questo processo l'idrogeno molecolare dovrà cedere i suoi elettroni al carbonio della CO₂ (in linguaggio chimico, riducendolo). Il primo passo consiste nel trasformare la CO₂ in CO, ma si può andare oltre, sino a formare metanolo (CH₃OH), metano (CH₄), e via via altri preziosi composti pronti per essere utilizzati come combustibili o come materie prime:



Come si vede si parte da anidride carbonica, che, reagendo con tre molecole di idrogeno su adeguati catalizzatori, forma metanolo, un alcol, parente del più popolare e apprezzato alcol etilico o etanolo. Il metanolo brucia bene, è un bel combustibile, o anche una nuova sostanza da cui partire per fare altre cose. Quella sopra descritta è una reazione diretta, ben nota e “rodada”. Un impianto di conversione di anidride carbonica in metanolo esiste da tempo in Islanda e nel 2011 la *Carbon Recycling International* è diventata la prima azienda a produrre e vendere carburanti liquidi per trasporto utilizzando solo anidride carbonica, acqua ed elettricità da fonti rinnovabili, in particolare geotermia. L'impianto prende il nome da George Olah (1927-2017), premio Nobel per la chimica nel 1994 e tra i primi a sostenere la creazione di una economia a metanolo³. Ha una capacità di cinque milioni di litri all'anno ed è in grado di catturare e utilizzare circa il 10% dell'anidride carbonica emessa dalla vicina centrale elettrica di

² Ramirez *et al.* 2021; Ueckerdt *et al.* 2021.

³ Olah 2005.

Svartsengi, una cinquantina di chilometri dalla capitale Reykjavík. Un impianto pilota dimostrativo simile è stato realizzato in Germania e un altro, in fase di progetto in Cina, sarà costruito nella città di Anyang, e riciclerà circa 150.000 tonnellate di CO₂ all'anno (pari alle emissioni annuali di 40.000 auto) per produrre 180.000 tonnellate di metanolo. Uno studio recente ha analizzato i costi per produrre metanolo da CO₂ catturata direttamente dall'aria utilizzando energia eolica, giungendo alla conclusione che gli investimenti maggiori sono relativi agli elettrolizzatori (45%), e alla cattura della CO₂ dall'aria di cui parleremo più avanti (50%), mentre il sistema di sintesi del metanolo pesa solo per il 5%.

Secondo questo studio il metanolo prodotto usando CO₂ atmosferica, acqua e elettricità da fonti rinnovabili sta diventando un'opzione realistica a costi ragionevoli di 800-900 dollari per tonnellata (circa il doppio del costo attuale del metanolo tradizionale). Certo, bisogna essere realisti, la natura non si piega facilmente ai nostri voleri. Restano problemi legati alla termodinamica del processo per cui servono grandi pressioni, non sono tutte rose e fiori. Insomma, per ora questa è una promessa concreta che richiede ancora miglioramenti importanti, ma il percorso è iniziato.

7. Benzina sintetica

Altrettanto e forse più interessante sul piano pratico è un'altra via, quella di spezzare la molecola di CO₂ togliendo di netto un atomo di ossigeno. Per farlo serve sempre il solito idrogeno:

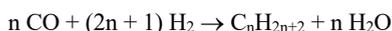


Al profano l'aver tolto un atomo di ossigeno dalla CO₂ e averla trasformata in una molecola semplice ma tossica, CO, può sembrare una cosa banale e non particolarmente attraente. E in effetti attraente non lo è, ma posso garantire che non è nemmeno banale. Nel CO o monossido di carbonio il carbonio è parzialmente ridotto, ha riacquisito due degli elettroni che gli aveva sottratto l'ossigeno, ed è molto più disponibile per reagire ulteriormente. Ha già divorziato una volta dall'ossigeno, ora gli è più congeniale farlo una seconda volta (succede anche agli individui, a volte). E qui ha inizio una vicenda dove chimica e storia del Novecento si intrecciano in modo molto intimo, come abbiamo già visto nel caso della sintesi dell'ammoniaca.

Facciamo un salto indietro, e andiamo al 1920. La Germania è uscita stremata e pesantemente ridimensionata dal primo conflitto mondiale. È

sempre più chiaro che lo sviluppo industriale, economico ma soprattutto quello militare hanno e avranno bisogno di grandi quantità di petrolio. Ma la Germania di petrolio non ne ha proprio. In compenso, possiede enormi giacimenti di carbone nella regione della Ruhr. Se si riuscisse a produrre benzina dal carbone, il problema della dipendenza dalle forniture di petrolio dall'estero svanirebbe. Al Kaiser Wilhelm Institut für Kohlenforschung, a Mülheim, nel cuore della Ruhr, lavorano due ricercatori, Franz Fischer (1877-1947) e Hans Tropsch (1889-1935). Il compito che si prefiggono è davvero improbo: sviluppare un processo per trasformare il lurido carbone in volatile benzina⁴. Se gli antichi alchimisti erano alla ricerca della pietra filosofale per trasmutare i metalli in oro, qui si tratta di trovare i giusti catalizzatori per convertire un solido nero in un liquido giallastro. Diventa subito chiaro che un passaggio chiave è la formazione di monossido di carbonio, CO. Infatti, sin dal 1902 era noto che il CO combinato con idrogeno può formare idrocarburi (benzina). Erano stati Paul Sabatier (1854-1941) e Jean Baptiste Senderens (1856-1937) in Francia, a ottenere acqua e metano partendo da CO e idrogeno utilizzando catalizzatori di nichel e cobalto. Il processo dei due francesi non venne mai sviluppato industrialmente perché troppo costoso, il che non impedì a Sabatier di ricevere il Nobel per la chimica nel 1912.

Franz Fischer era il direttore e il fondatore del Kaiser Wilhelm, un istituto interamente dedicato alla ricerca sul carbone generosamente finanziato dall'industria mineraria tedesca. Intorno al 1925, insieme a Tropsch, riuscì a sviluppare un processo basato su catalizzatori metallici per la produzione di idrocarburi liquidi (benzine) partendo da carbone e idrogeno. C'erano vari stadi, ma quello chiave passava per l'ottenimento di CO, da combinare poi con idrogeno molecolare:



Il processo, oggi noto come Fischer-Tropsch, è in realtà un complesso insieme di reazioni chimiche in cascata in cui si producono moltissime sostanze utili. Le condizioni non sono particolarmente spinte: temperature di 150-300°C e pressioni da una a diverse decine di atmosfere. Era una delle grandi conquiste della chimica tedesca del Novecento: fare benzina liquida partendo dal polveroso carbone era diventato possibile, benché non propriamente semplice e nemmeno economico.

La cosa si rivelò estremamente utile allo scoppiare del secondo conflitto mondiale. La meccanizzazione degli eserciti aveva aumentato enormemen-

⁴ Geerlings *et al.* 1999.

te la richiesta di combustibili liquidi, e il petrolio era quindi strategico e indispensabile, ma lontano dai fronti di guerra europei e spesso in mani nemiche. La sintesi Fischer-Tropsch era una valida alternativa autoctona, e contribuì significativamente alle necessità di carburante della Wehrmacht. Alla fine del conflitto, l'industria chimica tedesca aveva realizzato ben nove impianti basati su questo processo con una capacità produttiva di oltre mezzo milione di tonnellate di benzina all'anno. Nel dopoguerra gli immensi giacimenti della penisola Araba resero i prodotti petroliferi via via più economici. Il processo sviluppato dai due chimici tedeschi fu quasi completamente abbandonato e gli impianti smantellati, anche in seguito alle sanzioni delle potenze occidentali vincitrici.

Ma il processo Fischer-Tropsch non scomparve del tutto. Nella Repubblica del Sudafrica, dove esistono grandi riserve di carbone, il primo impianto moderno per produrre idrocarburi liquidi da carbone entrò in funzione nel 1955. Erano gli anni in cui in Sudafrica vigeva la politica di *apartheid*, l'odiosa segregazione razziale introdotta nel Paese nel 1948. Il Sudafrica fu sanzionato a livello internazionale per questo, e sottoposto a pesanti restrizioni, compreso un embargo sulle forniture di petrolio. Il Paese si trovò a dipendere largamente dagli impianti Fischer-Tropsch per produrre i carburanti di cui aveva bisogno. E li sviluppò al punto che sono attivi ancora oggi.

Quindi, se da una parte la tecnologia per trasformare CO e H₂ in idrocarburi non è mai divenuta concorrenziale con la raffinazione del petrolio per ragioni economiche, le reazioni, i catalizzatori e gli impianti sono noti, collaudati, e potenzialmente migliorabili. Il che, per una prossima azione di conversione della CO₂ in eccesso in combustibili solari è un importante punto fermo.

8. Una via diretta

Ma non ci si ferma qui. È anche possibile convertire direttamente l'anidride carbonica in altre specie chimiche usando energia elettrica. Si chiama conversione elettrochimica e di fatto simula la fotosintesi naturale, ma, anziché utilizzare luce solare come fanno fare così bene le piante, fa più prosaicamente ricorso a energia elettrica fornita dall'esterno. Se però questa proviene da fonti rinnovabili, il processo diventa sostenibile e quelli che si ottengono possono essere classificati a tutti gli effetti come combustibili solari. I primi esempi di trasformazione dell'anidride carbonica per via elettrochimica risalgono addirittura al XIX secolo, quando questa venne ridotta a monossido di carbonio (CO) usando elettrodi di zinco. La ricerca

in questo campo si è intensificata a partire dagli anni Ottanta del Novecento come conseguenza dei vari *shock* petroliferi del decennio precedente (i meno giovani ricorderanno le “domeniche a piedi”). La riduzione elettrochimica della CO₂, anche nota come elettrocatalisi in quanto si basa sia sull’uso di catalizzatori che di una differenza di potenziale elettrico, è quindi una possibile e ben nota via per produrre acido formico (HCOOH), metanolo (CH₃OH), etilene (C₂H₄), metano (CH₄), monossido di carbonio (CO) e tante altre sostanze utili⁵. Ovviamente, anche per la conversione per via elettrochimica servono abbondanti risorse di energia elettrica da fonti rinnovabili. E non mancano problemi tecnologici rilevanti, ma in tutto il mondo sono in corso importanti progetti di ricerca che puntano a risolvere tali problemi, principalmente attraverso lo sviluppo di nuovi catalizzatori e di processi più efficienti.

Insomma, il succo del discorso è che esistono diversi modi, e non li abbiamo nemmeno descritti tutti, per usare la CO₂ in modo ciclico e sostenibile, circolare come si dice oggi, come utile materia prima da trasformare in tanti prodotti necessari alla nostra esistenza, *Fig.03*. Ma l’energia necessaria dobbiamo imparare a produrla con le fonti rinnovabili.

Quindi, riassumendo, gli *e-fuels* sono combustibili sintetici prodotti grazie a energia elettrica da fonti rinnovabili identici ai combustibili tradizionali. Compensano la CO₂ prodotta nella combustione con quella catturata. Un’auto alimentata con *e-fuels* produrrebbe nell’intero ciclo di vita l’85-90% in meno di emissioni rispetto a un’auto tradizionale a benzina. Inoltre, non è necessaria nessuna creazione di nuove infrastrutture per la distribuzione. L’idrogeno necessario deve essere prodotto per elettrolisi dell’acqua (idrogeno verde), con una efficienza (conversione di energia elettrica in energia chimica) sino al 60%⁶. Nel complesso, l’efficienza di produzione di *e-fuels* è del 25-30% per composti a catena corta (2 atomi di carbonio, etilene) e scende a meno del 10% per composti con 3 o più atomi di carbonio.

Il risultato è che il costo energetico per produrre *e-fuels* è molto elevato. L’uso di *e-fuels* in un motore a combustione interna richiede cinque volte più elettricità di un veicolo equivalente a batteria. Le stime dicono che il costo di produzione di *e-fuels* nel 2035 sarà quattro volte quello dei combustibili derivati dal petrolio (ora è di circa 2-3 euro/l, dieci-venti volte più costosi). Il futuro degli *e-fuels* è però per applicazioni specifiche, come il trasporto aereo (cherosene), navale o eventualmente per automezzi pesanti.

⁵ Sullivan *et al.* 2021; Jin *et al.* 2021.

⁶ Kumar-Lin 2022.

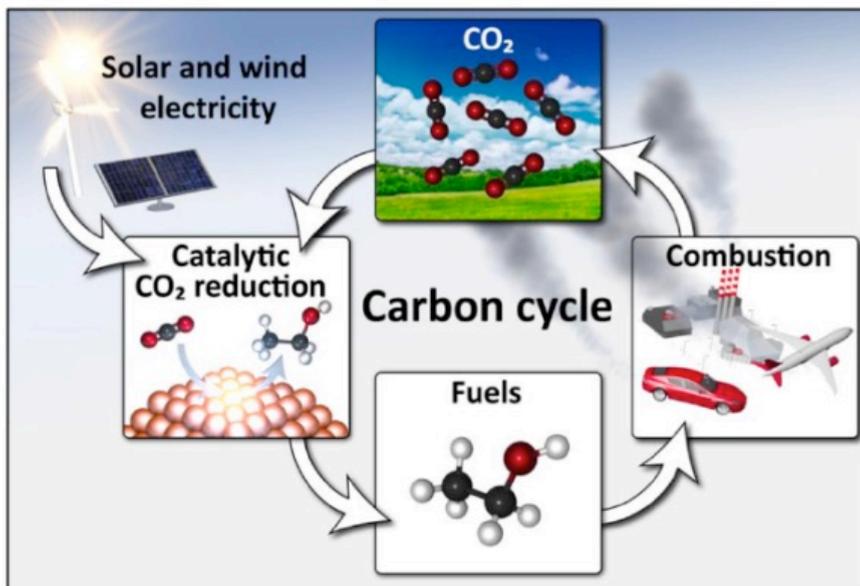


Fig.03. Il ciclo sostenibile del carbonio. La CO₂ dell'atmosfera è catturata e trasformata (ridotta) a combustibile solare grazie a energie rinnovabili. Il combustibile viene utilizzato in tradizionali processi di combustione, rilasciando nuovamente CO₂ nell'atmosfera. Pertanto, il ciclo è a emissioni zero. Il punto critico, la tecnologia in via di sviluppo, si basa su un'efficace estrazione della CO₂ dall'aria e la sua trasformazione in carburanti usando energia rinnovabile. Fonte: Nørskov et al. 2019, p. 2, available at: https://www.uu.nl/sites/default/files/geo-sd-reports-Energy_X_Research-needs-report_final_24.02.2020.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].

9. La cattura

C'è però ancora un problema da affrontare, l'ultimo e forse il più difficile: per poter utilizzare la CO₂ dobbiamo prima "catturarla". Tutti i processi di cui abbiamo parlato funzionano, e anche abbastanza bene, a patto che ci sia la materia prima, la sostanza da trasformare, in questo caso l'anidride carbonica. Nell'aria di CO₂ ce n'è tanta in totale, ma in forma molto diluita, solo lo 0,04%, circa 400 parti per milione. Ora immaginate di avere davanti a voi una folla di un milione di persone, come tutti i cittadini di Napoli, e di dover individuare e invitare a casa vostra solo 400 di queste. In media, dovrete far scorrere davanti a voi 2500 persone prima di individuare un invitato. Lo stesso vale se volete estrarre e separare le molecole di CO₂ dall'aria.

Le tecniche commerciali richiedono grandi ventilatori per spingere l'aria attraverso appositi filtri⁷. Lì, solventi liquidi, di solito a base di ammine o idrossido di sodio, assorbono la CO₂, ad esempio facendo precipitare un carbonato di sodio stabile (Na₂CO₃) da cui poi è facile estrarla. Più complesse sono le reazioni con le ammine, che funzionano un po' come gli enzimi naturali dei sistemi fotosintetici, dando luogo alla formazione di molecole chiamate carbammate da cui, riscaldando, si recupera la CO₂. Ci sono anche nuovi materiali altamente porosi, zeoliti, carboni attivi, appositamente studiati e in grado di catturare la CO₂ che ne riempie i pori come l'acqua impregna una spugna. Anche qui, per riscaldamento l'anidride carbonica viene rilasciata alla bisogna. Ma non è proprio una bazzecola. Ad esempio, la cattura della CO₂ con ammine richiede un significativo apporto di acqua. Per catturare 3,3 gigatonnellate di CO₂ all'anno servirebbero trecento chilometri cubi di acqua, come dire il 4% dell'acqua utilizzata per l'irrigazione. E se l'uso dell'idrossido di sodio richiede molta meno acqua, si tratta però di una sostanza altamente caustica.

La cattura della CO₂ dall'aria richiede anche molta energia. Si parla di 250 chilowattora per tonnellata di CO₂, quando per la cattura da centrali a carbone, dove la CO₂ è concentrata, ne bastano 65. Nonostante queste premesse, i primi esempi di cattura di anidride carbonica dall'aria stanno prendendo forma⁸. Prometheus fuels è una *start-up* della Silicon Valley che nel 2019 ha messo in funzione un impianto per rimuovere la CO₂ dall'aria e trasformarla in benzina e carburante facendo uso di una tecnologia che assorbe CO₂ direttamente in elettroliti di processo, dove viene convertita in alcoli. Gli alcoli vengono poi trasformati in benzina e carburanti per aerei. Dal momento che il processo utilizza solo elettricità da fonti rinnovabili, i combustibili sono di tipo solare, non emettendo CO₂ netta nell'atmosfera. Carbon Engineering è una società fondata nel 2009 che gestisce un impianto pilota nella British Columbia, in Canada, in funzione dal 2015 e in grado di estrarre circa una tonnellata di CO₂ al giorno con un costo tra 94 e 232 dollari. La CO₂ estratta viene poi utilizzata dalla società californiana Greyrock per produrre carburanti sintetici, compresi benzina, *diesel* e cherosene. Climeworks è una azienda svizzera che ha avviato nel 2017 un piccolo impianto per cattura di CO₂ su scala industriale a Hinwil, nel cantone di Zurigo. L'impianto è in grado di catturare 900 tonnellate di CO₂ all'anno (non molte in verità) e utilizza come fonte energetica il calore proveniente da un vicino impianto di incenerimento dei rifiuti. L'obiettivo è raggiungere entro

⁷ Bains *et al.* 2017; Barker *et al.* 2009.

⁸ Jiang *et al.* 2023; Kumar *et al.* 2015.

il 2025 la cattura dell'1% delle emissioni annuali di CO₂ dell'azienda. Pare che ciò richieda la costruzione di 250.000 sistemi simili a quello di Hinwil. E il costo è proibitivo, circa 600 dollari a tonnellata. Insomma, c'è ancora molto da fare e qualcuno si domanda giustamente se saremo mai in grado di sviluppare delle tecnologie in grado di separare la CO₂ dall'aria con costi energetici ed economici sostenibili.

Quindi non c'è speranza? Beh, intanto la CO₂ si può catturare dove viene prodotta, e in forma concentrata: impianti industriali, cementifici, fermentatori, e via discorrendo⁹. Qui la CO₂ è abbastanza “densa” da poter essere convogliata direttamente all'impianto di trasformazione per farne quello che vogliamo. Oggi una buona parte della CO₂, circa 20 miliardi di tonnellate, è prodotta in siti industriali di grandi dimensioni, centrali elettriche, industrie chimiche o altro. È da lì che i produttori di bevande gassate prendono le bollicine da aggiungere alle loro bibite. Esistono studi che mostrano come nei cementifici sia possibile recuperare parte dell'energia necessaria dal calore dei fumi, e usarla per produrre energia elettrica con cui catturare e convertire CO₂ in altre sostanze. Recuperare CO₂ per questa via comincia a divenire una prospettiva concreta.

Di certo c'è che per poter raggiungere l'obiettivo di emissioni negative di anidride carbonica, quindi per ridurre l'accumulo, c'è bisogno di tanta energia a basso costo prodotta con fonti rinnovabili, altrimenti si rischia di produrre più CO₂ di quanta ne venga rimossa. E questo è un problema tutt'altro che banale, ma non è qui la sede per affrontarlo a fondo. Di certo c'è che alla fine torniamo sempre lì: abbiamo bisogno di fonti primarie pulite e sostenibili di energia. Forse catturare la CO₂ dall'aria con costi contenuti resterà un miraggio ancora per molti anni. Farlo da fonti concentrate tipo impianti industriali invece sta già diventando economicamente accessibile. Ma se vorremo ripulire l'atmosfera dall'eccesso di carbonio accumulato in oltre due secoli, dovremo cominciare a rimboccarci le maniche.

Sul tema della cattura della CO₂ non possiamo non menzionare il fatto che esistono numerose altre idee in proposito. Una di quelle che ha attirato maggiore attenzione è il sequestro geologico, ossia lo stoccaggio di CO₂ in giacimenti di petrolio e gas esauriti, formazioni saline o letti di carbone profondi. Un buon sito di stoccaggio per essere considerato tale deve essere formato da rocce con una particolare porosità, permeabilità, assenza di faglie. La roccia porosa, una volta “riempita” di CO₂ compressa e iniettata ad alte pressioni nel sottosuolo deve essere ricoperta da uno strato di materiale a bassa permeabilità che funge da guarnizione, una specie di tappo. Il problema di questa e di altre tecnologie resta il costo di estrazione della CO₂

⁹ Barker *et al.* 2009.

dall'aria, di cui abbiamo già parlato. Ma se dobbiamo spendere tanta energia per catturare la CO₂, perché poi confinarla in profondità terrestri quando, come abbiamo visto sopra, potremmo riutilizzarla come materia prima?

Prima di concludere questa breve analisi vediamo qualche aspetto economico dei processi di cattura. Il costo della cattura di CO₂ con solventi (ammine) si aggira sui 40-60 euro/tonnellata; con assorbenti solidi, membrane porose etc. si potranno raggiungere i 30 euro/tonnellata, ma l'obiettivo è di scendere a 10-20 euro/tonnellata, un *target* raggiungibile. Le cose stanno molto diversamente per quanto riguarda la stima dei costi per la DAC (*Direct Air Capture*). Qui si parla di 500 euro/tonnellata ma le stime sono molto variabili e in altri casi si parla di costi che vanno dai 100 ai 250 euro/tonnellata.

Per quanto riguarda i volumi si dovrà passare dalle 40 megatonnellate/anno attuali a 6,6 gigatonnellate/anno nel 2050 per le sorgenti concentrate mentre per la DAC dovremo andare dalle poche kilotonnellate/anno attuali a 1 gigatonnellata/anno nel 2050. In termini pratici, oggi ci sono circa 30 impianti di DAC attivi; per raggiungere le zero emissioni entro il 2050 serviranno almeno 2000 grandi impianti, un obiettivo oggettivamente molto sfidante.

10. Prospettive

Vediamo di riassumere e lasciare un messaggio sintetico ma chiaro. Ormai dovrebbe essere evidente che non basterà ridurre drasticamente il rilascio di CO₂ in atmosfera per contenere il riscaldamento globale, e che dovremo sviluppare nuovi processi che ci consentano di giungere a emissioni negative, ossia di catturare parte di quella anidride carbonica che abbiamo già prodotto e che comunque continueremo a produrre, e riutilizzarla in modo utile. Estrarre CO₂ dall'atmosfera dove si trova in forma molto diluita comporta costi energetici talmente elevati che al momento, e forse anche in futuro, la cosa appare poco praticabile. Altra cosa invece è sfruttare la CO₂ prodotta in impianti industriali dove viene generata in forma concentrata (cementifici, impianti chimici). L'ideale sarebbe convertire questa CO₂ direttamente in carbonio riutilizzabile grazie all'azione del sole e a fotocatalizzatori efficienti. È l'idea della fotosintesi artificiale, un settore in cui i progressi ci sono stati, ma non al ritmo sperato e comunque non tali da prospettare soluzioni miracolistiche a breve termine. La ricerca continua nella speranza di effettuare un vero salto tecnologico, un *breakthrough*, una scoperta rivoluzionaria.

In attesa che questo accada, appare molto più concreta l'idea di ottenere idrogeno dall'acqua con processi di elettrolisi sfruttando energie rinnovabili. Con l'idrogeno non solo potremo produrre i fertilizzanti indispensabili per sfamare la popolazione mondiale, ma anche trasformare la CO₂ in combustibili e altre materie prime utili mediante processi chimici noti e rodati. Combustibili che probabilmente dovremo continuare a utilizzare per alimentare i potenti motori di navi e aerei, per cui difficilmente potremo contare su batterie super-durature. Non certo per garantire il funzionamento del miliardo e trecento milioni di autoveicoli oggi circolanti al mondo. Questi potranno forse continuare a viaggiare grazie a batterie ricaricabili o eventualmente usando idrogeno solare in celle a combustibile. Ma per realizzare tutto questo serviranno inevitabilmente enormi quantitativi di energia elettrica pulita da fonti sostenibili e rinnovabili. Il che non è scontato, e ci deve far riflettere sul fatto che in realtà continuare a perseguire uno sviluppo incontrollato e scriteriato dei consumi potrebbe portarci a un collasso generale. La sostenibilità ambientale passa necessariamente per una revisione profonda dei meccanismi di funzionamento della società contemporanea, attualmente basata sullo sfruttamento selvaggio delle risorse e sul trasferimento alle generazioni future dei problemi che ne derivano. In quest'ottica, sviluppare processi per il riutilizzo della CO₂ ci permetterà di fare un utile passo in avanti per garantire un futuro migliore ai nostri discendenti. Ma solo se riusciremo a coniugare lo sviluppo di tecnologie pulite con comportamenti e modelli economici non basati sulla devastazione dell'ambiente potremo forse evitare l'autodistruzione della nostra specie e consegnare un pianeta abitabile a chi verrà dopo di noi.

Bibliografia

- Bains *et al.* 2017 P. Bains, P. Psarras, J. Wilcox, *CO₂ capture from the industry sector*, Progress in Energy and Combustion Science 63, 2017, pp. 146-172.
- Baker *et al.* 2009 D.J. Barker, S.A. Turner, P.A. Napier-Moore, M. Clark, J.E. Davison, *CO₂ capture in the cement industry*, Energy procedia 1, 2009, pp. 87-94.
- Geerlings *et al.* 1999 J.J.C. Geerlings, J.H. Wilson, G.J. Kramer, H.P. Kuipers, A. Hoek, H.M. Huisman, *Fischer-Tropsch technology – from active site to commercial process*, Applied Catalysis A: General 186, 1999, pp. 27-40.
- Hermesmann-Müller 2022 M. Hermesmann, T.E. Müller, *Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in*

transforming energy systems, Progress in Energy and Combustion Science 90, 2022, pp. 100996.

- Jiang *et al.* 2023 L. Jiang, W. Liu, R.Q. Wang, A. Gonzalez-Diaz, M.F. Rojas-Michaga, S. Michailos *et al.*, *Sorption direct air capture with CO₂ utilization*, Progress in Energy and Combustion Science 95, 2023, pp. 101069.
- Jin *et al.* 2021 S. Jin, Z. Hao, K. Zhang, Z. Yan, J. Chen, *Advances and challenges for the electrochemical reduction of CO₂ to CO: from fundamentals to industrialization*, Angewandte Chemie 133, 2021, pp. 20795-20816.
- Kumar *et al.* 2015 A. Kumar, D.G. Madden, M. Lusi, K.J. Chen, E.A. Daniels, T. Curtin, T. *et al.*, *Direct air capture of CO₂ by physisorbent materials*, Angewandte Chemie International Edition 54, 2015, pp. 14372-14377.
- Kumar-Lim 2022 S.S. Kumar, H. Lim, *An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production*, Energy reports 8, 2022, pp. 13793-13813.
- Nørskov *et al.* 2019 J.K. Nørskov, A. Latimer, C.F. Dickens (ed.), *Research needs towards sustainable production of fuels and chemicals*, 2019, available at: https://www.uu.nl/sites/default/files/geo-sd-reports-Energy_X_Research-needs-report_final_24.02.2020.pdf [consultato il 15 gennaio 2025].
- Olah 2005 G.A. Olah, *Beyond oil and gas: the methanol economy*. Angewandte Chemie International Edition 44, 2005, pp. 2636-2639.
- Oliveira *et al.* 2021 A.M. Oliveira, R.R. Beswick, Y. Yan, *A green hydrogen economy for a renewable energy society*, Current Opinion in Chemical Engineering 33, 2021, pp. 100701.
- Ramirez *et al.* 2020 A. Ramirez, S. M. Sarathy, J. Gascon, *CO₂ derived E-fuels: research trends, misconceptions, and future directions*, Trends in chemistry 2, 2020, pp. 785-795.
- Sullivan *et al.* 2021 I. Sullivan, A. Goryachev, I.A. Digdaya, X. Li, H.A. Atwater, D. A. Vermaas, C. Xiang, *Coupling electrochemical CO₂ conversion with CO₂ capture*, Nature Catalysis 4, 2021, pp. 952-958.
- Ueckerdt *et al.* 2021 F. Ueckerdt, C. Bauer, A. Dirnaichner, J. Everall, R. Sacchi, G. Luderer, *Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation*, Nature Climate Change 11, 2021, pp. 384-393.

Scritto nel ghiaccio: la lezione che viene dal passato

Carlo Barbante*

Rispetto agli altri numerosi archivi ambientali e climatici a nostra disposizione, il ghiaccio è l'unico che ci fornisce allo stesso tempo informazioni sia sulle forzanti (le cause) sia sulle risposte del clima (gli effetti). Le carote di ghiaccio registrano, nevicata dopo nevicata, anno dopo anno, straordinarie informazioni sulle variazioni della temperatura, delle precipitazioni, della circolazione atmosferica e di altri aspetti ambientali del passato. Questi formidabili archivi ci dicono, per esempio, quanto fosse freddo il nostro pianeta e quanto fossero intense le tempeste che sollevavano la polvere dei deserti per trasportarla negli angoli più distanti del mondo. Le informazioni che rimangono intrappolate negli strati di neve e ghiaccio che si accumulano anno dopo anno costituiscono quindi una memoria eccezionale delle cause dei cambiamenti climatici del passato e ci aiutano a comprendere meglio quali sono i processi in atto oggi e a proiettarli nel futuro¹. Nessun altro archivio climatico possiede questa importante caratteristica ed è questo uno dei motivi per cui mi accingo a condurvi in questo viaggio straordinario alla ricerca e allo studio di quanto è fedelmente registrato in queste straordinarie biblioteche di ghiaccio.

Le carote di ghiaccio estratte dalle calotte glaciali di Antartide e Groenlandia e dai siti di alta quota rappresentano una fonte di informazioni inestimabile per ricostruire la storia del clima della Terra. Queste preziose testimonianze del passato, formate da strati di neve e ghiaccio accumulatisi nel corso dei millenni, ci forniscono dati dettagliati sulle condizioni climatiche che si sono susseguite nel tempo. Ma come avviene il processo di estrazione di queste carote di ghiaccio?

* Professore ordinario di Chimica analitica presso l'Università Ca' Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica. Istituto di Scienze Polari – CNR. E-mail: barbante@unive.it.

¹ Barbante 2022.

La prima fase del processo di estrazione delle carote di ghiaccio consiste nell'individuare i siti più adatti per effettuare le perforazioni. Gli scienziati selezionano aree caratterizzate da uno scarso accumulo di neve e ghiaccio, in modo da ottenere carote che possano coprire un arco temporale il più ampio possibile. Solitamente, i siti prescelti si trovano nelle regioni centrali delle calotte glaciali, dove lo spessore del ghiaccio è più costante e regolare.

Una volta individuati i siti di perforazione, gli scienziati procedono all'estrazione delle carote di ghiaccio utilizzando speciali carotieri. Questi strumenti, azionati elettricamente o manualmente, permettono di prelevare cilindri di ghiaccio lunghi anche diversi metri, preservando intatta la stratigrafia degli strati accumulatisi nel corso dei secoli e dei millenni. Il processo di perforazione richiede grande precisione e delicatezza, al fine di evitare che il ghiaccio si fratturi o si deformi durante l'estrazione².

Una volta estratte, le carote di ghiaccio vengono attentamente imballate e trasportate in laboratori specializzati, dove vengono conservate a temperature molto basse, solitamente intorno ai -25°C , ma anche più basse per non perdere i gas intrappolati nel ghiaccio. Questo passaggio è fondamentale per preservare intatte le informazioni contenute nel ghiaccio, evitando che eventuali alterazioni possano compromettere l'analisi dei dati.

Nei laboratori, gli scienziati procedono all'analisi dettagliata delle carote di ghiaccio, utilizzando una vasta gamma di tecniche analitiche. Attraverso l'esame degli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno, ad esempio, è possibile ricostruire l'andamento delle temperature nel passato. Allo stesso modo, la misurazione delle concentrazioni di gas serra e di particolato atmosferico fornisce preziose informazioni sulle forzanti climatiche che hanno influenzato il clima terrestre.

Tuttavia, dall'analisi di tutti questi parametri nelle carote di ghiaccio non riusciamo a ricostruire direttamente le caratteristiche del clima del passato; ci avvalliamo tuttavia di "sostituti" dei parametri climatici che vengono definiti in gergo *proxy* climatici. Essi sono indicatori o parametri che vengono utilizzati per ricostruire le variazioni climatiche del passato quando i dati diretti non sono disponibili. Essenzialmente, funzionano come "indizi" o "testimoni" delle condizioni atmosferiche, permettendoci di comprendere come il clima sia cambiato nel corso del tempo³.

Gli isotopi stabili misurati nei campioni di ghiaccio, come l'ossigeno 18 (^{18}O) e il deuterio (^2H o D), sono utilizzati per ricostruire le paleotemperature, cioè le temperature del passato, grazie alle loro variazioni in funzione

² EPICA 2004.

³ Petit *et al.* 1999.

delle condizioni climatiche. Questi isotopi si trovano nell'acqua che forma il ghiaccio e la loro concentrazione varia con la temperatura atmosferica al momento della precipitazione. Durante i processi di evaporazione e condensazione dell'acqua, gli isotopi più pesanti (come ^{18}O) e il deuterio (D) tendono a comportarsi in modo diverso rispetto a quelli più leggeri (come ^{16}O) e l'idrogeno (^1H , il comune idrogeno). Questo fenomeno si chiama "frazionamento isotopico".

Quando la temperatura è più fredda, l'acqua con isotopi più leggeri tende a evaporare più facilmente e quella con isotopi più pesanti tende a rimanere. Allo stesso modo, l'acqua che precipita (come la neve) contiene proporzioni diverse di isotopi pesanti e leggeri a seconda della temperatura al momento della precipitazione. Dopo aver confrontato i rapporti isotopici con dati di temperatura noti e creato una curva di calibrazione, si possono studiare queste variazioni ed è possibile risalire alle variazioni delle temperature del passato⁴.

Nello studio delle carote di ghiaccio, vengono impiegati diversi tipi di *proxy* climatici per interpretare le variazioni nelle condizioni atmosferiche passate. Uno dei più comuni è rappresentato dai rapporti isotopici del carbonio nelle molecole di anidride carbonica e metano intrappolate nelle bolle di aria all'interno del ghiaccio. Le concentrazioni di questi gas e dei rapporti isotopici del carbonio, possono essere analizzati per ottenere informazioni sulla composizione chimica dell'atmosfera in epoche passate, consentendo di correlare le concentrazioni di gas serra con le variazioni nella temperatura nel corso dei secoli e del tempo.

Inoltre, le particelle di polvere e i composti chimici presenti nelle carote di ghiaccio possono fungere da *proxy* climatici, fornendo indicazioni sulle condizioni atmosferiche e ambientali del passato. Ad esempio, le particelle di polvere provenienti da deserti o da eruzioni vulcaniche possono essere datate e utilizzate per ricostruire eventi atmosferici storici.

Complessivamente, i dati paleoclimatici sono fondamentali per comprendere le dinamiche del clima passato e per stabilire collegamenti con le variazioni climatiche attuali e future. Attraverso l'analisi accurata di queste informazioni, possiamo ottenere preziose conoscenze sulla storia climatica del nostro pianeta e sulle implicazioni dei cambiamenti climatici in corso.

L'estrazione e l'analisi delle carote di ghiaccio rappresentano un processo complesso e delicato, che richiede grande abilità e precisione da parte degli scienziati. Tuttavia, i risultati ottenuti da questo lavoro sono di inestimabile valore per la comprensione del clima del passato e

⁴ Legrand-Mayewski 1997; Alley 2000.

per proiettare tali conoscenze verso il futuro, al fine di affrontare in modo più consapevole le sfide legate al cambiamento climatico in atto da oltre un secolo e accentuatosi ormai da alcuni decenni.

1. Quali risultati dallo studio delle carote polari?

Lo studio delle carote di ghiaccio estratte dalle calotte glaciali di Antartide e Groenlandia ha prodotto risultati di grande rilevanza a livello internazionale, offrendo una visione unica e dettagliata dell'evoluzione del clima della Terra nel corso dei millenni. Queste preziose testimonianze del passato hanno permesso agli scienziati di ricostruire con maggiore precisione le variazioni della temperatura nelle epoche passate, in particolare durante la successione di lunghi periodi freddi glaciali e di più brevi periodi caldi interglaciali e di ricostruire l'estensione della copertura di ghiacci marini nelle regioni polari, dimostrando come questi rispondano rapidamente ai riscaldamenti climatici. Questa evidenza rafforza la stretta relazione che attualmente si osserva tra riscaldamento globale e riduzione dei ghiacci marini artici con gravi conseguenze sugli ecosistemi delle regioni artiche. Hanno inoltre consentito di comprendere meglio le variazioni della copertura di ghiaccio marino nelle regioni sub-polari, mostrando come il ghiaccio risponda in modo quasi istantaneo ai rapidi riscaldamenti climatici. Questa evidenza rafforza ulteriormente la stretta relazione tra il riscaldamento globale e la riduzione del ghiaccio marino, un fenomeno che sta avendo gravi conseguenze sull'ecosistema artico.

Lo studio delle carote di ghiaccio in Groenlandia ha inoltre portato alla scoperta delle variazioni climatiche della durata del millennio, note come eventi di Dansgaard-Oeschger, caratterizzati da bruschi aumenti di temperatura e da progressivi raffreddamenti.

Un altro risultato di grande rilevanza è stato il rilevamento, all'interno delle carote di ghiaccio delle Alpi, di inquinanti come il plutonio, derivante dai test nucleari del passato, nonché di particelle come *black carbon*, microplastiche e polveri. Queste informazioni sono cruciali per valutare l'impatto di tali agenti sull'albedo e sui processi atmosferici, con importanti *feedback* sul clima. Nel complesso, le carote di ghiaccio rappresentano un archivio climatico e ambientale unico, in grado di fornire informazioni dettagliate sulle condizioni passate del nostro pianeta, come temperature, concentrazioni di gas serra, eventi vulcanici e molto altro.

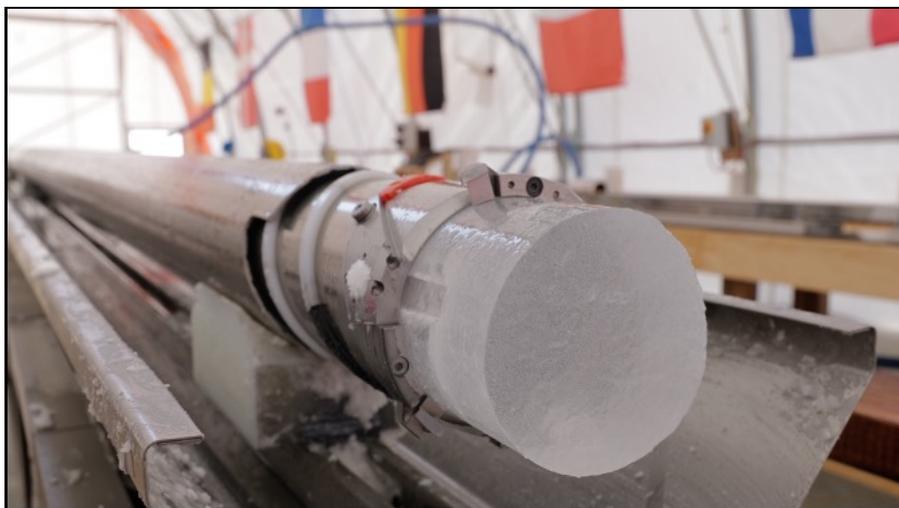


Fig.01. Una carota di ghiaccio del progetto Beyond EPICA, appena estratta dal carotiere. Dalla composizione chimica del ghiaccio si estraggono straordinarie informazioni sul clima passato della terra. ©PNRA/IPEV.

Un esempio straordinario di quanto fatto nel campo delle ricostruzioni climatiche attraverso le carote di ghiaccio viene dal Progetto EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*). Esso rappresenta uno dei più ambiziosi e importanti sforzi internazionali per comprendere la storia del clima della Terra. Lanciato nel 1996 da un consorzio che comprendeva laboratori provenienti da dieci nazioni europee, questo progetto ha avuto come obiettivo principale l'estrazione di carote di ghiaccio dalle calotte glaciali dell'Antartide, al fine di ricostruire in dettaglio l'evoluzione del clima del nostro pianeta.

Le attività di perforazione si sono concentrate in due siti principali: la località di Dome C presso la stazione franco-italiana Concordia, nel settore antartico rivolto verso il Pacifico meridionale e nella Terra della Regina Maud, presso la stazione tedesca Kohnen, nel settore rivolto verso l'Atlantico meridionale, per consentire un confronto (e una correlazione) con i risultati ottenuti dalle carote di ghiaccio perforate in Groenlandia, ritenuti espressivi delle condizioni paleoclimatiche proprie dell'emisfero settentrionale (e in particolare dell'Atlantico settentrionale). A Dome C, gli scienziati sono riusciti a raggiungere una profondità record di 3.270 metri, appena 5 metri sopra il letto roccioso, estraendo una carota di ghiaccio che copre un arco temporale di ben 820.000 anni. Questa impresa ha permesso di ottenere la più lunga e ininterrotta sequenza dei cambiamenti climatici

del passato mai registrata. L'analisi di questa straordinaria carota di ghiaccio ha rivelato informazioni di straordinario valore scientifico. Ad esempio, è stato possibile ricostruire l'andamento delle temperature nel corso degli ultimi undici cicli glaciali-interglaciali, mostrando come i periodi interglaciali precedenti ai più recenti 400.000 anni fossero caratterizzati da temperature decisamente più basse. Si sono inoltre evidenziati entro quali margini sono variate le concentrazioni atmosferiche della CO₂ in atmosfera verificando come le concentrazioni fossero di ca 180 ppm durante i periodi glaciali e di ca 280 ppm durante i periodi più caldi interglaciali. Queste scoperte hanno gettato nuova luce sui meccanismi che regolano i cambiamenti climatici su scale temporali millenarie.

Oltre alle temperature, le carote di ghiaccio estratte nell'ambito del progetto EPICA hanno permesso di analizzare in dettaglio la composizione dell'atmosfera del passato, rilevando le concentrazioni di gas serra come anidride carbonica e metano. Queste informazioni sono cruciali per comprendere il ruolo dei forzanti climatici naturali e il loro impatto sui cambiamenti del clima. Il successo del progetto EPICA è stato reso possibile grazie agli sforzi congiunti di numerosi scienziati e tecnici provenienti da diversi Paesi europei, inclusa l'Italia. Nonostante le numerose sfide logistiche e tecniche incontrate durante le operazioni di perforazione, condotte in condizioni estreme nell'Antartide, il *team* è riuscito a raggiungere gli obiettivi prefissati, offrendo una finestra unica sul passato climatico del nostro pianeta.

Sebbene le carote di ghiaccio estratte dalle calotte glaciali di Antartide e Groenlandia rappresentino senza dubbio la fonte di informazioni più preziosa per ricostruire la storia del clima della Terra, anche lo studio dei ghiacciai situati in altre regioni del mondo ha fornito risultati di grande rilevanza. Uno dei siti di particolare interesse è il *plateau* tibetano, noto anche come il Terzo Polo. Qui, i ghiacciai conservano una memoria climatica che risale a diverse migliaia di anni fa. L'analisi di queste carote di ghiaccio ha permesso agli scienziati di ricostruire l'evoluzione del monzone asiatico, un sistema di venti stagionali che gioca un ruolo cruciale nel determinare il clima di vaste aree dell'Asia. Tali informazioni sono fondamentali per comprendere come i cambiamenti climatici possano influenzare i meccanismi di circolazione atmosferica a scala regionale.

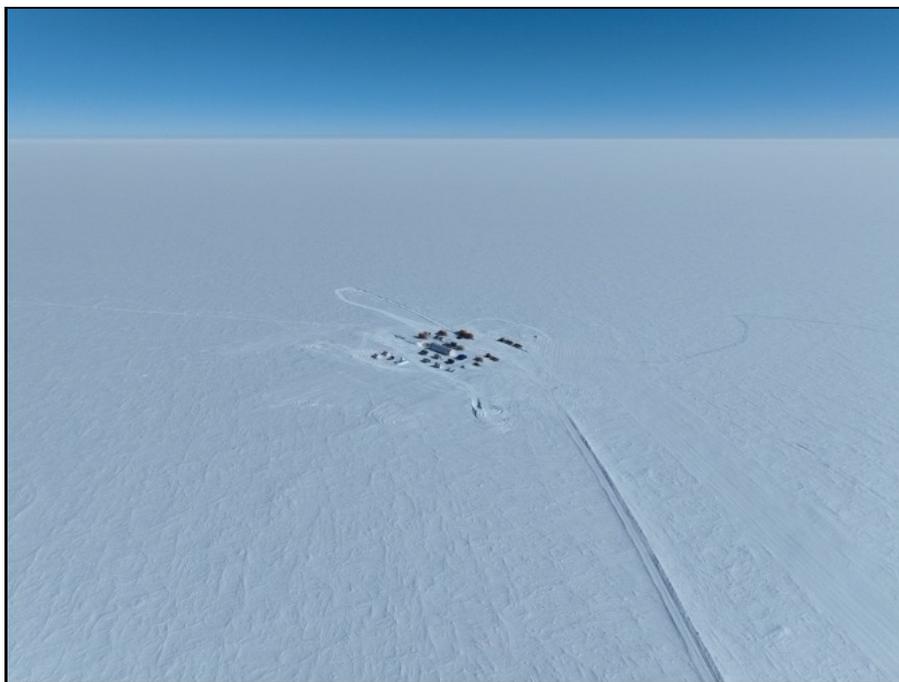


Fig.02. Il Campo del sito di perforazione del progetto Beyond EPICA che ambisce a ricostruire il clima del pianeta nel corso degli ultimo milione e mezzo di anni. Il sito si trova a circa 35 km dalla stazione Italo-Francese di Concordia. ©PNRA/IPEV.

Spostandoci verso occidente, le Alpi europee hanno anch'esse fornito un prezioso archivio climatico. Le carote di ghiaccio estratte dai ghiacciai alpini hanno rivelato informazioni dettagliate sulle variazioni di temperatura e precipitazioni nell'Europa meridionale negli ultimi secoli, consentendo di studiare l'impatto dei cambiamenti climatici su un'area densamente popolata e industrializzata. Analogamente, le Ande sudamericane hanno restituito informazioni di grande valore. Le carote di ghiaccio provenienti da siti come il Quelccaya in Perù hanno permesso di ricostruire l'evoluzione dei *pattern* di precipitazione legati ai fenomeni El Niño-Oscillazione Meridionale (ENSO), offrendo una migliore comprensione di come tali fenomeni climatici influenzino le regioni tropicali.

Infine, anche i ghiacciai delle montagne tropicali, come il Kilimanjaro in Africa o il Puncak Jaya in Nuova Guinea, hanno fornito preziose informazioni sulle variazioni climatiche in aree remote e scarsamente studiate. Queste testimonianze del passato hanno aiutato a delineare un quadro più

completo dell'evoluzione del clima a livello globale. In sintesi, sebbene le carote di ghiaccio polari rimangano la fonte di informazioni più completa e dettagliata, lo studio dei ghiacciai situati in altre regioni del mondo ha permesso di ampliare notevolmente la nostra comprensione dei cambiamenti climatici, offrendo una visione più articolata e completa dell'evoluzione del clima della Terra nel corso dei millenni.

Le carote di ghiaccio estratte dalle calotte glaciali polari e dai ghiacciai alpini rappresentano una fonte di informazioni inestimabile per l'IPCC, il Panel Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, nel suo lavoro di valutazione e comprensione dei cambiamenti del clima a livello globale. Innanzitutto, le analisi dettagliate delle carote di ghiaccio forniscono all'IPCC dati preziosi sulle variazioni passate delle temperature, delle concentrazioni di gas serra e di altri parametri climatici chiave. Queste informazioni, che coprono spesso migliaia e persino centinaia di migliaia di anni, permettono di contestualizzare l'attuale riscaldamento globale all'interno di una prospettiva storica più ampia, aiutando a comprendere meglio i meccanismi naturali che regolano i cambiamenti climatici.

Inoltre, lo studio delle carote di ghiaccio ha permesso di ricostruire l'evoluzione della copertura di ghiaccio marino nelle regioni polari, un elemento fondamentale per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sull'ecosistema artico. Questi dati sono essenziali per gli scenari futuri elaborati dall'IPCC, che prevedono una progressiva riduzione del ghiaccio marino con gravi conseguenze sull'ambiente e sulle comunità che vi abitano. Allo stesso modo, le informazioni provenienti dalle carote di ghiaccio alpine hanno consentito di analizzare l'impatto dei cambiamenti climatici su aree densamente popolate e industrializzate, come l'Europa. Tali dati sono cruciali per valutare la vulnerabilità di queste regioni e sviluppare strategie di adattamento adeguate. Infine, lo studio delle carote di ghiaccio ha permesso di identificare e comprendere meglio i cicli climatici naturali, come gli eventi Dansgaard-Oeschger, che hanno caratterizzato il passato della Terra. Questa conoscenza è fondamentale per distinguere l'influenza delle attività umane sui cambiamenti climatici in atto e proiettare scenari futuri più affidabili.

In sintesi, il contributo delle carote di ghiaccio agli studi dell'IPCC è di importanza cruciale. Queste preziose testimonianze del passato forniscono dati essenziali per contestualizzare il riscaldamento globale, valutare i suoi impatti, validare come le velocità del cambiamento in atto non abbiano precedenti nella storia climatica del nostro pianeta e sviluppare strategie di mitigazione e adattamento adeguate, elementi chiave per affrontare la sfida dei cambiamenti climatici a livello globale.

Bibliografia

- Alley 2000 R.B. Alley, *The Two-Mile Time Machine: Ice Cores, Abrupt Climate Change, and Our Future*, Princeton, University Press 2000.
- Barbante 2022 C. Barbante, *Scritto nel ghiaccio: Viaggio nel clima che cambia*, Bologna, Il Mulino 2022.
- EPICA 2004 EPICA community members, *Eight glacial cycles from an Antarctic ice core*, Nature 429, 2004, pp. 623-628.
- Jouzel *et al.* 2007 J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann *et al.*, B. Stenni, *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800.000 years*, Science 317(5839), 2007, pp. 793-796.
- Legrand-Mayewski 1997 M. Legrand, P. Mayewski, *Glaciochemistry of polar ice cores: a review*, Reviews of Geophysics 35(3), 1997, pp. 219-243.
- Petit *et al.* 1999 J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.M. Barnola, I. Basile *et al.*, M. Stievenard, *Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core*, Antarctica. Nature 399(6735), 1999, pp. 429-436.

Le nanotecnologie per la bonifica ambientale: un rischio o un'opportunità?

Laura Riva, Ilaria Corsi, Carlo Punta*

1. Nanomateriali: perché sì, perché no

L'utilizzo delle nanotecnologie sta prendendo sempre più piede in diversi ambiti di ricerca e applicativi, con un incremento esponenziale sia in termini di risultati scientifici che di tecnologie innovative prodotte. Passando dal mondo biomedicale, con lo sviluppo della *nanomedicina*, a settori più prettamente industriali, come quello degli imballaggi, dell'*automotive* e dell'energia, fino ad applicazioni meno evidenti, ma altrettanto cruciali per lo sviluppo sostenibile dei processi produttivi, quale la catalisi, l'impiego dei nanomateriali è considerato sempre più funzionale e decisivo per la realizzazione di soluzioni efficaci e performanti¹.

Negli ultimi anni, anche il settore della bonifica è stato investito da questa ondata di innovazione (nano)tecnologica, intravedendo nell'utilizzo di nanomateriali interessanti opportunità per il trattamento e la decontaminazione delle diverse matrici ambientali (acqua, suolo, aria)².

L'urgenza dello sviluppo di nuove tecnologie da applicarsi in questo ambito è evidente, dettata dalla necessità di far fronte all'impatto dell'antropizzazione sia sul cambiamento climatico che sull'inquinamento degli ecosistemi naturali. In particolare, se per secoli si è guardato alla matrice acqua come a una risorsa da sfruttare a supporto di diversi settori produttivi, appare ormai evidente come essa sia da considerarsi un bene da

* Laura Riva: Ricercatrice TD presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta", e-mail: laura2.riva@polimi.it. Ilaria Corsi: Professore associato di Scienze biologiche presso l'Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze fisiche, della Terra e dell'Ambiente, e-mail: ilaria.corsi@unisi.it. Carlo Punta: Professore ordinario di Fondamenti chimici delle Tecnologie presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta", carlo.punta@polimi.it.

¹ Pathak *et al.* 2022.

² Bonelli *et al.* 2020.

preservare, ancorché minacciato da un crescente nuovo numero di contaminanti emergenti. Non a caso, tra i 17 *Obiettivi per uno Sviluppo Sostenibile* dell'*Agenda 2030*, il sesto riguarda proprio l'accessibilità per tutti ad acqua pulita, migliorandone la qualità sia mediante un'efficace rimozione degli inquinanti presenti, ma anche tramite interventi a monte per minimizzare il rilascio di sostanze tossiche nella stessa matrice³.

In questo contesto, se da una parte i materiali ingegnerizzati aprono la strada a nuove soluzioni per la bonifica ambientale, l'aumento di contaminanti nano-dimensionati rinvenuti nell'ecosistema, associato al rilascio di nanoparticelle impiegate nei diversi settori sopra descritti, richiede un'attenta riflessione anche sui possibili rischi legati all'uso di nanomateriali in applicazioni tecnologiche, in riferimento sia alla sicurezza ambientale che alla salute umana.

Ma procediamo con ordine. Come sono definiti propriamente i nanomateriali e per quale motivo essi destano un così crescente interesse nell'ambito tecnologico, anche per i trattamenti di decontaminazione?

Secondo la definizione della *International Organization for Standardization*, aggiornata al 2023, si definisce “nanomateriale” un materiale che possieda almeno una dimensione in scala nano (ovvero in un range tra 1 e 100 nm) o che possieda una struttura interna o una struttura superficiale nano-dimensionata⁴.

Il valore aggiunto di un nanomateriale risiede pertanto appunto nella sua nano-dimensione. A essa sono direttamente associate innanzitutto una struttura ben definita e un'elevata area superficiale, che comportano a loro volta elevata reattività e azione catalitica (spesso anche fotocatalitica in processi di fotodegradazione), ma anche alta capacità dispersiva e facile interazione con diverse specie chimiche in fenomeni di assorbimento.

Appare evidente poi come in questa definizione siano inclusi sia sistemi nano-particellari, con diametro nanometrico, che sistemi nano-strutturati più complessi. Tra le nanoparticelle più ampiamente investigate e utilizzate nell'ambito del trattamento delle acque vi sono quelle a base di ferro zerovalente (nZVI), opportunamente modificate o funzionalizzate in superficie. Esse agiscono come nano-catalizzatori per la fotodegrada-

³ Si veda il dettaglio dell'obiettivo 6 della *2030 Agenda for Sustainable Development* alla pagina di riferimento del sito delle Nazioni Unite, disponibile al *link*: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁴ Si veda la norma ISO/TS 80004-2023, Capitolo 3, disponibile al *link*: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:80004:-1:ed-1:vl:en> [consultato il 15 gennaio 2025].

zione, la riduzione o l'assorbimento di inquinanti⁵, e hanno già trovato applicazioni in diverse sperimentazioni *in situ*.

I materiali nano-strutturati richiedono un'ulteriore fase di ingegnerizzazione, come vedremo anche più avanti. A titolo di esempio, a dimostrazione di quanto ampio sia il campo che stiamo affrontando in termini di innovazione nella ricerca nanotecnologica per il trattamento di matrici ambientali, possiamo citare lo sviluppo di strutture metallo-organiche nano-dimensionate (*nano Metal Organic Frameworks*, nanoMOF) per la progettazione di materiali compositi da impiegarsi nella fabbricazione di membrane per il trattamento delle acque⁶.

Tuttavia, proprio la nano-scala di questi sistemi, che è ciò che li rende particolarmente interessanti, è anche all'origine delle crescenti preoccupazioni e dei forti dubbi sull'opportunità di un loro impegno, specie in settori quale quello della bonifica ambientale in cui il rapporto rischio/benefici non appare ben definito.

Nano-dimensione può implicare infatti possibile internalizzazione cellulare nei sistemi viventi che popolano l'ecosistema interessato dall'intervento, con conseguente possibile bioaccumulo, e in definitiva (eco)tossicità acuta e cronica. In aggiunta, spesso mancano informazioni chiare sulla mobilità e il destino finale dei nanomateriali nella matrice trattata, con poche informazioni sulla loro potenziale trasformazione, aggregazione e dispersione nell'ambiente che potrebbero anche inficiare le loro proprietà di rimozione/degradazione dei contaminanti *target*.

È interessante constatare come, dopo l'esplosione della ricerca nel mondo delle nanotecnologie a partire dal secolo scorso, solo negli ultimi anni si sia iniziato a prestare attenzione alla loro sicurezza in termini di impatto sulla salute umana e ambientale dei nanomateriali. Una breve ricerca condotta sul motore di ricerca Scopus, utilizzando come parola chiave "*nanotoxicity*" e limitata agli ultimi 20 anni, rivela come il numero di pubblicazioni sul tema sia esponenzialmente aumentato solo in tempi più recenti (*Fig. 01*).

Questi dati confermano quanto già nel 2007 veniva riportato sulla rivista «*The Economist*» che, trattando del rischio nanotecnologico (*A little risky business*, titolava il giornale), metteva in guardia sulla scarsità di dati relativi alla sicurezza nell'uso di particelle così piccole: «*The unusual properties of tiny particles contain huge promise. But nobody knows how safe they are. And too few people are trying to find out*»⁷.

⁵ Gebre 2023.

⁶ Attia *et al.* 2022.

⁷ «*The Economist*» 2007.

La mancanza di conoscenza appariva pertanto già come il principale segnale di allarme rispetto allo sviluppo incontrollato delle nanotecnologie. Come conseguenza, si sono sollevate negli anni diverse perplessità su un loro possibile utilizzo sicuro, sia da parte della società civile, e cioè in definitiva del consumatore finale, che del legislatore, a livello nazionale e internazionale. In molti settori, specie in quello della bonifica ambientale ma non solo, è prevalso il principio cautelativo e conservativo per cui *se non sappiamo, non possiamo*.

Già qualche anno prima Brumfiel⁸ affrontava su «Nature» la stessa problematica, richiamando la comunità scientifica alla responsabilità di trovare in tempi brevi risposte esaustive e modelli efficaci capaci di assicurarsi la fiducia di una società giustamente sempre più preoccupata degli aspetti ambientali, evitando di incorrere negli stessi errori riscontrati con l'immissione sui mercati degli alimenti geneticamente modificati, fortemente contrastati da buona parte della società civile che da subito li ha percepiti come altamente pericolosi.

Tuttavia, se è vero che molto lavoro è stato fatto negli ultimi anni per fornire valutazioni oggettive sull'impatto (eco)tossicologico di nanotecnologie nuove o già presenti sul mercato, come ci racconta in parte la Fig.01, nella quasi totalità dei casi si tratta di valutazione *ex-post*, ovvero su nanomateriali già progettati e realizzati, mentre se si vogliono sviluppare soluzioni davvero sicure per l'ambiente e per la salute umana, queste valutazioni devono essere parte integrante dello sviluppo del nanomateriale stesso già nella fase della sua progettazione.

Serve, in definitiva, una corretta valutazione già in fase di progettazione dei nuovi nanomateriali su scala di laboratorio, ciò che abbiamo definito *eco-design* del prodotto⁹, che tenga conto non solo della sostenibilità del processo, ma anche di tutte le possibili implicazioni in termini di sicurezza per l'uomo e l'ambiente naturale nei reali scenari di utilizzo, in coerenza con le raccomandazioni della Comunità Europea per una produzione di nuovi (nano)materiali secondo l'approccio del *Safe and Sustainability by Design* (SSbD)¹⁰.

⁸ Brumfiel 2003.

⁹ Corsi *et al.* 2018; Corsi *et al.* 2021.

¹⁰ Si veda il link: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128591> [consultato il 15 gennaio 2025].

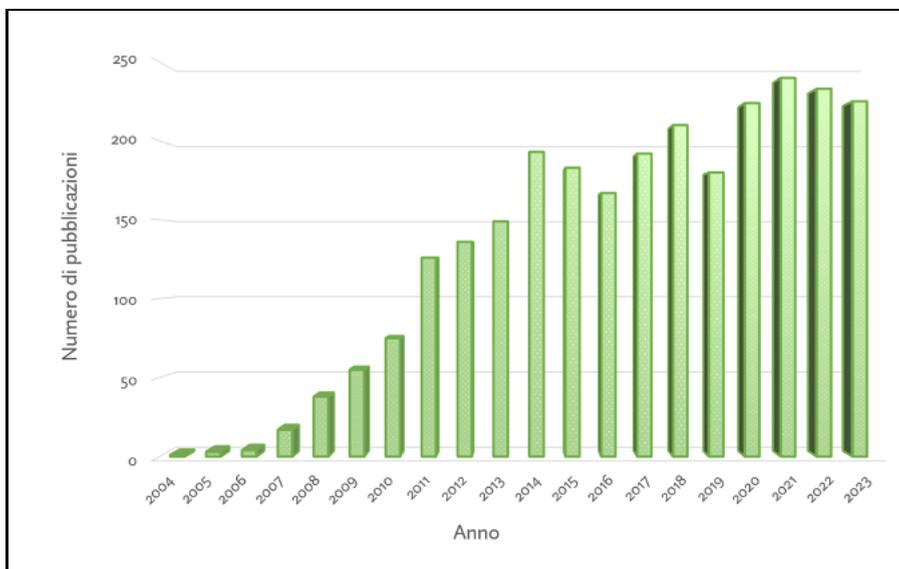


Fig.01. Numero di pubblicazioni nell'ambito della "nanotoxicity" dal 2004 al 2023 estratti dal motore di ricerca Scopus (Elsevier).

2. Sostenibili e sicuri per l'ambiente: l'*eco-design* di nanomateriali per la bonifica ambientale

Per poter affrontare in modo definitivo e costruttivo la questione *nano* in ambito ambientale, e considerare non solo le utili applicazioni, ma contestualmente anche le possibili implicazioni nell'uso di dette nanotecnologie, occorre prima di tutto una piena conoscenza dei reali impatti, e quindi lo sviluppo di protocolli di validazione attendibili, affidabili, e riconosciuti dal legislatore, che consentano di uscire dalla situazione di incertezza che spesso caratterizza la valutazione (eco)tossicologica sui nanomateriali. Occorre poi che le restrizioni imposte facciano riferimento a questi stessi protocolli, evitando pertanto generiche definizioni di rischio¹¹.

In questo contesto, l'*eco-design* prevede di avvalersi delle linee guida e dei protocolli di validazione accreditati già in fase preliminare di progettazione, al fine di considerare gli aspetti di sostenibilità e sicurezza ambientale a monte e non più, o non solo, a valle dello sviluppo di una nuova nanotecnologia.

¹¹ Corsi *et al.* 2018.

Pilastrini di questo approccio sono i *Greener Nanoscience and Nanotechnology Design Principles* (Fig.02), ovvero i sei principi fondanti della *Green Nanoscience*, enunciati per la prima volta da Dahl *et al.* nel 2007¹².

Essi derivano direttamente dai ben piÙ noti 12 principi della *Green Chemistry*¹³ ma, come ben evidenziato da Hutchinson nel 2016¹⁴, tengono conto di alcune caratteristiche intrinseche dei nanomateriali che ne determinano la reattivit e quindi anche il potenziale impatto, quali la forma, la composizione superficiale e ovviamente la dimensione.

Non ultimo, inquadrano da subito la questione della progettazione di nuovi nanomateriali da un punto di vista di sicurezza per la salute umana e per l'ambiente.

Non  un caso che il primo dei sei principi, *Progettazione di nanomateriali piÙ sicuri*, sia cos declinato: «Determine the biological impact of size, surface area, surface functionality; utilize this knowledge to design effective safer materials that possess desired physical properties; avoid incorporation of toxic elements in nanoparticle composition»¹⁵.

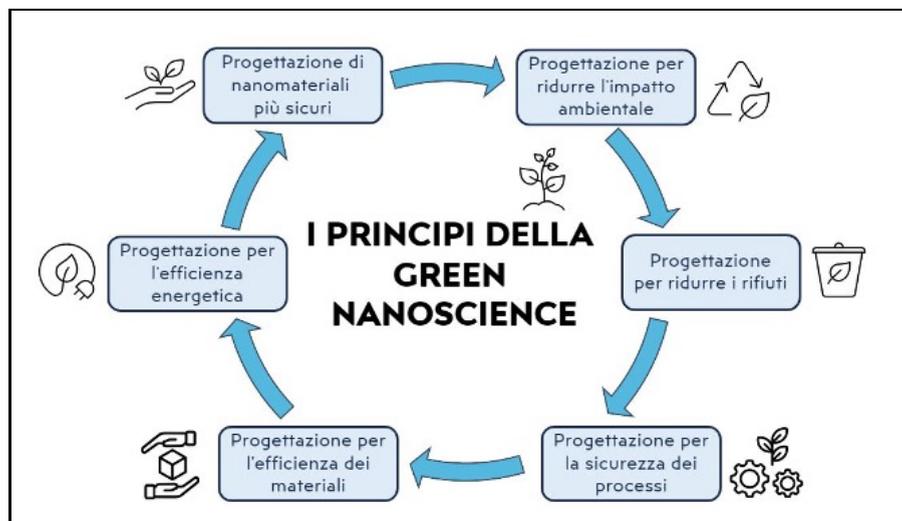


Fig.02. I sei Principi della Green Nanoscience.

¹² Dahl *et al.* 2007.

¹³ Anastas *et al.* 2010.

¹⁴ Hutchinson 2016.

¹⁵ Dahl *et al.* 2007.

Specie nell'ambito dello sviluppo di nanotecnologie per il trattamento di matrici ambientali, diventa dunque cruciale, per un efficace *eco-design*, il ruolo degli ecotossicologi, che sono chiamati da una parte a fornire al legislatore protocolli di validazione solidi e affidabili per la valutazione della sicurezza ambientale, e dall'altra a non limitarsi a svolgere un ruolo di controllore nella valutazione del rischio per le nuove nano-soluzioni proposte, ma piuttosto a svolgere una funzione proattiva finalizzata a contribuire alla progettazione di nanomateriali ingegnerizzati sicuri per l'ambiente.

La valutazione (eco)tossicologica entra dunque a far parte della fase di sintesi sin dalle prime indagini su scala di laboratorio, sollecitando di volta in volta modifiche sia in termini di reagenti che di processo, per giungere a un prodotto finale che intrinsecamente minimizzi il rischio (eco)tossicologico proprio a motivo dell'approccio utilizzato per la sua progettazione (*Fig.03*)¹⁶.

A indicare una strada da percorrere per il raggiungimento di questo obiettivo è il secondo principio, "progettazione per ridurre l'impatto ambientale", a nostro avviso strettamente correlato al primo: «Study nanomaterial degradation and fate in the environment; design material to degrade to harmless subunits or products. An important approach involves avoiding the use of hazardous elements in nanoparticle formulation; the use of hazardless, bio-based nanoparticle feedstocks may be a key»¹⁷.

Ci preme in particolare evidenziare qui il sollecito a considerare fonti *bio-based* da cui estrarre materie prime per la sintesi dei nanomateriali, viste non solo come una soluzione più sostenibile, ma capace anche di offrire maggiori garanzie per un prodotto più sicuro per l'ambiente. Riconsidereremo questo aspetto più avanti, affrontando uno specifico caso studio. La piena adesione a tutti e sei i principi richiede poi l'impiego di strumenti per la valutazione dell'intero ciclo di vita del prodotto (*Life Cycle Assessment, LCA*) e la conseguente individuazione delle fasi in cui risulti determinante intervenire per rendere più efficiente e sostenibile il processo¹⁸. In questo contesto è sempre Hutchinson a evidenziare le lacune ancora presenti nello sviluppo di processi sintetici efficienti per sistemi così complessi come quelli nano-dimensionati, e a denunciare la mancanza di strumenti efficaci e misurabili per predire il rapporto impatto/beneficio nel ciclo di vita sia dei prodotti che dei processi stessi¹⁹.

¹⁶ Corsi *et al.* 2023.

¹⁷ Dahl *et al.* 2007.

¹⁸ García-Quintero *et al.* 2021.

¹⁹ Hutchinson 2016.

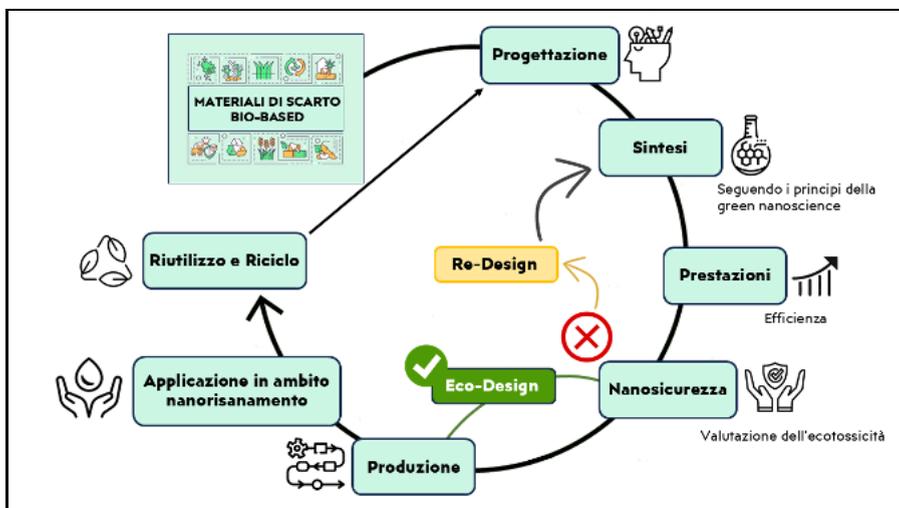


Fig.03. L'approccio dell'eco-design nella sintesi di nanomateriali.

In altre parole, per i nanomateriali mancano spesso dati utili per poter produrre una LCA attendibile, sia in termini, ancora una volta, di impatto (eco)tossicologico che di scalabilità di processo.

Più in generale è bene qui sottolineare come, in una logica di *eco-design*, e quindi di operatività e di predizione su scala di laboratorio, spesso lo strumento LCA, per quanto raccomandato nelle linee guida SSbD per composti chimici e materiali, risulti poco efficace, perché più adatto a valutare processi già in fase quantomeno di pre-industrializzazione (TRL – *Technology Readiness Level* più elevati). Si può ovviare a questo limite da un lato sviluppando modelli che simulino le fasi di *scale-up*, dall'altro utilizzando approcci semplificati che consentano valutazioni e correttivi su piccola scala, per poi applicare il modello LCA negli *step* successivi a scala maggiore. A titolo di esempio, il modello ESCAPE (*Evaluation of Sustainability of material substitution using Carbon footPrint by a simplifiEd approach*), recentemente sviluppato da Ducoli *et al.*²⁰, considera solo due parametri, l'energia consumata nel processo (*embodied energy*) e la CO₂ rilasciata per unità di massa di materiale prodotto (*carbon footprint*), e risulta particolarmente efficace nell'*eco-design*, specie nella comparazione di diversi prodotti e/o processi.

²⁰ Ducoli *et al.* 2023.

3. Nanospugne di cellulosa per la decontaminazione delle acque: un caso studio di applicazione dell'*eco-design*

Sulla base di quanto precedentemente trattato, negli ultimi anni abbiamo definito una strategia di *eco-design* che può rappresentare un esempio significativo di come sia possibile progettare nanotecnologie sostenibili e sicure per il trattamento delle acque. La nostra personale risposta al titolo provocatorio di questo capitolo.

Essa si fonda su tre pilastri (*Fig.04*):

1. progettare i nanomateriali partendo da fonti sostenibili, rinnovabili e sicure per l'ambiente, possibilmente derivate da biomassa – inclusa quella di scarto – seguendo così la filiera virtuosa dell'economia circolare;
2. progettare i nanomateriali passando da un sistema nano-dimensionato a un sistema nano-strutturato, in modo da superare il problema dei potenziali rischi associati alla mobilità delle nanoparticelle, ma conservando nel composito finale tutti i vantaggi derivanti dall'operare su scala nano;
3. progettare i nanomateriali valutandone *step-by-step* l'ecotossicità e il ciclo di vita (LCA), in modo da poter ottimizzare processo e prodotto sin dalle prime fasi di sintesi.

Per quanto concerne il primo punto, l'utilizzo di biopolimeri estratti da risorse naturali di scarto pone solide basi per lo sviluppo di soluzioni eco-sostenibili ed eco-compatibili²¹, anche se è opportuno rimarcare due aspetti: *i*) un'origine naturale della materia prima non rappresenta di per sé garanzia assoluta di assenza di impatto ambientale ed (eco)tossicologico; *ii*) il recupero di bio-polimeri da biomassa richiede processi estrattivi che possono impattare in modo anche significativo sull'intero processo, specie per quanto concerne il consumo di elevati volumi d'acqua.

²¹ Barhoum *et al.* 2020.

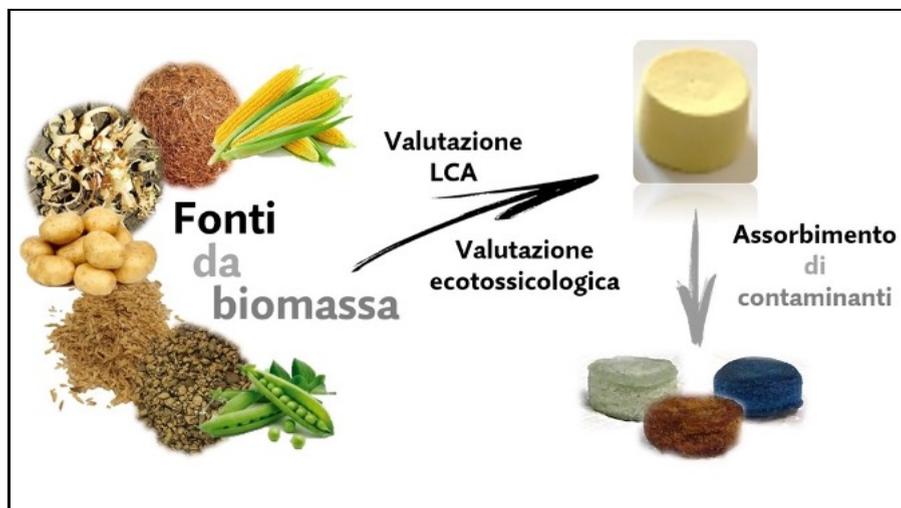


Fig.04. Le tappe verso la sintesi di nanospugne di cellulosa per il trattamento delle acque.

Per questo motivo, pur in linea con l'approccio suggerito, non condividiamo la riformulazione semplificata del primo principio della *Green Nanoscience* recentemente proposta da Huguet-Casquero, Gainza e Pedraz²²: «Choice of biomaterials from renewable sources and obtained with green extraction methods». Assunzioni semplicistiche e non puntualmente verificate secondo i protocolli di validazione prima raccomandati ci riporterebbe in quella nebbia di incertezza che è il vero limite allo sviluppo delle nanotecnologie.

Tra i diversi biopolimeri utili per la produzione di nanomateriali, la cellulosa ricopre indiscutibilmente un ruolo di primo piano. È il biopolimero più abbondante sulla crosta terrestre, e recuperabile sia direttamente da fonti naturali (cotone, legno, alghe) che da un'ampia gamma di scarti di filiera, da quella agricola a quella alimentare, dall'industria cartaria a quella tessile. È costituita da unità di β -glucopiranosio (glucosio), e presenta una serie di caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche che la rende particolarmente interessante per l'impiego in diversi settori industriali. L'apertura della sua struttura gerarchica mediante processi meccanici, enzimatici e/o chimici, consente di ottenere nanocellulosa²³ nella forma prevalentemente di nanofibre²⁴ o nanocristalli²⁵. Le prime presentano un diametro tra i 20 e i

²² Huguet-Casquero *et al.* 2021.

²³ Dufresne 2013.

²⁴ Nechyporchuk *et al.* 2016.

40 nm e una lunghezza nell'ordine dei micron, mentre i nanocristalli presentano una struttura aghiforme, con larghezza tra i 5 e i 20 nm e lunghezza in un range di 100-250 nm, avendo eliminato tutte le componenti amorfe.

I due processi più largamente utilizzati per l'ottenimento delle nanofibre si basano o su una idrolisi enzimatica mediante *endoglucanasi*²⁶, capace di rompere in modo casuale il legame β -1,4 che tiene unite le molecole di glucosio, o su una ossidazione regio-selettiva di una frazione dei gruppi alcolici presenti in posizione C6 dello stesso anello glucopiranosico²⁷. In quest'ultimo caso il processo è promosso dal catalizzatore TEMPO (2,2,6,6-tetrametil-1-piperidinilossi), utilizzando come ossidante finale NaClO (candeggina), e porta all'introduzione sulla catena polisaccaridica di un numero variabile – e controllabile in un certo intervallo – di unità carbossiliche, come illustrato nel primo *step* illustrato in *Fig.05*.

Una valutazione comparativa LCA di entrambi i processi su scala di laboratorio, con simulazioni di scalabilità, ha evidenziato gli anelli deboli della catena produttiva²⁸. L'analisi rivela un minore impatto, in termini di consumo energetico e produzione di equivalenti di CO₂, per l'approccio enzimatico rispetto a quello TEMPO-mediato nelle fasi di pre-trattamento, mentre quest'ultimo porta a un risparmio energetico nelle fasi di trattamento meccanico, grazie proprio all'introduzione dei gruppi carbossilici che, a pH basici, si deprotonano caricandosi negativamente, favorendo così la separazione delle singole nanofibre mediante repulsione elettrostatica. Inoltre, il prodotto ottenuto nel processo ossidativo, già pre-funzionalizzato, consente di procedere con la fase di nano-reticolazione senza richiedere ulteriori passaggi sintetici, che dovrebbero invece essere considerati per la nanofibra di origine enzimatica, qualora volesse essere utilizzata per gli stessi scopi. Non ultimo, l'impatto su quasi tutti gli indici misurati e simulati diminuisce in modo significativo passando dall'utilizzo di una matrice vergine di partenza, a un materiale di scarto, con gli evidenti vantaggi legati alla circolarità e rivalorizzazione di un rifiuto.

L'impatto (eco)tossicologico di entrambe le tipologie di nanofibre è stato recentemente valutato nel mollusco bivalve marino *Mytilus galloprovincialis* in concentrazioni di esposizione ambientale realistiche e acute²⁹. Lo studio ha evidenziato da una parte un impatto sia sulla stabilità lisosomiale degli emociti del mitilo che della funzione colinergica nelle branchie, dovuto essenzialmente a interazioni di tipo fisico/meccanico delle nanofibre con

²⁵ Trache *et al.* 2017.

²⁶ Pääkkö *et al.* 2007.

²⁷ Pierre *et al.* 2017.

²⁸ Gallo Stampino 2021.

²⁹ Rusconi *et al.* 2024.

le membrane cellulari. D'altra parte, non è stata registrata alcuna alterazione significativa dei *marker* di *stress* ossidativo o del metabolismo nelle ghiandole digestive dei molluschi, e in generale non è stata rilevata alcuna tossicità acuta negli organismi studiati.

Questi risultati da un lato supportano la necessità di ulteriori approfondimenti su orizzonti a più lunga durata espositiva, e dall'altra rafforzano la strategia ipotizzata di promuovere la reticolazione delle nanofibre per limitarne la mobilità.

L'approccio da noi adottato si è basato sull'opportunità presentata dall'introduzione dei gruppi carbossilici sulle nanofibre ottenute attraverso il processo TEMPO-mediato (*Fig.05*). L'idea è stata quella di promuovere la reticolazione delle fibre mediante aggiunta, in una dispersione acquosa delle nanofibre, di un polimero poliamminico ramificato (polietilenimina ramificata, b-PEI 25 kDa). Un semplice trattamento termico, che prevede congelamento, liofilizzazione e riscaldamento in forno a temperature di poco inferiori ai 100°C, ha portato a "nanospugne" di cellulosa (CNS) nano-strutturate, micro- e nano-porose (*Fig.06*), che si sono rivelate particolarmente efficaci nella rimozione di un'ampia gamma di contaminanti sia da acqua dolce che acqua marina, quali metalli pesanti, pesticidi, antibiotici e coloranti ampiamente utilizzati nell'industria tessile³⁰.

I materiali sono stati ottimizzati e ingegnerizzati secondo i principi dell'*eco-design*. Studi di inibizione di crescita algale e di esposizione in vivo verso mitili bivalvi marini hanno portato a individuare rischi legati al parziale rilascio di b-PEI – risultato eco-tossico – nel mezzo acquoso³¹. Questi risultati hanno portato *in primis* a una modifica della formulazione, con l'aggiunta di acido citrico per garantire una maggiore efficienza di reticolazione, un migliore fissaggio del b-PEI nel sistema, e una maggiore resistenza meccanica in acqua della nanospugna. L'ottimizzazione del processo di reticolazione ha anche consentito di ridurre in modo significativo il dosaggio del polimero poliamminico nella formulazione finale.

³⁰ Melone *et al.* 2015; Fiorati *et al.* 2020; Riva *et al.* 2020.

³¹ Fiorati *et al.* 2020.

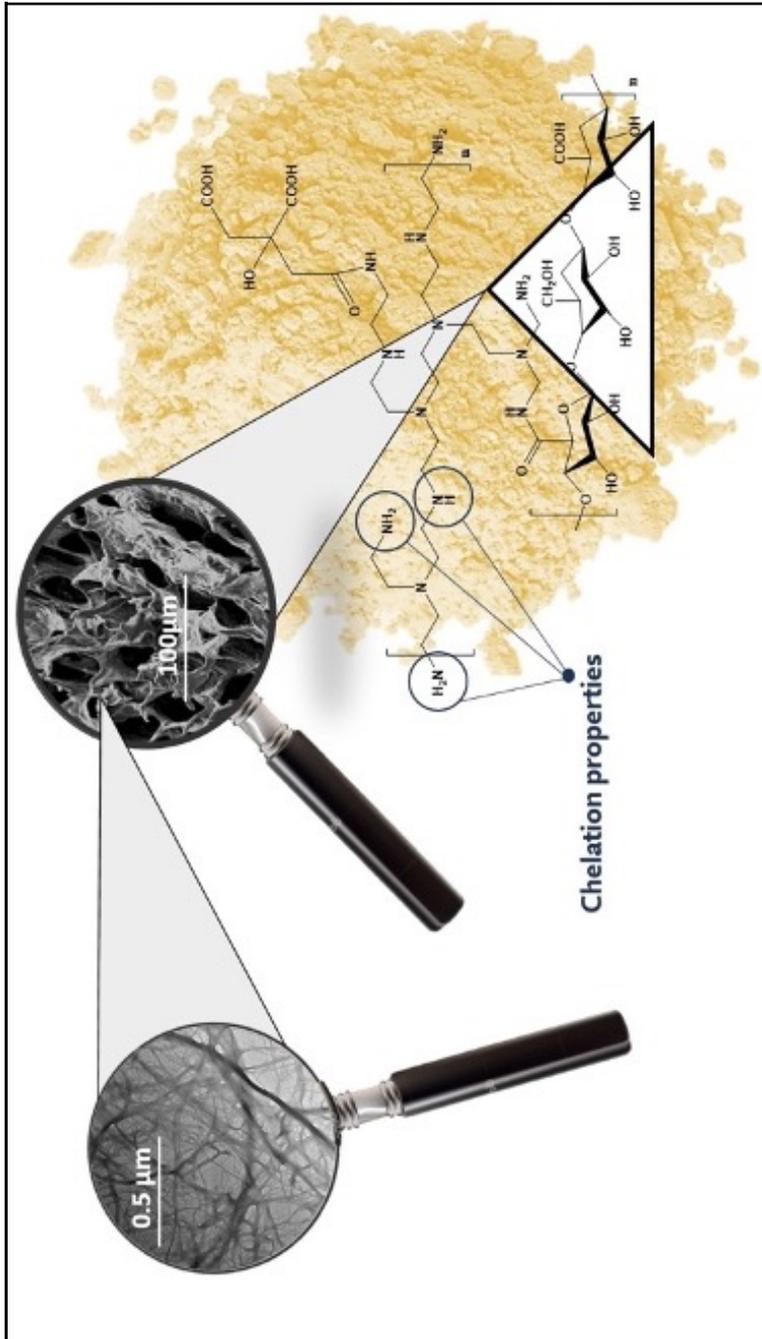


Fig.06. La struttura delle nanospugne.

Si è poi provveduto a una revisione della fase di lavaggio del materiale, per un'efficace rimozione delle componenti eventualmente non reticolate. Il risultato è stato l'ottenimento di un nanomateriale riprogettato e validato da un punto di vista (eco)tossicologico senza che ciò impattasse sulle prestazioni finali di adsorbimento di contaminanti. Più recentemente, un'analisi più dettagliata e una valutazione con utilizzo delle nanospugne per la decontaminazione di metalli pesanti in scenari reali, ha portato a confermare le criticità derivanti dal possibile rilascio di b-PEI, superabili mediante preventivo condizionamento del materiale con acqua del mezzo che poi dovrà essere trattata³². D'altro canto, questi studi hanno consolidato la valutazione positiva sul basso rischio derivante dall'uso delle nanofibre, così come dell'acido citrico aggiunto alla formulazione.

Curiosamente, gli stessi interventi finalizzati a superare i problemi di rischio ambientale rilevati hanno portato significativi vantaggi anche dal punto di vista della sostenibilità del prodotto e del processo, valutata mediante analisi LCA³³. La riduzione dei quantitativi di b-PEI nella formulazione finale, la modifica dello *step* di lavaggio – passando dall'utilizzo di etanolo a reflusso a quello di acqua a temperatura ambiente – e la possibilità di recuperare il catalizzatore TEMPO impiegato nella fase di produzione delle nanofibre ha consentito di ridurre significativamente gli impatti su tutte le categorie analizzate, con una previsione simulata di ulteriore abbattimento in fase di *scale-up*. Il nanomateriale così prodotto è stato impiegato in sperimentazioni *in situ*.

4. Conclusioni e raccomandazioni

Riprendendo l'interrogativo proposto nel titolo di questo capitolo, giungiamo alla conclusione che si possa affermare che i nanomateriali rappresentino una grande opportunità per la bonifica ambientale. Per coglierla, occorre però che si attivino tutti i meccanismi regolatori e di competenze scientifiche per una corretta valutazione dei rischi in termini di sicurezza ambientale e una loro significativa mitigazione mediante l'utilizzo dello strumento dell'*eco-design*.

Se tale approccio può apparire dispendioso in termini di tempo e di investimenti nella fase di progettazione e sviluppo, esso è l'unico in grado di garantire la realizzazione di nanotecnologie sicure e sostenibili per l'ambiente, realmente scalabili e immettibili sul mercato.

³² Esposito *et al.* 2023; Esposito *et al.* 2024.

³³ Bartolozzi *et al.* 2020.

L'*eco-design* è l'unico strumento capace di sostituire, nello sviluppo delle nanotecnologie, il muro della *negazione* (non si può), con le molteplici vie della *prevenzione*.

A seguito di tutta la fase di riprogettazione, il caso studio qui presentato costituisce un valido esempio di come tale approccio possa portare a soluzioni efficaci e scalabili. Risultati ottenuti hanno permesso inoltre di ampliare i campi di applicazione di questi nanomateriali, e le nanospugne sono diventate parte integrante di altri due progetti finanziati dalla Comunità Europea, finalizzati al trattamento e alla gestione della risorsa acqua, sia potabile (SafeCrew³⁴) che di refluo industriale (Life CASCADE³⁵), a riprova dell'efficacia del modello proposto.

Bibliografia

- Anastas *et al.* 2010 P. Anastas *et al.*, *Green Chemistry: Principles and Practice*, Chem. Soc. Rev. 39(1), 2010, pp. 301-312.
- Attia *et al.* 2021 M.S. Attia *et al.*, *Emerging Advances and Current Applications of NanoMOF-Based Membranes for Water Treatment*, Chemosphere 292, 2022, 2022, 133369, pp. 1-24.
- Barhoum *et al.* 2020 A. Barhoum *et al.*, *Plant Celluloses, Hemicelluloses, Lignins, and Volatile Oils for the Synthesis of Nanoparticles and Nanostructured Materials*, Nanoscale 12(45), 2020, pp. 22845-22890.
- Bartolozzi *et al.* 2020 I. Bartolozzi *et al.*, *Life Cycle Assessment of Emerging Environmental Technologies in the Early Stage of Development: A Case Study on Nanostructured Materials*, J. Ind. Ec. 24(1), 2020, pp. 101-115.
- Bonelli *et al.* 2020 B. Bonelli *et al.*, *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*, Amsterdam Elsevier 2020.
- Brumfiel 2003 G. Brumfiel, *A Little Knowledge about Nanotechnology*, Nature 424, 2003, pp. 246-248.
- Corsi *et al.* 2018 I. Corsi *et al.*, *Ecofriendly Nanotechnologies and Nanomaterials for Environmental Applications: Key Issue and Consensus Recommendations for Sustainable and Ecosafe Nanoremediation*, Ecotoxicology and Environmental Safety 154, 2018, pp. 237-244.

³⁴ Si veda il link: <https://safecrew.org/> [consultato il 15 gennaio 2025].

³⁵ Si veda il link: <https://lifecascade.eu/> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Corsi *et al.* 2021 I. Corsi *et al.*, *Eco-Interactions of Engineered Nanomaterials in the Marine Environment: Towards an Eco-Design Framework*, *Nanomaterials* 11(8), 2021, pp. 1903-1934.
- Corsi *et al.* 2023 I. Corsi *et al.*, *Environmental Safety of Nanotechnologies: The Eco-Design of Manufactured Nanomaterials for Environmental Remediation*, *Sc. Tot. Env.* 864, 2023, p. 161181.
- Dahl *et al.* 2007 J. A Dahl *et al.*, *Toward Greener Nanosynthesis*, *Chem. Rev.* 107(6), 2007, pp. 2228-2269.
- Ducoli *et al.* 2023 S. Ducoli *et al.*, *ESCAPE Simplified Approach Designed to Evaluate Materials Sustainability: The Case of New Adsorbent Materials for Activated Carbon Substitution*, *Sus. Mat. Tech.* 38, 2023, p. e00709.
- Dufresne 2013 A. Dufresne, *Nanocellulose: A New Ageless Bionanomaterial*, *Materials Today* 16(6), 2013, pp. 220-227.
- Esposito *et al.* 2023 M.C. Esposito *et al.*, *Nanostructured Cellulose Sponge Engineered for Marine Environmental Remediation: Eco-Safety Assessment of Its Leachate on Sea Urchin Reproduction (Part A)*, *Env. Poll.* 334, 2023, p. 122169.
- Esposito *et al.* 2024 M.C. Esposito *et al.*, *Reproductive Toxicity Assessment of Cellulose Nanofibers, Citric Acid, and Branched Polyethylenimine in Sea Urchins: Eco-Design of Nanostructured Cellulose Sponge Framework (Part B)*, *Env. Poll.* 350, 2024, p. 123934.
- Fiorati *et al.* 2020 A. Fiorati *et al.*, *Eco-Design of Nanostructured Cellulose Sponges for Sea-Water Decontamination from Heavy Metal Ions*, *J. Clean. Prod.* 246, 2020, p. 119009.
- Gallo Stampino 2021 P. Gallo Stampino *et al.* *Comparative Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibres Production Routes from Virgin and Recycled Raw Materials*, *Molecules* 26, 2021, p. 2558.
- García-Quintero *et al.* 2021 A. García-Quintero *et al.*, *A Critical Analysis of Environmental Sustainability Metrics Applied to Green Synthesis of Nanomaterials and the Assessment of Environmental Risks Associated with the Nanotechnology*, *Sc. Tot. Env.* 793, 2021, p. 148524.
- Gebre 2023 S.H. Gebre, *Nanoscale zero-valent iron for remediation of toxicants and wastewater treatment*, *Env. Tec. Rev.* 12(1), 2023, pp. 390-419.
- Hagos Gebre 2023 S. Hagos Gebre, *Nanoscale zero-valent iron for remediation of toxicants and wastewater treatment*, *Env. Tec. Rev.* 12(1), 2023, pp. 390-419.

- Huguet-Casquero *et al.* 2020 A. Huguet-Casquero *et al.*, *Towards Green Nanoscience: From Extraction to Nanoformulation*, Biotech. Adv. 46, 2021, p. 107657.
- Hutchison 2016 J.E. Hutchison, *The Road to Sustainable Nanotechnology: Challenges, Progress and Opportunities*, ACS Sus. Chem. and Eng. 4(11), 2016, pp. 5907-5914.
- Melone *et al.* 2015 L. Melone *et al.*, *TEMPO-Oxidized Cellulose Cross-Linked with Branched Polyethyleneimine: Nanostructured Adsorbent Sponges for Water Remediation*, ChemPlusChem 80(9), 2015, pp. 1408-1415.
- Nechyporchuk *et al.* 2016 O. Nechyporchuk *et al.*, *Production of Cellulose Nanofibrils: A Review of Recent Advances*, Ind. Crops. Prod. 93, 2016, pp. 2-25.
- Pääkko *et al.* 2007 M. Pääkko *et al.*, *Enzymatic Hydrolysis Combined with Mechanical Shearing and High-Pressure Homogenization for Nanoscale Cellulose Fibrils and Strong Gels*, Biomacrom. 8(6), 2007, pp.1934-1941.
- Pathak *et al.* 2022 Y.V. Pathak *et al.*, *Sustainable Nanotechnology: Strategies, Products, and Applications*, Hoboken, Wiley & Sons 2022.
- Pierre *et al.* 2017 G. Pierre *et al.*, *TEMPO-Mediated Oxidation of Polysaccharides: An Ongoing Story*, Carb. Pol. 165, 2017, pp. 71-85.
- Riva *et al.* 2020 L. Riva *et al.*, *Nanostructured Cellulose-Based Sorbent Materials for Water Decontamination from Organic Dyes*, Nanomaterials 10(8), 2020, pp.1-18.
- Rusconi *et al.* 2024 T. Rusconi *et al.*, *Environmental Safety of Nanocellulose: An in Vivo Acute Study with Marine Mussels *Mytilus Galloprovincialis**, Env. Sc. Nano 11(1), 2024, pp. 61-77.
- «The Economist» 2007 *A Little Risky Business*, The Economist, November 22nd 2007, available at: <https://www.economist.com/briefing/2007/11/22/a-little-risky-business> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Trache *et al.* 2017 D. Trache *et al.*, *Recent Progress in Cellulose Nanocrystals: Sources and Production*, Nanoscale 9(5), 2017, pp. 1763-1786.

Nuovi contaminanti emergenti negli ambienti lacustri: le microplastiche

Roberta Bettinetti*

1. L'era della plastica

Storicamente l'umanità ha attraversato diverse epoche che in almeno tre casi hanno preso – come è noto – il nome dei materiali più importanti utilizzati in quel determinato periodo storico (ad esempio l'Era della Pietra, l'Era del Bronzo, l'Era del Ferro). Sul modello della periodizzazione sopra esposta, la nostra epoca potrebbe essere definita come l'Era della Plastica o Plasticene, dal momento che la plastica rappresenta il materiale più prodotto e utilizzato nel mondo.

Con il termine plastica (dal greco “*plastikos*”, che significa “modellabile”) intendiamo materiali organici polimerici, a elevata massa molecolare, preparati a partire da monomeri ottenuti da materia prima di origine fossile. Tali materiali possono essere utilizzati puri o in miscela e possono essere addizionati di additivi di diversa natura¹. La plastica è stata sintetizzata a partire dall'inizio del 1900 (bakelite, resina fenolo-formaldeide, 1907) e, anche se all'inizio il suo utilizzo era limitato, dal 1950 la sua produzione è aumentata in modo esponenziale: si è passati da 2 milioni di tonnellate di plastica prodotte nel 1950 a circa 375 milioni di tonnellate nel 2019 a livello globale; complessivamente nel mondo sono state prodotte circa 9,5 miliardi di tonnellate di plastica. A livello mondiale, il Paese *leader* nella produzione di plastica è la Cina (32%), seguita dal Nord America (18%) e dall'Europa (15%). In Europa, la domanda di plastica proviene principalmente dalla Germania (23,2%) e dall'Italia (14,3%), seguite da Francia, Spagna, Polonia e Regno Unito². Nel 2021,

* Professore ordinario di Ecologia presso l'Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento di Scienze umane e dell'Innovazione per il Territorio. E-mail: roberta.bettinetti@uninsubria.it.

¹ Ivleva *et al.* 2017.

² *Plastics – the Facts* 2020.

in Europa sono state prodotte circa 57,2 milioni di tonnellate di plastica e il settore che ha contribuito maggiormente è il cosiddetto “*packaging*” (44% della domanda europea).

L'utilizzo della plastica ha senza dubbio portato a miglioramenti nella vita di tutti i giorni. Un esempio significativo è l'utilizzo dei prodotti monouso (circa il 50% della plastica utilizzata in Europa) che ha recato vantaggi soprattutto in termini di igiene e di risparmio di tempo: la possibilità di utilizzare un oggetto una sola volta ha ridotto o eliminato i contagi e ha consentito di ridurre il tempo impiegato e la fatica nell'acquisto di beni riutilizzabili, migliorando lo stile di vita delle persone.

Gli attuali bicchieri “usa e getta” di carta sono in realtà ancora foderati o rivestiti di plastica (polietilene), ancora oggi ampiamente utilizzata a questo scopo in molti Paesi, compresa l'Italia (*Fig.01*).



Fig.01. Bicchiere usa e getta di carta contenente plastica.

Non esiste ancora una legislazione che regoli in modo preciso l'utilizzo e la produzione globale di questi prodotti che hanno avuto successo negli Stati Uniti con l'obiettivo di alleggerire, in particolare, il lavoro delle casalinghe americane.

In generale, l'utilizzo delle plastiche ha grandi vantaggi che possiamo riassumere sommariamente qui di seguito:

- La plastica è versatile e ha un'ampia gamma di applicazioni. È un materiale che può essere modellato in diverse forme ed è utilizzato in settori come l'imballaggio, l'edilizia, l'elettronica e la sanità.
- I prodotti in plastica sono molto duraturi. Sono spesso resistenti e possono sopportare l'usura e gli strappi, rendendoli appunto di lunga durata. Questa qualità è particolarmente preziosa nei materiali da costruzione e nei beni di consumo.
- La leggerezza rispetto ad altri materiali rende la plastica una scelta preferenziale nei settori che richiedono una riduzione del peso, come l'aerospaziale e i trasporti. La leggerezza contribuisce anche al risparmio energetico durante il trasporto.
- L'efficienza dei costi rispetto ad altri materiali di largo consumo ha reso la plastica un'opzione economicamente vantaggiosa per molte industrie, portando a un'ampia adozione della medesima.
- La resistenza all'acqua rende la plastica adatta a varie applicazioni, come materiali da imballaggio, bottiglie e impianti idraulici.
- Alcuni materiali plastici, come il cloruro di polivinile (PVC), vengono utilizzati nella produzione di dispositivi medici per garantire la sicurezza dei pazienti durante le procedure mediche. Inoltre, i diversi tipi di imballaggi in plastica contribuiscono a mantenere la freschezza e l'igiene dei prodotti alimentari.

Dalla sua sintesi a oggi, dunque, gli usi sono innumerevoli e possiamo affermare senza tema di smentita che la plastica sia presente in quasi ogni attività umana (*Fig. 02*).

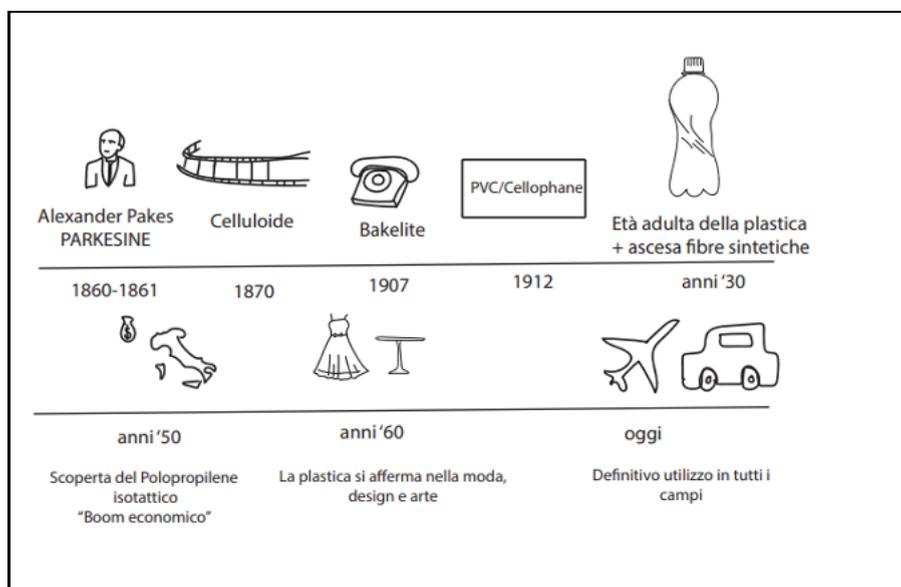


Fig.02. Storia dell'utilizzo della plastica dalla metà del 1800 a oggi (disegnato dall'autrice).

Nonostante questi vantaggi, l'uso della plastica presenta altrettanti svantaggi. La gestione dei rifiuti di plastica è indubbiamente migliorata, ma permane ancora il problema che una grande quantità di plastica continui a finire nell'ambiente, fuoriuscendo dai sistemi di raccolta³.

Negli ultimi anni sono stati fatti molti sforzi per produrre plastiche con processi sostenibili dal punto di vista ambientale. Tuttavia, ancora oggi il 90,2% della plastica mondiale è di origine fossile⁴ e solo il 9,8% della plastica a livello globale (il 12,4% in Europa) deriva da processi circolari, ad esempio dal riciclo del materiale al termine del periodo d'uso (es. per rifusione o per recupero del monomero); oppure dal riutilizzo del materiale stesso, oppure dalla produzione *ex novo* di materiale polimerico da materia prima costituita da sottoprodotti o scarti di altre lavorazioni. In quest'ultima classe ricadono le bioplastiche, ovvero materie plastiche preparate a partire da biomasse.

Nel 2020, sono state raccolte dopo l'utilizzo circa 29,5 milioni di tonnellate di plastica: il 35% di queste è stato riciclato, mentre il restante materiale plastico è stato utilizzato per la produzione di energia (42%) o smaltito in discarica (23%).

³ Rhodes 2018.

⁴ *Plastics – the Facts* 2020.

1.1. Dalla plastica alle microplastiche

Nonostante la resistenza delle materie plastiche, una volta rilasciate nell'ambiente, le plastiche possono subire diversi processi di invecchiamento⁵.

I fattori principali che portano alla frammentazione della plastica possono essere sia abiotici che biotici (ovvero dovuti a fenomeni legati agli organismi). Quando la plastica è presente nell'ambiente, tra i processi più importanti che portano alla sua degradazione c'è la fotodegradazione⁶. La radiazione UV interagisce con i cromofori, avviando una serie di reazioni di foto-ossidazione che alla fine portano alla rottura della catena principale e alla reticolazione dei polimeri. Queste reazioni promuovono l'indebolimento della struttura polimerica, favorendo l'irruvidimento del polimero. In sinergia con la radiazione UV, può agire la temperatura. La degradazione termica, infatti, è un altro processo che, simile all'esposizione UV, promuove una serie di reazioni di ossidazione, portando alla rottura della catena principale del polimero e alla reticolazione del polimero⁷. L'energia di attivazione determina la temperatura che innesca il processo di degradazione termica dei materiali plastici. In presenza di ossigeno, le tipiche plastiche contenenti idrogeno come costituente danno luogo a un'ossidazione esotermica a una temperatura prossima o maggiore di 200°C. Nell'ambiente, l'ossidazione esotermica è improbabile a causa dell'elevata temperatura richiesta, ma la lenta ossidazione termica dei materiali plastici può verificarsi in combinazione con la fotodegradazione, specialmente su spiagge o marciapiedi direttamente esposti alla luce solare. Inoltre, la temperatura e la radiazione UV possono avere effetti sinergici sulla degradazione dei materiali plastici e la velocità delle reazioni ossidative aumenta anche con l'incremento della temperatura.

Oltre ai deterioramenti, UV e termici, si può avere anche degradazione della plastica dovuta all'abrasione e alla collisione su substrati duri a causa dell'azione di forze esterne. Questo tipo di deterioramento è principalmente legato al danneggiamento fisico della struttura del polimero anziché a processi chimici ed è correlato alla capacità di allungamento a trazione del polimero. La rottura delle catene dei polimeri durante la degradazione foto e termica influisce sulle proprietà meccaniche delle plastiche e in particolare sul loro allungamento a trazione in caso di rottura⁸. Ad esempio, è ciò che

⁵ Samir *et al.* 2021.

⁶ Zhang *et al.* 2021.

⁷ Fairbrother *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2021.

⁸ Andradý 2017.

di solito accade con l'usura degli pneumatici, l'usura dei freni e della formazione di particelle prodotte dall'usura delle strade⁹.

Oltre a questi fattori abiotici, può verificarsi anche la degradazione biotica. Alcuni organismi, infatti, possono deteriorare la plastica mediante processi sia chimici sia biologici. I principali microrganismi coinvolti in questi processi sono funghi, batteri e alghe¹⁰. In sintesi, questi organismi colonizzano frammenti di plastica già indeboliti e, grazie a diverse reazioni enzimatiche, sono in grado di biodegradare i polimeri per generare metaboliti (a partire dalla plastica stessa) che possono essere anche assimilati¹¹.

Anche gli organismi invertebrati possono agire come fattore di deterioramento biotico della plastica, rompendo e ingerendo la plastica. Grazie a questa loro capacità particolare, diversi studi esplorano la possibilità di utilizzare microrganismi e invertebrati come approccio efficiente, ecologico ed economico alla degradazione di essa¹².

Nonostante la capacità di biodegradare le materie plastiche, tuttavia, l'azione degli organismi contribuisce all'irruvidimento della plastica diffusa in natura, aumentandone a sua volta il numero di frammenti in ambiente. Quando sottoposte a questi processi, e in funzione di essi, le plastiche possono deteriorarsi promuovendo la formazione di particelle che sono in grado di entrare facilmente nelle catene trofiche.

Sebbene esistano ancora alcune discrepanze nella definizione delle particelle di plastica¹³, in base alle dimensioni le MP sono attualmente individuate¹⁴ come quelle particelle comprese tra 0,1 e 5 mm. Al di sotto di 0,1 mm si parla di nanoplastiche.

Le micro- e nanoplastiche sono difficilmente percepibili a occhio nudo e rappresentano quindi una minaccia nascosta per l'ambiente.

Le MP sono ubiquitarie, tanto che la loro concentrazione nei ghiacci delle regioni remote del Mar Artico è superiore a quella delle zone più inquinate dell'Oceano Pacifico. Esistono anche MP prodotte intenzionalmente dall'uomo per le loro proprietà abrasive: esse sono principalmente utilizzate in cosmetici, dentifrici, deodoranti, creme da barba e paste per lucidare oggetti.

In questo caso si parla di MP primarie; mentre quelle prodotte per degradazione naturale sono dette MP secondarie.

⁹ Wehrhahn *et al.* 2018.

¹⁰ Samir *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2021.

¹¹ Samir *et al.* 2021.

¹² Kumar *et al.* 2021.

¹³ Hartmann *et al.* 2019.

¹⁴ EFSA 2016.

È importante sottolineare che esiste una crescente consapevolezza globale delle questioni ambientali causate dall'uso della plastica. Molti individui, organizzazioni e governi stanno lavorando attivamente per ridurre il suo utilizzo e promuovere alternative più sostenibili («Gazzetta Ufficiale Europea» del 27 settembre 2023).

A partire dal 2019, l'ECHA (European Chemical Agency) ha proposto alcune restrizioni nella produzione di MP (“prodotti intenzionali”) nel mercato dell'UE per ridurre il rilascio nell'ambiente. Secondo le stime, le diverse restrizioni porterebbero a una riduzione del rilascio di circa 500.000 tonnellate di MP in 20 anni. Già dal 17 ottobre dello scorso anno (2023) è stato compiuto un primo passo in questa direzione vietando a livello europeo la produzione di “glitter” e microsfele cosmetiche.

1.2. Il ruolo delle microplastiche negli ambienti acquatici

Le prime evidenze di inquinamento da plastica negli ecosistemi acquatici marini risalgono al 1972, quando Carpenter e Smith¹⁵ hanno osservato la presenza di plastica galleggiante sulla superficie del Mar dei Sargassi.

La questione della contaminazione degli ecosistemi acquatici da plastica è diventata più rilevante all'inizio degli anni 2000 e il numero è aumentato in modo esponenziale a partire dal 2015¹⁶. Questo appare evidente, ad esempio, verificando le parole chiave “plastica, inquinamento, ecosistema acquatico” nel *database* di Scopus.

Secondo i dati riportati nel *database*, nel 1995 è stato pubblicato solo uno studio sulla presenza di plastica nelle acque, mentre nel 2015 sono stati pubblicati 25 articoli in questo campo, aumentati poi esponenzialmente in anni recenti. È anche possibile evidenziare come il numero degli studi relativi agli organismi e ai sedimenti delle acque dolci sia proporzionalmente inferiore rispetto a quelli marini.

Negli ultimi decenni, i detriti di plastica sono diventati una preoccupazione globale a causa della loro ampia distribuzione e delle conseguenze ambientali associate, specialmente nel campo degli ambienti acquatici. Gli ecosistemi acquatici infatti sembrano essere il comparto più colpito, tanto che le statistiche hanno previsto che al ritmo attuale di inquinamento, nel 2050 gli oceani saranno più ricchi di plastica che di pesci¹⁷. Si stima che circa 4,8-12,7 milioni di tonnellate di plastica provenien-

¹⁵ Carpenter-Smith 1972.

¹⁶ Ivleva *et al.* 2017.

¹⁷ Rhodes 2018.

ti da fonti terrestri entrino ogni anno negli oceani del mondo¹⁸, rappresentando il 50%-80% dei rifiuti sulle spiagge, di quelli galleggianti sulla superficie dell'oceano e di quelli sul fondale marino¹⁹.

Come già riportato precedentemente, la plastica può entrare negli ambienti acquatici sotto forma di frammenti di plastica più grandi o di piccole particelle.

Gli impianti di trattamento delle acque reflue rappresentano uno dei principali veicoli per le fibre sintetiche derivanti dal lavaggio dei vestiti. Uno studio condotto nel 2016²⁰ ha evidenziato che il rilascio di fibre è di circa 700.000 particelle in 6 kg di vestiti in un singolo lavaggio. In sintesi, le MP possono fluire negli impianti attraverso le piogge e quindi essere scaricate accidentalmente nelle acque o possono essere direttamente rilasciate negli scarichi domestici²¹.

È quindi interessante approfondire il ruolo degli impianti di depurazione nell'inquinamento da MP. Anche se gli impianti di depurazione sembrano essere una delle fonti più importanti di MP nelle acque²², l'efficienza nella rimozione delle MP da parte loro è molto alta, pari al 97-99% e, quindi, la grande quantità di microplastiche nell'ambiente è dovuta ai grandi volumi trattati²³. La rimozione delle MP avviene attualmente per separazione gravimetrica, per sedimentazione e/o per filtrazione, prima che vengano rilasciate nell'ambiente. Nonostante l'inquinamento da MP primarie sia considerevole, specialmente nelle vicinanze dello scarico delle acque reflue²⁴, la frazione più abbondante di MP nelle acque è rappresentata da quelle secondarie²⁵.

Le MP sono state riconosciute come contaminanti emergenti dal centro di competenza sulle acque della Scozia²⁶ e la preoccupazione per tale fenomeno ha portato alla formulazione di linee guida di gestione da parte di diverse organizzazioni a livello globale. A tal fine, il Gruppo di esperti per il Programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP), il Programma d'azione del Mediterraneo del Programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP-MAP), la Convenzione di Oslo/Parigi per la protezione dell'ambiente marino del nord-est Atlantico (OSPAR) e la Commissione di Helsinki per la protezione dell'ambiente marino del Baltico (HELCOM)

¹⁸ Aljaibachi-Callaghan 2018.

¹⁹ Barnes *et al.* 2009.

²⁰ Napper-Thompson 2016.

²¹ Bellasi *et al.* 2020.

²² Mani *et al.* 2016.

²³ Murphy *et al.* 2016.

²⁴ Syberg *et al.* 2015.

²⁵ Waller *et al.* 2017.

²⁶ Blair 2017.

hanno tutti elaborato linee guida per la valutazione dei rifiuti marini, comprese le MP²⁷. La questione delle MP è poi ulteriormente aggravata dalle loro dimensioni ridotte e dalla loro ampia diffusione. A tal proposito, la dimensione limitata e la bassa densità rendono le MP in grado di galleggiare, promuovendo la dispersione mediante vento e onde²⁸. Inoltre, la loro ampia dispersione le rende un importante veicolo per il trasferimento di inquinanti e specie aliene²⁹, mettendo in pericolo gli organismi acquatici: tanto che quasi 700 specie acquatiche nel mondo sono state danneggiate dalla diffusione delle MP. Oltre a rappresentare un problema ecologico, esse, disperse nelle acque del mondo, influiscono negativamente anche sugli aspetti socio-economici della vita del pianeta, mettendo a rischio tra l'altro la pesca commerciale, il turismo, la navigazione e la salute umana³⁰.

1.3. Microplastiche nelle acque dolci

Il termine acque dolci si riferisce ai corpi idrici interni che contengono meno di 0,05 ppm di concentrazione di sali (tipicamente dunque laghi, fiumi, stagni e torrenti). A oggi, le ricerche delle MP nelle acque dolci sono meno abbondanti rispetto a quelle sugli ecosistemi marini. Nonostante ciò, è plausibile che le MP siano presenti come contaminanti nelle acque dolci in tutto il mondo, laghi e fiumi compresi³¹.

Le particelle di plastica nei laghi e nei fiumi possono avere diverse origini: affluenti, attività sulla superficie dell'acqua, turismo e improprio smaltimento di rifiuti plastici dismessi o lasciati in ambiente terrestre³². La contaminazione da MP è maggiore nei siti rivolti in prossimità delle aree inquinate dalle attività umane e dalle industrie³³. Inoltre, eventi di pioggia, il drenaggio delle acque, le inondazioni e il vento possono raccogliere e trasportare microplastiche disperse o generate sulla terra portandole verso gli ecosistemi di acqua dolce. Non solo questo: fiumi e i laghi possono diventare produttori di MP secondarie attraverso la frammentazione dei rifiuti di plastica abbandonati sulle loro rive e sulle spiagge, analogamente a quanto accade per gli ambienti marini³⁴.

²⁷ Auta *et al.* 2017.

²⁸ Hamid *et al.* 2018.

²⁹ Mammo *et al.* 2020.

³⁰ Thushari-Senevirathna 2020.

³¹ Cera *et al.* 2020.

³² GESAMP 2015.

³³ Hamid *et al.* 2018.

³⁴ Andrady 2011; Kataoka *et al.* 2019.

In tale contesto, i fiumi svolgono un ruolo importante nel trasporto della plastica nei laghi, nei mari e negli oceani. La quantità di MP presenti nei laghi dipende da diverse variabili e in modo specifico dal tempo di residenza delle acque, dalle dimensioni del corpo idrico, dal tipo di gestione dei rifiuti e dalla quantità delle acque reflue³⁵.

Sebbene le MP siano ubiquitarie negli ecosistemi lacustri, l'entità della contaminazione varia in relazione alle condizioni ambientali e antropogeniche³⁶. In particolare, la loro distribuzione orizzontale è principalmente legata a fattori ambientali come onde, correnti e direzione del vento³⁷.

Se rivolgiamo la nostra attenzione ai laghi, l'aspetto più importante nella distribuzione orizzontale delle particelle è senza dubbio la direzione in cui soffia il vento.

Anche la distribuzione verticale in colonna d'acqua non è uniforme: le MP mostrano un gradiente di distribuzione dall'alto verso il basso in relazione principalmente alla densità della plastica. Infatti, diversi studi hanno evidenziato una maggiore abbondanza di MP a bassa densità nelle acque superficiali, mentre le particelle ad alta densità tendono ad accumularsi nelle acque profonde e nei sedimenti³⁸. La densità della plastica in ambiente potrebbe variare a causa di diverse dinamiche, portando alla presenza di polimeri ad alta o bassa densità in comparti acquatici inaspettati³⁹.

1.3.1. Il ruolo dei sedimenti

L'indagine sulle MP nei sedimenti è diventata di rilievo dopo il 2010 e solo dopo il 2016 sono iniziate ad aumentare esponenzialmente le ricerche in questo campo⁴⁰. Ad oggi, la contaminazione dei sedimenti da microplastiche viene segnalata in tutto il mondo⁴¹. Anche se le conoscenze sull'impatto effettivo delle MP sui sedimenti sono ancora frammentarie, questo compartimento riveste un ruolo chiave negli ecosistemi di acqua dolce. Oltre a ciò, a causa delle dinamiche di partizione (menzionate nel paragrafo precedente), anche i polimeri a bassa densità hanno probabilità di

³⁵ Erkes-Medrano *et al.* 2015.

³⁶ Imhof *et al.* 2013.

³⁷ Liubartseva *et al.* 2016.

³⁸ Choy *et al.* 2019; Lenaker *et al.* 2021.

³⁹ Lenaker *et al.* 2021.

⁴⁰ Bellasi *et al.* 2021.

⁴¹ Hengstmann-Fischer 2020; Thompson *et al.* 2004.

affondare e accumularsi nei sedimenti⁴², determinando un aumento dell'accumulo di contaminanti in questo comparto.

I sedimenti spesso presentano condizioni anossiche che favoriscono l'accumulo di sostanze chimiche. Infatti, l'ambiente privo di ossigeno altera gli equilibri *redox* e, poiché il carico di metalli è fortemente influenzato dal contesto geochimico⁴³, diversi metalli antropogenici (ad esempio Pb, Cd e Hg) e numerosi contaminanti idrofobici possono accumularsi in quantità maggiori qui, rispetto alla colonna d'acqua⁴⁴. A tal riguardo, uno studio pubblicato nel 2015⁴⁵ ha dimostrato che solo l'1% di tali sostanze chimiche rimane disciolto in acqua, mentre il 99% viene accumulato nei sedimenti.

Oltre a essere un importante deposito di contaminanti, dai sedimenti dipende anche la vita degli organismi bentonici. Gli organismi bentonici vivono in prossimità o a contatto del fondo e grazie al loro stretto legame con il substrato possono essere utili bioindicatori della salute ambientale. Inoltre, essi rappresentano un componente chiave delle catene alimentari e per questa ragione sono rappresentativi del funzionamento dell'ecosistema⁴⁶. Considerando ciò, l'accumulo di MP nei sedimenti può aumentare notevolmente la possibilità di ingestione da parte degli organismi bentonici, determinando effetti negativi sull'intero ecosistema.

1.4. Microplastiche come fonte e serbatoio di contaminanti

Una volta diffuse negli ecosistemi acquatici, le MP possono interagire con i contaminanti presenti in acqua, come metalli pesanti e sostanze chimiche organiche idrofobiche⁴⁷. Inoltre, a causa dei processi di deterioramento, gli additivi e i plastificanti aggiunti ai polimeri durante il processo di produzione possono fuoriuscire dalla struttura polimerica, aumentando i rischi eco-tossicologici per gli organismi viventi⁴⁸.

La possibilità di adsorbire e desorbire sostanze chimiche sulle microplastiche dipende dai coefficienti di ripartizione di equilibrio tra microplastiche, sostanze chimiche e ambiente acquatico⁴⁹.

I principali fattori che influenzano l'interazione con le sostanze chimiche sono descritti di seguito:

⁴² Cózar *et al.* 2014; Kowalski *et al.* 2016; Zalasiewicz *et al.* 2016.

⁴³ Binda *et al.* 2018, 2021.

⁴⁴ Zhang *et al.* 2017.

⁴⁵ Saleem *et al.* 2015.

⁴⁶ Berlino *et al.* 2021.

⁴⁷ Wang *et al.* 2019.

⁴⁸ Ding *et al.* 2020.

⁴⁹ Mammo *et al.* 2020.

- Tipologia di MP: tipo di polimero, densità e struttura chimica. Nel polietilene, una delle più comuni resine termoplastiche, possono per esempio formarsi ampie cavità all'interno della struttura molecolare durante il processo di produzione. Queste cavità possono essere causate da diversi processi, come una distribuzione non uniforme del flusso di materiale durante la lavorazione, o da impurità presenti nel materiale di base.
- Dimensione delle MP: le dimensioni delle particelle influenzano direttamente l'area superficiale disponibile⁵⁰. Di conseguenza, le particelle più piccole hanno una maggiore area superficiale per l'adsorbimento.
- Il pH dell'acqua circostante: poiché la superficie delle MP è carica elettrostaticamente, l'adsorbimento di contaminanti emergenti sulle MP cambierà con il pH ambientale poiché la loro ionizzazione dipende dal pH.
- Salinità: le variazioni nella salinità dell'ambiente circostante influiscono sul coefficiente di ripartizione delle sostanze chimiche che si adsorbono a causa delle interazioni elettrostatiche⁵¹.
- Invecchiamento delle particelle: il grado di deterioramento delle particelle aumenta la velocità di adsorbimento delle sostanze chimiche, a causa dell'aumento dell'area superficiale disponibile e del cambiamento delle proprietà chimiche⁵²;
- Cristallinità del polimero: l'arrangiamento delle catene polimeriche influenza l'accessibilità delle sostanze chimiche alle MP⁵³.
- *Biofouling*: la presenza di *biofilm* cambia l'idrofobicità della plastica e la carica superficiale, influenzando l'interazione con le sostanze chimiche.

Le MP possono dunque agire come vettori nel trasporto di contaminanti nei sistemi acquatici e negli organismi attraverso l'ingestione⁵⁴. Entrando nei sistemi acquatici, le MP cariche di contaminanti possono aumentare le concentrazioni di inquinanti mediante processi di desorbimento. Tale fe-

⁵⁰ Wang-Wang 2020.

⁵¹ Mammo *et al.* 2020.

⁵² Ogata *et al.* 2009.

⁵³ Mammo *et al.* 2020.

⁵⁴ Anderson *et al.* 2017; Aljaibachi-Callaghan 2018; Horton *et al.* 2017; Setälä *et al.* 2014.

nomeno può essere particolarmente significativo nelle acque dolci continentali, dove le concentrazioni di queste sostanze chimiche sono attese essere più elevate rispetto ai sistemi marini⁵⁵.

1.5. Rischi eco-tossicologici: interazione con gli organismi bentonici

A causa delle dimensioni ridotte, le MP possono essere facilmente assorbite dagli organismi acquatici⁵⁶. Ne sono state trovate nell'intestino di diverse specie di organismi a quasi ogni livello trofico⁵⁷. Le MP nelle acque dolci possono avere effetti a catena sugli ecosistemi terrestri attraverso la catena alimentare poiché molti organismi d'acqua dolce sono prede di organismi terrestri⁵⁸. Questo effetto può inoltre rappresentare anche un problema per il successivo consumo umano.

Le due principali vie di assunzione delle MP sono la respirazione e l'ingestione⁵⁹, e anche l'adesione sulla superficie corporea può facilitare la loro assunzione⁶⁰: alcuni studi hanno rivelato che le MP sono presenti non solo in organi come il fegato, lo stomaco o l'apparato respiratorio, ma anche sul corpo di organismi zooplanctonici e molluschi⁶¹.

La possibilità di ingerire MP da parte degli organismi dipende dalla loro abbondanza e dimensione delle particelle, dalla presenza di prede naturali e dalle caratteristiche fisiologiche e comportamentali degli organismi⁶². Gli organismi bentonici che vivono sul fondo non sono in grado di discriminare tra MP e particelle alimentari, essendo le dimensioni l'unico fattore limitante; ciò aumenta la possibilità di ingerire le MP⁶³.

Nonostante questa consapevolezza diffusa, gli effetti tossici delle MP negli ambienti di acqua dolce sono ancora poco compresi⁶⁴, sebbene si sia stimato che tra il 32% e il 100% degli organismi invertebrati di acqua dolce ingeriscano MP⁶⁵. Gli studi che esaminano gli effetti eco-tossicologici delle MP sono però ancora per lo più concentrati sugli organismi pelagici, men-

⁵⁵ Horton *et al.* 2018.

⁵⁶ Collard *et al.* 2017; Ory *et al.* 2018; Slootmaekers *et al.* 2019; Watts *et al.* 2016.

⁵⁷ Rowland *et al.* 2007.

⁵⁸ Eerkes-Medrano *et al.* 2015.

⁵⁹ Weis 2019.

⁶⁰ Kolandhasamy *et al.* 2018.

⁶¹ Watts *et al.* 2016.

⁶² Setälä *et al.* 2014.

⁶³ Iannilli *et al.* 2019.

⁶⁴ Aljaibachi-Callaghan 2018.

⁶⁵ Watts *et al.* 2016.

tre le conoscenze sugli effetti tossici sugli organismi bentonici sembrano ancora limitate⁶⁶.

Gli effetti dell'assunzione di MP da parte degli organismi che vivono sul fondo (*bentos*) di acqua dolce sono tuttavia un problema importante, poiché gli invertebrati bentonici contribuiscono fino al 90% alla biomassa delle prede dei pesci⁶⁷.

I rischi legati all'assunzione di MP da parte degli organismi bentonici sono principalmente legati a:

- i) perdita di biodiversità e declino del funzionamento degli ecosistemi;
- ii) biomagnificazione dei contaminanti lungo la catena alimentare;
- iii) diminuzione dell'attività di bioturbazione da parte degli organismi bentonici⁶⁸.

Con lo scopo di indagare gli effetti dell'assunzione di MP, sono stati condotti diversi studi nell'ultimo decennio sul bentos di acqua dolce. Dai risultati ottenuti, si può dedurre che l'ingestione non comporta direttamente effetti fatali per gli organismi: sono stati però osservati diversi effetti cronici⁶⁹. Inoltre, gli effetti sono più evidenti negli organismi vulnerabili o in quelli nelle prime fasi di vita, perché sembra che gli organismi adulti in buona salute preferiscano ingerire particelle più grandi come cibo⁷⁰.

In generale, la presenza di MP nel tratto digestivo provoca una sensazione di sazietà, causando una ridotta assunzione di cibo e un ridotto apporto energetico, portando alla fame⁷¹. Di conseguenza, la crescita, la sopravvivenza, la fecondità e il tasso di riproduzione sono influenzati negativamente, compromettendo la forma fisica generale⁷². Questa minore produzione di energia è particolarmente evidente nella diminuzione dello sfarfallamento degli organismi che vivono in stadio larvale nel sedimento⁷³. Oltre agli effetti legati alla depauperazione energetica, sono stati registrati effetti sui parametri di stress cellulare⁷⁴.

Nel complesso, un recente studio ha evidenziato come l'assunzione di MP influisca negativamente sugli organismi che vivono a stretto con-

⁶⁶ Haegerbaeumer *et al.* 2019.

⁶⁷ Berlino *et al.* 2021; Weber-Traunspurger 2015.

⁶⁸ Berlino *et al.* 2021.

⁶⁹ Wright *et al.* 2013.

⁷⁰ Ziajahromi *et al.* 2018.

⁷¹ Straub *et al.* 2017.

⁷² Jemec *et al.* 2016.

⁷³ Ziajahromi *et al.* 2018.

⁷⁴ Jang *et al.* 2014; Jeong *et al.* 2016; Magni *et al.* 2018.

tatto con i sedimenti⁷⁵. In particolare, “la diluizione del cibo” derivante dall’assunzione di esse influenza l’allocazione di energia negli organismi, portando a cambiamenti nel comportamento e, di conseguenza, delle caratteristiche ecologiche delle specie bentoniche. In ultima analisi, secondo l’idea di un effetto ecologico trasversale, il deterioramento delle specie bentoniche a causa delle MP potrebbe avere effetti a livello ecosistemico.

Oltre a causare danni fisici e risposta allo stress cellulare, le MP possono agire come vettori di contaminanti, potenziando la biomagnificazione⁷⁶ e rappresentando una fonte diretta di sostanze tossiche. Infatti, durante i processi di produzione, vengono aggiunti diversi additivi (ad esempio, ammorbidenti, stabilizzatori, agenti espandenti, ritardanti di fiamma) alla polimerizzazione vergine al fine di conferire le proprietà desiderate⁷⁷. Tali sostanze sono debolmente legate alla struttura polimerica e tendono a fuoriuscire dalla plastica.

Le plastiche deteriorate, pertanto, hanno maggiori probabilità di agire come fonte di questi contaminanti, che possono essere trasferiti agli ecosistemi acquatici attraverso processi come desorbimento, scambio ionico, complessazione, dissoluzione, diffusione e partizionamento⁷⁸.

Inoltre, le MP possono anche agire come deposito di contaminanti, adsorbendo sostanze inquinanti presenti nell’acqua e rilasciandole nel corpo degli organismi dopo essere state ingerite.

Infatti, il pH acido del tratto gastrointestinale favorisce il rilascio di contaminanti legati alle microplastiche⁷⁹. A tal fine, diversi studi⁸⁰ hanno evidenziato come i contaminanti rilasciati dalle microplastiche influiscano negativamente sulla vita degli organismi, portando a immobilità, riduzione del tasso di riproduzione e, in generale, a effetti cronici sul ciclo vitale delle popolazioni.

2. Conclusioni

Una delle principali necessità, per lo studio delle MP in ambiente, è quella di sviluppare un metodo standardizzato per caratterizzare il loro comportamento; per quanto riguarda la quantificazione, la mancanza di un

⁷⁵ Berlino *et al.* 2021.

⁷⁶ Velzeboer *et al.* 2014.

⁷⁷ Lithner *et al.* 2009.

⁷⁸ Ding *et al.* 2020.

⁷⁹ Sciences 2020.

⁸⁰ Halle *et al.* 2020; Lithner *et al.* 2009.

protocollo standardizzato ostacola ancora il confronto dei dati e rende quindi difficile comprendere la reale entità della contaminazione provocata. In particolare, nel campo della co-presenza tra MP e altri contaminanti, sarà utile individuare un protocollo che consenta di condurre esperimenti di laboratorio secondo le condizioni ambientali. In questo modo, si limiterà il rischio di ottenere risultati non confrontabili.

Le MP sembrano rappresentare un rischio importante per gli ambienti di acqua dolce sui quali è necessario lavorare ancora molto; soprattutto per individuare il loro stato di diffusione e gli effetti della loro contaminazione. Le problematiche esistenti per gli ecosistemi sembrano essere analoghe a quelle riscontrate già da tempo in ambiente marino; nel caso delle acque dolci, il problema diventa ancora più grave dal momento che l'acqua dolce viene utilizzata per scopi antropici in modo più ampio rispetto a quella salata.

Le prospettive future riguardo questa problematica ambientale includono la necessità di intensificare gli sforzi per ridurre la produzione e l'uso della plastica, soprattutto per quanto riguarda quella monouso, così come per cercare di migliorare la gestione dei rifiuti (recupero, riciclo). Appare anche utile sviluppare modelli rappresentativi per tracciare l'origine e il destino delle MP nelle acque dolci. Grazie a tali modelli, infatti, si potranno prevedere scenari futuri, suggerendo anche diversi approcci analitici⁸¹.

La regolamentazione e l'adozione di leggi più restrittive a livello globale rimangono uno strumento essenziale per limitare l'accumulo di MP in acqua e per incoraggiare lo sviluppo di alternative sostenibili alle plastiche tradizionali.

In ultima battuta, occorre rammentare che effetti negativi potrebbero ricadere anche sulla salute dell'uomo, aspetto di cui i tossicologi si stanno sempre più interessando. Le prime ricerche tossicologiche suggeriscono la necessità di quantificare le MP anche in ambiente aereo⁸²; in termini di effetti le MP e le nanoplastiche possono portare a infiammazioni, danni al DNA, neurotossicità, stress ossidativo, e migrando nel sistema circolatorio e negli altri organi, provocare disfunzioni. C'è anche una crescente preoccupazione riguardo al possibile rilascio di sostanze chimiche usate come additivi plastici nell'uomo attraverso l'ingestione. Tuttavia, l'esposizione alle MP e la valutazione del rischio sugli esseri umani sono ancora agli inizi, e sono necessarie ulteriori ricerche sulla presenza delle microparticelle in vari ambienti interni ed esterni per fornire la base di conoscenza necessa-

⁸¹ Cera *et al.* 2020.

⁸² Eberhard *et al.* 2024.

ria per regolamentare e proteggere la salute umana e l'ambiente dalle MP⁸³. Infine, è fondamentale continuare parallelamente a condurre ricerche scientifiche per comprendere meglio gli effetti delle MP sugli ambienti acquatici, così come per identificare metodi di rimozione ed eliminazione di quelle già presenti nell'ambiente. Le tecnologie innovative e i metodi di monitoraggio possono svolgere un ruolo chiave nell'affrontare questa problematica e nel proteggere gli ecosistemi acquatici per le future generazioni in un'ottica di sostenibilità ambientale.

Bibliografia

- Aljaibachi-Callaghan 2018 R. Aljaibachi, A. Callaghan, *Impact of polystyrene microplastics on Daphnia magna mortality and reproduction in relation to food availability*, Peer J 6, 2018, p. e4601, available at: <https://doi.org/10.7717/peerj.4601> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Anderson et al. 2017 P.J. Anderson, S. Warrack, V. Langen, J.K. Challis, M.L. Hanson, M.D. Rennie, *Microplastic contamination in Lake Winnipeg, Canada*, Environ. Pollut. 225, 2017, pp. 223-231, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.072> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Andrady 2011 A.L. Andrady, *Microplastics in the marine environment*, Mar. Pollut. Bull. 62, 2011, pp. 1596-1605, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Andrady 2017 A.L. Andrady, *The plastic in microplastics: A review*, Mar. Pollut. Bull. 119, 2017, pp. 12-22, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Auta et al. 2017 H.S. Auta, C.U. Emenike, S.H. Fauziah, *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions*, Environ. Int. 102, 2017, pp. 165-176, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Barnes et al. 2009 D.K.A. Barnes, F. Galgani, R.C. Thompson, M. Barlaz, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*, Phil. Trans. R. Soc. B 364, 2009, pp. 1985-1998, available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205> [consultato il 15 gennaio 2025].

⁸³ Dewika et al. 2023; Yue et al. 2023; Zolfaghari et al. 2024.

- Bellasi *et al.* 2020 A. Bellasi, G. Binda, A. Pozzi, S. Galafassi, P. Volta, R. Bettinetti, *Microplastic Contamination in Freshwater Environments: A Review, Focusing on Interactions with Sediments and Benthic Organisms*, *Environments* 7(4), 2020, p. 30, available at: <https://doi.org/10.3390/environments7040030> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Bellasi *et al.* 2021 A. Bellasi, G. Binda, A. Pozzi, G. Boldrocchi, R. Bettinetti, *The extraction of microplastics from sediments: An overview of existing methods and the proposal of a new and green alternative*, *Chemosphere* 278, 2021, p. 130357, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130357> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Berlino *et al.* 2021 M. Berlino, M.C. Mangano, C. Vittor, G. Sarà, *Effects of microplastics on the functional traits of aquatic benthic organisms: a global-scale meta-analysis*, *Env. Poll.* 285, 2021, p. 117174, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117174> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Binda *et al.* 2018 G. Binda, A. Pozzi, F. Livio, P. Piasini, C. Zhang, *Anomalously high concentration of Ni as sulphide phase in sediment and in water of a mountain catchment with serpentinite bedrock*, *J. Geochemical Explor.* 190, 2018, pp. 58-68, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.014> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Binda *et al.* 2021 G. Binda, D. Spanu, D. Monticelli, A. Pozzi, A. Bellasi, R. Bettinetti, S. Carnati, L. Nizzetto, *Unfolding the interaction between microplastics and (trace) elements in water: A critical review*. *Water Res.* 204, 2021, p. 117637, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117637> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Blair 2017 R.M. Blair, *Micro- and Nanoplastic Pollution of Freshwater and Wastewater Treatment Systems*, *Springer Sci. Rev.* 5, 2017, pp. 19-30, available at: <https://doi.org/10.1007/s40362-017-0044-7> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Carpenter-Smith 1972 E.J. Carpenter, K.L.J. Smith, *Plastics on the Sargasso sea surface*, *Science* 175, 1972, pp. 1240-1241, available at: <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Cera *et al.* 2020 A. Cera, G. Cesarini, M. Scalici, *Microplastics in Freshwater: What Is the News from the World?*, *Diversity* 12, 7, 2020, p. 276, available at: <https://doi.org/10.3390/d12070276> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Choy *et al.* 2019 C.A. Choy, B.H. Robison, T.O. Gagne, B. Erwin, E. Firl, R.U. Halden, J.A. Hamilton, K. Katija, S.E. Lisin, C. Rolsky, K. Van Houtan, *The*

vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column. Sci. Rep. 9, 2019, p. 7843, available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Collard *et al.* 2017 F. Collard, B. Gilbert, P. Compère, G. Eppe, K. Das, T. Jauniaux, E. Parmentier, *Microplastics in livers of European anchovies (Engraulis encrasicolus, L.)*, Environ. Pollut. 229, 2017, pp. 1000-1005, available at : <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.089> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Cózar *et al.* 2014 A. Cózar, F Echevarría, J.I. González-Gordillo, X. Irigoien, B. Úbeda, *Plastic debris in the open ocean 17 – Microplastics in Freshwater Environments*, PNAS 111(28), 2014, pp. 10239-10244, available at : <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Dewika *et al.* 2023 M. Dewika, K. Markandan, N.A. Irfan, M.A.A. Mohd Abdah, J.N. Ruwaida, Y.Y. Sara, M. Khalid. *Review of microplastics in the indoor environment: Distribution, human exposure and potential health impacts*, Chemosphere 324, 2023, p. 138270, available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138270> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ding *et al.* 2020 T. Ding, L. Wei, Z. Hou, J. Li, C. Zhang, D. Lin, *Microplastics altered contaminant behaviour and toxicity in natural waters*, J. Hazard. Mater. 425, 2020, p. 127908, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127908> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Eberhard *et al.* 2024 T. Eberhard, G. Casillas, G.M. Zarus *et al.*, *Systematic review of microplastics and nanoplastics in indoor and outdoor air: identifying a framework and data needs for quantifying human inhalation exposures*, J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol., 2024, available at: <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00634-x> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Eerkes-Medrano *et al.* 2015 D. Eerkes-Medrano, R.C. Thompson, D.C. Aldridge, *Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of, research needs*, Water Res. 75, 2015, pp. 63-82, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012> [consultato il 15 gennaio 2025].
- EFSA 2016 EFSA CONTAM Panel, *Statement on the presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood*, EFSA J. 14(6), 2016, p. 4501, 30, available at: <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/4501> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Fairbrother *et al.* 2019 H.C. Fairbrother, Hsueh, J.H. Kim, D. Jacobs, L. Perry, D. Goodwin, C. White, S. Watson, L.P. Sung, *Temperature and light intensity effects on photodegradation of high-density polyethylene*, Polym. Degrad. Stab. 165, 2019, pp. 153-160, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.002> [consultato il 15 gennaio 2025].
- GESAMP 2015 GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment*, P.L. Kershaw (ed.), IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud. GESAMP 90, 2015, p. 96.
- Haegerbaeumer *et al.* 2019 A. Haegerbaeumer, M.T. Mueller, H. Fueser, W. Traunspurger, *Impacts of micro- and nano-sized plastic particles on benthic invertebrates: A literature review and gap analysis*, Front. Environ. Sci. 7, 2019, pp. 1-33, available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00017> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Halle *et al.* 2020 L.L. Halle, A. Palmqvist, K. Kampmann, F.R. Khan, *Ecotoxicology of micronized tire rubber: Past, present and future considerations*, Sci. Total Environ. 706, 2020, p. 135694, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135694> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Hamid *et al.* 2018 F.S. Hamid, M.S. Bhatti, N. Anuar, N. Anuar, P. Mohan, A. Periathamby, *Worldwide distribution and abundance of microplastic: How dire is the situation?*, Waste Management & Res. 36(10), 2018, pp. 873-897, available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X18785730> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Hartmann *et al.* 2019 N.B. Hartmann, T. Hu, R.C. Thompson, M. Hassello, A. Verschoor, A.E. Daugaard, S. Rist, T. Karlsson, N. Brennholt, M. Cole, M.P. Herrling, M.C. Hess, N.P. Ivleva, A.L. Lusher, M. Wagner, *Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris*, Environ. Sci. Technol. 53, 3, 2019, pp. 1039-1047, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Hengstmann-Fischer 2020 E. Hengstmann, E.K. Fischer, *Anthropogenic litter in freshwater environments – Study on lake beaches evaluating marine guidelines and aerial imaging*, Environ. Res. 189, 2020, p. 109945, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109945> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Horton *et al.* 2017 A.A. Horton, A. Walton, D.J. Spurgeon, E. Lahive, C. Svendsen, *Microplastics in freshwater and terrestrial environments:*

- Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities*, *Sci. Total Environ.* 586, 2017, pp. 127-141, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Horton *et al.* 2018 A.A. Horton, M.D. Jürgens, E. Lahive, P.M. Bodegom, M.G. Vijver, *The influence of exposure and physiology on microplastic ingestion by the freshwater fish *Rutilus rutilus* (roach) in the River Thames, UK*, *Environ. Pollut.* 236, 2018, pp. 188-194, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.044> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Iannilli *et al.* 2019 V. Iannilli, V. Pasquali, A. Setini, F. Corami, *First evidence of microplastics ingestion in benthic amphipods from Svalbard*, *Environ. Res.* 179, 2019, p. 108811, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108811> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Imhof *et al.* 2013 H.K. Imhof, J. Schmid, R. Niessner, C. Laforsch, *Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles*, *CURBIO* 23, 2013, pp. R867–R868, available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.09.001> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ivleva *et al.* 2017 N.P. Ivleva, A.C. Wiesheu, R. Niessner, *Microplastic in Aquatic Ecosystems*, *Angewandte Chemie*, 2017, pp. 1720-1739, available at: <https://doi.org/10.1002/anie.201606957> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Jang *et al.* 2014 Y.C. Jang, S. Hong, J. Lee, M.J. Lee, M.J. Shim, *Estimation of lost tourism revenue in Geoje Island from the 2011 marine debris pollution event in South Korea*, *Mar. Pollut. Bull.* 81, 2014, pp. 49-54, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.021> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Jemec *et al.* 2016 A. Jemec, P. Horvat, U. Kunej, M. Bele, A. Kržan, *Uptake and effects of microplastic textile fibers on freshwater crustacean *Daphnia magna**, *Environ. Pollut.* 219, 2016, pp. 201-209, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.037> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Jeong *et al.* 2016 C.B. Jeong, E.J. Won, H.M. Kang, M.C. Lee, D.S Hwang, U.K. Hwang, B. Zhou, S. Souissi, S.J. Lee, J.S. Lee, *Microplastic Size-Dependent Toxicity, Oxidative Stress Induction, and p-JNK and p-p38 Activation in the Monogonont Rotifer (*Brachionus koreanus*)*, *Environ. Sci. Technol.* 50, 2016, pp. 8849-8857, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01441> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Kataoka *et al.* 2019 T. Kataoka, Y Nihei, K. Kudou, H. Hinata, *Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan*, Environ. Pollut. 244, 2019, pp. 958-965, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.111> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Kolandhasamy *et al.* 2018. P. Kolandhasamy, L. Su, J. Li, X. Qu, K. Jabeen, H. Shi, *Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: A novel way to uptake microplastics beyond ingestion*, Sci. Total Environ. 610-611, 2018, pp. 635–640, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.053> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Kowalski *et al.* 2016 N. Kowalski, A. Reichardt, J. Wanick, *Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors*, Mar. Pollut. Bull. 109, 1, 2016, pp. 310-319, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.064> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Kumar *et al.* 2021 R. Kumar, P. Pandit, D. Kumar, Z. Patel, L. Pandya, M. Kumar, *Land fill microbiome harbour plastic degrading genes: A metagenomic study of solid waste dumping site of Gujarat, India*, Sci. Total Environ. 779, 2021, p. 146184, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146184> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Lenaker *et al.* 2021 P.L. Lenaker, S.R. Corsi, S.A. Mason, *Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie*, Environ. Sci. Technol. 55, 2021, pp. 373-384, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06087> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Lithner *et al.* 2009 D. Lithner, J. Damberg, G. Dave, Å. Larsson, *Leachates from plastic consumer products – Screening for toxicity with Daphnia magna*, Chemosphere 74, 2009, pp. 1195-1200, available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.022> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Liubartseva *et al.* 2016 S. Liubartseva, G. Coppini, R. Lecci, S. Creti, *Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea*, Mar. Pollut. Bull. 103, 2016, pp. 115-127, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.031> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Magni *et al.* 2018 S. Magni, F. Gagné, C. André, C. Della Torre, J. Auclair, H. Hanana, C.C. Parenti, F. Bonasoro, A. Binelli, *Evaluation of uptake and chronic toxicity of virgin polystyrene microbeads in freshwater zebra mussel Dreissena polymorpha (Mollusca: Bivalvia)*, Sci. Total Environ. 631-632, 2018, pp. 778-788, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.075> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Mammo *et al.* 2020 F.K. Mammo, I.D. Amoah, K.M. Gani, L. Pillay, S.K. Ratha, F. Bux, S. Kumari, *Microplastics in the environment: Interactions with microbes and chemical contaminants*, Sci. Total Environ. 743, 2020, p. 140518, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140518>. [consultato il 15 gennaio 2025].
- Mani *et al.* 2016 T. Mani, A. Hauk, U. Wal, P. Burkhardt-holm, *Microplastics profile along the Rhine River*, Sci. Rep. 5, 2016, p. 17988, available at: <https://doi.org/10.1038/srep17988> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Murphy *et al.* 2016 F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier, B. Quinn, *Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment*, Environ. Sci. Technol. 50, 11, 2016, pp. 5800-5808, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Napper-Thompson 2016 I.E. Napper, R.C. Thompson, *Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions*, Mar. Pollut. Bull. 112, 2016, pp. 39-45, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.025> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ogata *et al.* 2009 Y. Ogata, H. Takada, K. Mizukawa, H. Hirai, S. Iwasa, S. Endo, Y. Mato, M. Saha, K. Okuda, A. Nakashima, Murakami, N. Zurcher, R. Booyatumanondo, M. Pauzi, L. Quang, M. Gordon, C. Miguez, S. Suzuki, C. Moore, H.K. Karapanagioti, S. Weerts, T. Mcclurg, E. Burren, W. Smith, M. Velkenburg, J Van Selby, R.C. Lang, D. Laursen, B. Danner, N. Stewardson, R.C. Thompson, *International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. Initial phase data on PCBs, DDTs and HCHs*, Mar. Pollut. Bull. 58, 2009, pp. 1437-1446, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.06.014> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ogata *et al.* 2012 Y. Ogata, C. Kwan, A. Heckhausen, H. Taylor, T. Powell, C. Morishige, D. Young, H. Patterson, B. Robertson, E. Bailey, J. Mermoz, *Measurement of persistent organic pollutants (POPs) in plastic resin pellets from remote islands: Toward establishment of background concentrations for International Pellet Watch*, Mar. Pollut. Bull. 64, 2012, pp. 445-448, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.11.004> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ory *et al.* 2018 N.C. Ory, C. Gallardo, M. Lenz, M. Thiel, *Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish*, Environ. Pollut. 240, 2018, pp. 566-573, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.093> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Plastics – the Facts* 2020 *Plastics – the Facts*, PlasticEurope 16, available at: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2016/> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Rhodes 2018 C.J. Rhodes, *Plastic pollution and potential solutions*, Science Progress 101(3), 2018, pp. 207-260, available at: <https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Rowland *et al.* 2007 S.J. Rowland, T.S. Galloway, R.C. Thompson, *Potential for Plastics to Transport Hydrophobic Contaminants*, Environ. Sci. Technol. 41, 22, 2007, pp. 7759-776, available at: <https://doi.org/10.1021/es071737s> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Saleem *et al.* 2015 M. Saleem, J. Iqbal, M.H. Shah, *Geochemical speciation, anthropogenic contamination, risk assessment and source identification of selected metals in freshwater sediments – A case study from Mangla Lake, Pakistan*, Environ. Nanotechnology, Monit. Manag. 4, 2015, pp. 27-36, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2015.02.002> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Samir *et al.* 2021 S. Samir, T. Elsamahy, E. Koutra, M. Kornaros, M. El-Sheekh, E.A. Abdelkarim, D. Zhu, J. Sun, *Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal*, Sci. Total Environ. 771, 2021, p. 2144719, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Sciences 2020 E. Sciences, *Mobilisation kinetics of Br, Cd, Cr, Hg, Pb and Sb in microplastics exposed to simulated, dietary-adapted digestive conditions of seabirds*, Sci. Tot. Environ. 733, 2020, p. 138802.
- Setälä *et al.* 2014 O. Setälä, V. Fleming-Lehtinen, M. Lehtiniemi, *Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web*, Environ. Pollut. 185, 2014, pp. 77-83, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Slootmaekers *et al.* 2019 B. Slootmaekers, C. Catarci Carteny, C. Belpaire, S. Saverwyns, W. Fremout, R. Blust, L. Bervoets, *Microplastic contamination in gudgeons (Gobio gobio) from Flemish rivers (Belgium)*, Environ. Pollut. 244, 2019, pp. 675-684, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.136> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Straub *et al.* 2017 S. Straub, P.E. Hirsch, P. Burkhardt-Holm, *Biodegradable and Petroleum-Based Microplastics Do Not Differ in Their Ingestion and Excretion but in Their Biological Effects in a Freshwater Invertebrate Gammarus fossarum*, Int. J. Environ. Res. Public Health 14, 2017, 774, available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph14070774> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Syberg *et al.* 2015 K. Syberg, F.R. Khan, H. Selck, A. Palmqvist, G.T. Banta, J. Daley, L. Sano, M.B. Duhaime, *Microplastics: A Focus on Lacustrine Ecosystems addressing ecological risk through lessons learned*, Environ. Toxicol. Chem. 34, 2015, pp. 945-953, available at: <https://doi.org/10.1002/etc.2914> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Thompson *et al.* 2004 R.C. Thompson, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D. McGonigle, A.E Russell, *Lost at Sea: Where Is All the Plastic?*, Science 304, 5672, 2004, p. 838, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1094559> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Thushari-Senevirathna 2020 G.G.N. Thushari, J.D.M. Senevirathna, *Plastic pollution in the marine environment*, Heliyon 6, 2020, p. 2e04709, available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Velzeboer *et al.* 2014 I. Velzeboer, C.J.A.F. Kwadijk, A.A. Koelmans, *Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes*, Environ. Sci. Technol. 48, 2014, pp. 4869-4876, available at: <https://doi.org/10.1021/es405721v> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Wagner *et al.* 2014 M. Wagner, C. Scherer, D. Alvarez-Muñoz, N. Brennholt, X. Bourrain, S. Buchinger, E. Fries, C. Grosbois, J. Klasmeier, T. Marti, S. Rodriguez-mozaz, R. Urbatzka, A.D. Vethaak, M. Winther-Nielsen, G. Reifferscheid, *Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know*, Environ Sci Eur. 26(1), 2014, p. 12, available at: <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Waller *et al.* 2017 C.L. Waller, H.J. Grif, C.M. Waluda, S.E. Thorpe, I. Loaiza, B. Moreno, C.O. Pacherres, K.A. Hughes, *Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research* 598, 2017, pp. 220-227, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.283> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Wang-Wang 2020 W. Wang, J. Wang, *Different partition of polycyclic aromatic hydrocarbon on environmental particulates in freshwater: Microplastics in comparison to natural sediment*, Ecotoxicol, Environ. Saf. 147, 2020, pp. 648-655, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.029> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Wang *et al.* 2019 J. Wang, M. Wang, S. Ru, X. Liu, *High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China*, Sci. Total Environ. 651, 2019, pp. 1661-1669, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.007> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Watts *et al.* 2016 A.J.R. Watts, M.A. Urbina, R. Goodhead, J. Moger, C. Lewis, T.S. Galloway, *Effect of Microplastic on the Gills of the Shore Crab*

- Carcinus maenas*, Environ. Sci. Technol. 50, 2016, pp. 5364-5369, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01187> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Weber-Traunspurger 2015 S. Weber, W. Traunspurger, *The effects of predation by juvenile fish on the meiobenthic community structure in a natural pond*, Freshw. Biol. 60, 2015, pp. 2392-2409, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/fwb.12665> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Wehrhahn et al. 2018 M. Wehrhahn, S. Wagner, T. Hüffer, P. Kl, T. Hofmann, T. Reemtsma, *Tire wear particles in the aquatic environment – A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects*, Water Res. 139, 2018, pp. 83-100, available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Weis 2019 J.S. Weis, *Improving microplastic research*, AIMS Environ. Sci. 6, 2019, pp. 326-340, available at: <https://doi.org/10.3934/environsci.2019.5.326> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Wright et al. 2013 S.L. Wright, D. Rowe, R.C. Thompson, *Correspondences Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms*, CURBIO 23, 2013, pp. R1031–R1033, available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.068> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Yue et al. 2023 L. Yue, T. Le, W. Qiong, W. Fengbang, L. Gang, S. Maoyong, *Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects*, Environment & Health 249(1), 2023, p 257, available at: <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Zalasiewicz et al. 2016 J. Zalasiewicz, C. Waters, J. Sul, P. Corcoran, A. Barnosky, A. Cearreta, M. Edgeworth, A. Gałuszka, C. Jeandel, R. Leinfelder, J. McNeill, W. Steffen, C. Summerhayes, M. Wagreich, M. Williams, A. Wolfe, Y. Yonan, *The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene*, Anthropocene 13, 2016, pp. 4-17, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Zhang et al. 2017 G. Zhang, J. Bai, R. Xiao, Q. Zhao, J. Jia, B. Cu, X. Liu, *Heavy metal fractions and ecological risk assessment in sediments from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Estuary, China*, Chemosphere 184, 2017, pp. 278-288, available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.155> [consultato il 15 gennaio 2025].

- Zhang *et al.*
2021 K Zhang, A. Hossein, A. Tubi, J.K.H. Fang, C. Wu, P.K.S. Lam, *Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: a review*, Environ. Pollut 274, 2021, p. 116564, available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Ziajahromi *et al.*
2018 S. Ziajahromi, A. Kumar, P.A. Neale, F.D.I. Leusch, *Environmentally relevant concentrations of polyethylene microplastics negatively impact the survival, growth and emergence of sediment-dwelling invertebrates*, Environ. Pollut. 236, 2018, pp. 425-431, available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.094> [consultato il 15 gennaio 2025].
- Zolfaghari *et al.*
2024 F.N. Zolfaghari, G. Farhad, G. Akbar, *A narrative review of microplastics in the indoor and outdoor environment, human effects, and ecological risks*, J. Air Pollut. Health. 9(1), 2024, pp. 123-140.

Abstracts e Keywords

Massimo Beccarello

Stima costi di impatto scenario Fit for 55 per l'Italia

Estimated impact costs Fit for 55 scenario for Italy

Nel luglio 2021 la Commissione Europea ha presentato il nuovo pacchetto di misure chiamato “*Fit For 55*” con il quale l’UE intende aumentare gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 prevedendo una riduzione del -55% delle emissioni di CO₂. Questo contributo ha l’obiettivo di stimare il fabbisogno di investimenti necessari, per l’Italia, al fine di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 previsti dal pacchetto *Fit For 55*. Il fabbisogno di investimenti diretti complessivi per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 è pari a 1.120,7 miliardi di euro. A fronte di questo significativo flusso di investimenti potrebbero derivare benefici economici per la collettività, derivanti dagli effetti positivi sul bilancio dello Stato in termini di maggiori entrate, stimabili in circa 541 miliardi di euro a cui si aggiungono benefici in termini di riduzione del consumo di energia stimabile in circa 28 miliardi di euro e i benefici derivanti dal costo evitato della CO₂ stimabili in circa 36 miliardi di euro.

In July 2021, the European Commission presented the new package of measures called *Fit For 55* with which the EU intends to increase the decarbonisation objectives to 2030, aiming for a reduction of -55% of CO₂ emissions. This contribution aims to estimate the investment needs necessary for Italy in order to achieve the 2030 decarbonisation objectives set by the *Fit For 55* package. The overall direct investment requirement to achieve the 2030 decarbonisation objectives is equal to 1.120,7 billion of euros. Given this significant flow of investments, economic benefits could arise for the community, deriving from the positive effects on the state budget in terms of greater revenues, estimated at approximately 541 billions of euros, to which are added benefits in terms of reduction in consumption of energy estimated at approximately 28 billions of euros and the benefits deriving from the avoided cost of CO₂ estimated at approximately 36 billions of euros.

Parole-chiave: Fit For 55; Innovazione, Decarbonizzazione

Keywords: Fit For 55; Innovation, Decarbonization

Alessandro Abbotto

Idrogeno: un combustibile verde e rinnovabile per la mobilità sostenibile
Hydrogen: a green and renewable fuel for sustainable mobility

L'idrogeno rappresenta un combustibile pulito e rinnovabile, con un potenziale significativo per supportare la transizione verso una società decarbonizzata. L'articolo analizza gli utilizzi attuali ed emergenti di questo vettore energetico per soddisfare le crescenti esigenze energetiche di una società sostenibile, con particolare focus sul settore dei trasporti. Viene enfatizzato il ruolo dell'idrogeno in contesti in cui la mobilità elettrica non è una soluzione sempre praticabile, come nel trasporto pesante su strada, via acqua, ferrovia e aereo. Infine, vengono esaminati i metodi di produzione dell'idrogeno, dai processi ad alta emissione a quelli sostenibili, sottolineando la sua versatilità e il ruolo chiave nel futuro energetico.

Hydrogen is a clean and renewable fuel with significant potential to support the transition toward a decarbonized society. The article examines the current and emerging uses of this energy carrier to meet the growing energy demands of a sustainable society, with a particular focus on the transport sector. The role of hydrogen is emphasized in contexts where electric mobility is not a fully feasible solution, such as heavy road transport, waterborne transport, railways, and aviation. Finally, the article explores hydrogen production methods, from high-emission processes to sustainable ones, highlighting its versatility and key role in the energy future.

Parole-chiave: Energia; Transizione energetica; Emissioni CO₂; Diossido di carbonio; Cambiamenti climatici, Trasporto.

Keywords: Energy; Energy transition; CO₂ emissions; Carbon dioxide; Climate change; Transport.

Roberto Zoboli

Rifiuti e materiali secondari nel paradigma industriale dell'economia circolare
Waste and secondary materials in the circular economy industrial paradigm

Il saggio esamina alcune questioni critiche dell'economia circolare (*Circular Economy*, CE) all'incrocio tra politiche europee dei rifiuti e innovazioni industriali per i materiali. Date le elevate riserve globali e i bassi prezzi internazionali in termini reali dei materiali industriali, a spingere la CE in Europa sono le politiche europee per i rifiuti, che hanno generato ambiziosi obiettivi e un imponente flusso di legislazione, fino al *Circular Economy Action Plan* adottato nel 2020 nell'ambito dello *European Green Deal*. Sebbene sia stata efficace in molti casi, la dominanza delle politiche come *driver* di CE ha condotto anche ad alcuni fallimenti delle politiche stesse, sia da un punto di vista economico-industriale sia da quello ambientale. Ciò è avvenuto quando le politiche hanno mancato di assumere una visione integrata delle catene di valore, in particolare quelle dei materiali secondari. Esempi di questi fallimenti sono i rifiuti plastici, gli ancora deboli mercati di diversi materiali secondari, l'eccessivo uso energetico dei materiali biologici. Gli scenari per la CE in Europa sono ora influenzati dalla cosiddetta "autonomia strategica aperta" che, di fronte alle crisi e ai rischi internazionali, è perseguita dall'Europa nel tentativo di garantirsi autonomia nei settori industriali del *Net Zero* e nell'approvvigionamento dei necessari "materiali critici". Ne risulteranno nuovi impulsi per l'innovazione nel riciclo e nell'uso dei materiali. L'Italia è un Paese di avanzata *performance* circolare, con grande vivacità innovativa, ma il percorso italiano di CE come paradigma industriale incontra perduranti barriere.

The essay addresses some key issues of the Circular Economy (CE) in between EU waste policies and innovation for industrial materials. Given the high global reserves and the low real prices of energy and industrial commodities, the major force behind the development of the CE in Europe is the wide flow of EU waste policies up to the Circular Economy Action Plan adopted in 2020 within the European Green Deal. Although effective in many cases, the dominant role of waste policies in pushing the CE also highlighted failures of the same policies when they failed to take an integrated value chain approach, in particular for secondary raw materials. Examples of such failures and shortcomings are plastic waste, the weakness of some secondary materials markets, and the overuse of biomaterials for energy production. The scenario for the CE in Europa is now influenced by the EU's 'Open strategic autonomy' that, in response to international crises and risks, pushes the EU to pursue autonomy for the domestic capacity in the Net Zero industries and the procurement of critical raw materials. This policy direction further pushes for recycling and innovations in industrial materials. Italy has a very good circularity performance and innovation capacity for the CE, but the full deployment of CE as an industrial paradigm still faces various barriers.

Parole-chiave: Economia circolare; Rifiuti e riciclo; Innovazione; *European Green Deal*; *Net Zero*.

Keywords: Circular Economy; Waste and recycling; Innovation; European Green Deal; Net Zero.

Gianfranco Pacchioni
CO₂: da problema a risorsa
CO₂: from problem to resource

Il costante aumento della CO₂ nell'atmosfera ha determinato le conseguenze climatiche che ben sappiamo. Molto si parla del problema, meno delle soluzioni. Anche se potessimo fermare oggi le emissioni di CO₂, la temperatura del pianeta continuerebbe a crescere a lungo. E in realtà di CO₂ ne produrremo ancora per decenni, come minimo, in attesa di una completa transizione alle fonti rinnovabili, e continueremo a produrne anche dopo. Forse una via d'uscita c'è. Dobbiamo invertire la rotta, non solo ridurre le emissioni ma imparare a catturare la CO₂ e riutilizzarla come materia prima, magari per produrre combustibili, i cosiddetti *e-fuels*. Copiando dalla natura, e imparando a sfruttare l'energia abbondante e gratuita che ci arriva dal sole. Non è facile ma si può fare. Dovremo innanzitutto produrre idrogeno verde a costi contenuti e poi utilizzarlo per convertire la CO₂ in molecole utili quando non indispensabili, ma senza fare più ricorso ai combustibili fossili.

The constant increase of CO₂ in the atmosphere has determined the climatic consequences that we know well. Much is said about the problem, less about the solutions. Even if we could stop CO₂ emissions today, the planet's temperature will continue to rise for a long time. And in reality, we will still produce CO₂ for decades, at least, waiting for a complete transition to renewable sources, and we will continue to produce it even after. Maybe there is a way out. We must reverse course, not only reduce emissions but learn to capture CO₂ and reuse it as a raw material, perhaps to produce the so-called *e-fuels*. Copying from nature and learning to exploit the abundant and free energy that comes to us from the sun. It's not easy but it can be done. We will first have to produce green hydrogen at low costs and then use it to convert CO₂ into useful molecules when not indispensable, but without using fossil fuels anymore.

Parole-chiave: CO₂; *e-fuels*; Innovazione.

Keywords: CO₂; *e-fuels*; Innovation.

Carlo Barbante

Scritto nel ghiaccio: la lezione che viene dal passato

Written in Ice: The Lesson from the Past

Molto di quello che sappiamo sui cambiamenti del clima del nostro pianeta lo dobbiamo a questi formidabili archivi climatici e ambientali che sono le carote di ghiaccio. La storia climatica della Terra è scritta un po' dappertutto: nel calcare delle stalagmiti nelle caverne di mezzo mondo, nei sedimenti oceanici e lacustri e in molti altri luoghi ancora, tuttavia, la memoria probabilmente più chiara e convincente del clima del recente passato geologico è quella registrata nei ghiacci delle aree polari, in Antartide e in Groenlandia da dove estraiano dei cilindri di ghiaccio che, in una meravigliosa e perfetta sequenza stratigrafica, ci forniscono una fotografia precisa delle condizioni del nostro pianeta. Questi cilindri, in gergo chiamati carote, contengono al proprio interno informazioni legate ai principali fattori che possono influenzare il clima come, ad esempio, le concentrazioni di gas a effetto serra o quelle delle polveri sottili. Cioè tutti quei parametri le cui variazioni possono causare dei cambiamenti nelle condizioni climatiche che, comunemente, chiamiamo forzanti climatiche.

Much of what we know about climatic variations of our planet is owed to these formidable climate and environmental archives, which are ice cores. The climatic history of the Earth is written in several places: in the calcite of stalagmites in caves around the world, in oceanic sediments and lake beds, and in many other locations. However, the clearest and most convincing record of the climate of the past is that preserved in the ice of the polar regions, in Antarctica and Greenland, where we extract cylinders of ice, in a wonderful and perfect stratigraphic sequence, which provide a precise snapshot of the conditions of our planet in the past. These cylinders, known as ice cores, contain within them important information regarding the main factors that can influence climate, such as the concentrations of greenhouse gases and the level of fine dust. All of this helps us understand the parameters whose variations can cause changes in climatic conditions, which we commonly call climate forcing factors.

Parole-chiave: Cambiamenti climatici; Carote di ghiaccio; Forzanti climatiche.

Keywords: Climatic variations; Ice cores; Climate forcing factors.

Laura Riva, Ilaria Corsi, Carlo Punta

Le nanotecnologie per la bonifica ambientale: un rischio o un'opportunità?

Nanotechnology for environmental remediation: a risk or an opportunity?

Lo sviluppo e l'impiego di nanomateriali ingegnerizzati sta trovando sempre più sbocchi applicativi in diversi settori tecnologici. Tra questi, nell'ambito della bonifica ambientale si registra una crescente e continua proposta di nuove nano-soluzioni per il trattamento e la decontaminazione di suoli, sedimenti ed acque. Se da un lato i risultati appaiono efficaci e promettenti, dall'altro l'uso delle nanotecnologie, ancor più in questo ambito, solleva molti dubbi e preoccupazioni sia all'interno della comunità scientifica che nella società civile, a causa della presunta e/o potenziale (eco)tossicità dei nanomateriali stessi. Ne conseguono spesso restrizioni d'impiego sia a livello nazionale che comunitario, seguendo principi precauzionali. Questo capitolo si propone di fornire linee guida virtuose, validate in un caso studio, per lo sviluppo di nanomateriali ingegnerizzati per la bonifica ambientale, che possano essere considerati sicuri per l'ambiente già dalla prima fase di progettazione, seguendo i principi dell'*eco-design*.

The development and use of engineered nanomaterials is finding more and more applications in various technological sectors. Among these, in the field of environmental remediation there is a growing and continuous proposal of new nano-solutions for the treatment and decontamination of soils, sediments and water. If on the one hand the results appear effective and promising, on the other the use of nanotechnologies, even more so in this area, raises many doubts and concerns both within the scientific community and in civil society, due to the presumed and/or potential (eco)toxicity of the nanomaterials themselves. This often results in restrictions on use both at national and community level, following precautionary principles. This chapter aims to provide virtuous guidelines, validated in a case study, for the development of engineered nanomaterials for environmental remediation, which can be considered safe for the environment right from the first design phase, following the principles of eco-design.

Parole-chiave: Nanotecnologie; Bonifica ambientale; Eco-tossicità; *Eco-design*.

Keywords: Nanomaterials; Environmental remediation; Eco-toxicity; Eco-design.

Roberta Bettinetti

Nuovi contaminanti emergenti negli ambienti lacustri: le microplastiche

Newly emerging contaminants in lake environments: microplastics

La plastica è uno dei materiali più comunemente prodotti e utilizzati al mondo grazie alle sue eccezionali caratteristiche. L'uso mondiale della plastica, tuttavia, e la cattiva gestione dei rifiuti hanno portato a impatti negativi sugli ecosistemi. La degradazione della plastica nell'ambiente porta alla generazione di particelle di plastica di dimensioni inferiori a 5 mm (ma superiori a 0,1 mm) dette microplastiche (MP). Esse rappresentano un problema emergente a causa della loro ampia dispersione negli ambienti acquatici e dei potenziali effetti eco-tossicologici correlati che a oggi sono ancora poco definiti. Numerosi studi di questo tipo sono stati già condotti in ambiente marino con l'obiettivo di valutarne la presenza e gli impatti. Questo non si può dire però per i sistemi di acqua dolce, laghi in particolare, rendendo così il recupero dei dati un compito difficile. Questo testo ha lo scopo di illustrare i principali aspetti riguardanti le fonti di inquinamento da MP nei laghi, individuate ormai come contaminanti emergenti e ubiquitari.

Plastic is one of the most commonly produced and used material in the world due to its exceptional characteristics. However, the global use of plastics and poor waste management have led to negative impacts on ecosystems. The degradation of plastic in the environment leads to the generation of plastic particles with a size of <5 mm (but larger than 0,1 mm) which are defined as microplastics (MP). These represent an emerging problem due to their wide dispersion in aquatic environments and the potential ecotoxicological effects that are still poorly defined. Numerous studies have already been conducted with the aim of assessing the presence and impacts in the marine environment. However, their presence in freshwater systems and lakes in particular is still poorly studied, making data retrieval a difficult task. The aim of this text is to identify the main aspects concerning the sources of MP pollution in lakes, identified as ubiquitous emergent contaminants.

Parole-chiave: Plastica; Microplastica; Ambienti d'acqua dolce; Laghi.

Key words: Plastic; Microplastic; Freshwater environments; Lakes.



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

FrancoAngeli Open Access è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli massimizza la visibilità, favorisce facilità di ricerca per l'utente e possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più: [Pubblica con noi](#)

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio "[Informatemi](#)" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

FrancoAngeli

a strong international commitment

Our rich catalogue of publications includes hundreds of English-language monographs, as well as many journals that are published, partially or in whole, in English.

The **FrancoAngeli**, **FrancoAngeli Journals** and **FrancoAngeli Series** websites now offer a completely dual language interface, in Italian and English.

Since 2006, we have been making our content available in digital format, as one of the first partners and contributors to the **Torrossa** platform for the distribution of digital content to Italian and foreign academic institutions. **Torrossa** is a pan-European platform which currently provides access to nearly 400,000 e-books and more than 1,000 e-journals in many languages from academic publishers in Italy and Spain, and, more recently, French, German, Swiss, Belgian, Dutch, and English publishers. It regularly serves more than 3,000 libraries worldwide.

Ensuring international visibility and discoverability for our authors is of crucial importance to us.

FrancoAngeli



torrossa
Online Digital Library

INCONTRI DI STUDIO

Collana dell'Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e Lettere

L'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere ha organizzato tre convegni a cadenza annuale sotto il titolo generale "Chimica, società e ambiente", dedicati rispettivamente a *La Chimica nella sfida energetica* (ottobre 2022), *La sfida chimica e ambientale* (ottobre 2023), *Chimica, agricoltura e alimentazione sostenibili* (ottobre 2024). Con questi incontri si è inteso fare il punto, da un rigoroso punto di vista scientifico, sullo stato dell'arte della ricerca chimica in campo energetico e ambientale e sulle prospettive concrete di tempi, costi e modi di realizzazione di possibili soluzioni, anche in vista del considerevole aumento della popolazione mondiale previsto nei prossimi anni. Il presente volume raccoglie alcuni dei contributi conferiti nei primi due convegni del ciclo.

Stefano Maiorana, Professore emerito di Chimica organica presso l'Università degli Studi di Milano, si è occupato di ricerca nel campo della Chimica organometallica ed eterociclica. Ha svolto un'intensa attività di collaborazione con l'industria chimica di sintesi e di rappresentanza negli organi di governo universitario. Membro effettivo della Sezione di Chimica, attualmente è Presidente dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere.

Carlo Gatti, già Dirigente di Ricerca presso il CNR, ha svolto ricerca nell'ambito della Chimica Fisica teorica e della modellistica chimica, occupandosi prevalentemente di legame chimico nello stato solido, con particolare riguardo ai materiali termoelettrici e ai materiali a cambiamento di fase. È membro effettivo dell'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, dove è anche rappresentante della Sezione di Chimica.