



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



**N. 3/2021**





## Nel trattamento delle acque il massimo rispetto per l'ambiente

Da anni ci dedichiamo con passione  
allo sviluppo ed alla messa a punto  
di sistemi per la depurazione delle acque  
senza inquinare l'aria.

Ozono per ridurre i microinquinanti,  
ossigeno per eliminare gli aerosol per soluzioni  
a scala reale e sperimentazioni a cura del nostro  
laboratorio di biologia e chimica ambientale.

Gruppo SIAD.  
Technical gases, Engineering,  
Healthcare, LPG and Natural Gas.

[thesiadgroup.com](http://thesiadgroup.com)

The SIAD logo consists of a green graphic element on the left, composed of several horizontal lines of varying lengths that create a sense of motion or a stylized 'S' shape. To the right of this graphic, the word 'SIAD' is written in a bold, green, sans-serif font.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

## INDICE



VOL. 8  
NUM. 3  
2021

Ingegneria  
dell'Ambiente  
per il 2021 è  
sostenuta da:



### EDITORIALI

- Il sesto rapporto di valutazione dell'IPCC ..... 177  
*Stefano Caserini*
- Climate Change 2021 – Le basi fisico-scientifiche: i messaggi principali del rapporto ..... 180  
*Focal Point IPCC per l'Italia*

### ARTICOLI

- Le fasi opzionali di normalizzazione e pesatura nell'analisi del ciclo di vita: approcci possibili e stato dell'arte ..... 188  
*Giulia Cavenago, Lucia Rigamonti, Mario Grosso*
- La strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni di gas serra: scenari emissivi e trend storici ..... 201  
*Emanuele Peschi, Antonio Caputo, Eleonora Di Cristofaro, Marina Colaiezzi, Monica Pantaleoni, Marina Vitullo, Maria Gaeta*
- Analisi sperimentale sulla degradazione anaerobica di sacchetti in carta o in bioplastica per la raccolta del rifiuto alimentare ..... 221  
*Valeria Venturelli, Giovanni Dolci, Arianna Catenacci, Francesca Malpei, Mario Grosso*
- Rimozione di cromo da liquami: valutazione dell'upgrading di un depuratore di reflui e rifiuti industriali ..... 235  
*Andrea Re, Elisabetta Zanardini, Domiziano Ivan Basilico, Marcello Rigon, Marco Vanotti, Cristiana Morosini*

### PUBBLIREDAZIONALI

- Evaporatori mono e multieffetto con scambiatore immerso ..... 249  
*Mattia Maggioni, Davide Ripamonti – Eco-Techno*
- AMAREX – Elettropompe sommergibili per il convogliamento di acque reflue ..... 253  
*KSB Italia*
- Garantire la continuità operativa in caso di carenza d'acqua ..... 257  
*Veolia Water Technologies Italia*
- CONOU, una filiera circolare al 100% anche nell'anno della pandemia ..... 261  
*CONOU*
- Risparmio energetico e scarico zero in zincatura ..... 265  
*Ecogenerazione*
- L'End of Waste Carta per carta e cartone: un ulteriore passo avanti sulla strada della circolarità ..... 268  
*Claudio Busca – Comieco*

### RUBRICHE

- Informazioni dalle Aziende ..... 272



**DIRETTORE RESPONSABILE***Stefano Caserini* (Politecnico di Milano)**DIREZIONE SCIENTIFICA***Stefano Caserini* (Politecnico di Milano)*Roberto Canziani* (Politecnico di Milano)**COMITATO SCIENTIFICO***Manuela Antonelli* (Politecnico di Milano)*Arianna Azzellino* (Politecnico di Milano)*Vincenzo Belgiorno* (Università di Salerno)*Giorgio Bertanza* (Università di Brescia)*Alessio Boldrin* (DTU, Copenhagen, Danimarca)*Gianluigi Buttiglieri* (Catalan Institute for Water Research, Girona, Spagna)*Andrea Capodaglio* (Università di Pavia)*Alessandra Carucci* (Università di Cagliari)*Stefano Cernuschi* (Politecnico di Milano)*Raffaello Cossu* (Università di Padova)*Paola Crippa* (Università di Notre Dame, USA)*Giovanni De Feo* (Università di Salerno)*Massimiliano Fabbicino* (Università di Napoli Federico II)*Francesco Fatone* (Università Politecnica delle Marche)*Elena Ficara* (Politecnico di Milano)*Paola Foladori* (Università di Trento)*Mario A. Gandini* (Univ. Aut. de Occidente, Cali, Colombia)*Grazia Ghermandi* (Università di Modena e Reggio Emilia)*Daniele Goi* (Università di Udine)*Mario Grosso* (Politecnico di Milano)*Giovanni Lonati* (Politecnico di Milano)*Claudio Lubello* (Università di Firenze)*Francesca Malpei* (Politecnico di Milano)*Salvatore Masi* (Università della Basilicata)*Giulio Munz* (Università di Firenze)*Salvatore Nicosia* (Università di Palermo)*Senem Ozgen* (Laboratorio Energia e Ambiente, Piacenza)*Eleonora Perotto* (Politecnico di Milano)*Francesco Pirozzi* (Università di Napoli Federico II)*Alessandra Poletti* (Università di Roma La Sapienza)*Raffaella Pomi* (Università La Sapienza, Roma)*Marco Ragazzi* (Università di Trento)*Ezio Ranieri* (Politecnico di Bari)*Enrico Remigi* (DHI, Merelbeke, Belgio)*Lucia Rigamonti* (Politecnico di Milano)*Paolo Roccaro* (Università di Catania)*Francesco Romagnoli* (Riga Technical Univ., Riga, Lituania)*Diego Rosso* (University of California, Irvine, USA)*Sabrina Saponaro* (Politecnico di Milano)*Elena Sezenna* (Politecnico di Milano)*Fabio Tatano* (Università di Urbino)*Sergio Teggi* (Università di Modena e Reggio Emilia)*Davide Tonini* (JRC Siviglia)*Vincenzo Torretta* (Università dell'Insubria)*Mentore Vaccari* (Università di Brescia)*Paola Verlicchi* (Università di Ferrara)*Gaspare Viviani* (Università di Palermo)*Maria Chiara Zanetti* (Politecnico di Torino)**COMITATO DI REDAZIONE***Arianna Azzellino, Mario Grosso, Giovanni Lonati, Lucia Rigamonti, Elena Sezenna***SEGRETARIA DI REDAZIONE***Loredana Alaimo***INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE****N. 3/2021****COPYRIGHT**

I testi sono pubblicati da Ingegneria dell'Ambiente con la licenza CREATIVE COMMONS Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia (CC BY-NC-SA 3.0 IT)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/it/deed.it>

Chiunque è libero di:

- *Condividere* – riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare questo materiale con qualsiasi mezzo e formato;
- *Modificare* – remixare, trasformare il materiale e basarsi su di esso per le sue opere;

alle seguenti condizioni:

- *Attribuzione* – Deve essere attribuita adeguatamente la paternità del materiale, fornendo un link alla licenza e indicando se sono state effettuate modifiche. È possibile realizzare queste condizioni in qualsiasi maniera ragionevole, ma senza suggerire che il licenziante avalli il modo in cui il materiale è usato.
- *Non Commerciale* – Non è possibile usare il materiale per scopi commerciali.
- *Stessa Licenza* – Se si trasforma il materiale o ci si basa su di esso, è fatto obbligo di distribuire il contributo così prodotto con la stessa licenza del materiale originario.

Il licenziante non può revocare questi diritti fintanto che i termini della licenza sono rispettati.

**EDITORE**

COLORSHADE di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI), Italia.

REDAZIONE E PUBBLICITÀ: Loredana Alaimo, Tel. 329.3126157, e-mail: [redazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:redazione@ingegneriadellambiente.net)

Registrata presso il Tribunale di Milano (n.108 del 21/3/2014)

PER ABBONAMENTI: Tel. 02.2847518, Fax 02.45482383, e-mail: [amministrazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:amministrazione@ingegneriadellambiente.net)

PER INFORMAZIONI: Ing. Stefano Caserini, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Sezione Ambientale, Via Golgi 39, 20133 Milano. Tel. 02.23996430, e-mail: [info@ingegneriadellambiente.net](mailto:info@ingegneriadellambiente.net)

Publicato on-line il 14 ottobre 2021.

Finito di stampare in ottobre 2021, presso Colorshade di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI).

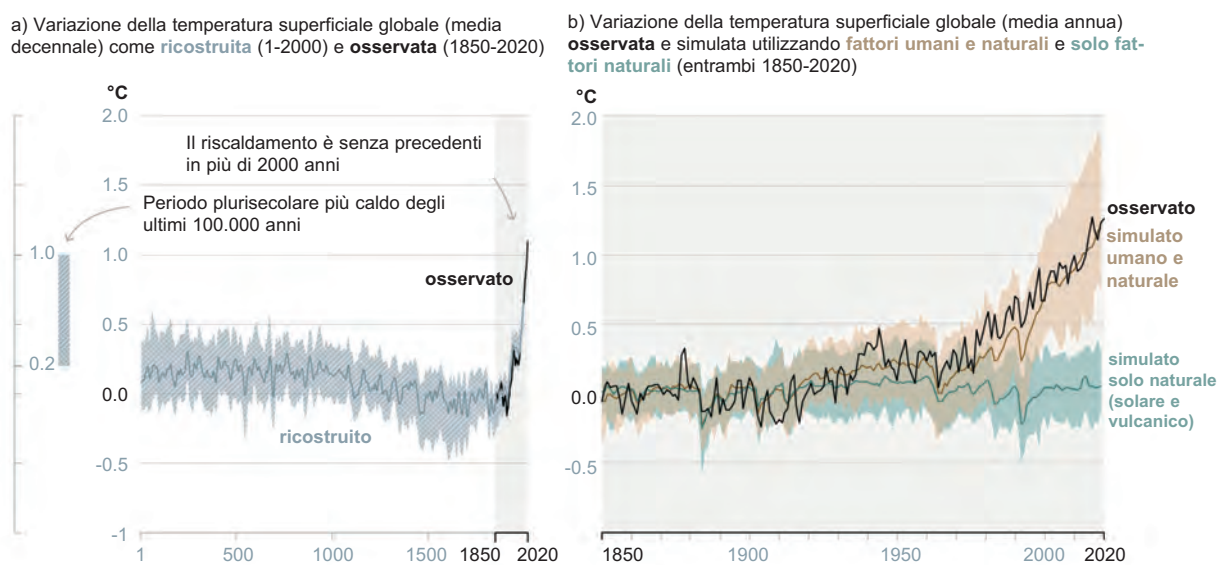
Stefano Caserini

Docente di Mitigazione dei Cambiamenti climatici, Politecnico di Milano

La pubblicazione nell'agosto 2021 del primo volume del Sesto Rapporto di Valutazione (AR6) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) rappresenta un altro passo importante nel lungo percorso con cui l'umanità ha riconosciuto la gravità dell'interferenza delle sue attività con il sistema climatico terrestre. A 21 anni dal primo rapporto dell'IPCC, pubblicato nel 1990, ora il quadro delle conoscenze ha raggiunto un livello di dettaglio e accuratezza impressionante: il rapporto è formato da 3949 pagine, suddivise in 12 capitoli e un atlante interattivo, tutti disponibili sul sito [www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/](http://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/). Un lavoro enorme, che ha passato in rassegna un'estesissima letteratura scientifica (oltre 14.000 sono le citazioni), ed è il risultato di tre cicli di revisione che hanno prodotto oltre 750.000 commenti. I mezzi di comunicazione hanno rilanciato i messaggi principali del Sommario per i decisori politici, la sintesi più divulgativa del rapporto, che fa riferimento in modo preciso – e verrebbe da dire pedante – a quanto presente nel rapporto. Il Som-

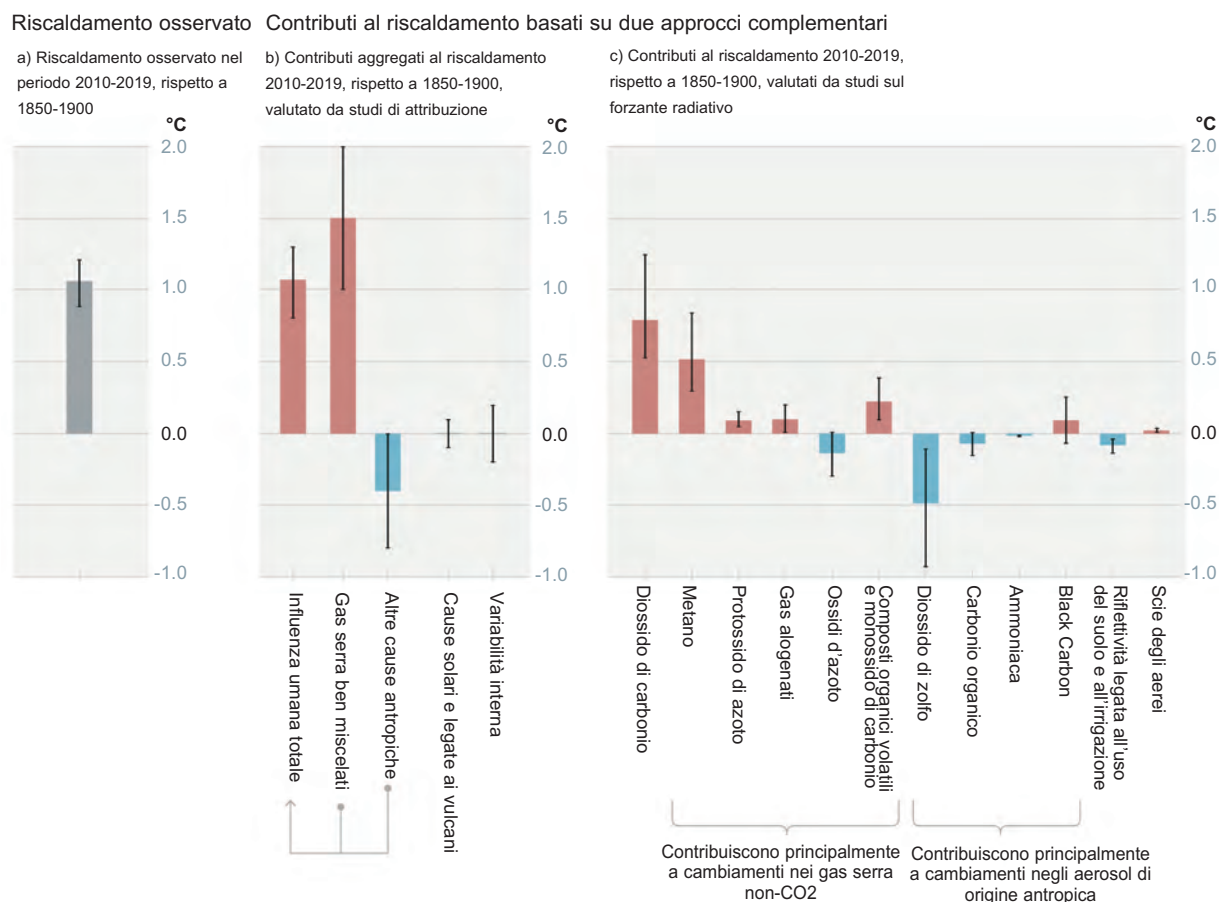
mario tecnico (150 pagine) è raccomandato per chi vuole avere una visione ampia e approfondita dello stato dell'arte della scienza del clima. Rimandando alla lettura di questi documenti o della sintesi dei messaggi principali del Sesto rapporto curata dal Focal Point IPCC – Italia, riportata alla fine di questo editoriale, si può riconoscere come un fatto ormai inequivocabile che i cambiamenti climatici riguardino ogni regione della Terra, sono rapidi e si stanno intensificando. Molti di questi cambiamenti sono senza precedenti da secoli o anche millenni. È il caso delle temperature medie globali: nel riquadro a sinistra della prima figura del Sommario del rapporto, riprodotto nella seguente figura 1 nella versione in italiano, si nota come l'andamento delle temperature attuali sia senza precedenti rispetto alle temperature ricostruite per gli scorsi due millenni. Si tratta di un'ulteriore conferma del grafico a forma di "mazza da hockey" presente già nel Terzo rapporto IPCC del 2001, e che aveva suscitato attacchi veementi verso gli

## Cambiamenti nella temperatura superficiale globale rispetto al 1850-1900



**Figura 1: Storia del cambiamento della temperatura globale e cause del recente riscaldamento. Fonte: IPCC, 2021, figura SPM1: si rimanda alla figura originale per i dettagli sulle fonti dei dati utilizzati pe i grafici**

## Il riscaldamento osservato è determinato dalle emissioni delle attività umane, con il riscaldamento causato dai gas serra parzialmente mascherato dal raffreddamento causato dagli aerosol



**Figura 2: Stima dei contributi al riscaldamento osservato nel periodo 2010-2019, rispetto al periodo 1850-1900. Fonte: IPCC, 2021, figura SPM2: si rimanda alla figura originale per i dettagli sulle fonti dei dati utilizzati**

scienziati che per primi avevano effettuato le ricerche su cui si basava (si veda al riguardo Caserini, 2008). Pure chiarissimo anche il grafico presente nel riquadro a destra della stessa figura, in cui si nota come i modelli climatici più avanzati, realizzati da numerosi centri di ricerca in tutto il mondo, non riescano a riprodurre il riscaldamento osservato senza la componente dei fattori antropici.

Il rapporto mostra come nei prossimi decenni in tutte le regioni del mondo è atteso un ulteriore cambiamento dei parametri climatici, a partire dall'ulteriore incremento delle temperature globali, del numero delle ondate di calore e della lunghezza delle stagioni calde. Con un riscaldamento globale anche solo di 2°C (attualmente le temperature globali sono aumentate di +1,1 °C rispetto ai livelli pre-industriali), gli estremi di calore raggiungerebbero più spesso soglie di tolleranza critiche per l'agricoltura e la salute.

Il rapporto si sofferma anche sugli impatti attesi dal surriscaldamento globale senza precedenti da molte migliaia di anni, e anche irreversibili per le scale temporali degli esseri umani: è il caso - ad esempio - dell'aumento del livello dei mari, che potrà essere fermato solo in molte decine di migliaia di anni.

Dal rapporto emerge con ancora maggiore chiarezza il ruolo delle diverse "forzanti" del sistema climatico sul riscaldamento globale complessivo, contributi stimati con approcci sempre più sofisticati e quantificando i fattori di incertezza. Dalla seconda figura del Sommario per i decisori politici (Figura 2) emerge la conferma di quanto già mostrato nei precedenti rapporti, il contributo insignificante dei fattori naturali (cause solari e vulcani) sul riscaldamento globale osservato dal 1850, ed invece il contributo determinante di CO<sub>2</sub> (biossido di carbonio) e degli altri gas climalteranti (principalmente metano, protossido di azoto e gas alogenati).

Il nuovo rapporto riassume anche i grandi progressi avvenuti negli ultimi anni nella scienza dell'attribuzione, che studia il ruolo dei cambiamenti climatici nell'intensificazione di specifici eventi meteorologici e climatici come ondate di calore estreme e precipitazioni intense. Il riscaldamento globale provoca un aumento chiaramente percepibile della frequenza e della durata di estremi di temperatura, dell'intensità delle precipitazioni intense e della siccità, in modo più o meno accentuato nelle diverse regioni del pianeta.

Il rapporto infine conferma e rafforza un'altra acquisizione della scienza del clima degli ultimi decenni, ossia che solo forti e costanti riduzioni di emissioni di CO<sub>2</sub> e degli altri gas serra sarebbero in grado di limitare le future variazioni climatiche.



Queste riduzioni, che negli scenari più ambiziosi permettono di rispettare gli impegni dell'Accordo di Parigi (limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei +2°C rispetto al periodo pre-industriale) sarebbero accompagnate da diversi benefici per molti obiettivi di sviluppo sostenibile, come già evidenziato dal Rapporto Speciale su 1.5°C di riscaldamento globale pubblicato dall'IPCC nel 2018 (IPCC, 2018).

Le informazioni del rapporto sono utili non solo all'intera comunità scientifica e a chi si occupa della questione climatica, ma sono anche un contributo ai negoziati sul clima che vedranno nella COP26 di Glasgow, da 1 a 15 novembre, un'altra tappa importante.

“Questo rapporto è un riscontro oggettivo con la realtà (reality-check)”, ha dichiarato nella conferenza stampa di presentazione del rapporto la co-presidente del Gruppo di Lavoro I dell'IPCC, Valérie Masson-Delmotte. “Ora abbiamo un quadro molto più chiaro del clima passato, presente e futuro, che è essenziale per capire dove siamo diretti, cosa si può fare e come ci possiamo preparare”.

Il rapporto pubblicato è il primo dei tre volumi che costituiranno il Sesto Rapporto di Valutazione (AR6) dell'IPCC. I rapporti degli altri due gruppi di lavoro, su Impatti e Adattamenti (WG2) e sulla Mitigazione del cambiamento climatico (WG3) saranno pubblicati rispettivamente nel febbraio e marzo 2022.

### Riferimenti bibliografici

Caserini S. (2008) A qualcuno piace caldo. Errori e leggende sul clima che cambia. Edizioni Ambiente, Milano, 352 pp., ISBN 978-88-89014-75-2.  
Disponibile su [www.caserinik.it/aqpc](http://www.caserinik.it/aqpc).

IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

## CLIMATE CHANGE 2021 – LE BASI FISICO-SCIENTIFICHE: I MESSAGGI PRINCIPALI DEL RAPPORTO

*A cura del Focal Point IPCC per l'Italia\**

### Lo stato attuale del clima

*Rispetto al Quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (AR5) sono migliorate le stime basate sulle osservazioni e le informazioni dagli archivi paleoclimatici, che forniscono una visione completa di ogni componente del sistema climatico e dei suoi cambiamenti fino ad oggi. Nuove simulazioni dei modelli climatici, nuove analisi e metodi che combinano numerose evidenze, portano ad una migliore comprensione dell'influenza umana su un'ampia gamma di variabili climatiche, compresi gli estremi meteo-climatici.*

È inequivocabile che l'influenza umana ha riscaldato l'atmosfera, l'oceano e le terre emerse. Si sono verificati cambiamenti diffusi e rapidi nell'atmosfera, nell'oceano, nella criosfera e nella biosfera.

- Gli aumenti osservati nelle concentrazioni di gas serra (greenhouse gases, GHG) dal 1750 circa sono inequivocabilmente causati da attività umane. Dal 2011 le concentrazioni in atmosfera hanno continuato ad aumentare, raggiungendo nel 2019 medie annuali di 410 ppm per l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), 1.866 ppb per il metano (CH<sub>4</sub>), e 332 ppb per il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O).
- La temperatura superficiale globale nel periodo 2001-2020 è stata di 0,99°C superiore a quella del periodo 1850-1900, ed è stata più alta di 1,09°C nel periodo 2011-2020 rispetto al periodo 1850-1900, con aumenti maggiori sulla terraferma (1,59°C) rispetto all'oceano (0,88°).
- Le precipitazioni globali medie sulla terraferma sono aumentate dal 1950, e più rapidamente a partire dagli anni '80. L'influenza umana ha probabilmente contribuito al pattern di cambiamento delle precipitazioni dalla metà del XX° secolo, e ha molto probabilmente contribuito al pattern di cambiamento della salinità dell'oceano superficiale.
- L'influenza umana è la causa principale del ritiro dei ghiacciai a livello globale dagli anni '90, della diminuzione del ghiaccio. Questa diminuzione è di circa il 40% in settembre (mese

del minimo annuale). Inoltre, le attività umane hanno contribuito alla diminuzione della copertura nevosa primaverile dell'emisfero settentrionale dal 1950 e allo scioglimento superficiale osservato della calotta glaciale della Groenlandia negli ultimi due decenni.

- Lo strato superficiale dell'oceano (0-700 m) si è riscaldato a partire dagli anni '70 e le emissioni di CO<sub>2</sub> causate dall'uomo sono la causa dell'attuale acidificazione globale dell'oceano superficiale.
- Il livello medio del mare globale è aumentato di 0,20 m tra il 1901 e il 2018 e il tasso medio di innalzamento è stato di 1,3 mm yr<sup>-1</sup> tra il 1901 e il 1971. Le attività umane sono la principale causa di questo innalzamento. Recentemente tra il 2006 e il 2018 il tasso di innalzamento ha raggiunto i 3,7 mm per anno.
- Le zone climatiche si sono spostate verso il polo in entrambi gli emisferi, ed il periodo vegetativo si è allungato in media fino a due giorni per decennio dagli anni '50 alle medie latitudini in entrambi gli emisferi.
- L'influenza umana ha riscaldato il clima a un ritmo (velocità) senza precedenti negli ultimi 2000 anni.

La portata dei recenti cambiamenti nel sistema climatico è senza precedenti da molti secoli e molte migliaia di anni.

- Nel 2019, le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> sono state le più alte degli ultimi 2 milioni di anni, e le concentrazioni di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O erano le più alte degli ultimi 800.000 anni. Dal 1750, gli aumenti delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> (47%) e CH<sub>4</sub> (156%) superano di gran lunga i cambiamenti naturali plurimillenni tra periodi glaciali e interglaciali degli ultimi 800.000 anni.
- La temperatura superficiale globale è aumentata più velocemente a partire dal 1970 che in qualsiasi altro periodo di 50 anni degli ultimi 2000 anni. Durante il decennio 2011-2020 le temperature hanno superato quelle del più recente periodo caldo multi-centenario, circa 6500 anni fa.
- Nel periodo 2011-2020, la media annuale dell'area di ghiaccio marino artico ha raggiunto il

\* <https://ipccitalia.emcc.it/>



livello più basso dal 1850. Nel periodo tardo estivo è stata inferiore a qualsiasi altro periodo degli ultimi 1000 anni. La natura globale del ritiro dei ghiacciai a partire dagli anni '50 è senza precedenti negli ultimi 2000 anni.

- Il livello medio del mare è aumentato più velocemente a partire dal 1900 che in ogni secolo precedente degli ultimi 3000 anni. L'oceano si è riscaldato più velocemente nell'ultimo secolo che dalla fine dell'ultima deglaciazione (circa 11.000 anni fa).

I cambiamenti climatici stanno già influenzando molti estremi meteorologici e climatici, come ondate di calore, precipitazioni intense, siccità e cicloni tropicali, in ogni regione del mondo, e si sono rafforzate rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)* le prove che attribuiscono queste variazioni negli estremi all'influenza umana.

- Gli estremi di caldo (incluse le ondate di calore) sono diventati più frequenti e più intensi nella maggior parte delle terre emerse a partire dagli anni '50 del XX secolo, mentre gli estremi di freddo (incluse le ondate di freddo) sono diventati meno frequenti e meno gravi; il cambiamento climatico indotto dall'uomo è il principale motore di questi cambiamenti. Alcuni recenti estremi di caldo osservati nell'ultimo decennio sarebbero stati estremamente improbabili senza l'influenza umana sul sistema climatico.
- Le ondate di calore marine sono raddoppiate in frequenza dagli anni '80.
- La frequenza e l'intensità degli eventi di precipitazione intensa sono aumentate a partire dagli anni '50 sulla maggior parte delle terre emerse.
- In alcune regioni, è aumentata la siccità agricola ed ecologica<sup>[1]</sup> per via dell'aumento dell'evapotraspirazione dei terreni.
- La diminuzione delle precipitazioni monsoniche terrestri globali dagli anni '50 agli anni '80 è in parte attribuita alle emissioni di aerosol

nell'emisfero settentrionale causate dall'uomo, ma gli aumenti da allora sono dovuti all'aumento delle concentrazioni di gas serra e alla variabilità interna su scala decennale o pluridecennale;

- È probabile che la percentuale di forti cicloni tropicali (categoria 3-5) sia aumentata negli ultimi quattro decenni, e che la latitudine in cui i cicloni tropicali nel Pacifico settentrionale occidentale raggiungono il picco di intensità si sia spostata verso nord.
- L'influenza umana ha aumentato la probabilità di eventi estremi combinati<sup>[2]</sup> a partire dagli anni '50.

Una migliore conoscenza dei processi climatici, delle evidenze paleoclimatiche e della risposta del sistema climatico all'aumento del forzante radiativo fornisce una migliore stima della sensibilità climatica all'equilibrio di 3°C con un intervallo ridotto rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)*.

- Il forcing radiativo causato dall'uomo che ha riscaldato il sistema climatico è di 2,72 W m<sup>-2</sup> nel 2019 rispetto al 1750. Questo riscaldamento è dovuto principalmente all'aumento delle concentrazioni di gas serra, in parte ridotto dal raffreddamento dovuto all'aumento delle concentrazioni di aerosol.
- Il tasso medio osservato di riscaldamento del sistema climatico è aumentato da 0,50 W m<sup>-2</sup> per il periodo 1971-2006, a 0,79 W m<sup>-2</sup> per il periodo 2006-2018.
- Il riscaldamento del sistema climatico ha causato l'aumento del livello medio del mare a livello globale attraverso la perdita di ghiaccio terrestre e l'espansione termica dovuta al riscaldamento degli oceani. L'espansione termica giustifica il 50% dell'innalzamento del livello del mare nel periodo 1971-2018, mentre la perdita di ghiaccio dai ghiacciai ha contribuito per il 22%, le calotte di ghiaccio per il 20% e i cambiamenti nell'immagazzinamento delle acque terrestri per l'8%.

[1] *Siccità agricola ed ecologica (a seconda del bioma interessato): un periodo con un deficit anormale di umidità del suolo, dato dalla carenza combinata di precipitazioni e dall'eccesso di evapotraspirazione, che, durante la stagione di crescita, compromette la produzione agricola o il funzionamento dell'ecosistema in generale. I cambiamenti osservati durante le siccità meteorologiche (deficit di precipitazioni) e idrologiche (deficit di flusso) sono distinti da quelli delle siccità agricola ed ecologica.*

[2] *Gli eventi estremi composti sono la combinazione di più fattori trainanti che contribuiscono al rischio sociale o ambientale. Esempi includono ondate di calore e siccità concomitanti, inondazioni composte (per esempio, un'ondata di maltempo in combinazione con piogge e/o flussi fluviali estremi), condizioni meteorologiche di incendio composte (per esempio, una combinazione di condizioni di caldo, secco e vento), o estremi concomitanti in luoghi diversi.*

## Possibili futuri climatici

*Cinque nuovi scenari di emissioni sono stati usati per esplorare la risposta climatica a una gamma più ampia di GHG, usi del suolo e inquinanti atmosferici rispetto a quelli valutati nel precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5). Questi scenari guidano le proiezioni dei modelli climatici e tengono conto dell'attività solare e vulcanica.*

È atteso che la temperatura superficiale globale continuerà ad aumentare almeno fino alla metà del secolo in tutti gli scenari di emissioni considerati. Il riscaldamento globale di 1,5°C e 2°C sarà superato durante il corso del XXI° secolo a meno che non si verifichino nei prossimi decenni profonde riduzioni delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra.

- Rispetto al periodo 1850-1900, la temperatura superficiale globale media nel 2081-2100 sarà molto probabilmente più alta di 1,0°C-1,8°C nello scenario di emissioni di GHG molto basso (SSP1-1,9), di 2,1°C-3,5°C nello scenario intermedio (SSP2-4,5) e di 3,3°C-5,7°C nello scenario di emissioni molto alto (SSP5-8,5). L'ultima volta che la temperatura superficiale globale ha superato i 2,5°C è stato più di 3 milioni di anni fa.
- I 2°C verrebbero superati durante il XXI° secolo negli scenari di emissioni di GHG alti (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e molto probabilmente anche nello scenario intermedio (SSP2-4.5). Negli scenari di emissioni di GHG bassi, è estremamente improbabile che il riscaldamento globale di 2°C venga superato nello scenario SSP1-1.9, e improbabile nello scenario SSP1-2.6<sup>[3]</sup>. Il superamento dei 2°C nel medio termine (2041-2060) è molto probabile nello scenario di emissioni di GHG molto elevate (SSP5-8.5), e probabile negli scenari di emissioni intermedie ed elevate.
- Il riscaldamento globale di 1,5°C (rispetto al 1850-1900) verrebbe superato nel corso del XXI secolo negli scenari intermedio, alto e molto alto (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, rispettivamente). Nel breve termine (2021-2040) è molto probabile che 1.5°C venga superato nello scenario di emissioni molto alte (SSP5-8,5), è pro-

babile che venga superato negli scenari intermedio e alto (SSP2-4,5 e SSP3-7,0). È probabile che non venga superato nello scenario di emissioni di GHG basse (SSP1-2,6) ed è ancora più probabile che non venga raggiunto nello scenario di emissioni molto basse (SSP1-1,9). Inoltre, nello scenario a emissioni molto basse (SSP1-1.9), c'è una probabilità superiore al 50% che la temperatura superficiale globale scenda nuovamente al di sotto di 1,5°C verso la fine del XXI secolo, con un superamento temporaneo di non più di 0,1°C al di sopra di 1,5°C.

- La temperatura superficiale globale in ogni singolo anno può variare al di sopra o al di sotto della tendenza a lungo termine indotta dall'uomo, a causa della sostanziale variabilità naturale<sup>[4]</sup>. Il verificarsi di singoli anni con variazioni di temperatura media globale al di sopra di un certo livello, ad esempio 1,5°C o 2°C, relative al periodo 1850-1900 non implica che questo livello di riscaldamento globale sia stato raggiunto.

Molti cambiamenti nel sistema climatico diventano più grandi in relazione diretta all'aumento del riscaldamento globale. Questi includono l'aumento della frequenza e dell'intensità degli estremi caldi, delle ondate di calore marine, delle forti precipitazioni, della siccità agricola ed ecologica in alcune regioni, della proporzione di cicloni tropicali intensi, della riduzione del ghiaccio marino artico, della copertura nevosa e del permafrost.

- È certo che la superficie terrestre continuerà a riscaldarsi più di quella oceanica (di 1,4/ 1,7 volte di più) e che l'Artico continuerà a riscaldarsi a una velocità due volte superiore rispetto a quella della temperatura superficiale globale.
- Con ogni ulteriore incremento del riscaldamento globale, i cambiamenti negli estremi continueranno ad aumentare. Ad esempio, ogni 0,5°C in più di riscaldamento globale provoca aumenti chiaramente percepibili dell'intensità e della frequenza degli estremi di caldo, comprese le ondate di calore e le forti precipitazioni, nonché siccità agricola ed ecologica in alcune regioni. Alcuni eventi estremi avranno aumenti senza precedenti anche con un ulteriore riscaldamento.

[3] *SSP1-1.9 e SSP1-2.6 sono scenari che iniziano nel 2015 e hanno emissioni di GHG molto basse e basse ed emissioni di CO<sub>2</sub> che diminuiscono fino allo zero netto intorno al 2050, seguiti da vari livelli di emissioni negative di CO<sub>2</sub>.*

[4] *La variabilità naturale si riferisce alle fluttuazioni climatiche che si verificano senza alcuna influenza umana, cioè la variabilità interna combinata con la risposta a fattori naturali esterni come le eruzioni vulcaniche, i cambiamenti nell'attività solare e, su scale temporali più lunghe, gli effetti orbitali e la tettonica a placche.*

to globale anche a 1,5°C rispetto al periodo pre-industriale.

- Si prevede che alcune regioni alle medie latitudini e semi-aride e la regione del monzone sudamericano, vedranno il più alto aumento della temperatura media dei giorni più caldi (di circa 1,5/2 volte il tasso di riscaldamento globale). L'Artico sperimenterà il più alto aumento della temperatura media dei giorni più freddi (di circa 3 volte il tasso di riscaldamento globale).
- È molto probabile che, con un ulteriore riscaldamento globale, eventi di forte precipitazione si intensifichino e diventino più frequenti nella maggior parte delle regioni. Su scala globale, si prevede che gli eventi estremi di precipitazione giornaliera si intensificheranno di circa il 7% per ogni 1°C di riscaldamento globale. La proporzione di cicloni tropicali intensi (categorie 4-5) e le velocità del vento di picco dei cicloni più intensi aumenteranno su scala globale.
- Si prevede che un ulteriore riscaldamento amplifichi ulteriormente lo scioglimento del permafrost, la perdita della copertura nevosa stagionale, del ghiaccio terrestre e del ghiaccio marino artico. È probabile che l'Artico sarà praticamente privo di ghiaccio marino a settembre almeno una volta prima del 2050, con occorrenze più frequenti per livelli di riscaldamento più elevati.

Si prevede che un continuo riscaldamento globale intensifichi ulteriormente il ciclo dell'acqua su scala globale, compresa la sua variabilità, le precipitazioni monsoniche e la gravità degli eventi di precipitazione e siccitosi.

- Il ciclo globale dell'acqua continuerà ad intensificarsi con l'aumento della temperatura globale; le precipitazioni e i flussi d'acqua superficiali dovrebbero diventare più variabili nella maggior parte delle regioni terrestri, sia a scala stagionale, che di anno in anno. Si prevede che le precipitazioni terrestri medie annuali aumenteranno dello 0-5% nello scenario di emissioni GHG molto basse (SSP1-1.9), e dell'1-13% nello scenario di emissioni molto alte (SSP5-8.5) entro il 2081-2100 rispetto al 1995-2014. Si prevede che le precipitazioni aumenteranno alle alte latitudini, nel Pacifico equatoriale e in alcune regioni monsoniche, ma diminuiranno in alcune regioni subtropicali e in aree limitate dei tropici.
- Un clima più caldo intensificherà gli eventi meteorologici e climatici molto umidi e molto sec-

chi, con implicazioni per inondazioni o siccità, ma la localizzazione e la frequenza di questi eventi dipendono dai cambiamenti nella circolazione atmosferica regionale.

- Si prevede che le precipitazioni monsoniche aumentino nel medio-lungo termine su scala globale, in particolare nell'Asia meridionale e sudorientale, nell'Asia orientale e nell'Africa occidentale, tranne che nell'estremo ovest del Sahel.

Negli scenari in cui aumentano le emissioni di CO<sub>2</sub>, si prevede che i serbatoi di carbonio oceanici e terrestri saranno meno efficaci nel rallentare l'accumulo della CO<sub>2</sub> in atmosfera.

- Sulla base delle proiezioni dei modelli, nello scenario intermedio che stabilizza le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> durante questo secolo (SSP2-4.5), i tassi di CO<sub>2</sub> assorbiti dalla terra e dagli oceani dovrebbero diminuire nella seconda metà del XXI secolo. Negli scenari di emissioni di GHG bassi e molto bassi (SSP1-2.6, SSP1-1.9), la terra e gli oceani iniziano ad assorbire meno carbonio in risposta al calo delle concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> e, nello scenario SSP1-1.9, diventano una debole fonte netta di emissioni entro la fine del secolo.
- L'ampiezza dei feedback tra i cambiamenti climatici e il ciclo del carbonio diventa più grande ma anche più incerta negli scenari ad alte emissioni di CO<sub>2</sub>. Ulteriori risposte degli ecosistemi al riscaldamento non ancora completamente riflesse nei modelli climatici (come i flussi di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> dalle zone paludose, il disgelo del permafrost e gli incendi) potrebbero aumentare ulteriormente le concentrazioni di questi gas in atmosfera.

Molti cambiamenti dovuti alle emissioni di GHG passate e future sono irreversibili per secoli o millenni, in particolar modo i cambiamenti nell'oceano, nelle calotte glaciali e nel livello del mare.

- Le emissioni passate di GHG dal 1750 porteranno l'oceano globale ad un riscaldamento futuro. La stratificazione dell'oceano superiore, l'acidificazione e la deossigenazione degli oceani continueranno ad aumentare nel XXI secolo, a tassi variabili a seconda dalle emissioni future, e sono potenzialmente irreversibili per secoli e millenni.
- I ghiacciai montani e polari sono destinati a continuare a sciogliersi per decenni/secoli. La per-

dita di carbonio dal permafrost in seguito al suo disgelo è irreversibile su scale temporali centenarie. La continua perdita di ghiaccio nel corso del XXI secolo è virtualmente certa per la calotta glaciale della Groenlandia e probabile per la calotta glaciale antartica. Conseguenze a bassa probabilità e alto impatto (derivanti da processi di instabilità della calotta glaciale caratterizzati da profonda incertezza che in alcuni casi raggiungerebbero punti critici<sup>[5]</sup>) potrebbero risultare in un forte aumento della perdita di ghiaccio dalla calotta antartica per secoli in scenari di emissioni elevate di GHG.

- Il livello medio globale del mare continuerà ad aumentare nel corso del XXI secolo. Rispetto al 1995-2014, l'aumento sarà probabilmente di 0,28-0,55 m entro il 2100 nello scenario di emissioni di GHG molto basse (SSP1-1.9), e 0,63-1,01 m nello scenario di emissioni molto elevate (SSP5-8.5). Entro il 2150 l'aumento è di 0,37-0,86 m nello scenario molto basso (SSP1-1.9) e di 0,98-1,88 m nello scenario molto elevato (SSP5-8.5). Un innalzamento intorno a 2m entro il 2100 e 5 m entro il 2150 in uno scenario di emissioni di gas serra molto alto (SSP5-8.5) non può essere escluso.
- Nel lungo termine, il livello del mare è destinato ad aumentare per secoli/millenni a causa del continuo riscaldamento profondo degli oceani e dello scioglimento delle calotte glaciali, e rimarrà elevato per migliaia di anni. Nei prossimi 2000 anni, il livello medio globale del mare potrebbe aumentare di circa 2-3 m se il riscaldamento sarà limitato a 1,5°C e di 2-6 m se sarà limitato a 2°C.

### Informazioni climatiche per la valutazione del rischio e l'adattamento a livello regionale

*Le informazioni legate alla fisica del clima considerano il modo in cui il sistema climatico risponde all'interazione tra influenza umana, fattori naturali e variabilità interna. Queste conoscenze, incluse conseguenze a bassa probabilità e alto impatto, forniscono informazioni ai servizi climatici per la valutazione dei rischi climatici e la pianificazione dell'adattamento. Le informazioni fisiche sulla fisica*

[5] *Si parla di conseguenze a bassa probabilità e ad alto impatto quando la probabilità di verificarsi è bassa o non ben nota, ma l'impatto potenziale sulla società e sugli ecosistemi potrebbe essere alto. Un punto critico (tipping point) è una soglia critica oltre la quale un sistema si riorganizza, spesso in modo brusco e/o irreversibile.*

*del clima a scala globale, regionale e locale sono sviluppate sulla base di molteplici evidenze, tra cui osservazioni, risultati dei modelli climatici e strumenti diagnostici sviluppati su misura.*

I fattori naturali e la variabilità interna<sup>[6]</sup> regoleranno i cambiamenti causati dall'uomo, in particolare modo su scala regionale e nel breve termine, con effetti minimi sul riscaldamento globale di lungo periodo. Queste modulazioni su scale temporali decennali o multi-decennali sono importanti da considerare nella pianificazione dell'intera gamma di possibili cambiamenti.

- La temperatura superficiale globale registrata storicamente evidenzia che la variabilità su scala decennale ha potenziato e mascherato i cambiamenti sottostanti causati dall'uomo nel lungo termine, e questa variabilità continuerà in futuro. Per esempio, la variabilità interna su scala decennale e le variazioni dei driver solari e vulcanici hanno parzialmente mascherato il riscaldamento globale superficiale causato dall'uomo nel periodo 1998-2012, con distinzioni regionali e stagionali pronunciate. Tuttavia, il riscaldamento del sistema climatico è continuato durante questo periodo, e ciò si riflette nel continuo riscaldamento dell'oceano e nell'aumento di estremi caldi nelle aree continentali
- I cambiamenti causati dall'uomo previsti nelle condizioni climatiche medie e nei driver di impatto climatico (CID)<sup>[7]</sup>, inclusi gli estremi, saranno o amplificati o attenuati dalla variabilità interna. Un raffreddamento a breve termine, in qualsiasi luogo, sarebbe consistente con l'aumento della temperatura superficiale globale dovuto all'influenza umana.
- La variabilità interna è stata in gran parte responsabile dell'amplificazione e dell'attenuazione dei cambiamenti causati dall'uomo nelle precipitazioni medie da decennali a multi-decennali osservate in molte regioni terrestri.

[6] *I principali fenomeni di variabilità interna includono El Niño-Southern Oscillation, la variabilità su scala decennale del Pacifico e la variabilità multidecennale dell'Atlantico attraverso la loro influenza regionale.*

[7] *I driver di impatto climatico (CID) sono condizioni fisiche del sistema climatico (ad esempio, medie, eventi, estremi) che influenzano un elemento della società o degli ecosistemi. A seconda della tolleranza del sistema, i CID e i loro cambiamenti possono essere dannosi, benefici, neutri, o un misto di entrambi a seconda degli elementi del sistema e delle regioni con cui interagiscono.*

- Sulla base delle evidenze paleoclimatiche e storiche, è probabile che si verifichi nel corso del XXI° secolo almeno una grande eruzione vulcanica esplosiva. Tale eruzione ridurrebbe la temperatura superficiale globale e le precipitazioni, specialmente sulla terraferma, per uno-tre anni, altererebbe la circolazione monsonica globale, modificherebbe le precipitazioni estreme e cambierebbe molte CID. Tale evento andrebbe a mascherare temporaneamente e parzialmente il cambiamento climatico causato dall'uomo.

Con un ulteriore riscaldamento globale, si prevede che ogni regione sperimenterà sempre più cambiamenti concomitanti e multipli negli eventi climatici capaci di generare un impatto su società ed ecosistemi (CID). Questi sarebbero più diffusi a 2°C rispetto che a 1,5°C e ancora più diffusi e/o pronunciati per livelli di riscaldamento più elevati.

- In tutte le regioni si prevede un ulteriore aumento di CID caldi e una diminuzione di CID freddi. Ulteriori diminuzioni sono previste nel permafrost, nella neve, nei ghiacciai e nelle calotte glaciali, nei laghi e nel ghiaccio marino artico. Questi cambiamenti saranno maggiori con un riscaldamento globale di 2°C rispetto che a 1,5°C. Per esempio, si prevede che soglie critiche di caldo per l'agricoltura e la salute saranno superate più frequentemente a livelli più alti di riscaldamento globale.
- Con un riscaldamento globale di 1,5°C, si prevede che le precipitazioni forti e le relative inondazioni si intensificheranno e saranno più frequenti nella maggior parte dell'Africa, Asia, Nord America ed Europa. Inoltre, si prevedono delle siccità agricole ed ecologiche più frequenti e/o gravi in alcune regioni di tutti i continenti, tranne l'Asia.
- Con un riscaldamento globale di 2°C e oltre, gli eventi siccitosi e di forte precipitazione aumenteranno e saranno più intensi rispetto a quanto succederà per un aumento di temperatura globale di 1,5 C. Si prevede che le forti precipitazioni e gli eventi alluvionali diventeranno più intensi e frequenti nelle isole del Pacifico, in molte regioni del Nord America e dell'Europa e in alcune regioni dell'Australia e dell'America centrale e meridionale. In diverse regioni dell'Africa, del Sud America e dell'Europa si prevede un aumento della frequenza e/o gravità delle siccità agricole ed ecologiche; aumenti sono previsti anche in Australia, in America centrale e del nord e nei

Caraibi. Si prevede che le precipitazioni medie aumentino in tutte le regioni polari, nel Nord Europa e nel Nord America, nella maggior parte delle regioni asiatiche e in due regioni del Sud America.

- Cambiamenti specifici in alcune regioni includono l'intensificazione dei cicloni tropicali e/o delle tempeste extratropicali, l'aumento delle inondazioni fluviali, la riduzione delle precipitazioni medie e l'aumento dell'aridità e degli incendi.
- L'innalzamento medio regionale del livello del mare continuerà per tutto il XXI secolo, eccetto in poche regioni che hanno sostanziali tassi di sollevamento geologico del terreno.
- A causa dell'innalzamento relativo del livello del mare, si prevede che entro il 2100 eventi estremi che nel recente passato si verificavano una volta ogni 100 anni si verificheranno annualmente in più della metà delle località di misurazione delle maree. L'innalzamento relativo del livello del mare contribuisce all'aumento della frequenza e della gravità delle inondazioni costiere alle quote più basse e all'erosione costiera lungo la maggior parte delle coste sabbiose.
- Le città intensificano il riscaldamento indotto dall'uomo a livello locale, e un'ulteriore urbanizzazione, insieme a temperature estreme più frequenti, aumenterà la gravità delle ondate di calore. L'urbanizzazione aumenta anche le precipitazioni medie e intense, e la conseguente intensità di deflusso. Nelle città costiere, la combinazione di eventi estremi più frequenti a livello del mare e di eventi estremi di pioggia/deflusso dei fiumi renderà più probabili le inondazioni.

Esiti del cambiamento climatico a bassa probabilità, come il collasso della calotta glaciale, bruschi cambiamenti nella circolazione oceanica, alcuni eventi estremi combinati e un riscaldamento notevolmente maggiore di quello stimato non possono essere esclusi e fanno parte della valutazione del rischio.

- Un (poco probabile) riscaldamento molto elevato porterebbe a impatti potenzialmente molto significativi, come ondate di calore più intense e più frequenti, forti precipitazioni e rischi elevati per i sistemi umani ed ecologici.
- La possibilità che si verifichino esiti del cambiamento climatico a bassa probabilità e alto impatto aumenta con livelli più alti di riscaldamento globale. Non si possono escludere cambiamenti improvvisi e superamento di punti cri-

tici del sistema climatico in risposta al riscaldamento, come un forte aumento dello scioglimento della calotta antartica e il deperimento delle foreste.

- È molto probabile che l'Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) si indebolisca nel corso del XXI secolo, in tutti gli scenari di emissione, ed è possibile un brusco collasso prima del 2100. Se tale collasso dovesse verificarsi, questo causerebbe bruschi cambiamenti nell'andamento degli eventi meteo e nel ciclo dell'acqua su scala regionale.
- Eventi naturali imprevedibili e rari, non collegati all'influenza umana sul clima, possono portare a conseguenze a bassa probabilità e alto impatto. Per esempio, una sequenza di grandi eruzioni vulcaniche esplosive nel giro di decenni si è verificata in passato, causando sostanziali perturbazioni del clima globale e regionale per diversi decenni. Tali eventi non possono essere esclusi in futuro, ma a causa della loro intrinseca imprevedibilità non sono inclusi nella serie illustrativa di scenari a cui si fa riferimento nel rapporto.

### Limitare i cambiamenti climatici futuri

*Rispetto al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5), sono migliorate le stime dei budget di carbonio rimanenti. Gli scenari futuri possibili includono anche azioni di controllo dell'inquinamento atmosferico per valutare in maniera coerente gli effetti delle varie ipotesi sulle proiezioni climatiche e sull'inquinamento atmosferico. È migliorata la capacità di determinare quando la risposta climatica alle riduzioni delle emissioni si distingue dalla variabilità naturale climatica, inclusa la variabilità interna e le risposte a fattori forzanti naturali.*

Limitare il riscaldamento globale ad un livello specifico richiede una limitazione delle emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> che raggiunga emissioni zero nette, insieme a forti riduzioni delle emissioni degli altri gas serra. Forti riduzioni delle emissioni di metano (CH<sub>4</sub>) limiterebbero anche l'effetto di riscaldamento risultante dalla diminuzione dell'inquinamento da aerosol e migliorerebbero la qualità dell'aria.

- C'è una relazione quasi lineare tra le emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> antropiche e il riscaldamento globale: ogni 1000 Gt CO<sub>2</sub> di emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> la temperatura superficiale globale aumenta di circa 0,45°C (ogni Gt equivale a

un miliardo di tonnellate). Questa quantità è indicata come la risposta transitoria del clima alle emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> (TCRE) e implica che raggiungere emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> zero nette è un requisito necessario per stabilizzare l'aumento della temperatura globale indotta dall'uomo a qualsiasi livello, ma che limitare l'aumento della temperatura globale a un livello specifico implica limitare le emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> entro un budget di carbonio<sup>[8]</sup>.

- Nel periodo 1850-2019, sono state emesse 2390 ± 240 Gt CO<sub>2</sub> di origine antropica.
- Le stime di bilancio del carbonio rimanente sono state rivalutate, e risultano simili al rapporto SR1.5 ma più grandi rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)* a causa di miglioramenti nelle metodologie adottate.
- La rimozione antropica di CO<sub>2</sub> (CDR) ha il potenziale di rimuovere la CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e di immagazzinarla in modo duraturo nei serbatoi. La CDR mira a compensare le emissioni residue per raggiungere emissioni zero nette di CO<sub>2</sub> o GHG. I metodi di CDR possono avere effetti potenzialmente ad ampio raggio sui cicli biogeochimici e sul clima, e possono avere effetti sulla disponibilità e la qualità dell'acqua, la produzione alimentare e la biodiversità.
- Se la rimozione antropica di CO<sub>2</sub> (CDR) portasse a emissioni globali nette negative, si abbasserebbe la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> e si invertirebbe l'acidificazione superficiale degli oceani. Le rimozioni ed emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> sarebbero parzialmente compensate rispettivamente dal rilascio e dall'assorbimento di CO<sub>2</sub> da e verso i bacini di carbonio terrestri e oceanici.
- Se si raggiungessero e mantenessero emissioni globali nette negative di CO<sub>2</sub>, l'aumento globale della temperatura superficiale indotto dalla CO<sub>2</sub> sarebbe gradualmente invertito, ma altri cambiamenti climatici continuerebbero nella loro direzione attuale per decenni/ millenni. Per esempio, ci vorrebbero diversi secoli/millenni

[8] *Il termine budget di carbonio si riferisce alla quantità massima di emissioni globali nette cumulative di CO<sub>2</sub> antropogenica che risulterebbe nella limitazione del riscaldamento globale a un dato livello con una data probabilità, tenendo conto dell'effetto di altri forzanti climatici antropogenici. Le emissioni cumulative storiche di CO<sub>2</sub> determinano in larga misura il riscaldamento fino ad oggi, mentre le emissioni future sono responsabili di un ulteriore riscaldamento futuro. Il bilancio del carbonio rimanente indica quanta CO<sub>2</sub> potrebbe ancora essere emessa mantenendo il riscaldamento al di sotto di un livello di temperatura specifico.*

perché il livello medio globale del mare inverte la rotta anche con grandi emissioni nette negative di CO<sub>2</sub>.

- Cambiamenti simultanei nelle emissioni di CH<sub>4</sub>, aerosol e precursori dell'ozono, che contribuiscono anche all'inquinamento atmosferico, portano ad un riscaldamento netto della superficie globale nel breve e nel lungo periodo. Nel lungo termine, questo riscaldamento è inferiore negli scenari che assumono un controllo dell'inquinamento atmosferico combinato con forti e sostenute riduzioni delle emissioni di CH<sub>4</sub>. A causa del breve tempo di vita in atmosfera sia del CH<sub>4</sub> che degli aerosol, questi effetti sul clima si compensano parzialmente a vicenda. Le riduzioni di CH<sub>4</sub> contribuiscono anche a migliorare la qualità dell'aria riducendo l'ozono superficiale globale.

Gli scenari con emissioni di GHG bassi (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) portano in pochi anni ad effetti percepibili sulle concentrazioni di GHG e di aerosol, e sulla qualità dell'aria.

- Le riduzioni delle emissioni nel 2020 associate alle misure per ridurre la diffusione del COVID-19

hanno portato a effetti temporanei ma rilevabili sull'inquinamento atmosferico, e un temporaneo aumento del forcing radiativo totale, dovuto principalmente alle riduzioni del raffreddamento causato dagli aerosol. Le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera hanno continuato ad aumentare nel 2020, senza una diminuzione rilevabile del tasso di crescita osservato della CO<sub>2</sub>.

- Le riduzioni delle emissioni di GHG portano anche a miglioramenti nella qualità dell'aria. Tuttavia, nel breve termine (2021-2040), anche negli scenari con una forte riduzione dei GHG, questi miglioramenti non sono sufficienti a raggiungere le linee guida sulla qualità dell'aria dell'Organizzazione Mondiale della Sanità in molte regioni inquinate. Gli scenari con riduzioni mirate delle emissioni di inquinanti atmosferici portano a miglioramenti più rapidi nella qualità dell'aria rispetto alle riduzioni delle sole emissioni di GHG nei primi anni, ma a partire dal 2040, sono previsti miglioramenti maggiori negli scenari che combinano gli sforzi per ridurre sia gli inquinanti atmosferici che le emissioni di GHG.



# LE FASI OPZIONALI DI NORMALIZZAZIONE E PESATURA NELL'ANALISI DEL CICLO DI VITA: APPROCCI POSSIBILI E STATO DELL'ARTE

Giulia Cavenago\*, Lucia Rigamonti, Mario Grosso

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale

**Sommario** – Il presente articolo si pone due obiettivi: far luce sullo stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura della metodologia di analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA) e indagare l'effettiva introduzione di tali fasi negli studi LCA applicati ai rifiuti. Per fornire una panoramica aggiornata, è stata valutata la letteratura ad oggi sviluppata su normalizzazione e pesatura e, nella prima parte dell'articolo, viene fatta chiarezza sugli obiettivi di tali fasi, sulle modalità di applicazione delle stesse e sulle conseguenze che la loro introduzione comporta nella presentazione dei risultati di uno studio LCA. Secondo la norma ISO 14044, standard tecnico che fornisce requisiti e linee guida su come condurre uno studio LCA, queste due fasi non sono obbligatorie, pertanto spesso gli studi si fermano alla fase precedente, quella di caratterizzazione degli impatti. Tuttavia, da una ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative, un'iniziativa congiunta del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC), è emerso che, seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, entrambe le fasi vengano considerate rilevanti ai fini decisionali. Aggregare i risultati normalizzati e pesati, fornendo un unico punteggio indice dell'impatto ambientale complessivo del prodotto, è infatti d'aiuto per il decisore, per il quale l'interpretazione delle molteplici informazioni ambientali può risultare complessa. Per indagare dunque l'effettivo utilizzo di tali fasi, è stata condotta un'indagine sugli studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 su alcune note riviste scientifiche. Dall'analisi è emerso che nell'80% dei casi almeno una delle due fasi è applicata. L'approccio di normalizzazione principalmente usato per riportare i diversi impatti sulla stessa scala di misura e procedere con la fase di pesatura è quello esterno, mentre gli approcci di pesatura più spesso adottati sono quelli binari (*footprint* o *pesi uguali*).

**Parole chiave:** normalizzazione, pesatura, Life Cycle Assessment, aggregazione, rifiuti.

## NORMALISATION AND WEIGHTING IN THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY: POSSIBLE APPROACHES AND STATE OF THE ART

**Abstract** – This article fits into the landscape of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which aims to evaluate the environmental impact of a product, a production process, a service, or an organisation. In the case of a product, its entire life cycle is taken into account; in the case of a process or service, all the phases that com-

pose it, therefore all the input and output flows of materials and energy, are considered. Eventually, in the case of an organisation, its environmental footprint is quantified by taking into account all the flows associated with its activities from a supply-chain perspective. The LCA methodology considers the impact of the system under analysis on different environmental effects such as climate change, acidification, marine eutrophication, human toxicity, photochemical ozone formation, land water and resources use. These effects are called impact categories and they are measured through dedicated indicators. An LCA study consists of four iterative phases: the goal and scope definition phase, the inventory analysis phase (LCI phase), the impact assessment phase (LCIA phase), and the interpretation phase. According to ISO 14044, the technical standard which provides requirements and guidelines on how to conduct an LCA study, the LCIA phase includes some mandatory elements, such as the classification and characterisation steps, and some optional elements, namely normalisation, grouping, and weighting. The first objective of this article is to provide an overview of normalisation and weighting phases, while grouping, which consists of sorting and possibly ranking of the normalised impacts related to different categories, is not discussed in this article; the second objective of this article is to investigate the actual use of normalisation and weighting in LCA studies applied to wastes. In order to provide an up-to-date overview, the literature developed until now on normalisation and weighting has been evaluated. In the first part of the article, it has been clarified the objective of these phases, how they can be applied, and which are the advantages and drawbacks of their application on the LCA results. As described in the technical standard ISO 14044, normalisation is the calculation of the magnitude of the category indicator results relative to a system taken as a reference. The impact of the system takes the name of the normalisation factor, and one normalisation factor is calculated for each impact category. Therefore, normalisation might help to state the relevance of the impacts by comparing the product of the study with something that the reader can more easily imagine, it might help the analyst to check for inconsistencies among the results and it might help to scale the results related to different impact categories to a common unit of measurement, thus making possible their aggregation into a single final score. The weighting phase, on the other hand, allows the analysts to assign a weight, which is a numerical factor based on value-choices, to each impact category making then possible to aggregate the normalised and weighted results to obtain a final score that indicates the environmental impact of the product. Since normalisation and weighting are not mandatory, many studies do not include them and they stop at the previous step, i.e., the characterisation. However, a research

\* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano MI – +39 3341472168, E-mail: giulia.cavenago@live.it.



conducted in 2015 within the context of the Life Cycle Initiative, a joint initiative of the United Nations Environment Program (UNEP) and the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), showed that, although it is considered complicated and still not very robust to use them, both these phases are considered relevant for decision-making purposes. The aggregation of the normalised and weighted results, in order to provide a single score of the overall environmental impact of a product, is indeed helpful for the decision-maker for whom the interpretation of the multiple environmental information can be complex. Therefore, to investigate the current use of these optional phases, a survey has been conducted on LCA studies applied to wastes and published in the biennium 2019-2020 in the scientific journals "Waste Management" and "Resources, Conservation and Recycling". The analysis showed that in 80% of the cases at least one of the two phases is applied. Moreover, the normalisation approach mainly used to bring the different impacts on the same scale and proceed with the weighting phase is the external one, while the most often adopted weighting approaches are the binary ones (*footprint or equal weights*).

**Keywords:** normalisation, weighting, Life Cycle Assessment, aggregation, waste.

Ricevuto il 7-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 31-5-2021. Correzioni richieste il 29-6-2021. Accettazione il 6-7-2021.

## 1. INTRODUZIONE

La metodologia LCA (Life Cycle Assessment) si pone l'obiettivo di quantificare l'impronta ambientale di un prodotto, di un processo produttivo, di un servizio o di un'organizzazione. Nel caso di un prodotto si tiene conto del suo intero ciclo di vita, nel caso di un processo o servizio si considerano tutte le fasi che lo compongono e quindi tutti i flussi (di materia o energia) in ingresso e uscita e, nel caso di un'organizzazione, se ne quantifica l'impronta ambientale tenendo conto di tutti i flussi associati alle sue attività dal punto di vista della catena di approvvigionamento. A volte, di fronte ad alcune scelte d'acquisto, il consumatore finale, propenso per le opzioni più sostenibili, non riesce a operare in piena consapevolezza per carenza di strumenti a sua disposizione. Per esempio, di fronte alla scelta tra uno spazzolino in bambù e uno in plastica, data l'enorme quantità di plastica visibile oggi negli oceani, il consumatore potrebbe optare per quello in bambù in quanto potenzialmente biodegradabile e compostabile a fine vita, al contrario di quello in plastica. Tuttavia, per un'analisi completa, bisognerebbe tenere conto anche di altri fattori, come l'impronta idrica ed energetica dei due prodotti, o la distanza tra il luogo di produzione delle materie prime e quello di acquisto del bene. La metodologia LCA valuta l'impronta ambientale di un pro-

dotto guardando al suo intero ciclo di vita, considerando tutte le fasi: l'estrazione delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, l'uso e il fine vita. Uno degli obiettivi della metodologia è proprio quello di analizzare, e dunque cercare di evitare, il cosiddetto *spostamento dei carichi* da una fase all'altra o da un comparto ambientale all'altro.

L'ambiente infatti è un sistema complesso, perciò valutare l'impronta ambientale di un prodotto significa guardare gli effetti che quel prodotto ha sull'aria, sull'acqua, sul suolo e anche sull'uomo stesso. Per questo l'impronta ambientale di un prodotto calcolata tramite metodologia LCA viene descritta da molteplici categorie di impatto, che rappresentano gli effetti ambientali considerati, misurati tramite degli indicatori dedicati. Per fare alcuni esempi di categorie di impatto si possono citare il cambiamento climatico, la formazione di particolato atmosferico, la tossicità umana e sugli ecosistemi e il consumo di risorse idriche e fossili.

La metodologia LCA, che può essere applicata a studi di tipo comparativo o meno, può rispondere pertanto alla domanda: tra lo spazzolino in plastica e quello in bambù quale impatta di più sul fenomeno del cambiamento climatico? Quale dei due contribuisce di più alla tossicità umana? E così via. Tuttavia, per il decisore finale, ovvero un consumatore che deve indirizzare le sue scelte d'acquisto o un imprenditore che vuole limitare gli impatti causati dai propri prodotti, l'interpretazione delle molteplici informazioni fornite a livello delle categorie di impatto può risultare complessa: se un prodotto è migliore dell'altro in termini di cambiamento climatico, ma peggiore in termini di tossicità umana, cosa scegliere? E ancora, se venisse comunicato al decisore finale che il contributo al cambiamento climatico di uno spazzolino in bambù, prodotto esemplificativo di cui si vuole valutare la sostenibilità, è di 0,04 g di CO<sub>2</sub> equivalenti (Lyne et al., 2020), che cosa significherebbe questo?

All'interno della metodologia LCA sono previste delle fasi, ad oggi opzionali, che cercano di superare questi limiti rendendo i risultati maggiormente comprensibili anche ai non esperti di LCA e guidando il decisore nelle scelte finali.

La prima di tali fasi opzionali è la fase di normalizzazione, che permette di comprendere il significato dei risultati confrontandoli con riferimenti più familiari, ad esempio quantificando l'impatto sul cambiamento climatico dello spazzolino in bambù rispetto all'impatto medio globale annuo di una persona. La fase di pesatura permette invece di attribuire un peso a ogni categoria di impatto, sulla

base di determinati criteri, per arrivare a un punteggio finale indice dell'impatto ambientale dei prodotti: ad esempio, ritornando allo spazzolino, si può scegliere con opportuna giustificazione di dare più peso alla categoria di impatto del cambiamento climatico rispetto a quella di tossicità umana o viceversa. Il presente articolo si pone due obiettivi: far luce sullo stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura e indagare l'effettiva introduzione di tali fasi negli studi LCA applicati ai rifiuti. Il primo obiettivo viene raggiunto facendo chiarezza sulle modalità di applicazione delle due fasi e sulle conseguenze che la loro introduzione comporta nella presentazione dei risultati di uno studio LCA. Il secondo obiettivo viene invece perseguito tramite un'indagine effettuata sugli studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 sulle riviste scientifiche "Waste Management" e "Resources, Conservation and Recycling".

## 2. MATERIALI E METODI

Dopo una breve introduzione alle diverse fasi della LCA presentata nel paragrafo 3, i paragrafi 4 e 5 si focalizzano rispettivamente sulle fasi di normalizzazione e pesatura, spiegandone gli scopi, gli approcci possibili, i vantaggi e gli svantaggi. L'analisi di queste due fasi è stata fatta valutando la letteratura ad oggi sviluppata sul tema e le discussioni emerse al 72esimo Swiss Discussion Forum sulla LCA tenutosi a Zurigo nel settembre 2019 e focalizzato su normalizzazione e pesatura (Roesch et al., 2020). I due principali articoli di review di riferimento, presenti nella letteratura in lingua inglese, sono Pizzol et al. (2017) e Roesch et al. (2020). Nel paragrafo 6 vengono riportati i fattori di normalizzazione e il set di pesi usati nel contesto della Product Environmental Footprint (PEF), ovvero la metodologia LCA sviluppata dal Joint Research Center (JRC) della Commissione Europea e proposta come metodologia comune per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti. Si è deciso nello specifico di riportare tali fattori, poiché proposti dalla Commissione Europea al fine di condurre studi LCA utilizzando una metodologia comune per la valutazione dell'impronta ambientale dei prodotti e rendendo quindi i risultati comparabili, guidando il decisore nelle scelte in maniera affidabile. Nei risultati di una ricerca condotta nel 2015 (Pizzol et al., 2017) nel contesto della Life Cycle Initiative (iniziativa congiunta del Programma del-

le Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC)), emerge che seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, le fasi di normalizzazione e pesatura vengono considerate rilevanti ai fini decisionali. Pertanto, a partire da questi risultati, si è deciso di indagare l'effettivo utilizzo di tali fasi opzionali in studi LCA applicati ai rifiuti. Tale indagine, descritta nel paragrafo 7, è stata condotta considerando studi LCA applicati ai rifiuti e pubblicati nel biennio 2019-2020 sulle riviste scientifiche "Waste Management" e "Resources, Conservation and Recycling". Le due riviste scelte si classificano nelle prime dieci posizioni per *impact factor* relativo all'anno 2020 tra le riviste dell'ambito "Environmental Science – Waste Management and Disposal". I risultati vengono presentati indicando, tramite grafici a torta e istogrammi, le percentuali di studi che utilizzano le fasi di normalizzazione e pesatura e le tipologie di approcci adottati. Seguono nei paragrafi 8 e 9 una discussione sui risultati e le conclusioni della review ponendo anche uno sguardo critico all'utilizzo dell'approccio di normalizzazione esterno, per lo scopo di scalare e aggregare gli impatti in punteggi confrontabili in LCA comparative.

## 3. LIFE CYCLE ASSESSMENT – FASI OBBLIGATORIE E OPZIONALI

Una definizione della metodologia LCA, proposta nel 1993 dalla *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, suggerisce che «La Life Cycle Assessment sia uno strumento che permette di valutare gli impatti ambientali associati al ciclo di vita di un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti».

Uno studio di tipo LCA si compone di quattro fasi iterative. Nella prima vengono definiti gli obiettivi dello studio e viene individuato il campo di applicazione; nella seconda si svolge un inventario di tutti i flussi che dal sistema ambiente entrano nel sistema prodotto e viceversa. Il sistema ambiente è la fonte di materie prime e il ricevitore degli output del sistema prodotto, il quale invece è composto da tutte le operazioni atte a produrre un bene.

Nella terza fase i dati raccolti vengono elaborati e usati per valutare i potenziali impatti del prodotto sui diversi effetti ambientali considerati, ovvero le

categorie di impatto. Ad esempio, si può valutare l'impatto del prodotto in termini di consumo delle risorse idriche, tramite l'indicatore che misura questo effetto, ovvero il potenziale di privazione, espresso in metri cubi di acqua equivalenti, e si può valutare l'impatto del prodotto in termini di potenziale contributo al cambiamento climatico, tramite l'indicatore dedicato che è l'incremento della forzante radiativa infrarossa, la cui unità di misura sono i kg di CO<sub>2</sub> equivalenti. La terza fase si compone a sua volta di quattro principali sottofasi: classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e pesatura. Nella prima sottofase i dati di inventario vengono classificati in modo da capire su quali categorie di impatto abbiano un'influenza, ad esempio le emissioni di CO<sub>2</sub> verranno classificate anche nella categoria cambiamento climatico. Nella seconda sottofase i dati di inventario vengono caratterizzati tramite dei fattori predefiniti che permettono di esprimere tutti i dati classificati nella stessa categoria nell'unità di misura dell'indicatore scelto: ad esempio il fattore di caratterizzazione del metano pari a 28 kgCO<sub>2</sub>eq (IPCC, 2013) dice che l'impatto di 1 kg di metano equivale a quello di 28 kg di CO<sub>2</sub> se si utilizza 100 anni come orizzonte temporale. Le due successive sottofasi, normalizzazione e pesatura, che vengono ampiamente descritte nei paragrafi successivi, sono indicate dalla ISO 14044 come opzionali e scarse linee guida sono fornite circa il loro utilizzo, pertanto spesso gli studi si fermano alla fase della caratterizzazione. Tuttavia, da una ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative, un'iniziativa congiunta del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e della Società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC), è emerso, come si legge in Pizzol et al. (2017), che, seppur ritenuto complicato e ancora poco robusto utilizzarle, entrambe le fasi vengono considerate rilevanti ai fini decisionali; aggregare i risultati normalizzati e pesati, fornendo un unico punteggio indice dell'impatto ambientale complessivo del prodotto, è infatti d'aiuto per il decisore, per il quale l'interpretazione delle molteplici informazioni può risultare complessa. Si è in attesa di un nuovo standard tecnico (ISO/WD TS 14074), per ora in definizione, che, in aggiunta ai contenuti delle ISO 14040 e 14044, dovrebbe fornire utili linee guida sull'applicazione di normalizzazione e pesatura. In particolare, questo nuovo standard, che conterrà anche nuove procedure e indicazioni sulla fase di interpretazione dei risultati, si pone l'obiettivo di trattare,

in maniera più esaustiva, l'uso di queste fasi in studi LCA, le limitazioni connesse alla loro introduzione, la scelta e la costruzione di fattori di pesatura e la generazione di punteggi ambientali finali. Per completezza, è bene specificare che nello standard ISO 14044 viene citata una terza sottofase opzionale inclusa nella fase di valutazione degli impatti, chiamata raggruppamento. Questa fase, ove applicata, permette all'analista di raggruppare alcune categorie di impatto secondo determinati criteri. Una procedura possibile (*sorting*) è quella di ordinare le categorie sulla base della loro appartenenza a una specifica area di protezione (ad esempio salute umana, ambiente naturale e consumo di risorse) o sulla base del loro impatto a livello spaziale (globale, regionale, locale). Un'altra procedura (*ranking*) è invece quella di stabilire delle classifiche delle categorie sulla base di criteri come la reversibilità degli impatti o il loro grado di certezza. Questa fase, che si basa spesso su scelte di tipo qualitativo, usando criteri soggettivi, non è però oggetto di discussione del presente articolo. Tuttavia, ulteriori approfondimenti potranno essere fatti negli sviluppi futuri di questo lavoro di ricerca, attendendo anche eventuali maggiori indicazioni sul suo utilizzo nello standard tecnico ISO/WD TS 14074.

Infine, la quarta fase di cui si compone uno studio LCA è quella dell'interpretazione dei risultati, che può comprendere un'analisi di sensibilità e incertezza dei dati e dei risultati, portando eventualmente l'analista a ritornare iterativamente sulle fasi precedenti.

#### 4. LA FASE DI NORMALIZZAZIONE

Come descritto nello standard ISO 14044, la normalizzazione serve per quantificare l'impatto relativo di un oggetto rispetto a quello di un sistema preso come riferimento. L'impatto di quest'ultimo prende il nome di fattore di normalizzazione e ne viene calcolato uno per ogni categoria di impatto. La normalizzazione è quindi utile perché permette di:

- indicare la rilevanza degli impatti confrontando l'oggetto studiato con qualcosa che l'esecutore e il lettore dello studio LCA possano immaginare più facilmente, fornendo così una chiave di lettura più semplice (quanto sono rilevanti gli 0,04 g di CO<sub>2</sub> equivalenti dello spazzolino in bambù rispetto al contributo medio annuo di una persona sul potenziale di riscaldamento globale?);

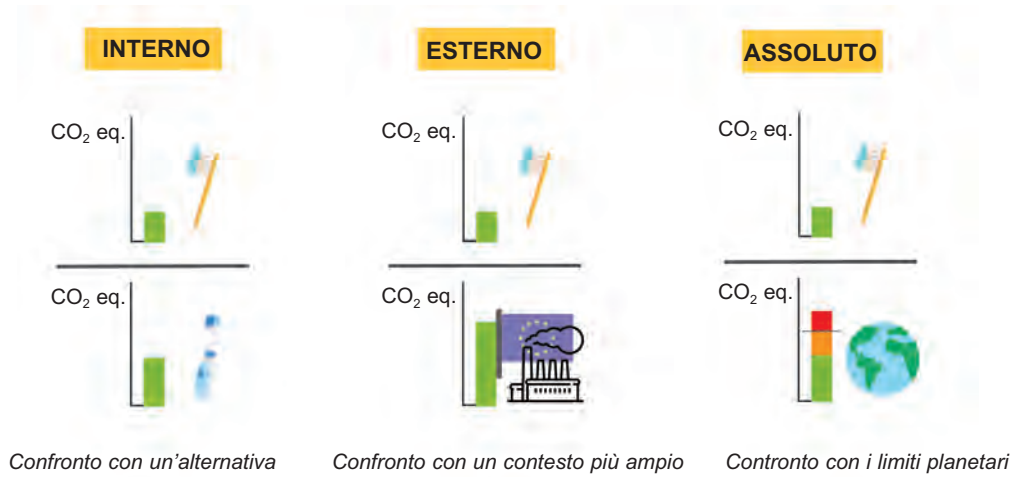


Figura 1 – Approcci di normalizzazione applicati all'esempio di uno spazzolino in bambù per la categoria di impatto cambiamento climatico. Nel caso interno il sistema di riferimento scelto è uno spazzolino elettrico, nel caso esterno il sistema di riferimento è il cittadino medio dell'Unione europea e nel caso assoluto il sistema di riferimento sono i limiti planetari. NOTA: l'immagine è ispirata alla presentazione di Arnaud Hélias tenutasi al 72esimo Swiss Discussion Forum sulla LCA a Zurigo nel settembre 2019, per le icone si attribuiscono i crediti a [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com)

- verificare la plausibilità dei risultati ottenuti (se il sistema di riferimento sono i consumi nel mondo e il prodotto studiato è una maglietta di cotone, se si ottiene un impatto relativo del 50% si sono probabilmente commessi degli errori);
- esprimere gli impatti relativi alle diverse categorie di impatto secondo unità di misura comparabili, rendendo così possibile il loro confronto e anche la loro eventuale aggregazione in un unico punteggio finale.

Ad oggi, nella letteratura scientifica, si trovano molteplici approcci usati per implementare la fase di normalizzazione, come riportato in Pizzol et al. (2017). Nel presente articolo è fornita una breve descrizione dei tre principali approcci di normalizzazione, ossia interno, esterno ed assoluto, che sono riassunti nella Figura 1.

Nell'approccio interno, applicabile ai solo studi di tipo comparativo e spesso usato inconsciamente, il sistema di riferimento è una delle alternative analizzate oppure una sua funzione. Per esempio, si può scegliere un'unica alternativa come riferimento ed esprimere gli impatti delle altre rispetto ad essa (*division by baseline*), si può scegliere per ogni categoria di impatto un riferimento diverso identificato nell'alternativa con impatto maggiore (*division by maximum*) oppure ancora si può usare come riferimento la somma degli impatti di tutte le alternative (*division by sum*). Il vantaggio della normalizzazione interna è che viene fatta a partire dai soli dati già a disposizione dello studio poiché il sistema di riferimento è uno dei prodotti studiati o una funzione degli stessi. In Figura 1, viene

mostrato un esempio pratico di normalizzazione interna, che permette di confrontare gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale con gli impatti di uno spazzolino elettrico: la normalizzazione può essere applicata per tutte le categorie di impatto, e nel caso in figura essa è applicata per la categoria di impatto cambiamento climatico. Applicando la fase di normalizzazione, gli impatti normalizzati relativi alle diverse categorie di impatto sono così riportati sulla stessa scala (adimensionali) e potrebbero essere aggregati per fornire un punteggio complessivo dell'impatto ambientale dei prodotti. Tuttavia, come si legge in Norris (2001), vi sono degli aspetti negativi nell'aggregazione tramite pesi degli impatti normalizzati secondo approccio interno, in quanto i pesi, solitamente determinati a livello generico e quindi indipendenti dallo studio analizzato, possono risultare incongruenti con la normalizzazione interna, che è invece specifica per lo studio. Si ricorda poi che vi sono altri approcci considerati appartenenti al gruppo della normalizzazione interna, come quello di *outranking*, che fa parte dei metodi di analisi decisionale multicriterio (MCDA), che non sono oggetto di questo articolo, ma ai quali si accenna nelle conclusioni.

Nell'approccio di normalizzazione esterna i risultati ottenuti (di uno studio comparativo o meno) vengono invece confrontati con quelli di un sistema di riferimento più ampio, come ad esempio la totalità dei carichi ambientali annui di un Paese o di una regione dovuti alle sue attività di consumo o produzione. Pertanto, i fattori di normalizzazio-

ne sopra citati sono ottenuti a partire da dati esterni allo studio, la robustezza dei quali sarà quindi rilevante.

Con questo approccio, per calcolare i fattori di normalizzazione viene eseguita a sua volta un'analisi LCA sul sistema di riferimento. Ciò si traduce nelle seguenti operazioni:

- vengono scelte le categorie d'impatto per le quali definire i fattori di normalizzazione e i rispettivi modelli di caratterizzazione, ad esempio viene scelta la categoria cambiamento climatico usando il modello proposto dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel 2013 (IPCC, 2013);
- vengono raccolti i dati di inventario preferendo fonti statistiche ufficiali (come Eurostat o FAO) in quanto ampiamente documentate e sottoposte a revisioni periodiche di qualità;
- viene eseguita la fase di classificazione;
- viene fatta la caratterizzazione dei flussi elementari con i fattori di caratterizzazione definiti dai modelli adottati.

A questo punto gli impatti ambientali del sistema di riferimento rappresentano i fattori di normalizzazione, che spesso sono espressi in persone equivalenti dopo essere quindi stati divisi per il numero di abitanti del Paese o regione presi come sistema di riferimento. Nell'esempio in Figura 1, gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale vengono confrontati con gli impatti ambientali medi di un cittadino dell'Unione europea. A ogni fattore di normalizzazione ottenuto può essere associato poi un indice di robustezza che tiene conto della quantità e della qualità dei dati di inventario raccolti e inclusi nell'analisi e della solidità dei metodi di caratterizzazione scelti per le varie categorie di impatto.

Infine, l'approccio di tipo assoluto prevede di confrontare gli impatti del prodotto studiato con i limiti planetari, tenendo quindi presente la capacità di sopportazione del pianeta. Questo approccio presenta una grande utilità nel processo decisionale per la definizione degli obiettivi sociopolitici, ma porta anche numerose difficoltà nella determinazione e quantificazione dei limiti planetari (Sala et al., 2016, 2020). Nell'esempio in Figura 1, gli impatti ambientali di uno spazzolino da denti tradizionale vengono confrontati con i limiti planetari. Tra gli svantaggi legati all'uso della normalizzazione con approccio esterno o assoluto, si trovano le incertezze che si accumulano a causa dell'introduzione nello studio di dati esterni e delle scelte metodologiche fatte per la definizione dei fattori

di normalizzazione, come ad esempio quella di includere o meno, nel sistema di riferimento, i carichi dovuti alle attività di importazione ed esportazione di un Paese.

Tra le principali raccomandazioni che vengono fatte nel caso di utilizzo di questa fase, citate anche dallo standard ISO 14044, si trova quella di condurre un'analisi di incertezza e sensibilità rispetto ai dati utilizzati, come viene fatto ad esempio da Benini et al. (2016), per valutare la robustezza dei risultati finali rispetto alle diverse assunzioni e scelte metodologiche fatte per definire i fattori di normalizzazione.

Inoltre, per comparare i risultati ottenuti, viene consigliato di testare diversi sistemi di riferimento e di scegliere questi ultimi in modo coerente con il proprio studio. Ad esempio, se come sistema di riferimento per normalizzare gli impatti di un prodotto fabbricato in India e importato in Italia si scegliesse di usare le attività produttive all'interno dell'Unione europea, escludendo le importazioni, si rischierebbe di sovrastimare l'impatto normalizzato.

## 5. LA FASE DI PESATURA

La fase di pesatura consiste nello stabilire l'importanza relativa di ogni categoria d'impatto rispetto alle altre: ad ogni categoria viene associato un peso, ad esempio il 30% al cambiamento climatico e il rimanente 70% distribuito equamente tra le rimanenti categorie di impatto. In generale gli impatti pesati possono essere precedentemente normalizzati oppure no, con il vincolo che per poter sommare gli impatti pesati e ottenere un unico punteggio è necessario che questi siano espressi nella stessa unità di misura.

Questa fase, inevitabilmente condizionata da scelte non esclusivamente con base scientifica, permette la risoluzione di alcuni compromessi, come ad esempio la preferenza tra un'alternativa con impatto maggiore sull'eutrofizzazione marina, ma minore sul cambiamento climatico e un'altra con situazione ribaltata. La pesatura guida quindi il decisore nelle scelte tramite l'aggregazione dei risultati normalizzati e pesati in un unico punteggio, in modo da dare il giusto peso ai diversi impatti secondo il criterio adottato.

L'aggregazione di più risultati è in generale uno strumento utile per fornire una sintesi dell'impatto multidimensionale di un sistema; nel caso della LCA le multi dimensioni sono rappresentate dalle categorie d'impatto, che vengono aggregate tramite somma pesata lineare degli impatti normalizza-

ti, come riportato nell'equazione 1, dove  $i$  rappresenta l'indice progressivo delle categorie di impatto,  $n$  il numero delle categorie di impatto considerate,  $IC_i$  l'impatto caratterizzato,  $IC_i/FN_i$  l'impatto normalizzato attraverso il fattore di normalizzazione  $FN_i$  (ottenuto quasi sempre con approccio esterno) e  $P_i$  il relativo peso.

$$Punteggio = \sum_{i=1}^n \frac{IC_i}{FN_i} * P_i \quad (\text{eq. 1})$$

Per la definizione dei pesi si possono usare diversi approcci. In questo articolo si citano i più comuni usati fino ad oggi, ovvero:

- il gruppo degli approcci binari (*footprint* o *pesi uguali*);
- l'approccio *distance to target*;
- l'approccio *panel-based*;
- il gruppo degli approcci monetari.

Tra gli approcci binari, finora i più usati, troviamo l'approccio *footprint* e l'approccio *pesi uguali*. Il primo consiste nel concentrare tutto il peso su un'unica categoria d'impatto trascurando le altre; ciò avviene ad esempio con il calcolo della *carbon footprint* di un prodotto (CFP), approccio descritto nel dettaglio nella norma tecnica di riferimento (ISO 14067), che quantifica tutte le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento finale del prodotto. Nel secondo approccio di tipo binario, chiamato *pesi uguali*, tutte le categorie sono poste invece sullo stesso piano di importanza, e quindi ad ognuna di esse è associato lo stesso peso. Il primo approccio porta con sé un limite, ovvero quello di rischiare di commettere uno degli errori che l'analisi LCA vuole evitare, ovvero lo spostamento dei carichi. La critica fatta invece al secondo è quella di non dare la giusta importanza agli aspetti più urgenti.

Nell'approccio *distance to target* (Castellani et al., 2016; Muhl et al., 2020), i pesi dati alle diverse categorie di impatto sono calcolati in base alla vicinanza degli attuali impatti di un sistema di riferimento agli obiettivi sociopolitici che sono stati posti per quel sistema di riferimento rispetto a quella data categoria. Per esempio, se ad oggi gli impatti del sistema di riferimento Unione europea relativi alla categoria del cambiamento climatico si discostano di molto dagli obiettivi prefissati per un dato anno, il peso attribuito alla categoria del cambiamento climatico dovrà essere elevato. Il vantaggio di questo approccio è che, in quanto basato su target sociopolitici, dovrebbe essere il frutto del consenso della maggioranza, tuttavia il rischio è

che vengano trascurate quelle categorie di impatto per le quali ad oggi non esistono obiettivi ambiziosi. Talvolta nell'approccio *distance to target* viene incluso anche lo scostamento degli attuali impatti di un sistema di riferimento rispetto alla capacità di sopportazione planetaria, creando così un confine molto sottile tra l'approccio di normalizzazione assoluto e l'approccio di pesatura di tipo *distance to target* dove i target sono appunto i limiti planetari. Di questo sottile confine se ne è discusso in parte anche nel 72esimo Swiss Discussion Forum on LCA tenutosi a Zurigo nel settembre 2019 (Roesch et al., 2020).

Passando all'approccio di tipo *panel-based*, come suggerisce il nome stesso, i pesi sono calcolati a partire dalle preferenze di un gruppo di persone rispetto alle diverse categorie di impatto, preferenze che vengono solitamente raccolte tramite un questionario. Il gruppo di persone interrogate può essere di varia natura, da comuni cittadini a esperti di LCA. La forte dipendenza dei pesi dalla composizione del *panel*, che rappresenta il punto di vista di un sottoinsieme della società, e dalla tipologia di questionario, in quanto non è previsto uno standard preciso, costano a questo approccio una critica di eccessiva soggettività.

Ci sono infine altri approcci, tra cui quelli monetari, nei quali i pesi, espressi nell'unità di misura della moneta corrente, sono definiti per esempio sulla base del danno economico conseguente al danno ambientale, oppure sulla quantificazione dei costi necessari a prevenire il danno stesso o ancora sulla base di quanto la popolazione è pronta a spendere per ridurre gli impatti. Non è scopo di questo articolo approfondire gli approcci monetari, che sono invece ampiamente descritti in altri lavori di letteratura (Eldh et al., 2006; Arendt et al., 2020).

Nella costruzione di un set di pesi, oltre a poter combinare differenti approcci, usando quindi dei *metamodelli*, si può scegliere di tenere conto delle informazioni relative alla robustezza dei risultati che devono essere pesati. Questo permetterebbe infatti di non trascurare le incertezze di tutte le fasi precedenti, dalla caratterizzazione alla normalizzazione, in quanto come ultima fase la pesatura si trascina tutto ciò che viene scelto e assunto nelle fasi precedenti. Un esempio di questo approccio è mostrato nel paragrafo 6 nel caso del set di pesi scelto dal gruppo di lavoro della Commissione Europea. Un grande ostacolo che si presenta nell'utilizzo della pesatura è che la ISO 14044 ne vieta l'applicazione nel caso di asserzioni comparative destinate ad essere divulgate al pubblico. In questo sen-

so la comunità LCA a favore di questa fase resta in attesa della pubblicazione dello standard ISO/WD TS 14074 che, seppur prevista per il 2020 risulta ancora in fase preparatoria, sperando che suggerisca un nuovo approccio rispetto alla questione.

## 6. FATTORI DI NORMALIZZAZIONE E PESI NEL CONTESTO DELLA PRODUCT ENVIRONMENTAL FOOTPRINT (PEF)

Le aziende che vogliono porre attenzione alle prestazioni ambientali della propria organizzazione e dei propri prodotti si trovano oggi davanti ad alcuni ostacoli. Infatti, la proliferazione di marchi e certificazioni ambientali nel panorama europeo e internazionale ha introdotto confusione per le aziende sull'iter più ottimale da seguire al fine di ottenere una certificazione di sostenibilità ambientale. Alcuni marchi e certificazioni sono inoltre applicabili in un Paese e non in un altro e ciò si traduce in una somma dei costi per un'azienda che vuole commercializzare i propri prodotti in più Paesi, nonché in una barriera alla circolazione di prodotti verdi. Inoltre, l'esistenza di molti marchi e certificazioni crea diffidenza nei confronti dei consumatori che sono spesso confusi e privi di strumenti che li rendano capaci di fare scelte consapevoli. A partire da queste considerazioni, la Commissione Europea aveva emesso nel 2013 una comunicazione per la costruzione di un mercato unico dei prodotti verdi (EC, 2013a) e la raccomandazione 2013/179/UE (EC, 2013b) sull'uso di metodologie comuni, denominate PEF (Product Environmental Footprint) e OEF (Organisation Environmental Footprint), per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni: l'obiettivo è quello di utilizzare una metodologia comune per la valutazione dell'impronta ambientale dei prodotti e delle organizzazioni e rendere quindi i risultati comparabili, guidando il decisore nelle scelte. In questo senso, la normalizzazione e la pesatura sono di grande aiuto per permettere il confronto degli impatti ambientali complessivi di beni, servizi e organizzazioni.

La Commissione Europea ha deciso che negli studi svolti secondo la PEF (EC, 2013b), ovvero negli studi conformi alla metodologia comune indicata nella raccomandazione 2013/179/UE e basati su un'analisi di tipo LCA, debbano essere adottati degli specifici fattori di normalizzazione esterna. Questi fattori sono costruiti prendendo come sistema di riferimento gli impatti dell'intero pianeta fo-

tografati al 2010, dividendoli poi per il numero di abitanti per esprimere così gli impatti pro capite. La costruzione di tali fattori di normalizzazione avviene seguendo il procedimento standard descritto nel paragrafo 4 del presente articolo, e maggiori dettagli tecnici si possono trovare nei report del Joint Research Center della Commissione Europea (Benini et al., 2014; Sala et al., 2017) e nei conseguenti articoli pubblicati (Crenna et al., 2019; Sala et al., 2015). I fattori di normalizzazione secondo PEF sono in continua evoluzione e aggiornamento, la versione più aggiornata si trova sul sito della *European Platform on Life Cycle Assessment* (EPLCA, 2003). Questa piattaforma è nata in risposta alla comunicazione della Commissione Europea sulla politica integrata dei prodotti del 2003 (EC, 2003) che identificò la valutazione del ciclo di vita (LCA) come il «miglior quadro per valutare i potenziali impatti ambientali dei prodotti». Lo scopo è quindi quello di aumentare la disponibilità di dati e metodi di qualità per effettuare analisi di tipo LCA.

Per quanto riguarda invece la pesatura, i pesi ad oggi proposti dalla Commissione Europea sono il frutto di una combinazione di diversi set di pesi ottenuti con approcci differenti. Nello specifico vengono considerati quattro set. Il primo è stato ottenuto selezionando un campione di 2400 cittadini provenienti da diversi Paesi dell'Unione europea di età compresa tra i 18 e i 65 anni, e sottoponendo loro un questionario sull'importanza percepita delle diverse categorie di impatto. Il secondo set è invece stato ottenuto sottoponendo lo stesso questionario a 512 esperti di LCA. Per il terzo set sono invece stati coinvolti tecnici esperti delle diverse categorie di impatto, ai quali è stato chiesto di valutare alcune caratteristiche, come ad esempio la reversibilità e l'intensità degli impatti causati e i loro effetti in termini di diffusione spaziale e temporale, tenendo conto delle evidenze scientifiche. Il quarto set utilizzato assegna ad ogni categoria di impatto un peso che è direttamente proporzionale alla robustezza del metodo di caratterizzazione adottato per quella categoria. Maggiori dettagli sulla combinazione di questi set di pesi per ottenere quello finale si trovano in Sala et al. (2018) e, come per i fattori di normalizzazione, la versione più aggiornata dei pesi è consultabile sul sito della *European Platform on Life Cycle Assessment* (EPLCA, 2003).

I fattori di normalizzazione e i pesi aggiornati a novembre 2019, che non hanno subito modifiche pubblicate fino a marzo 2021, sono riportati nella Tabella 1.

**Tabella 1 – Fattori di normalizzazione e pesi proposti dal JRC della Commissione Europea nel metodo comune per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti (PEF) (EPLCA, 2003)**

Categoria di impatto	Fattore di normalizzazione	Peso (%)
Acidificazione	5,56E+01 mol H <sup>+</sup> eq. persona <sup>-1</sup>	6,20
Cambiamento Climatico	8,10E+03 kg CO <sub>2</sub> eq. persona <sup>-1</sup>	21,06
Ecotossicità delle acque dolci	4,27E+04 CTUe persona <sup>-1</sup>	1,92
Eutrofizzazione in acqua dolce	1,61E+00 kg P eq. persona <sup>-1</sup>	2,80
Eutrofizzazione marina	1,95E+01 kg N eq. persona <sup>-1</sup>	2,96
Eutrofizzazione terrestre	1,77E+02 mol N eq. persona <sup>-1</sup>	3,71
Tossicità umana cancerogena	1,69E-05 CTUh persona <sup>-1</sup>	2,13
Tossicità umana non cancerogena	2,30E-04 CTUh persona <sup>-1</sup>	1,84
Radiazioni ionizzanti – effetti sulla salute umana	4,22E+03kBq U-235 eq. persona <sup>-1</sup>	5,01
Uso e trasformazione del terreno	8,19E+05 pt persona <sup>-1</sup>	7,94
Assottigliamento dello strato di ozono	5,36E-02 kg CFC-11 eq. persona <sup>-1</sup>	6,31
Assunzione di materiale particolato	5,95E-04 incidenza malattie persona <sup>-1</sup>	8,96
Formazione di ozono fotochimico	4,06E+01 kg NMVOC eq. persona <sup>-1</sup>	4,78
Consumo di risorse – vettori energetici	6,50E+04 MJ persona <sup>-1</sup>	8,32
Consumo di risorse – minerali e metalli	6,36E-02 kg Sb eq. persona <sup>-1</sup>	7,55
Consumo di risorse idriche	1,15E+04 m <sup>3</sup> acqua eq. per persona <sup>-1</sup>	8,51

## 7. INDAGINE SULL'USO DELLE FASI OPZIONALI IN STUDI LCA APPLICATI AI RIFIUTI

Alla luce delle conclusioni della ricerca condotta nel 2015 nel contesto della Life Cycle Initiative (Pizzol et al., 2017), si è deciso di indagare se e come queste fasi vengano applicate in studi LCA sui rifiuti. L'indagine ha selezionato 115 studi pubblicati sulle riviste “Waste Management” e “Resources, Conservation and Recycling” relativi al biennio 2019 e 2020.

Sono stati inclusi studi che rientrano in una delle seguenti categorie:

- comparazione di diverse modalità di gestione di un rifiuto (es. smaltimento in discarica, incenerimento, riciclo...) o valutazione dei carichi ambientali legati a una singola modalità di gestione di un rifiuto senza fini comparativi;
- comparazione di diverse tecnologie disponibili per l'uso di un rifiuto come risorsa (es. syngas vs biogas) o valutazione dei carichi ambientali di una singola tecnologia per il riciclo di un rifiuto (es. tecnologia per il recupero di fibre tessili);
- comparazione di diversi prodotti tra i quali almeno uno è ottenuto a partire da un rifiuto;
- comparazione di diverse applicazioni di un rifiuto (es. comparazione del digestato da rifiuto organico come fertilizzante o trattato in un impianto di trattamento delle acque per recupero di acqua);

- confronto tra un'alternativa riusabile e l'equivalente monouso.

Dei 327 studi selezionati inizialmente poiché contenenti le parole chiave “LCA” e “waste”, solo 115 sono stati considerati nell'indagine dopo una scrematura che ha escluso studi che riguardavano considerazioni generiche sulla metodologia, suggerimenti per future analisi di tipo LCA, articoli di review, utilizzo di strumenti di valutazione della sostenibilità differenti dalla LCA o studi su prodotti diversi da rifiuti. L'elenco degli articoli selezionati, e la classificazione svolta, sono reperibili come materiale supplementare nelle tabelle MS1 e MS2. In Figura 2 (a pagina seguente) vengono mostrati i risultati dell'indagine: l'applicazione della sola fase di normalizzazione è presente in un elevato numero di studi (46) e viene spesso giustificata sottolineando l'esigenza di esprimere i risultati ottenuti con la fase di caratterizzazione in relazione a un altro sistema di riferimento, che può essere una delle alternative analizzate nello studio (normalizzazione interna, applicabile a soli studi comparativi), oppure un sistema di riferimento più ampio e concretamente immaginabile come l'impatto di un cittadino medio rispetto ai consumi e alle attività europee o mondiali (normalizzazione esterna) oppure i limiti di sopportazione planetari (normalizzazione assoluta).

In alcuni studi viene applicata la sola fase di pesatura senza essere preceduta da normalizzazione; ge-



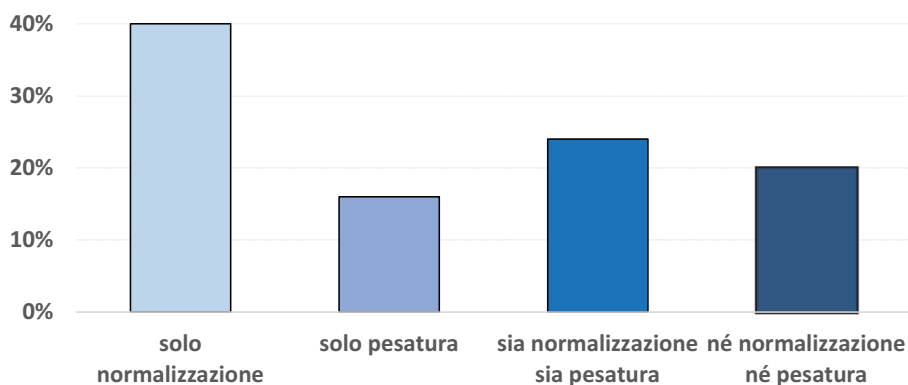


Figura 2 – Valutazione della percentuale di studi in cui viene applicata (i) solo la fase di normalizzazione (40%) (ii) solo la fase di pesatura (16%) (iii) entrambe le fasi (24%) (iv) nessuna delle due fasi (20%)

neralmente ciò accade nel caso di pesatura di tipo *footprint*. Gli studi che applicano entrambe le fasi giustificano la scelta con l'esigenza di esprimere l'impatto ambientale di un prodotto tramite un unico punteggio. Sono comunque presenti alcuni studi che si fermano alla fase di caratterizzazione senza applicare né normalizzazione né pesatura e spesso questa scelta viene giustificata solo affermando che si decidono di includere esclusivamente le fasi obbligatorie secondo lo standard ISO 14044.

Per quanto riguarda la normalizzazione, essa viene applicata in 74 studi, ovvero il 64% di quelli analizzati. Come illustrato in Figura 3, si può distinguere tra l'applicazione della fase di normalizzazione adottando un unico sistema di riferimento e l'applicazione di questa fase testandone più di uno. Infatti, lo stesso standard ISO 14044 consiglia di testare più sistemi di riferimento per capire la loro influenza sui risultati ottenuti nella fase di caratterizzazione. Nella presente indagine ciò si verifica in 16 studi. 14 di essi testano sia l'approccio interno sia quello esterno, un caso (Rosado et al., 2019) testa un sistema di riferimento esterno e quello assoluto e il

rimanente studio testa tre sistemi di riferimento: una delle alternative dello studio comparativo e due sistemi esterni, nello specifico l'insieme delle attività produttive in Europa nell'anno 2000 (Impact 2002+ methodology v.2.12, Jolliet et al., 2003) e quelle nel mondo sempre nell'anno 2000 (CML baseline methodology v.3.03, Guinée et al., 2002).

Il numero totale di normalizzazioni applicate negli studi analizzati è quindi pari a 91, avendo contato gli studi che testano più sistemi di riferimento tante volte quanti sono i sistemi di riferimenti testati (quindi 2 volte per 15 studi e 3 volte per uno studio). La Figura 4 riporta la percentuale di normalizzazioni di tipo interno, esterno o assoluto adottate. L'approccio interno viene applicato esclusivamente agli studi di tipo comparativo, con l'obiettivo di confrontare le alternative ed arricchire quindi l'interpretazione dei risultati. Soltanto in un caso (Khoo, 2019) la normalizzazione interna è invece applicata anche con l'obiettivo di riportare i diversi impatti sulla stessa scala di misura per poter procedere poi con la fase di pesatura. Nei 52 casi di normalizzazione interna applicata, sono

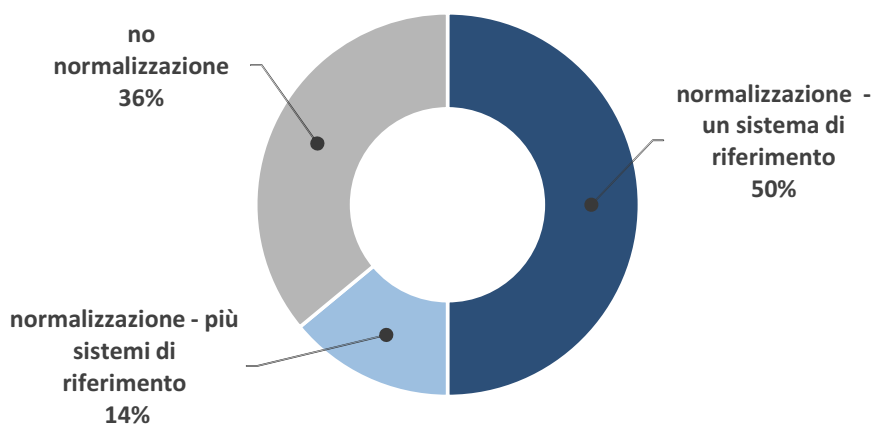


Figura 3 – Valutazione della percentuale di studi in cui (i) non viene applicata la normalizzazione, (ii) viene applicata usando un unico sistema di riferimento (iii) viene applicata testando più di un sistema di riferimento

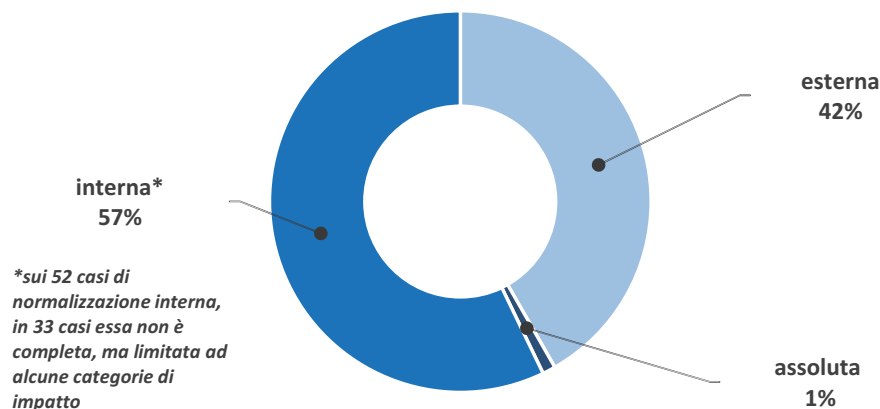


Figura 4 – Approcci di normalizzazione applicati: interna, esterna, assoluta

stati inclusi anche quelli in cui l'approccio non è applicato integralmente a tutte le categorie di impatto ma soltanto ad alcune. Per quanto riguarda gli altri approcci di normalizzazione rimanenti, è spesso preferito quello esterno, applicato scegliendo quasi sempre come sistema di riferimento l'impatto medio di un cittadino di una regione specifica, dell'Europa o del mondo. Solo in un caso (Liu et al., 2020) il sistema di riferimento usato è riconducibile ai limiti planetari.

Per quanto riguarda la pesatura, questa fase è applicata in 46 dei 115 studi analizzati, e, come si vede nella Figura 5, l'approccio maggiormente usato è quello binario di tipo *footprint*, seguito dagli approcci *pesi uguali* e *panel-based*. L'approccio *distance to target* viene applicato in un solo caso (Zhao et al., 2020) e in nessuno degli studi analizzati viene fatta una pesatura ricorrendo agli approcci monetari.

Negli studi in cui l'approccio di pesatura applicato è binario di tipo *footprint* (20%), la categoria nella quale viene concentrato tutto il peso è quasi sempre quella del cambiamento climatico, e si parla infatti di *carbon footprint*. Eccetto per un caso (Anshassi

et al., 2019), questo approccio di pesatura, non è mai preceduto da normalizzazione esterna e i ricercatori giustificano spesso il suo utilizzo con la sempre più urgente esigenza di dover diminuire la quantità di gas serra emessi. Tuttavia, negli studi nei quali questo approccio viene applicato, emerge spesso la consapevolezza del fatto che focalizzarsi su una sola categoria di impatto possa condurre allo spostamento dei carichi e infatti nelle conclusioni di tali studi viene molte volte citata la prospettiva futura di includere anche le altre categorie di impatto.

Anche per la pesatura lo standard ISO 14044 consiglia di testare diversi set di pesi esplorando tra gli approcci elencati; tuttavia, nel campione di studi analizzato ciò non si verifica mai.

## 8. DISCUSSIONE

Dall'analisi condotta sul campione di studi LCA applicati ai rifiuti è emerso che nell'80% di essi viene applicata almeno una delle due fasi di normalizzazione e pesatura (Figura 2). Come raccomandato dalla ISO 14044, i risultati a livello della caratterizzazione devono comunque essere forniti esplicitamen-

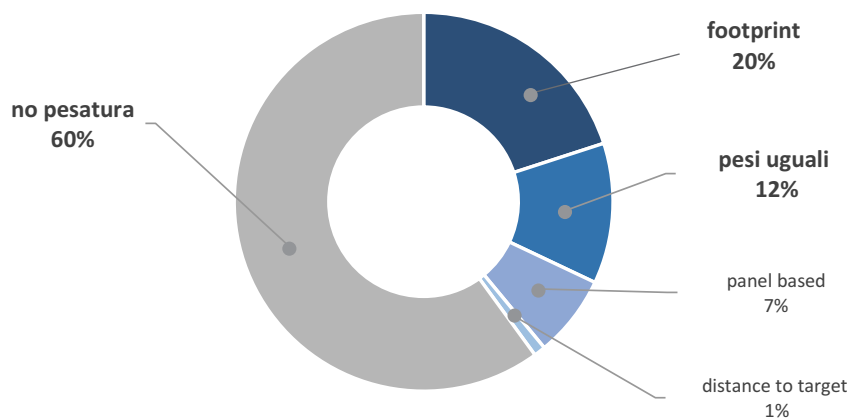


Figura 5 – Approcci di pesatura: percentuale degli studi in cui ogni approccio di pesatura è usato (*footprint*, *pesi uguali*, *panel-based*, *distance to target*) e percentuale degli studi in cui non viene usata questa fase

te, seguiti poi dagli eventuali impatti normalizzati e pesati. Questo permette al lettore di analizzare i risultati prima dell'applicazione di queste due fasi opzionali, facendo quindi le debite considerazioni. È ancora viva e attuale la discussione sul vantaggio di guidare il decisore finale nelle scelte tramite la comunicazione di un punteggio unico e lo svantaggio che, in questo modo, si possano perdere delle informazioni e fare assunzioni talvolta soggettive.

Per quanto riguarda la normalizzazione, si nota che è molto frequente l'utilizzo dell'approccio interno in studi di tipo comparativo. Per confrontare i risultati essa si rivela infatti uno strumento estremamente efficace che permette di arricchirne l'interpretazione. La normalizzazione interna però, viene raramente utilizzata come strumento preliminare a una fase di pesatura, poiché porta con sé alcune limitazioni ampiamente discusse da Norris (2001). Per questo scopo, l'approccio più usato è invece quello esterno: infatti, dei 28 studi nei quali vengono applicate sia normalizzazione che pesatura, 23 utilizzano una normalizzazione con approccio esterno al fine di riportare gli impatti sulla stessa scala e aggregarli tramite dei pesi. La scelta dei pesi, infine, viene ritenuta quella più critica in quanto può avvenire secondo criteri molto diversi tra loro; i più comuni usati fino ad oggi sono stati descritti nel paragrafo 6 di questo articolo. L'applicazione di questa fase è quindi molto delicata, ma sicuramente può, se ben motivata e correttamente esplicitata, aiutare il decisore finale ad effettuare delle scelte concrete basate su un approccio scientifico. È interessante osservare però che la scelta del metodo di aggregazione dei risultati tramite fattori di normalizzazione esterna descritto nel paragrafo 5 viene criticata da alcuni ricercatori (Rogers et al., 2009; Prado et al., 2014, 2018, 2020) poiché ritenuta incompatibile con gli obiettivi di una LCA comparativa. Viene infatti da loro sottolineato che, seppur i fattori di normalizzazione esterna (se costruiti a partire da un dataset robusto) siano ottimi per gli scopi di verifica dei risultati e loro interpretazione relativa (vedi paragrafo 4), quando usati ai fini dell'aggregazione possono condurre ad una totale compensazione dove le categorie di impatto più significative possono completamente guidare la scelta dell'alternativa migliore, mascherando le differenze degli impatti relativi alle altre categorie; in questo modo il punteggio finale è univocamente determinato da quelle categorie più impattanti, il cui primato è già noto nella fase della normalizzazione, rendendo la fase della pesatura inutilmente applicata (Prado et al., 2020).

## 9. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

L'analisi dello stato dell'arte delle fasi di normalizzazione e pesatura e l'indagine degli studi di LCA applicati ai rifiuti negli ultimi due anni ha permesso di osservare che l'applicazione di queste due fasi opzionali ha iniziato a trovare consenso nella comunità LCA. Nell'80% degli studi analizzati viene applicata almeno una delle due fasi di normalizzazione e pesatura. La normalizzazione interna è molto frequente in studi di tipo comparativo, mentre l'approccio di normalizzazione più usato come strumento preliminare a una fase di pesatura è quello esterno. La fase di pesatura è quella ritenuta più critica, in quanto può avvenire secondo criteri molto diversi tra loro, non sempre con base esclusivamente scientifica. È necessario ricordare che l'introduzione di queste due fasi in uno studio LCA porta con sé ulteriori variabili che possono rendere meno robusti i risultati finali. Tuttavia, per un consumatore che deve indirizzare le sue scelte d'acquisto, un imprenditore che vuole limitare gli impatti causati dai propri prodotti o ancora un decisore politico che deve effettuare delle scelte strategiche, le fasi di normalizzazione e pesatura possono essere di grande aiuto in quanto l'interpretazione delle molteplici informazioni fornite a livello delle categorie di impatto può risultare complessa. Normalizzazione e pesatura cercano quindi di rendere i risultati maggiormente comprensibili anche ai non esperti di LCA e di guidare il decisore nelle scelte finali. Molti analisti scelgono però oggi di fermarsi alla fase di caratterizzazione, anche perché scarse linee guida sono fornite circa l'utilizzo delle fasi opzionali. Tuttavia, specifiche linee guida dedicate a normalizzazione e pesatura dovrebbero essere introdotte con lo standard ISO/WD TS 14074; si spera che questo standard, ora in definizione, possa fare chiarezza, veicolando e incentivando l'utilizzo di queste due fasi negli studi LCA. Al fine di migliorare lo studio effettuato e irrobustire i risultati ottenuti, si potrebbe in futuro allargare l'indagine ad altre riviste scientifiche e ad altre tipologie di prodotti diversi dai rifiuti: questo potrebbe aiutare a capire se i risultati della ricerca sono generalizzabili anche ad altri contesti. Inoltre, saranno oggetto di studi futuri ulteriori indagini sugli aspetti critici della normalizzazione esterna (menzionati alla fine del paragrafo 8) e un'esplorazione più accurata dei metodi alternativi di aggregazione proposti per la LCA, come quello di *outranking*, strumento già ampiamente utilizzato nell'ambito dell'analisi decisionale multicriterio (MCDA).

## 10. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Anshassi M., Laux S., Townsend T. (2019) Approaches to integrate sustainable materials management into waste management planning and policy. *Resources, Conservation and Recycling* 148: 55-66.
- Arendt R., Bachmann T.M., Motoshita M. et al. (2020) Comparison of Different Monetisation Methods in LCA: A Review. *Sustainability* 12(24): 10493.
- Benini L., Mancini L., Sala S. et al. (2014) Normalisation method and data for Environmental Footprints. Report JRC 91531.
- Benini L. and Sala S. (2016) Uncertainty and sensitivity analysis of normalisation factors to methodological assumptions. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(2): 224-236.
- Castellani V., Benini L., Sala S. et al. (2016) A distance-to-target weighting method for Europe 2020. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(8): 1159-1169.
- Crenna E., Secchi M., Benini L. et al. (2019) Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalisation factors for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24(10): 1851-1877.
- Eldh P. and Johansson J. (2006) Weighting in LCA based on ecotaxes-development of a mid-point method and experiences from case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11(1): 81-88.
- EC (European Commission) (2003) Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-Cycle Thinking. Communication from the Commission COM (2003), 302 final.
- EC (European Commission) (2013a) Building the Single Market for Green Products. Communication from the Commission COM (2013), 196 final.
- EC (European Commission) (2013b) Commission Recommendation of 9 April 2013 on the Use of Common Methods to Measure and Communicate the Life Cycle Environmental Performance of Products and Organisations 2013/179. EU, Brussels.
- EPLCA (European Platform on Life Cycle Assessment) (2003) Developer Environmental Footprint (EF). Disponibile su: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- Guinée J.B. and Lindeijer E (2002) Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Vol. 7., Springer Science & Business Media.
- IPCC, Myhre G., Shindell D., Bréon F. et al. (2013) Chapter 8: "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing". *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: 659-740.
- ISO 14040 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- ISO 14044 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- ISO/WD TS 14074 (under development) Environmental management – Life cycle assessment – Principles, requirements and guidelines for normalisation, weighting and interpretation.
- ISO 14067 (2018) Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.
- Jolliet O., Margni M., Charles R. et al. (2003) IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *The international journal of life cycle assessment* 8(6): 324-330.
- Khoo H.H. (2019) LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, 145: 67-77.
- Liu G., Agostinho F., Duan H. et al. (2020) Environmental impacts characterisation of packaging waste generated by urban food delivery services. A big-data analysis in Jing-Jin-Ji region (China). *Waste Management*, 117: 157-169.
- Lyne A., Ashley P., Saget S. et al. (2020) Combining evidence-based healthcare with environmental sustainability: using the toothbrush as a model. *British Dental Journal* 229(5): 303-309.
- Muhl M., Berger M. and Finkbeiner M. (2020) Distance-to-target weighting in LCA – A matter of perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26(1): 114-126.
- Norris G.A. (2001) The requirement for congruence in normalisation. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 6(2): 85-88.
- Pizzol M., Laurent A., Sala S. et al. (2017) Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22(6): 853-866.
- Prado-Lopez V., Seager T.P., Chester M. et al. (2014) Stochastic multi-attribute analysis (SMAA) as an interpretation method for comparative life-cycle assessment (LCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(2): 405-416.
- Prado V. and Heijungs R. (2018) Implementation of stochastic multi attribute analysis (SMAA) in comparative environmental assessments. *Environmental Modelling & Software* 109: 223-231.
- Prado V., Cinelli M., Ter Haar S.F. et al. (2020) Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25: 2393-2406.
- Roesch A., Sala S. and Jungbluth N. (2020) Normalisation and weighting: the open challenge in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25(9): 1859-1865.
- Rogers K. and Seager T.P. (2009) Environmental decision-making using life cycle impact assessment and stochastic multiattribute decision analysis: a case study on alternative transportation fuels. *Environmental Science & Technology* 43: 1718-1723.
- Rosado L.P., Vitale P., Penteado C.S. et al. (2019) Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste management* 85: 477-489.
- Sala S., Benini L., Mancini L. et al. (2015) Integrated assessment of environmental impact of Europe in 2010: data sources and extrapolation strategies for calculating normalisation factors. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(11): 1568-1585.
- Sala S., Benini L., Crenna E. et al. (2016) Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA. Data sources and methodological choices for the calculation of global and consumption-based normalisation factors. Report JRC 105141.
- Sala S., Crenna E., Secchi M. et al. (2017) Global normalisation factors for the environmental footprint and life cycle assessment. Report JRC 109878.
- Sala S., Cerutti A.K. and Pant R. (2018) Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Report JRC 106545.
- Sala S., Crenna E., Secchi M. et al. (2020) Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries. *Journal of environmental management* 269: 110686.
- Zhao H.L., Liu F., Liu H.Q. et al. (2020) Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China. *Waste Management* 113: 447-455.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

# LA STRATEGIA ITALIANA DI LUNGO TERMINE SULLA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA: SCENARI EMISSIVI E TREND STORICI

Emanuele Peschi<sup>1\*</sup>, Antonio Caputo<sup>1</sup>, Eleonora Di Cristofaro<sup>1</sup>, Marina Colaiezzi<sup>1</sup>,  
Monica Pantaleoni<sup>1</sup>, Marina Vitullo<sup>1</sup>, Maria Gaeta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISPRA, Dipartimento per la valutazione, i controlli e la sostenibilità ambientale, Roma.

<sup>2</sup> Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A.

**Sommario** – Nel gennaio 2021, l'allora Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, ha pubblicato la strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Il documento è il frutto della collaborazione, avviata nel 2019, tra diversi Ministeri ed è largamente fondato sugli studi ed analisi di un gruppo di lavoro tecnico cui hanno partecipato ISPRA, RSE, GSE, Politecnico di Milano, ENEA e CMCC. Ognuno dei soggetti coinvolti ha contribuito con i propri strumenti e le proprie competenze al fine di analizzare lo spettro più ampio possibile delle implicazioni di una visione strategica di tale ampiezza. Particolare importanza assume l'analisi degli andamenti attesi delle emissioni dei principali settori emissivi alla luce di quanto osservato lungo tutta la serie storica dei dati disponibili a partire dal 1990. In questo modo è possibile mettere in luce le tendenze già in atto, individuare i principali driver che guidano le emissioni e, conseguentemente, avere un'idea di quali saranno le emissioni più difficili da ridurre al fine di raggiungere la neutralità emissiva entro il 2050, obiettivo finale della strategia. Dall'analisi emerge che quelli che oggi sono i settori più emissivi, sono anche quelli per i quali spesso già sono evidenti forti riduzioni grazie alle politiche fin qui adottate e agli sviluppi tecnologici, mentre altri settori oggi di minor importanza potrebbero rivelarsi maggiormente problematici negli anni a venire. Allo stato attuale delle conoscenze risulta inoltre che per raggiungere la neutralità sarà difficile fare a meno di sistemi di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>, anche se molto dipenderà dalle capacità degli assorbimenti naturali e dall'evoluzione dell'intero sistema economico.

**Parole chiave:** emissioni, assorbimenti, serie storica, scenari, neutralità, decarbonizzazione.

## THE ITALIAN LONG-TERM STRATEGY ON REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS: THE EMISSION SCENARIOS AND OBSERVED HISTORICAL TRENDS

**Abstract** – In January 2021, the Italian Ministry of the Environment Land and Sea published the Italian Long-term Strategy on Reducing Greenhouse Gas Emissions. The document is the result of the collaboration among different Ministries, launched in 2019, and it is largely based on the studies and analyses of a technical working group composed by ISPRA, RSE, GSE, Politecnico di Milano, ENEA and CMCC. Each subject contributed with its own tools and skills in order to analyse the

broadest possible spectrum of the implications of the Strategy. The analysis of the expected emission trends is particularly important in connection with what has been observed throughout the historical time series of data available since 1990. In this way, it is possible to highlight the trends already underway, identify the main drivers of emissions and, consequently, have a better understanding on the emissions that will be the most difficult to be reduced in the future in order to reach emission neutrality by 2050, the final goal of the Italian Strategy. The analysis highlights that those sectors that are the most emissive today are also those for which strong reductions are often already happening and may also be expected in the forthcoming years thanks to the policies adopted so far (e.g. heat and electricity generation) and technological developments (e.g. transport and buildings). This does not mean that no challenges have to be expected for these sectors, but that with adequate policies supporting the deployment of technologies that are already available, there is real possibilities to neutralize the emissions. Other sectors, which today are responsible for a smaller amount of emissions, could prove to be more problematic over the years to come (e.g. industrial processes, f-gas, and agriculture), because there are intrinsic limits and no strong policies in place yet. Emission intensity of industrial processes and f-gases does not show a clear descending trend in past years and this is not supposed to change in the future, without moving towards a more circular economy and major technological advancements those emissions may not be reduced. Emissions from agriculture only account for 7% at present in Italy, but there seems to be limited room for improvements given that most of them came from biological processes of livestock. Some policies can be implemented especially with regards to animal dietary change and manure management, also considering the biogas potential production. At the current state of knowledge, it also appears that some amount of CO<sub>2</sub> capture and storage systems will be needed to achieve net-zero GHG emissions, although much will depend on the capacity of natural sinks and the evolution of the entire economic system. The Land use, Land-Use Change, and Forestry sector emissions and sinks could be heavily affected by climate change in the forthcoming years. Since this sector is going to play a critical role in the achievement of climate neutrality, it is crucial to adopt policies that can improve carbon sequestration; in order to do so, utmost efforts should be paid to limit wild fires.

**Keywords:** emissions, sinks, time-series, scenarios, neutrality.

Ricevuto il 28-6-2021. Modifiche sostanziali richieste il 2-8-2021. Accettazione il 20-9-2021.

\* Per contatti: Via Vitaliano Brancati 48, 00144 Roma. Tel. 06.50072628, e-mail: emanuele.peschi@isprambiente.it

## 1. INTRODUZIONE

Le politiche su clima ed energia stanno attraversando una fase di profonda revisione a seguito della sottoscrizione dell'Accordo di Parigi, il cui obiettivo è il contenimento dell'aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2°C, cercando di limitare l'aumento a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. L'Accordo prevede che tutte le "Parti" presentino un Contributo Determinato a livello Nazionale (*Nationally Determined Contribution*, NDC), che identifichi l'impegno di ciascuno per la riduzione delle emissioni e il raggiungimento degli obiettivi di contenimento delle temperature, e che comunichino entro il 2020 Strategie di sviluppo a basse emissioni di gas serra con orizzonte temporale al 2050. Nell'ambito dell'Accordo di Parigi, l'Unione Europea (UE) ha presentato a marzo 2015 alla Conferenza sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC) il suo primo NDC contenente una riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 40% rispetto al 1990, entro il 2030. Al fine di raggiungere tale obiettivo l'UE ha quindi adottato un pacchetto di provvedimenti, il cosiddetto "Pacchetto clima-energia 2030", volto a ottenere, oltre alla riduzione di almeno il 40% delle emissioni, il raggiungimento di una quota di energie rinnovabili sui consumi complessivi al 2030 pari ad almeno il 32% e la riduzione dei consumi di energia primaria del 32,5% rispetto all'andamento tendenziale stabilito nello scenario PRIMES 2007 (lo scenario energetico adottato dalla Commissione europea come riferimento per la valutazione delle politiche di efficienza), da conseguire attraverso l'aumento dell'efficienza energetica.

Una parte dell'obiettivo di riduzione delle emissioni è ripartito tra i settori soggetti all'Emissions Trading System (ETS), per i quali è richiesta a livello europeo una riduzione del 43% rispetto ai livelli del 2005. Per la quota rimanente, non soggetta ad ETS, è invece richiesta una riduzione complessiva del 30% rispetto ai livelli del 2005, ai sensi del Regolamento (UE) 2018/842 (noto come *Effort Sharing*) che ha stabilito specifici obiettivi di riduzione per ciascuno Stato Membro. In tale quadro va anche ricordato il Regolamento (UE) 2018/841 che definisce gli impegni per il settore *Land use, Land-Use Change, and Forestry* (LULUCF).

Per conciliare i temi della riduzione delle emissioni climalteranti con quelli della sicurezza energetica e dello sviluppo del mercato interno dell'energia, l'UE ha adottato il Regolamento (UE) 2018/1999 (di seguito Regolamento *Governance*)

che istituisce un sistema di *Governance* dell'Unione dell'Energia e mira a pianificare e tracciare le politiche e misure messe in atto dagli Stati membri. Il principale obiettivo del Regolamento *Governance* (Art. 1) consiste nell'"attuare strategie e misure volte a conseguire gli obiettivi e traguardi dell'Unione dell'energia e gli obiettivi a lungo termine dell'Unione relativi alle emissioni dei gas a effetto serra conformemente all'accordo di Parigi, e in particolare, per il primo decennio compreso tra il 2021 e il 2030, i traguardi dell'Unione per il 2030 in materia di energia e di clima".

In tale contesto l'Italia ha definito il proprio Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) (MISE, 2020), con il quale vengono stabiliti gli obiettivi nazionali al 2030 sull'efficienza energetica, sulle fonti rinnovabili e sulla riduzione delle emissioni di gas serra.

Nell'ambito del Green Deal europeo, nel settembre 2020 la Commissione ha proposto di elevare l'obiettivo di riduzione delle emissioni al 2030 ad almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990, includendo anche gli assorbimenti del settore LULUCF, nell'ottica di raggiungere la neutralità emissiva entro il 2050 come stabilito nella recente *Long Term Strategy* della Commissione Europea (2018a, 2018b). Il nuovo obiettivo al 2030 è stato riportato anche nell'aggiornamento dell'NDC inviato dall'UE all'UNFCCC nel dicembre 2020. In tale contesto si collocano anche le Strategie nazionali di decarbonizzazione al 2050 che gli Stati membri devono adottare ai sensi dell'articolo 15 del Regolamento *Governance*.

L'Italia ha adottato la propria Strategia nazionale di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra (LTS) nel gennaio 2021 (AA.VV., 2021) individuando i possibili percorsi che potrebbero consentire di raggiungere entro il 2050 una condizione di neutralità emissiva, ossia l'equilibrio tra le emissioni di gas serra e gli assorbimenti di CO<sub>2</sub>, con l'eventuale ricorso a sistemi di cattura e stoccaggio geologico o riutilizzo della stessa. Successivamente la Commissione europea, al fine di conseguire il nuovo NDC, ha presentato il pacchetto di proposte legislative noto come "*fit for 55*" che si pone l'obiettivo di riformare profondamente l'insieme di direttive e regolamenti che a tutt'oggi stabiliscono gli obiettivi in materia di ETS, ESR, LULUCF, efficienza energetica e rinnovabili per gli Stati Membri.

Sul piano operativo la Strategia italiana è stata elaborata in continuità con il PNIEC, sotto il coordinamento dei Ministeri della Transizione Ecologica (già dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e

del Mare), dello Sviluppo Economico, delle Infrastrutture e della mobilità sostenibili (già delle Infrastrutture e Trasporti), nonché di quello delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. Inoltre, è stato istituito un gruppo di lavoro tecnico cui hanno partecipato gli esperti di ISPRA, RSE, GSE, Politecnico di Milano, ENEA e CMCC. In particolare, gli scenari dei settori energetici sono il frutto della stretta collaborazione tra RSE ed ISPRA.

Il presente lavoro si concentrerà sugli scenari delle emissioni e degli assorbimenti di gas a effetto serra e verranno illustrate la metodologia, le assunzioni e i risultati ottenuti nell'ambito del gruppo di lavoro che ha collaborato alla realizzazione della LTS, presentati in relazione all'analisi dell'andamento storico osservato nell'ultimo trentennio.

L'elaborazione degli scenari si è conclusa ad inizio 2020, quando i dati storici consolidati più recenti erano relativi all'anno 2017 e in parte al 2018 e prima dello scoppio della pandemia di COVID-19. Le ricadute dell'emergenza sanitaria sul processo di decarbonizzazione varieranno in funzione di una molteplicità di fattori come, ad esempio, l'implementazione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, trasmesso a Bruxelles il 30 aprile scorso, o il possibile cambio strutturale delle abitudini e modalità di lavoro dei cittadini (si pensi, ad esempio, al massiccio ricorso allo *smart-working*).

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1. Assunzioni di carattere generale

Uno scenario è una descrizione internamente coerente e plausibile della possibile evoluzione di un insieme di parametri, date le condizioni iniziali e una serie di ipotesi. Uno scenario serve a fornire una risposta ragionevole e coerente alla domanda "cosa succede se...?". Nell'ambito della LTS è stato preliminarmente prodotto uno scenario di riferimento, caratterizzato da tre elementi essenziali:

- raggiungimento degli obiettivi previsti dal PNIEC, e prosecuzione fino al 2050 delle tendenze così determinate;
- aggiornamento dei principali *driver* con i dati più recenti al 2019;
- integrazione degli effetti dei cambiamenti climatici, in termini di variazioni potenziali dei gradi giorno, di resa delle colture e di frequenza degli incendi.

Successivamente sono stati elaborati diversi scenari di decarbonizzazione caratterizzati dalla ridu-

zione delle emissioni fino al raggiungimento della neutralità climatica al 2050. Dato che lo scopo degli scenari oggetto del presente lavoro è quantificare le emissioni prodotte dalle attività antropiche, è fondamentale formulare delle ipotesi sulla loro evoluzione attesa. Per questo motivo le principali assunzioni riguardano gli andamenti demografici ed economici, dato che questi sono i principali driver delle domande finali di beni e servizi. Per quanto riguarda la popolazione italiana, sulla base delle proiezioni elaborate da EUROSTAT è stata assunta una graduale riduzione che dal 2040 porterebbe il totale degli abitanti sotto quota 60 milioni, mentre il numero delle famiglie, riducendosi il numero di componenti per nucleo, registrerebbe un lieve aumento nel periodo di proiezione 2018-50, in linea con quanto osservato negli ultimi anni. In particolare, è stato assunto che la tendenza alla riduzione delle dimensioni delle famiglie continui, raggiungendo una media di 2,2 abitanti per famiglia nel 2050. Ai fini dell'elaborazione degli scenari è stato ipotizzato che ad ogni famiglia corrisponda una abitazione. Per quanto riguarda il contesto economico si è fatto riferimento alle ipotesi alla base del *Central Scenario* POTEnCIA prodotto dal Joint Research Center della Commissione europea (Mantzou et al., 2019). Le proiezioni a breve termine (2017-19) per il PIL, il Valore Aggiunto (VA) settoriale e le spese per consumi privati sono desunte dalle previsioni pubblicate nella banca dati della DG ECFIN AMECO (versione primavera 2018). Le proiezioni del PIL dal 2020 in poi si basano sulle ipotesi di crescita del PIL pro capite del "2018 Ageing Report" (DG ECFIN, 2018). In particolare quindi si è assunta una crescita del PIL, a livello aggregato nazionale, con un tasso medio annuo di 0,70% nel periodo di proiezione 2018-2050. Anche l'evoluzione dei prezzi internazionali dei vettori energetici primari gioca un ruolo determinante nella definizione dei livelli di consumo e delle emissioni. I prezzi internazionali dei combustibili e della CO<sub>2</sub> sono tratti dallo scenario di riferimento dell'UE 2016 (Commissione Europea, 2016) con alcuni aggiornamenti per tenere conto dell'evoluzione osservata negli ultimi anni. Le proiezioni del prezzo delle *commodity* energetiche sui mercati internazionali dello scenario di riferimento UE 2016 sono il risultato di simulazioni effettuate col modello di equilibrio parziale del sistema energetico globale PROMETHEUS, sviluppato dall'Università di Atene nell'ambito del programma E3MLab (Capros, 2017). In tale quadro, i prezzi internazionali dei principa-

Tabella 1 – Evoluzione dei principali driver per l'Italia: dati 2018-2020 e ipotesi per il periodo 2020-2050

		18-20	20-25	25-30	30-50
PIL	tasso medio annuo %	1,05	0,69	0,38	0,69
V.A. Agricoltura	tasso medio annuo %	-0,89	0,28	0,29	0,63
V.A. Servizi	tasso medio annuo %	0,49	0,72	0,4	0,71
V.A. Industria	tasso medio annuo %	0,97	0,64	0,31	0,56
		<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Popolazione	milioni di abitanti	60,5	60,3	60,2	58,8
Numero di famiglie	milioni	26,2	26,4	26,5	26,6
Petrolio	€2016/bep	80,6	91,5	100,8	116,5
Gas naturale	€2016/bep	51,9	56,1	61,1	69,9
Carbone	€2016/bep	15,4	18,4	22,0	25,9
CO <sub>2</sub> ETS	€2016/tCO <sub>2</sub>	15,5	23,3	34,7	91,0

li combustibili fossili sono stimati al rialzo, così come la quotazione della CO<sub>2</sub> collegata al sistema EU-ETS che al 2050 supererebbe i 90 €/t.

Nella costruzione degli scenari sono stati utilizzati approcci diversi per ogni settore, come descritto nei paragrafi seguenti. Per tutti i settori è stata effettuata l'analisi delle serie storiche disponibili per individuare le dinamiche in corso e i principali fattori che le determinano. I dati ottenuti costituiscono la base informativa dei modelli utilizzati per ciascun settore.

## 2.2. Settori energetici

L'analisi degli scenari del sistema energetico nazionale è stata condotta con il modello TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM1 System / EFOM Energy Flow Optimization Model) sviluppato dalla IEA (*International Energy Agency*) nell'ambito del programma ETSAP (*Energy Technology Systems Analysis Program*) e riconosciuto dalla IPCC (*International Panel on Climate Change*). TIMES è un generatore di modelli ad equilibrio parziale per sistemi economici locali, nazionali o multiregionali finalizzato all'analisi di interi sistemi energetici o di singoli settori (elettrico, distribuzione di calore, trasporti, etc.). Il modello appartiene alla famiglia dei modelli MARKAL (*MARKet ALlocation*) e dei cosiddetti *3e models* (*energy, economy, environment*). Il modello TIMES adotta un approccio *bottom-up* in cui ogni tecnologia è identificata da parametri di input, output, costi unitari e altri parametri tecnici ed economici. Ogni settore è costituito da una serie di tecnologie legate dai rispettivi input e output (*commodities*) che possono essere vettori energetici, materiali, emissioni o domande finali di beni e servizi. I da-

ti di input al modello devono quindi fornire un quadro rappresentativo del sistema energetico studiato e riguardano sia i parametri tecnologici legati alle tecnologie disponibili, sia i parametri esogeni al modello (come il PIL, i valori aggiunti settoriali, la popolazione, il numero degli edifici, i costi dei combustibili, ecc.) provenienti da altri modelli o altre fonti accreditate. Partendo da questi parametri esogeni si definiscono le domande finali di beni e servizi e TIMES individua la soluzione ottimale per soddisfare tali domande al minor costo, realizzando simultaneamente investimenti in nuove tecnologie o utilizzando in maniera più intensiva le tecnologie disponibili. TIMES è quindi definito come modello *demand driven*. L'insieme di questi elementi costituisce il sistema energetico di riferimento, ovvero la rappresentazione schematica dei flussi di energia e materiali che dalle materie prime raggiungono la domanda di usi finali attraverso le varie fasi di trasformazione.

### 2.2.1. Industrie energetiche

Nell'ambito delle industrie energetiche, il settore della generazione elettrica ha un ruolo preponderante. Negli ultimi venti anni tale settore ha assorbito in media circa un terzo del consumo interno lordo di energia. Nel 2019 le emissioni di gas serra del settore elettrico ammontano al 22,6% delle emissioni nazionali. In particolare le emissioni per la produzione di energia elettrica e calore sono state 94,5 MtCO<sub>2</sub>eq, di cui circa il 90% per la sola produzione elettrica. Circa il 20% di tale quantità è dovuto alle attività di autoproduzione degli impianti industriali che, secondo la classificazione IPCC, rientrano nel settore delle industrie manifatturiere. I consumi energetici del settore elettrico ed i consumi di energia elettrica aumentano con tassi maggiori di



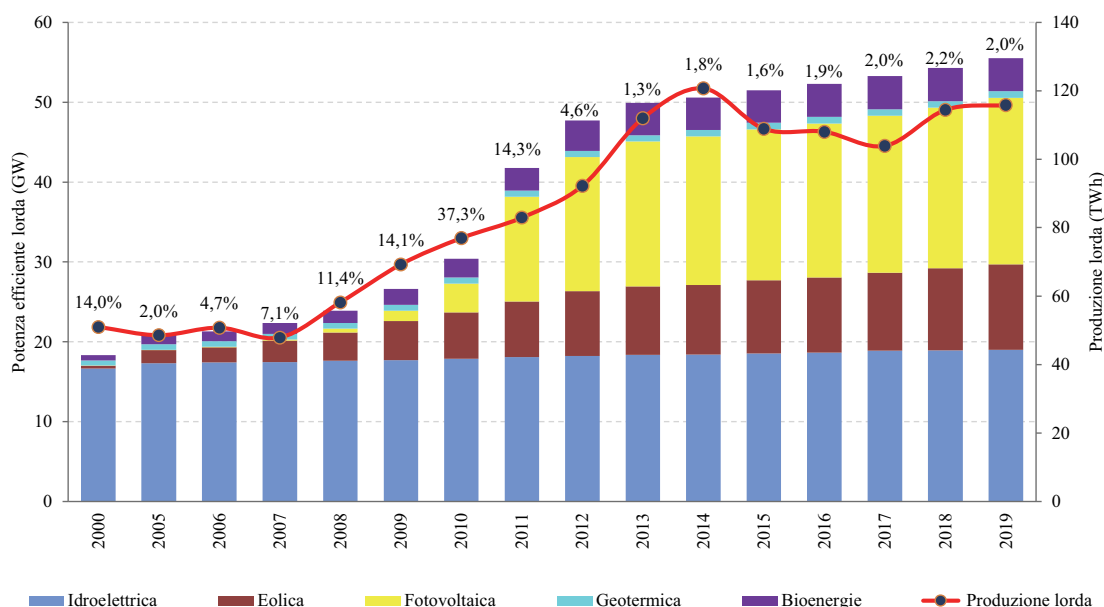


Figura 1 – Potenza efficiente lorda degli impianti da fonti rinnovabili e produzione lorda. È inoltre riportato l'incremento percentuale interannuale della potenza efficiente lorda

quelli osservati per il consumo interno lordo, indice di una progressiva elettrificazione dei consumi finali. Il mix energetico alla base della generazione elettrica è notevolmente cambiato dal 1990. I prodotti petroliferi sono stati sostituiti dal gas naturale, inoltre dal 2007 si registra un notevole sviluppo delle fonti rinnovabili che nel 2019 hanno raggiunto il 39,5% della produzione totale con un picco del 43,1% nel 2014. La produzione da combustibili solidi mostra un declino molto rapido negli ultimi anni ed è destinata a scomparire con il *phase out* del carbone dal settore che secondo il PNIEC dovrebbe avvenire entro il 2025. La produzione di energia elettrica negli ultimi quindici anni è oscillata tra l'85% e il 90% dell'energia richiesta, integrata da importazione netta, con una continua riduzione dell'apporto da pompaggio. Sia la quota importata che le perdite di rete si riducono dal 2005. Lo sviluppo delle fonti rinnovabili e l'incremento dell'utilizzo di gas naturale hanno determinato la riduzione dei fattori di emissione di gas serra per la produzione di energia elettrica del 42,8% dal 2005 al 2019. Per le fonti rinnovabili è stato registrato un notevole sviluppo della potenza installata con un tasso medio annuo del 7,2% dal 2005 al 2019. In particolare le fonti eolica e fotovoltaica nel 2019 raggiungono 10,7 GW e 20,9 GW rispettivamente (Figura 1).

La principale assunzione per il sistema elettrico nello scenario di riferimento è costituita dal mantenimento dei tassi medi annui di nuova potenza installata intorno al 3,1% fino al 2050. Tali tassi sono inferiori alla metà di quelli registrati dal 2005

al 2019, ma sembrano essere più realistici considerato il rallentamento registrato a partire dal 2012. Altre assunzioni riguardano una produzione idroelettrica simile a quella attuale e una progressiva riduzione della quota dell'importazione netta e delle perdite di rete in continuità con le dinamiche registrate finora. Negli scenari di decarbonizzazione non si è assunto alcun vincolo alla crescita del fotovoltaico, se non quelli strettamente connessi alla disponibilità di aree idonee. Il fotovoltaico ha quindi la possibilità di saturare il proprio potenziale tecnico-economico. Discorso analogo è stato fatto per l'eolico. Per quanto riguarda le efficienze elettriche attese si è fatto riferimento ai risultati dello studio ASSET sulle tecnologie di decarbonizzazione (De Vita et al., 2020). In base alla classificazione IPCC, anche la raffinazione di petrolio e la produzione di coke di carbone rientrano tra le industrie energetiche. In particolare per quanto riguarda le raffinerie l'analisi della serie storica mostra un accoppiamento molto stretto tra i consumi energetici e le emissioni degli impianti, come si evince dalla Figura 2, in sostanza dall'analisi dei dati storici non emergono miglioramenti in termini di riduzione delle emissioni di gas serra. Dato che le emissioni della raffinazione incidono, nel 2019, per il 6% del totale settoriale e che, negli anni a venire è attesa una marcata contrazione del livello di attività del comparto dovuta alla minore domanda di prodotti petroliferi da parte del settore dei trasporti, è stato adottato un approccio conservativo per il settore e non sono state fatte ipotesi particolari rispetto al-

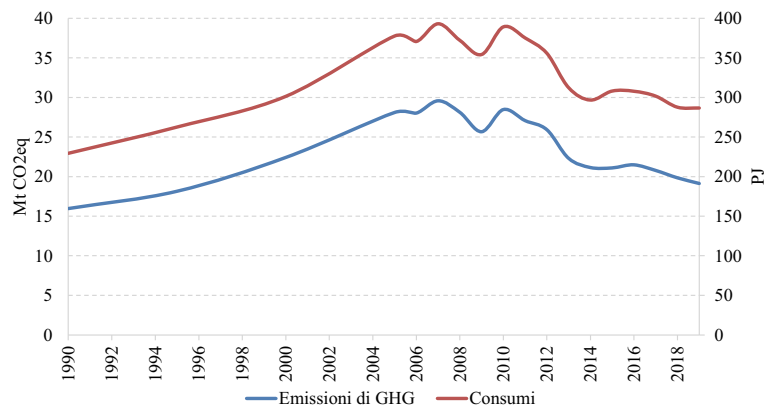


Figura 2 – Emissioni di gas serra e consumi energetici delle raffinerie, secondo le categorie IPCC

l'evoluzione tecnologica, se non quelle legate al tempo di vita degli impianti e al conseguente rinnovo degli stessi con tecnologie più efficienti già disponibili sul mercato. Discorso analogo può essere fatto per le cokerie, le cui emissioni, ammontavano nel 2019 a circa il 2% delle emissioni totali dei settori energetici.

#### 2.2.2. Industrie manifatturiere

Analizzando i bilanci energetici nazionali disponibili nelle banche dati EUROSTAT, la contrazione dei consumi del settore industriale è ben visibile a partire dal 2008, quando la crisi economica ha provocato un drammatico ridimensionamento del settore. Questo calo significativo dei consumi, che si inserisce comunque in un *trend* discendente di più lungo termine, ha interessato praticamente tutte le fonti energetiche sebbene in modalità diverse, determinando un cambiamento molto rilevante nel *mix* energetico settoriale. Nel periodo 2007-2009 si osserva una contrazione di circa il 20% dei consumi finali, che ha portato i prodotti petroliferi ed i combustibili solidi a livelli sempre più marginali, confermando di contro il ruolo chiave di gas naturale, elettricità e calore derivato. Va notato in par-

ticolare che, secondo EUROSTAT, nel 2019 i consumi di elettricità e calore costituiscono oltre il 53% dei consumi finali settoriali, mentre nel 2004, primo anno in cui è stato contabilizzato l'uso del calore derivato, rappresentavano circa il 40%. In merito al *mix* energetico si sottolinea la differenza piuttosto importante tra la classificazione adottata per la produzione delle statistiche energetiche da EUROSTAT e quella IPCC per la definizione dei settori emissivi. Se infatti, secondo i dati forniti da EUROSTAT, tutti i consumi primari per la produzione di elettricità e calore sono allocati nel settore "trasformazioni", secondo le linee guida IPCC i consumi e le emissioni degli impianti di produzione di elettricità e calore asserviti alle produzioni industriali sono allocati nel settore "industrie manifatturiere e costruzioni". Altre differenze meno rilevanti sono riconducibili alle diverse distribuzioni nei settori della raffinazione e del siderurgico tra "consumi finali" e "trasformazioni". In Figura 3 viene mostrato un confronto, relativo al 2019, tra i consumi di combustibili calcolati secondo i due diversi approcci.

Le emissioni del settore industriale non dipendono però solo dai consumi energetici. Analizzando la

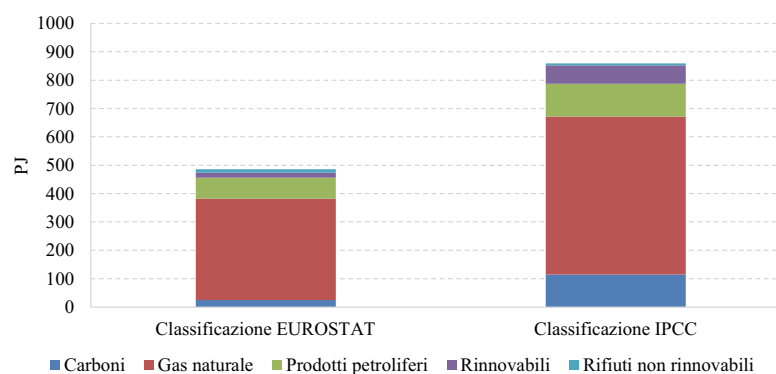


Figura 3 – Confronto relativo ai consumi energetici finali di combustibili per fonte (PJ) del 2019 nel settore industria, secondo le classificazioni adottate in ambito EUROSTAT e IPCC

serie storica è evidente che col passare degli anni le emissioni prodotte dai processi produttivi, quali ad esempio quelle legate ai processi di decarbonazione dei minerali nella produzione di cemento, e dall'utilizzo di gas fluorurati stanno assumendo un peso relativo crescente. Sebbene tali emissioni non siano di fonte energetica, al fine di dare una descrizione d'insieme del settore industriale, verranno trattate congiuntamente. Anche nell'industria, in analogia a quanto successo per la generazione elettrica, i consumi energetici si sono spostati verso vettori a minor contenuto di carbonio, mentre i miglioramenti sul fronte dei processi sono stati molto più contenuti. La Figura 4 illustra l'andamento dell'intensità emissiva del settore, suddivisa nelle due componenti. Nel complesso nel 2019 l'industria ha contribuito a circa il 20% delle emissioni nazionali con circa 50 MtCO<sub>2</sub>eq dai consumi energetici (-46% rispetto al 1990) e circa 30 MtCO<sub>2</sub>eq dai processi (-16% rispetto al 1990). Circa la metà delle emissioni da processi è in realtà costituita da gas fluorurati, le cui emissioni hanno visto una crescita molto rilevante a partire dai primi anni novanta, mentre le emissioni più strettamente legate alle principali produzioni hanno visto una progressiva riduzione legata sostanzialmente al declino dei livelli delle attività industriali. Nel 2019 le emissioni di CO<sub>2</sub> dalle industrie dei minerali non metalliferi, dalla chimica e dalla metallurgia, costituivano meno del 45% del totale delle emissioni di gas serra dal settore dei processi industriali.

Nell'elaborazione degli scenari per i settori più rilevanti sul piano emissivo e per i quali è identificabile una produzione specifica (es. cemento, acciaio, ecc.), è stata costruita la proiezione di quest'ultima analizzandone la correlazione negli anni

storici con il VA settoriale. Per tutti gli altri settori (come ad esempio quello agroalimentare), i tassi di variazione del VA sono stati utilizzati per proiettare specifici indici di produzione industriale. Per il calcolo dei consumi energetici e delle emissioni ad essi associate si è utilizzato il modello TIMES, mentre per le emissioni da processi sono stati calcolati gli andamenti per ogni tipo di gas emesso, a partire dall'evoluzione attesa delle produzioni, attraverso i fattori di emissione utilizzati nell'inventario nazionale delle emissioni (ISPRA, 2021). I dati sull'evoluzione tecnologica sono stati desunti sia dallo studio ASSET (De Vita et al., 2020) che dai "BAT reference documents" prodotti dall'European IPPC Bureau di Siviglia.

### 2.2.3. Trasporti

Il settore dei trasporti è responsabile del 25,2% del totale nazionale delle emissioni di gas serra (nel 2019 circa 105 MtCO<sub>2</sub>eq costituite per il 99% da CO<sub>2</sub>). L'andamento è risultato crescente tra il 1990 e il 2007 e decrescente negli anni successivi, in conseguenza soprattutto della crisi economica e della progressiva diffusione di veicoli più performanti. I consumi energetici mostrano nel tempo un andamento simile a quello delle emissioni, con un mix energetico pressoché costante ed il contributo prevalente dei prodotti petroliferi pari a circa il 94% del totale dei consumi del settore. Per tutto il periodo storico analizzato, oltre il 90% del trasporto passeggeri è avvenuto su strada, con una forte predominanza del trasporto individuale (autovetture e motocicli) rispetto a quello pubblico, come conseguenza circa il 92% delle emissioni di CO<sub>2</sub> del 2019 sono state prodotte dal trasporto su strada. Il peso delle emissioni di gas serra delle automobili è pari

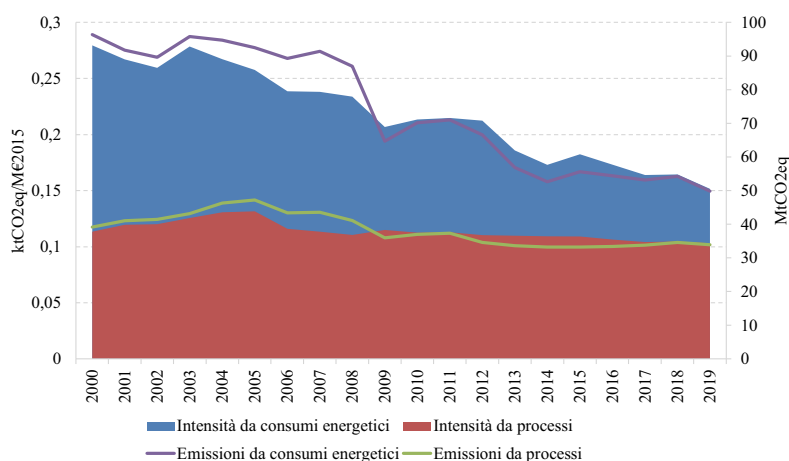


Figura 4 – Scomposizione dell'evoluzione storica delle emissioni e dell'intensità emissiva del settore "industrie manifatturiere e costruzioni"

a circa il 68% del totale emesso su strada, seguito da camion e veicoli commerciali leggeri (insieme circa il 25%); dagli autobus e dai veicoli a due ruote si originano rispettivamente circa il 3% ed il 2% dei gas serra emessi su strada. Dal 1990 la domanda di trasporto passeggeri ha registrato, seppure con ampie oscillazioni, una significativa crescita e nel 2019 è risultata più alta di circa il 32% rispetto al 1990. Per il trasporto di merci emerge un profilo ciclico con un recupero parziale nell'ultimo quinquennio, dopo gli effetti della crisi economica. Tuttavia, rispetto al picco del 2005 il traffico merci risulta oggi più basso di circa il 15%.

In termini di ripartizione modale, emerge che nel periodo considerato il trasporto merci si è realizzato per circa metà su strada e metà su vie d'acqua e treni come rappresentato nella Figura 5. Negli scenari per la LTS come input per il settore dei trasporti, è stata utilizzata la proiezione della domanda passeggeri e merci, espressa rispettivamente in passeggeri-chilometro (p-km) e tonnellate-chilometro (t-km) e suddivisa per ciascuna tipologia di trasporto ricavata dalle proiezioni dei driver riportati in Tabella 1. Per quanto riguarda le tecnologie, si sono ipotizzati tassi di sostituzione dei veicoli in

linea con quelli registrati nell'ultimo decennio e la progressiva penetrazione di mezzi di trasporto sempre più efficienti in linea con gli attuali regolamenti in materia di standard emissivi dei veicoli di nuova immatricolazione. Al riguardo va notato che, a causa dell'attuale composizione del mercato dell'auto a livello europeo, per l'Italia il fattore di emissione medio di CO<sub>2</sub> delle auto di nuova immatricolazione risulta superiore a quello medio europeo fissato dal regolamento per il 2020. Per quanto riguarda i veicoli elettrici sono state mantenute le stesse previsioni contenute nel PNIEC, ossia il raggiungimento al 2030 di una quota pari a circa 6 milioni di veicoli tra Battery Electric Vehicle (BEV) e Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV).

#### 2.2.4. Civile

Il settore civile ha contribuito per il 19% alle emissioni nazionali di gas serra del 2019, in particolare le emissioni del settore sono state pari a 81,5 MtCO<sub>2</sub>eq di cui quasi 50 MtCO<sub>2</sub>eq dal residenziale, 25,4 MtCO<sub>2</sub>eq dal settore terziario e poco più di 8 MtCO<sub>2</sub>eq dall'agricoltura (le emissioni contabilizzate per l'agricoltura in questo settore sono quel-

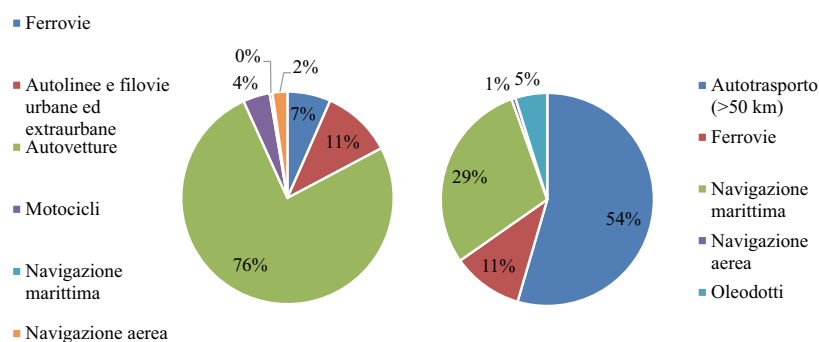


Figura 5 – Composizione percentuale del traffico passeggeri e merci nel 2019, elaborazione ISPRA su dati MIT – Fonte: Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, Anni 2019-2020 disponibile su: [www.mit.gov.it/comunicazione/pubblicazioni](http://www.mit.gov.it/comunicazione/pubblicazioni)

Tabella 2 – Emissioni di GHG, consumi e domanda del settore dei trasporti

		1990	2000	2005	2007	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Emissioni di GHG*	MtCO <sub>2</sub> eq	102,2	123,8	128,3	129,6	115,6	106,3	104,8	100,9	104,3	105,5
Consumi**	PJ	1369,1	1662,2	1750,1	1771,0	1616,1	1524,0	1498,9	1444,4	1490,5	1503,1
Domanda Passeggeri***	Gp-km	727,9	919,8	900,5	1023,2	916,6	901,1	929,2	970,1	946,4	966,9
Domanda Merci***	Gt-km	191,3	215,9	237,5	226,9	216,9	177,4	182,6	192,6	196,4	204,7

\*Fonte NIR (ISPRA, 2021)

\*\*Fonte: EUROSTAT

\*\*\*Fonte: Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti

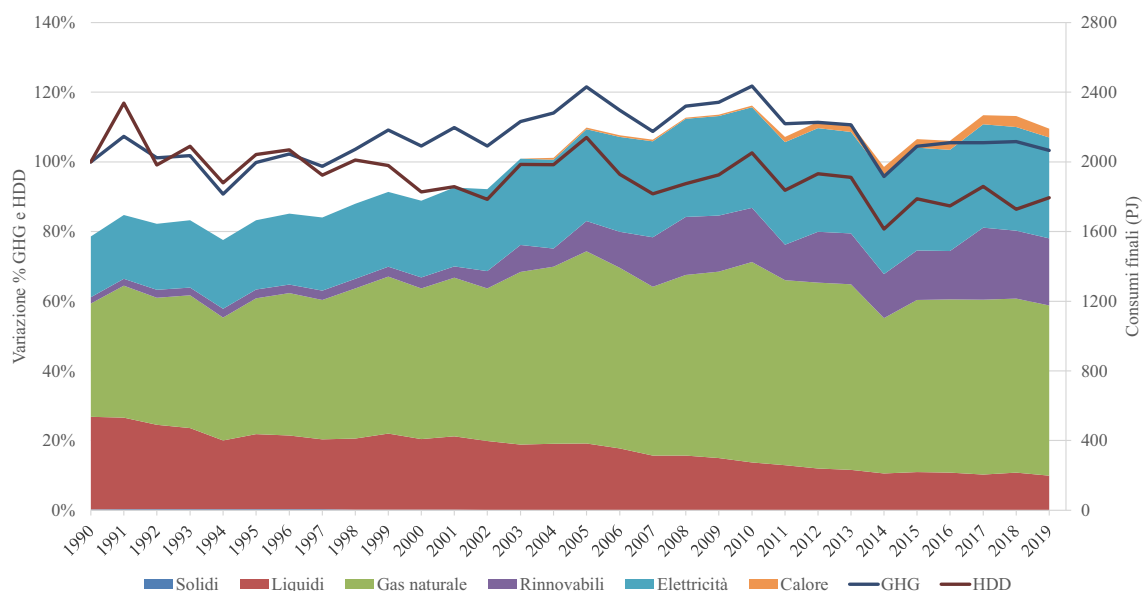


Figura 6 – Evoluzione dei consumi energetici finali per fonte e delle variazioni % rispetto al 1990 delle emissioni di GHG e degli HDD nel settore civile

le derivanti dai consumi energetici). Come si può notare dalla Figura 6, gli andamenti delle emissioni e dei consumi del settore sono strettamente correlati all’andamento dei gradi giorno di riscaldamento (*heating degree day*, HDD). In particolare i picchi di consumo, e quindi di emissione, sono osservabili negli anni più freddi ovvero con HDD più elevati. In Figura 6 non sono riportati i consumi di combustibili solidi fossili che nel 1990 pesavano per lo 0,3% sul totale e il cui impiego si è annullato a partire dal 2014.

Nel complesso si può osservare una crescita dei consumi totali del settore civile dal 2000: per il residenziale tale incremento è dovuto essenzialmente all’aumento della popolazione e alla modifica delle abitudini delle famiglie, mentre per il settore terziario, la crescita dei consumi è dovuta principalmente all’aumento delle attività legate ai servizi vendibili. Il settore agricolo ha mostrato un andamento

dei consumi piuttosto stabile. Anche nel settore civile si registra una modifica del *mix* energetico. Il gas ha progressivamente sostituito l’utilizzo dei combustibili liquidi e ad oggi questa rimane la fonte energetica più utilizzata nel settore nonostante una penetrazione crescente delle fonti rinnovabili, guidata dalla biomassa, dal 2005. Il teleriscaldamento, rappresentato dal consumo di calore, ha avuto un’espansione soprattutto nelle regioni del centro-nord. Negli ultimi anni si è assistito ad una crescente elettrificazione dei consumi, dettata principalmente dall’incremento della domanda di climatizzazione estiva e invernale degli edifici e dalla diffusione di nuove tipologie di apparecchi quali asciugatrici, lavastoviglie o i dispositivi di comunicazione e intrattenimento (smartphone, PC, tablet) nel residenziale, a sistemi di refrigerazione e cottura nel commercio alimentare e di comunicazione e informazione negli uffici. L’elettrificazione dei consumi,

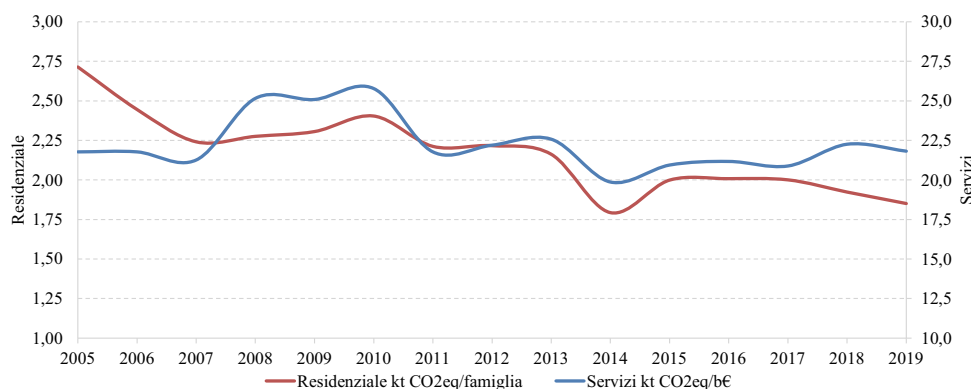


Figura 7 – Intensità emissiva nei settori residenziale e servizi

la penetrazione delle rinnovabili e le politiche di efficientamento stanno portando ad una decrescita delle emissioni per nucleo familiare nel settore residenziale, mentre rimangono sostanzialmente invariate le emissioni per unità di valore aggiunto del settore terziario (Figura 7).

### 2.3. Settori non energetici

#### 2.3.1. Agricoltura

Le emissioni del settore agricoltura nel 2019 sono state pari a 29,5 MtCO<sub>2</sub>eq e rappresentano il 7% circa delle emissioni nazionali di gas serra (in particolare, circa due terzi sono emissioni di metano, più di un terzo di protossido di azoto e una parte residuale di anidride carbonica), che derivano per quasi l'80% dalla gestione degli allevamenti. L'applicazione ai suoli di fertilizzanti sintetici determina un ulteriore 10% di emissioni; il 5% delle emissioni deriva dalla coltivazione del riso, il resto è rappresentato da sorgenti minori (altri apporti azotati ai suoli, combustione dei residui agricoli, applicazione di urea e calce).

Per la definizione degli scenari LTS del settore è stato utilizzato lo stesso approccio metodologico utilizzato per la stima delle emissioni di gas serra nell'ambito dell'inventario (ISPRA, 2021). Secondo tale approccio, le emissioni sono calcolate moltiplicando i dati di attività (per esempio, il numero di capi allevati o le quantità di fertilizzanti usati durante l'anno) per i fattori di emissione (espressi, per esempio, generalmente come chilogrammi di sostanza inquinante rispetto ad un capo allevato o ad un chilogrammo di fertilizzante utilizzato all'anno). Informazioni dettagliate sui metodi, parametri e fattori di emissioni utilizzati per il processo di stima del settore sono riportati nel capitolo 5 e annesso 7 del *National Inventory Report* (ISPRA, 2021). Per la definizione dei dati di attività, il primo passo è stata la definizione della proiezione dei capi allevati al 2050. Gli scenari delle consistenze animali vengono predisposti dall'ENEA nell'ambito della preparazione degli scenari emissivi in collaborazione con ISPRA (D'Elia e Peschi, 2013, 2016), tramite l'applicazione di un modello basato su parametri quali l'evoluzione demografica, le produzioni e i consumi alimentari della popolazione. Su tali parametri, sono stati costruiti degli indicatori, osservandone gli andamenti storici per definirne le evoluzioni future. In particolare, il consumo di carne totale pro-capite è stato mantenuto inalterato, sulla base dei dati circa l'evoluzione storica dell'andamento estratto dalle pubblicazioni

dell'Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare (ISMEA, 2019a) sui consumi alimentari delle famiglie italiane. Tuttavia, sono state considerate le statistiche di settore (in particolare le analisi di ISMEA sul mercato delle carni, vedi ISMEA, 2019b) relative al consumo di carne per categoria animale: rispetto al consumo di carne totale, si è ridotto il consumo di carne bovina, mentre è leggermente cresciuto il consumo di suini e avicoli; per tale ragione negli scenari si è assunto un maggiore consumo di carne bianca rispetto alla carne rossa. Per le vacche da latte, il rapporto della produzione di latte vaccino (pari a circa il 94% del totale di latte prodotto) rispetto alla produzione di latte totale è stato assunto sostanzialmente stabile fino al 2050; il rapporto tra la produzione annua di latte vaccino destinato all'industria lattiero-casearia e la popolazione è stato considerato fisso dal 2020 in poi e pari a circa 200 kg pro capite, secondo quanto osservato per l'anno 2017 sulla base dei dati EUROSTAT (2019a). Per le galline da covata, è stato assunto un leggero aumento del consumo di uova pro capite ed una sostanziale stabilità (intorno all'unità) del rapporto tra produzione e consumo di uova (secondo le statistiche di EUROSTAT, 2019b e della FAO, 2019). In definitiva, ne deriva negli scenari al 2050 una flessione del numero di bovini e un incremento di suini e avicoli, che rappresentano le categorie animali più importanti in termini di impatto emissivo. Il consumo di fertilizzanti sintetici azotati incide significativamente sulle emissioni di gas serra del settore agricoltura. Tale parametro è stimato da ENEA sulla base delle proiezioni dell'Associazione di categoria dei produttori europei di fertilizzanti sintetici (Fertilizers Europe, 2019), assumendo una riduzione complessiva dei consumi di azoto dal 2020 al 2030 pari a circa l'1,5%. Dal 2030 il valore del consumo dei fertilizzanti sintetici azotati varia in funzione delle proiezioni delle produzioni agricole. Per la stima delle superfici e produzioni agricole, si rimanda al settore LULUCF.

#### 2.3.2. LULUCF

Il settore LULUCF (uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e selvicoltura) ha la capacità di generare degli assorbimenti di carbonio, contribuendo alla mitigazione dei cambiamenti climatici, con oltre 41 MtCO<sub>2</sub>eq assorbite nel 2019 (ISPRA, 2021), il cui principale contributo deriva dalle foreste e dalla gestione dei pascoli. Analogamente a quanto fatto per l'agricoltura, l'elaborazione degli scenari è stata condotta sulla base dei dati e delle

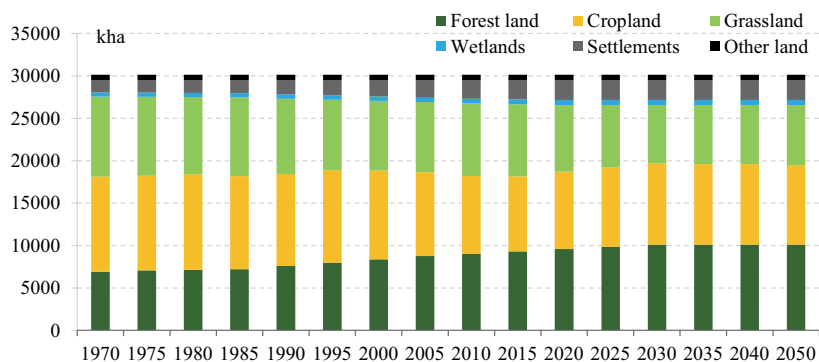


Figura 8 – Proiezione delle superfici delle categorie di uso del suolo LULUCF

metodologie attualmente utilizzate per l’inventario delle emissioni (ISPRA, 2021). Per la definizione degli scenari emissivi del settore, il punto di partenza è la definizione delle proiezioni di uso e cambiamento di uso del suolo in relazione alle rispettive categorie (Figura 8).

Le proiezioni delle superfici agricole sono state sviluppate a partire dagli scenari FAO elaborati per l’Italia con il modello Global Agriculture Perspectives System (FAO, 2018; Alexandratos et al., 2012). Si evidenzia una crescita di tali superfici fino al 2040 e, successivamente, una stabilizzazione. Tale profilo è determinato dall’incremento delle aree cerealicole e dalla decrescita delle coltivazioni legnose e industriali. Le superfici foraggere (temporanee e permanenti) sono state invece stimate sulla base del rapporto capi/ettaro (consistenza capi su superficie totale foraggere), evidenziando una decrescita delle superfici, conseguente alla previsione di riduzione dei capi. Per quanto riguarda la superficie forestale, in continuo aumento in Italia dal 1990, si è assunto che rimanga costante a partire dal 2030, mentre per gli insediamenti urbani è stato ipotizzato che non si espandano rispetto ai livelli attuali, in linea con l’obiettivo di limitare il consumo di suolo. Una volta definite le proiezioni delle categorie al 2050, sono state definite le variazioni annuali di uso del suolo e sono state realizzate le matrici di conversione tenendo conto del periodo di transizione di 20 anni, secondo la metodologia dell’IPCC. Sulla base delle superfici così calcolate, sono state effettuate le stime degli assorbimenti ed emissioni di gas serra per ogni categoria di uso del suolo.

### 3. RISULTATI

#### 3.1. Industrie energetiche

La generazione di energia elettrica e calore, che in termini emissivi costituisce la quota più rilevante

delle industrie energetiche, nello scenario di riferimento è caratterizzata da circa l’83% di produzione elettrica da fonti rinnovabili a fronte dell’attuale 40% e del 65% nel 2030, in linea con quanto indicato nel PNIEC se si tiene conto dell’aggiornamento dei driver illustrati in Tabella 1, i quali determinano nel complesso una minor crescita della domanda finale di energia elettrica rispetto a quanto indicato nel Piano. In tale scenario il tasso medio annuo di incremento della produzione elettrica dal 2019 al 2050 è 0,5%, relativamente contenuto rispetto al tasso medio 1,1% dal 1990 al 2019. La ridotta crescita della produzione elettrica è indice di un sistema produttivo ed economico con un assetto abbastanza simile a quello attuale. Le emissioni da generazione elettrica e calore nel 2050 ammontano a circa 21 MtCO<sub>2</sub>eq a fronte delle 95 MtCO<sub>2</sub>eq registrate nel 2019, comprensive della quota dovuta all’autoproduzione nelle industrie manifatturiere. Le emissioni complessive del settore nel 2050 si assestano intorno ai 30 MtCO<sub>2</sub>eq. Il quadro cambia radicalmente negli scenari di decarbonizzazione dove, per raggiungere la neutralità emissiva, il sistema elettrico dovrà trasformarsi in modo radicale e avere un ruolo sempre più centrale nell’assetto energetico del Paese attraverso una progressiva elettrificazione di tutti i settori di uso finale dell’energia. Inoltre, per la ulteriore riduzione delle emissioni appare necessario che grandi quantità di elettricità siano destinate alla produzione di idrogeno ed *e-fuels*. Gli esercizi modellistici hanno mostrato che nonostante la forte crescita attesa per la generazione fotovoltaica ed eolica, nonché dell’utilizzo di biocombustibili, in particolare biometano derivante dai reflui zootecnici, sarà verosimilmente necessario ricorrere a tecnologie di cattura della CO<sub>2</sub> (CCU e CCS) che, qualora associate a centrali alimentate da bioenergie, possono portare ad emissioni negative e alla produzione di *e-fuels* ad emissioni nulle di gas serra. Le caratteristiche essenziali del siste-

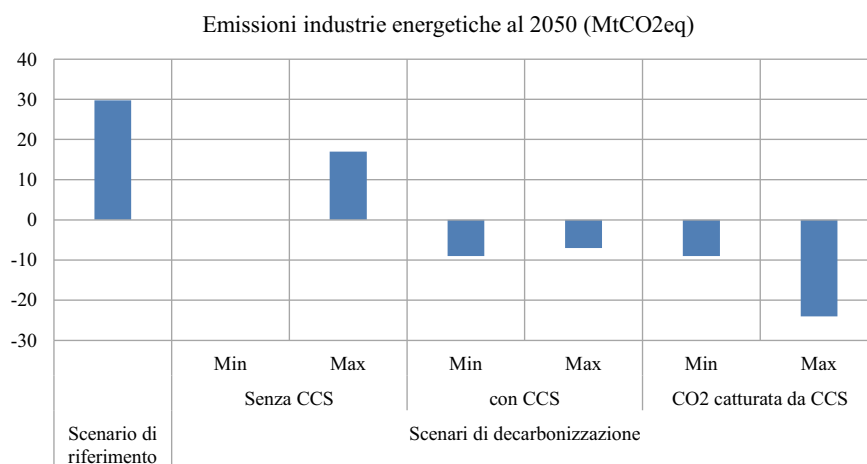
ma elettrico al 2050 che emergono da tutti gli scenari elaborati possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- a) quota rinnovabile superiore al 95%, con una potenza installata di fotovoltaico compresa tra i 200 e i 300 GW, un forte sviluppo dell'eolico fino a circa 50 GW di cui fino a 17 GW off-shore (in acque intermedie e profonde 30-200 m) ed un possibile sviluppo della produzione da maree e moto ondoso fino a 1,5 GW;
- b) ulteriori 10 GW di pompaggi (di cui 3 GW marini) aggiuntivi rispetto agli attuali 7 GW;
- c) eventuale quota di generazione elettrica da gas naturale (comunque inferiore a 30 TWh) con CCS.

Le valutazioni di potenza, energia e potenziali del settore elettrico sono basate su ipotesi tecnicamente percorribili con le conoscenze attuali. Le potenze e le produzioni elettriche per la completa decarbonizzazione potrebbero, quindi, essere in parte ottenibili, in presenza di ulteriori sviluppi di tecnologie già disponibili, da altre opzioni (es. ulteriori FER disponibili in mare) o anche da accordi di scambio con altri Paesi. Per riuscire a soddisfare tutte le esigenze del sistema energetico, sia di consumo diretto di elettricità che indiretto per la produzione di *e-fuels*, la produzione dalle fonti solare ed eolica potrebbe giungere dunque a valori tra i 440 e i 550 TWh. Questa nuova configurazione del sistema elettrico porta all'installazione di una elevata capacità di accumuli elettrochimici su rete e distribuiti tra 28 e 38 GW, con molteplici vantaggi: spostare l'eccesso di produzione da fonti rinnovabili non programmabili (FRNP) nelle ore in cui può essere consumato direttamente per gli usi finali e dai cosiddetti impianti *Power to X* (P2X) in cui l'elettricità è convertita in altri vettori energetici, quali metano, idrogeno e combustibili liquidi, nonché in calore. Tali impianti potranno svolgere un ruolo particolarmente rilevante poiché forniscono flessibilità al sistema. Il dispacciamento dell'energia agli impianti P2X dovrà, quindi, essere guidato dalle esigenze del sistema elettrico, in modo tale da concentrare il funzionamento degli stessi (ossia il consumo di energia elettrica) nelle ore di maggiori eccedenze di produzione delle FRNP. Uno degli aspetti più critici dell'evoluzione dei sistemi elettrici verso quote rilevanti di FRNP riguarda infatti proprio la flessibilità del sistema, ossia la capacità di mantenere bilanciati produzione e consumi, anche a fronte di perturbazioni imprevedute. Il fabbisogno di flessibilità è in realtà un insieme articolato di necessità specifiche dalla scala temporale intra-oraria (guidata dalle incertezze sulle previsioni

della produzione da FRNP) fino alla scala annuale (guidata dalla variazione stagionale della domanda e della produzione fotovoltaica). Al 2050 gli impianti P2X risultano responsabili di un consumo di energia elettrica compreso tra 160 e 230 TWh e contribuiscono significativamente a portare il consumo elettrico a quantità circa doppia rispetto alla domanda attuale (600-700 TWh). In sostanza con l'aumento della capacità installata di FRNP ci saranno molte ore dell'anno in cui la produzione di elettricità supererà i consumi. Dopo aver garantito il bilanciamento orario giornaliero dei consumi finali elettrici (es. tramite batterie), l'ulteriore *overgeneration* potrà essere trasformata in calore, o in idrogeno e successivamente in combustibili sintetici a base di idrogeno e CO<sub>2</sub>. Dalle simulazioni effettuate per il 2050 sugli scenari di decarbonizzazione, risulta che, per poter dare la flessibilità necessaria al sistema elettrico, gli impianti P2X non potranno operare come impianti di base, ma solo nelle ore di elevata produzione da FRNP, raggiungendo un *load factor* di circa 2000 ore equivalenti all'anno. Altri elementi potranno concorrere a garantire flessibilità al sistema anche in funzione dello sviluppo delle necessarie infrastrutture. In particolare, un elemento di flessibilità importante potrà essere rappresentato dai veicoli elettrici dotati di sistemi di ricarica in grado di assorbire energia nelle ore più indicate e al contempo di sfruttare le batterie delle auto per fornire servizi alla rete, attraverso il cosiddetto *vehicle to grid*. Altre forme flessibili di utilizzo dell'energia elettrica potranno essere realizzate dallo sviluppo di sistemi di accumulo di calore stagionale per le reti di teleriscaldamento. Questi sistemi potranno accumulare calore prodotto dalle eccedenze di produzione nella stagione estiva per la fornitura di calore nel periodo invernale (tecnologia *Power to Heat*). In questo modo, oltre a fornire ulteriore flessibilità utile per il sistema elettrico, possono contribuire alla decarbonizzazione del settore civile. Va comunque rilevato che, nonostante questi profondi cambiamenti, a seconda delle effettive capacità di assorbimento del settore LULUCF e delle diverse configurazioni di consumo del vettore elettrico che dipenderanno dalle possibili evoluzioni dei settori di uso finale dell'energia, rimane la necessità di procedere alla cattura della CO<sub>2</sub> da generazione elettrica per una quantità compresa tra 10 e 25 Mt/anno. Per quanto riguarda raffinerie e cokerie, nello scenario di decarbonizzazione le emissioni si approssimano allo zero come diretta conseguenza dell'evoluzione dei settori cui sono più strettamente connesse, ovvero quello dei trasporti e della siderurgia. Riassumendo, negli scenari di decarbonizzazio-





**Figura 9 – Emissioni delle industrie energetiche nelle diverse configurazioni risultanti dagli scenari di decarbonizzazione**

ne si stima che le emissioni complessive del settore al 2050 possano arrivare fino ad un massimo di circa 17 MtCO<sub>2</sub>eq, che col ricorso alle tecnologie di cattura nel settore termoelettrico da abbinare anche alle centrali alimentate a bio combustibili, possono dare un contributo negativo alle emissioni di circa -10 MtCO<sub>2</sub>eq. La Figura 9 fornisce un quadro sintetico delle diverse configurazioni emissive risultanti dagli scenari di decarbonizzazione.

### 3.1.2. Industrie manifatturiere

Nello scenario di riferimento del settore industriale risultano confermate le tendenze in atto ed osservabili nella serie storica. Le emissioni dovute ai consumi energetici continuano a ridursi, grazie ad un aumento dell'efficienza, alla progressiva elettrificazione e all'abbandono, ove possibile, dei combustibili a maggiore contenuto di carbonio. Dato però il calo deciso dell'intensità emissiva già registratosi negli anni storici, non sono attese riduzioni particolarmente rilevanti. Le emissioni da processo risultano ancora più difficilmente contenibili, poiché richiedono un ripensamento dei processi produttivi e la sostituzione di materiali e sostanze utilizzate. Nello scenario di riferimento al 2050 le emissioni del settore risultano essere pari a poco meno di 60 MtCO<sub>2</sub>eq, mostrando quindi una riduzione di circa il 34% rispetto ai livelli del 2019. Ai fini della decarbonizzazione del settore sono quindi state prese in considerazione diverse opzioni tecnologiche, quali l'ulteriore crescita dell'efficienza dei processi produttivi, la progressiva elettrificazione degli usi finali, la transizione da combustibili fossili a combustibili ad emissioni nulle quali idrogeno, *e-fuels* (combustibili liquidi o gassosi di origine sintetica prodotti a partire da idro-

geno, ottenuto con processi di elettrolisi alimentati con elettricità da energia rinnovabile, e dalla cattura e utilizzo della CO<sub>2</sub> generata dalle bioenergie) e bioenergie, nonché il ricorso a sistemi di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> (CCS). Tali opzioni risultano avere un effetto positivo soprattutto sulle emissioni derivanti da combustione, mentre le emissioni derivanti dai processi si confermano decisamente difficili da abbattere. A seconda delle diverse configurazioni assunte dal sistema di produzione e trasformazione dell'energia (maggiore o minore disponibilità di idrogeno, biocombustibili, *e-fuels*), le emissioni da combustione possono ridursi ulteriormente in una percentuale compresa tra il 50% e il 70%, che può arrivare fino al 75-80% con il ricorso a sistemi di cattura della CO<sub>2</sub>. Le emissioni da processo subiscono una riduzione minore in parte riconducibile alla conversione ad idrogeno della produzione siderurgica ed in parte grazie all'effetto dell'evoluzione normativa e tecnologica sui gas fluorurati il cui contributo scende dall'attuale 50% a circa il 30%. Le emissioni rimanenti, di cui circa il 70% costituito da CO<sub>2</sub>, risultano abbattibili esclusivamente col ricorso a sistemi di cattura da adottarsi nel settore dei minerali non metalliferi. In questo modo le emissioni possono essere ridotte di circa il 38%. L'analisi ha quindi mostrato che, pur adottando le tecniche più avanzate note al momento, non è possibile arrivare alla completa decarbonizzazione del settore. Sarà quindi necessario garantire un adeguato livello di assorbimenti in altri settori al fine di garantire la neutralità emissiva complessiva. Anche per il settore industriale il quadro risultante è piuttosto complesso a seconda che siano adottate o meno soluzioni tecnologiche più complesse quali ad esempio

la produzione di acciaio attraverso i sistemi di riduzione diretta combinata all'impiego di idrogeno. Il grafico in Figura 10 sintetizza i risultati della modellizzazione per il settore al 2050 negli scenari di decarbonizzazione.

### 3.1.3. Trasporti

Lo scenario di riferimento è stato costruito considerando i seguenti elementi principali:

- è stato attribuito un rilievo prioritario alle politiche per il contenimento del fabbisogno di mobilità privata e all'incremento della mobilità ciclo-pedonale e della mobilità collettiva, in particolare su rotaia;
- per il trasporto merci è stata favorita l'intermodalità, con lo spostamento dal trasporto su strada a quello ferroviario;
- per il residuo fabbisogno di mobilità privata e merci, è stata promossa la diffusione di veicoli elettrici o alimentati con biocarburanti.

Su tali basi, si ottiene al 2050 un livello emissivo prossimo a 60 MtCO<sub>2</sub>eq, corrispondente ad una diminuzione del 45% delle emissioni rispetto allo stato attuale. Anche in questo scenario rimane preponderante il contributo del trasporto su strada rispetto alle altre modalità, sebbene in misura minore rispetto allo stato attuale. I consumi energetici sono ancora dominati dai carburanti fossili, con un contributo pari a circa il 65% da prodotti petroliferi e 12% da metano, mentre il rimanente 23% si deve ai biocarburanti e all'elettricità. Nello scenario di riferimento i consumi energetici del settore sono quindi ancora dominati dalle fonti fossili e nonostante il calo significativo i trasporti risultano il primo settore in termini di emissioni al 2050. Al 2050 si ottiene un parco circolante pari a circa

24 milioni di autovetture con una riduzione del 23% rispetto a quello del 2019. In particolare, il 63% delle automobili circolanti risulta ancora di tipo "tradizionale" (benzina/diesel/metano/GPL) mentre il restante contributo percentuale risulterebbe composto per il 36% da auto ad alimentazione elettrica/ibride *plug-in* e per l'1% ad idrogeno. La crescita dell'efficienza dei nuovi veicoli appare, di fatto, insufficiente se non vengono affrontati in maniera sostanziale e drastica il ricambio del parco circolante con nuove motorizzazioni e la riduzione della domanda di mobilità privata. Tenendo conto di questi risultati, per decarbonizzare il settore risulta necessario intervenire sulla domanda di trasporto riducendo le modalità di trasporto passeggeri che comportano consumi energetici (incentivando il telelavoro, e la mobilità ciclo-pedonale), promuovendo lo spostamento dal trasporto su gomma privato verso quello pubblico, in particolare ferroviario, riducendo la domanda di trasporto aereo. Per quanto riguarda il trasporto merci risulta necessario potenziare il trasporto ferroviario e ridurre drasticamente i viaggi a vuoto nel trasporto su gomma, fino a un livello pari al 10% al 2050. La decarbonizzazione non sarebbe tuttavia possibile senza un parallelo e profondo cambiamento delle tecnologie e dei vettori energetici utilizzati. Risulta infatti fondamentale incoraggiare una maggiore elettrificazione, fino a quasi al 50% dei veicoli, soprattutto nel comparto auto dove la quota di veicoli elettrici diverrebbe largamente maggioritaria (circa il 79%), mentre per la quota rimanente è necessario un ricorso crescente all'idrogeno e ai biocarburanti avanzati o ai carburanti di origine sintetica, soprattutto per i trasporti aerei e navali. In questo modo lo scenario di de-

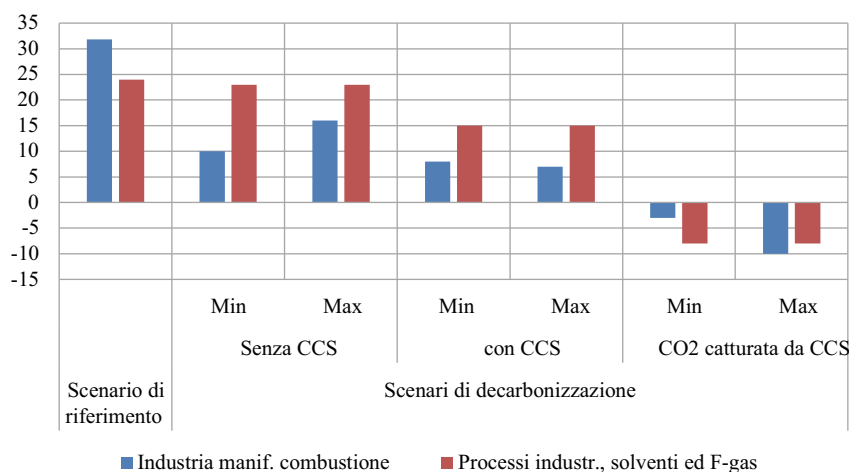


Figura 10 – Emissioni del settore industriale nelle diverse configurazioni risultanti dagli scenari di decarbonizzazione

carbonizzazione dimostra la concreta possibilità di azzerare le emissioni complessive del settore.

#### 3.1.4. Civile

Come per gli altri settori, anche per il civile nello scenario di riferimento è stato ipotizzato che fossero raggiunti tutti gli obiettivi del PNIEC al 2030 e che le dinamiche innescate dalle politiche in essere continuassero fino al 2050. In particolar modo è stato mantenuto costante il tasso di penetrazione delle fonti rinnovabili e il tasso di ristrutturazione degli edifici individuato dal PNIEC, pari all'1% annuo, di cui il 75% di ristrutturazione profonda. Come sottolineato nel paragrafo 2.2.4 la domanda di riscaldamento è legata anche all'andamento delle temperature, per questo motivo nel modello TIMES si è tenuto conto delle proiezioni delle anomalie climatiche elaborate dal Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) sulla base dello scenario RCP4.5 del Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (IPCC, 2014), che ipotizza un aumento delle temperature in linea con l'obiettivo dell'Accordo di Parigi. Considerato quanto sopra, il settore civile nello scenario di riferimento dovrebbe emettere al 2050 circa 36 MtCO<sub>2</sub>eq, contribuendo per circa il 17% alle emissioni totali di CO<sub>2</sub>eq. Per la completa decarbonizzazione del settore si è ipotizzata a partire dal 2030 una forte crescita dei tassi di ristrutturazione media annua degli edifici fino al 1,9-2%, di cui circa l'80% di ristrutturazione profonda. In tale quadro emerge una ulteriore elettrificazione dei consumi, fino a circa il 65% dei consumi finali, grazie in particolare all'utilizzo di pompe di calore sia per il raffrescamento che per il riscaldamento. Si tenga presente che nel 2019 l'elettricità incide per il 26% sui consumi finali del settore, mentre il gas pesa per circa il 59%. La quota rimanente di consumi dovrà essere soddisfatta dall' utilizzo di idrogeno, *e-fuel* sintetici e bioenergie. Qualora si riuscissero ad attuare tutte le misure il settore civile nello scenario decarbonizzazione vedrebbe azzerate le proprie emissioni al 2050. Per ottenere tali risultati è necessario ipotizzare che al 2050 nel settore residenziale almeno un terzo delle abitazioni sia costituito da edifici nuovi o completamente ristrutturati.

#### 3.1.5. Agricoltura

Nella stima degli scenari è stata ipotizzata la diffusione di possibili misure di riduzione delle emissioni di ammoniaca e gas serra al 2030. Le misure considerate sono relative ad interventi sull'alimentazione degli animali, sulla tipologia dei ricoveri, sullo stoccaggio (incluso il trattamento dei

reflui zootecnici negli impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas) e sullo spandimento delle deiezioni zootecniche di bovini, suini e avicoli, secondo lo studio del Centro Ricerche Produzioni Animali effettuato per conto di ISPRA nel 2018 (CRPA, 2018). Le misure considerate sono state valutate prendendo in considerazione quanto previsto dalla Direttiva sulle emissioni industriali, dalla Direttiva nitrati, dai programmi di azione nitrati, dai piani regionali per la qualità dell'aria e nei programmi di sviluppo rurale delle regioni padane. Tali misure sono anche contenute nelle "Linee guida per la riduzione delle emissioni in atmosfera provenienti dalle attività agricole e zootecniche" (MIPAAF, 2016). Analoghe misure di riduzione sono anche state incluse nel "Codice nazionale indicativo di buone pratiche agricole per il controllo delle emissioni di ammoniaca", predisposto dal MIPAAF in allegato al Programma Nazionale di Controllo dell'Inquinamento Atmosferico redatto nell'ambito della Direttiva 2016/2284/UE sui tetti nazionali di emissione. Per l'elaborazione degli scenari del settore agricoltura, il CMCC ha fornito i dati relativi alle variazioni delle temperature medie e alle variazioni delle rese cerealicole (di frumento tenero/duro e mais) nello scenario climatico RCP 4.5 per il trentennio 2036-2065, rispetto al periodo 1976-2005 per le temperature e 1981-2010 per le rese cerealicole. Sulla base di tali dati, è stata calcolata l'incidenza delle temperature sulle emissioni derivanti dalla gestione dei reflui zootecnici e le variazioni delle rese che modifichino le quantità dei fertilizzanti sintetici necessari.

Senza considerare ulteriori misure per gli anni successivi al 2030 fino al 2050, le emissioni dello scenario di riferimento per il settore sono pari a circa 27,8 MtCO<sub>2</sub>eq al 2050 (Figura 11).

Per lo scenario di decarbonizzazione, è stata ipotizzata a partire dal 2020 una maggiore diffusione delle stesse misure di riduzione delle emissioni considerate nello scenario di riferimento. In generale, per quanto concerne la gestione dei reflui zootecnici nei ricoveri e negli stoccaggi è stata ipotizzata la diffusione di misure che riguardano i sistemi di rimozione rapida del liquame, il rinnovo frequente delle lettiere, un'adeguata climatizzazione dei ricoveri (coibentazione del tetto e/o ventilazione naturale controllata automaticamente), la disidratazione della pollina, la sostituzione dei bacini in terra con vasche a pareti verticali con basso rapporto superficie volume; la copertura degli stoccaggi con materiali naturali (paglia, stocchi di mais, oli vege-

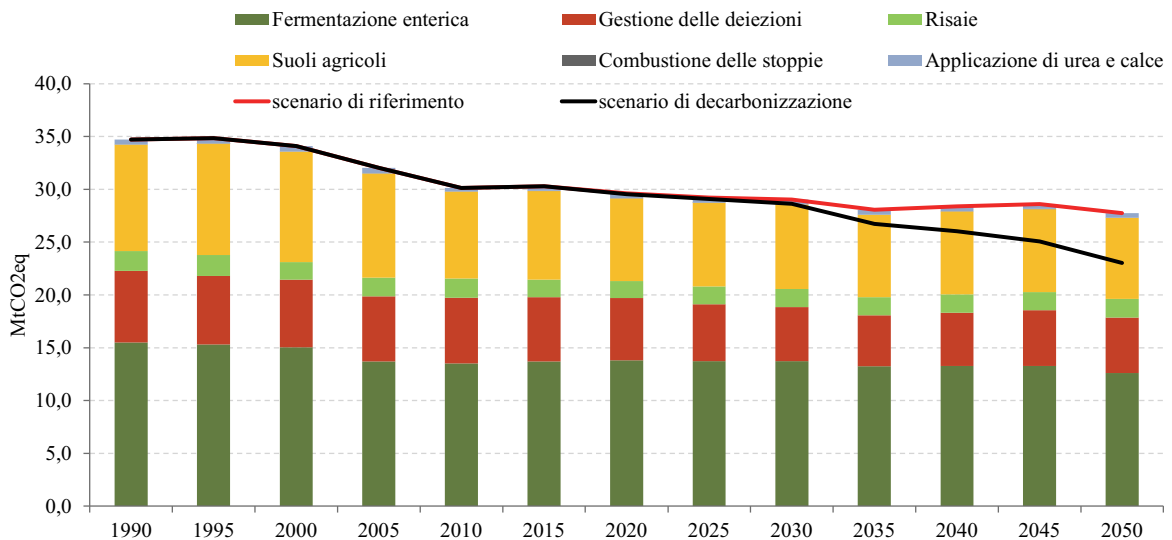


Figura 11 – Settore Agricoltura – Scenari di riferimento e decarbonizzazione

tali, argilla espansa), o con plastici galleggianti o con coperture solide e non permeabili. Per quanto riguarda lo spandimento dei reflui zootecnici, la riduzione delle emissioni può essere essenzialmente ottenuta riducendo la superficie o il tempo di contatto fra gli effluenti e l'atmosfera. Per gli effluenti liquidi, è stata considerata la diffusione dell'iniezione diretta (profonda o poco profonda), lo spandimento rasoterra in bande con tubi di convogliamento, eventualmente attrezzati con appositi deflettori (trailing hose e trailing shoe) e le tecniche di distribuzione di liquami molto diluiti da frazioni chiarificate (ad es. fertirrigazione); per gli effluenti solidi/palabili, sono state considerate l'incorporazione a breve distanza dallo spandimento. Tali tecniche di riduzione delle emissioni sono descritte e analizzate nei rapporti del JRC (IRPP Bref, 2017) e dell'UNECE (Bittman et al., 2014).

Tra le tecniche di riduzione delle emissioni da stoccaggio delle deiezioni, è stato inoltre considerato il recupero di biogas prodotto dalla digestione anaerobica delle deiezioni animali. Le percentuali di deiezioni avviate ai digestori anaerobici sono state assunte pari al 90% rispetto alle deiezioni totali prodotte da bovini e suini e pari all'80% di quelle avicole. In questo scenario, inoltre, per quanto riguarda le emissioni di metano da fermentazione enterica delle vacche da latte, sono stati modificati, a partire dal 2035, i valori relativi alla digeribilità della dieta dell'animale e alla percentuale di energia persa e trasformata in metano. La digeribilità rappresenta la porzione di energia lorda nel mangime non escreto nelle feci ed è comunemente espressa in percentuale dell'energia lorda del mangime. Maggiore è la digeribilità della dieta, minore sarà la quantità

di sostanza secca che dovrà assumere l'animale per il mantenimento, per l'allattamento e la gravidanza, secondo le linee guida IPCC per gli inventari nazionali dei gas serra (IPCC, 2006) e minore sarà la quota di sostanza secca convertita in metano e persa. Per quanto riguarda le emissioni di protossido di azoto dai suoli, è stata stimata una riduzione complessiva tra il 2017 e il 2050 del consumo di azoto contenuto nei fertilizzanti sintetici pari a circa il 22%. Tale percentuale è stata ottenuta considerando una combinazione di due fattori: da una parte la diffusione delle tecniche dell'Agricoltura di Precisione (AdP), dall'altra la riduzione negli anni delle superfici e delle produzioni agricole. Per quanto riguarda l'AdP, è stata stimata una riduzione di consumo di azoto pari all'8% circa nel 2050 rispetto al 2017, dato dal prodotto tra le percentuali del 16% (che corrisponde ad una riduzione del consumo di azoto dovuta alla diffusione delle tecniche dell'AdP) e del 50% (che corrisponde alla percentuale della Superficie Agricola Utilizzata (SAU) destinata ai seminativi), assumendo in maniera conservativa che tali tecniche si diffondano solamente su una parte della SAU. Per quanto riguarda l'AdP, si ipotizza la diffusione di tecniche che consentono di ridurre gli input produttivi (in particolare le macchine spandiconcime), rispetto alle tecniche convenzionali (Bisaglia, 2018). Per quanto concerne superfici e produzioni agricole, è stata stimata una riduzione di consumo di azoto del 14% nel 2050 rispetto al 2017. Sempre per quanto riguarda le emissioni di protossido di azoto dai suoli, è stata assunta una riduzione del 75% dell'azoto lisciviato, calcolata sulla quantità di azoto da fertilizzanti sintetici applicata al suolo; tale riduzione può essere ottenuta attraverso

so l'applicazione dell'AdP (MIPAAF, 2017). Secondo lo scenario di decarbonizzazione appena descritto, le emissioni del settore nel 2050 risulterebbero inferiori a quelle stimate nello scenario di riferimento del 17%, come riportato in Figura 11. Questo dato è il risultato della riduzione delle emissioni delle categorie più importanti del settore, che sono la fermentazione enterica, i suoli agricoli e lo stoccaggio e trattamento delle deiezioni. Rispetto allo scenario di riferimento, la riduzione complessiva di queste categorie è stata stimata pari a 10,4%, 6,3% e 54,9%, rispettivamente.

### 3.1.6. LULUCF

Informazioni dettagliate sui metodi, parametri e fattori di emissioni utilizzati per il processo di stima del settore LULUCF sono riportati nel *National Inventory Report* (NIR) pubblicato annualmente da ISPRA (ISPRA, 2021). In particolare, gli assorbimenti forestali sono stati stimati tramite il modello For-est, descritto nell'annesso 14 del NIR. Le proiezioni di emissioni ed assorbimenti al 2050 sono state effettuate, per ogni categoria di uso del suolo, suddivisa in "land remaining land" e "land converted to other land", utilizzando un fattore di carbon stock change derivato dal rapporto tra la media degli assorbimenti e delle emissioni di gas serra e la media delle superfici nel periodo 2012-2017. Tenendo conto di queste proiezioni di uso e variazioni di uso del suolo e, soprattutto, dei modelli climatici, nello scenario di riferimento, è stato incluso anche un aumento significativo di frequenza/intensità

degli incendi con la superficie interessata che potrebbe quasi raddoppiare rispetto alla media di lungo periodo. Gli effetti sul piano emissivo risultano significativi, con sensibili incrementi delle emissioni. Su queste basi, lo scenario di riferimento restituisce un quadro con assorbimenti netti poco inferiori a 25 MtCO<sub>2</sub>eq, in riduzione rispetto al livello attuale (Figura 12). Questo risultato riflette, da un lato, un incremento emissivo nelle superfici agricole e foraggere (in particolare, per effetto degli incendi) contrastato dal sostanziale mantenimento della capacità di assorbimento forestale e dall'arresto dell'espansione urbana. Le opzioni di decarbonizzazione considerate sono mirate ad incrementare gli assorbimenti netti, attraverso un miglioramento delle pratiche agricole e di uso del suolo con l'applicazione crescente di tecniche virtuose sul piano emissivo, quali: minima lavorazione del suolo, concimazione organica dei suoli, pratiche conservative e metodi di coltivazioni sostenibili, come l'agricoltura biologica e integrata, le pratiche conservative e il "set aside", così come definite nel cap. 6.3 del NIR. Determinante risulta anche l'azione rafforzata di prevenzione degli incendi, con la realizzazione di infrastrutture di protezione e sistemi di allerta. L'applicazione diffusa di tali sistemi sul territorio dovrebbe consentire di mantenere al 2050 una superficie percorsa da incendi pari a quella media registrata nel periodo 2008-2017. Su queste basi, nello scenario di decarbonizzazione risulta che, al 2050, il settore LULUCF può generare assorbimenti netti per quasi 45 MtCO<sub>2</sub>eq (Figura 12).

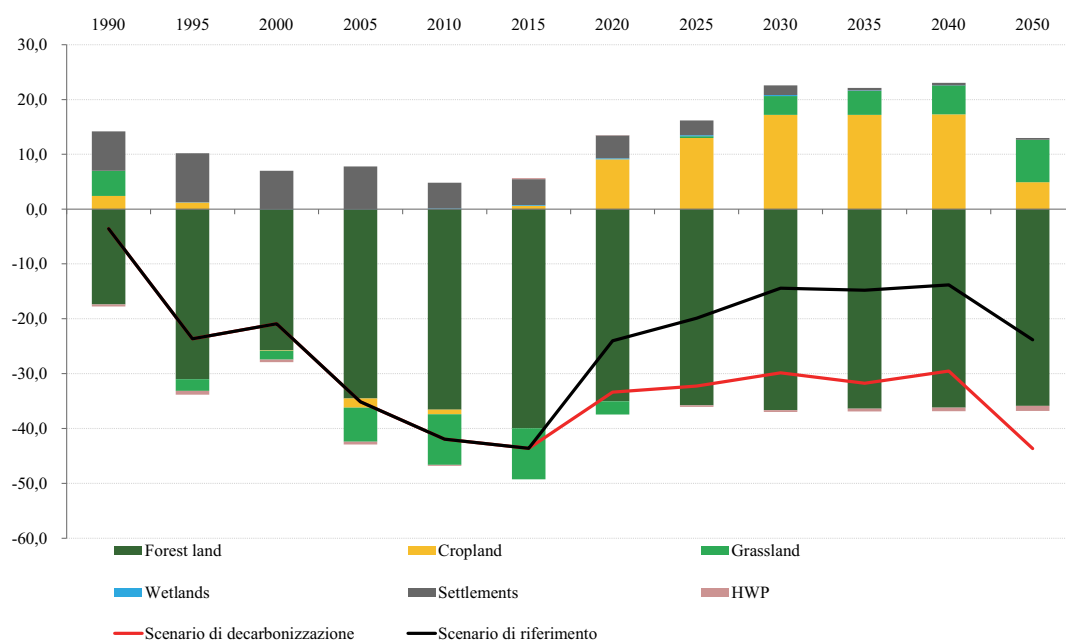


Figura 12 – Scenari di riferimento e decarbonizzazione nel settore LULUCF

#### 4. CONCLUSIONI

Secondo l'ultimo NIR, tra il 1990 e il 2019 le emissioni di gas serra si sono ridotte del 19,4%, passando da 519 a 418 MtCO<sub>2</sub>eq. Aggiungendo gli assorbimenti netti del settore LULUCF, il totale delle emissioni scende a circa 377 MtCO<sub>2</sub>eq. Al 2050, secondo lo scenario di riferimento potremo attenderci emissioni totali pari a circa 220 MtCO<sub>2</sub>eq e circa 30 MtCO<sub>2</sub>eq di assorbimenti (Figura 13). Tutti i risultati concordano nell'individuare le emissioni derivanti da processi industriali ed attività agricole particolarmente difficili da abbattere. I limiti sono intrinseci a tali settori. Per l'industria è infatti necessario individuare nuovi processi e sarà necessario ripensare i modelli di produzione e consumo anche nell'ottica di una sempre crescente circolarizzazione dell'economia. I livelli di produzione attuali non sono sostenibili nel lungo periodo con le modalità attuali, come anche evidenziato dal nuovo piano d'azione per l'economia circolare della Commissione Europea. Per quanto riguarda l'agricoltura, invece, va tenuto conto che le tecniche di produzione, sia nelle coltivazioni che negli allevamenti, devono confrontarsi con i vincoli imposti dalle caratteristiche biologiche di piante ed animali che forniscono i prodotti per l'alimentazione umana. Meno problematico appare invece intervenire sulle emissioni

derivanti da combustione, sebbene al momento queste rappresentino circa l'80% del totale dei GHG. In questo ambito grazie alla crescita delle fonti rinnovabili nella produzione elettrica, al progressivo abbandono dei prodotti petroliferi nei trasporti, all'aumento di efficienza e all'elettrificazione in ambito sia industriale che civile (con la progressiva riqualificazione degli edifici e la diffusione delle pompe di calore), le emissioni, se accompagnate da idonei sistemi di cattura della CO<sub>2</sub>, possono addirittura diventare negative. È ragionevole attendersi che sarà necessario catturare annualmente una quantità stimata all'incirca tra 20 e 40 MtCO<sub>2</sub>eq. È importante sottolineare che, nell'approccio seguito per il calcolo degli scenari, il ricorso alla CCS è stato preso in considerazione solo in via residuale, quando altre opzioni non erano in grado di garantire il raggiungimento della neutralità emissiva. La quantità di CO<sub>2</sub> effettivamente avviata a CCS dipenderà ovviamente dalle modalità produttive, dall'emergere di nuove soluzioni tecnologiche ed anche dai cambiamenti dello stile di vita dei cittadini. Per minimizzare il ricorso alla CCS, pur considerando l'effettiva realizzazione di tutto quanto ipotizzato, al fine di raggiungere l'obiettivo della neutralità emissiva appare comunque imprescindibile il contributo degli assorbimenti del settore LULUCF per una quantità pari ad almeno 45 MtCO<sub>2</sub>eq. Sebbene in anni

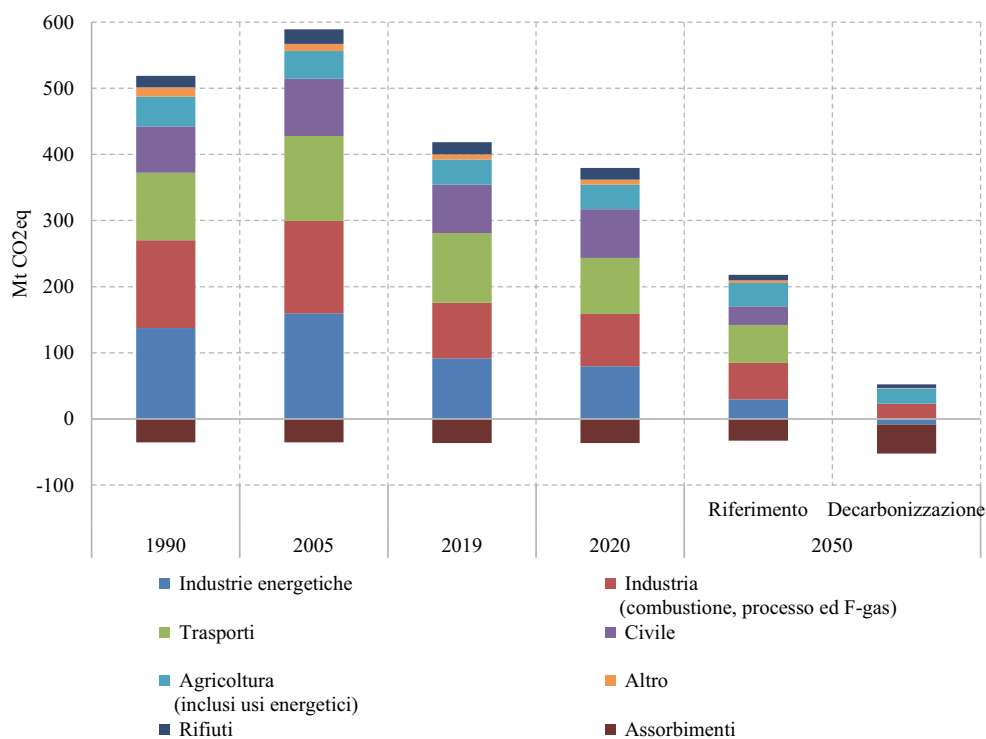


Figura 13 – Emissioni totali e assorbimenti di gas serra nei dati storici, preliminare 2020, nello scenario di riferimento al 2050 e nello scenario di decarbonizzazione al 2050

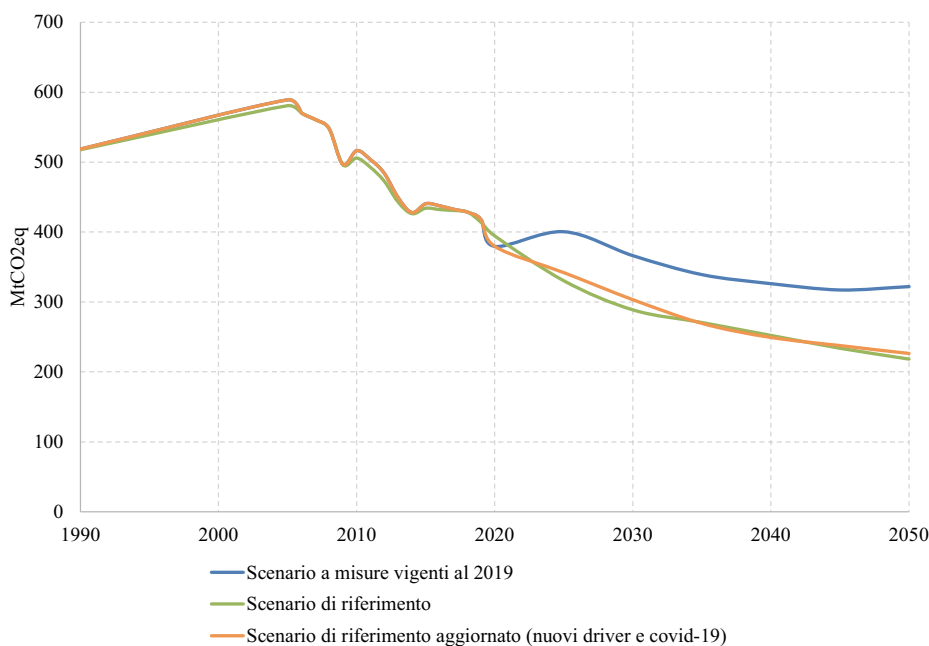


Figura 14 – Confronto tra le emissioni totali di gas serra nello scenario di riferimento, nello scenario di riferimento aggiornato post pandemia e nello scenario a misure vigenti al 2019

recenti tale valore sia stato già raggiunto, affinché ciò possa ripetersi ed affermarsi con continuità negli anni a venire, anche alla luce dei cambiamenti climatici già in atto e degli attuali tassi di consumo di suolo, è necessario adottare adeguate politiche di contrasto agli incendi e di gestione sostenibile del suolo.

Sintetizzando si può affermare che per raggiungere la neutralità emissiva è necessario:

- ridurre la domanda finale di energia, in particolare nel settore dei trasporti (riduzione della domanda di mobilità privata) e nel settore civile;
- modificare il *mix* energetico a favore delle fonti rinnovabili (FER), coniugate a una profonda elettrificazione degli usi finali e alla produzione di idrogeno;
- aumentare gli assorbimenti ottenuti attraverso la gestione forestale sostenibile, adeguate pratiche agricole, l'arresto del consumo di suolo e il contrasto agli incendi;
- ripensare i processi industriali le cui emissioni non appaiono altrimenti contenibili;
- adottare pratiche agricole e zootecniche mirate;
- ricorrere a forme di CCS-CCU per la quota di emissioni eccedente la neutralità emissiva.

Nel grafico in Figura 14, è riportata una stima preliminare delle emissioni del 2020 in considerazione dei recenti sviluppi dovuti alla pandemia di COVID-19. Nel corso del 2021, al fine di adempiere agli obblighi di comunicazione precedentemente stabiliti Regolamento (UE) n. 525/2013

relativo a un meccanismo di monitoraggio e comunicazione delle emissioni di gas a effetto serra e ora ricompresi nel Regolamento *Governance*, ISPRA ha aggiornato gli scenari emissivi tenendo conto dell'aggiornamento di tutti i *driver* come conseguenza del nuovo quadro macroeconomico e demografico europeo e nazionale e dell'impatto della pandemia. Per tale aggiornamento è stata utilizzata la medesima metodologia descritta nel presente lavoro.

Come si può notare, sul lungo periodo gli effetti dell'attuale situazione pandemica sono sostanzialmente trascurabili, a patto che si dia tempestiva attuazione ai pacchetti di misure necessari al raggiungimento degli obiettivi del PNIEC. Da questa prima analisi emerge anche che, dato il nuovo quadro macroeconomico, l'insieme delle misure attualmente considerate nello scenario di riferimento, sebbene non del tutto sufficiente a raggiungere il livello di ambizione richiesto dal pacchetto europeo "*fit for 55*", pone l'Italia nella direzione giusta per raggiungere i nuovi obiettivi al 2030 che saranno stabiliti nei negoziati attualmente in corso nell'Unione Europea. D'altro canto, è evidente che in assenza di una piena attuazione di misure adeguate, la ripresa delle attività produttive ed in particolare del trasporto privato può determinare un *trend* di riduzione sensibilmente meno marcato rispetto a quanto attualmente ipotizzato e sul lungo periodo allontanarci dal raggiungimento degli impegni europei.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Alexandratos N. and J. Bruinsma, 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO.
- AA.VV., 2019. Piano Nazionale di contabilizzazione forestale. Ministry for the Environment, Land and Sea, 2019 [www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/nfap\\_final\\_resubmission\\_2019\\_clean.pdf](http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/nfap_final_resubmission_2019_clean.pdf)
- AA.VV., 2020. Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), [www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC\\_finale\\_17012020.pdf](http://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf)
- AA.VV., 2021. Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra. [www.minambiente.it/sites/default/files/lts\\_gennaio\\_2021.pdf](http://www.minambiente.it/sites/default/files/lts_gennaio_2021.pdf)
- Bisaglia, 2018. Agricoltura di precisione in Italia: un'opportunità di aggiornamento delle agrotecniche, di sviluppo professionale e di efficienza del settore" pubblicato su *Agri-regionieuropa* anno 14 n°53, Giugno 2018. Disponibile su: <https://agrireregionieuropa.univpm.it/it/content/articolo/31/53/agricoltura-di-precisione-italia-unopportunita-di-aggiornamento-delle>
- Bittman et al., 2014. Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Disponibile su: [http://www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/AGD\\_final\\_file.pdf](http://www.clrtap-tfrn.org/sites/clrtap-tfrn.org/files/documents/AGD_final_file.pdf)
- Capros, 2017. Prometheus model description, E3MLab/ICCS at National Technical University of Athens. Disponibile su: [http://www.e3mlab.eu/e3mlab/PROMETHEUS%20Manual/The%20PROMETHEUS%20MODEL\\_2017.pdf](http://www.e3mlab.eu/e3mlab/PROMETHEUS%20Manual/The%20PROMETHEUS%20MODEL_2017.pdf)
- Commissione Europea, 2016. EU Reference Scenario 2016: Energy, transport, GHG emissions and trends to 2050. Disponibile su: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft\\_publication\\_REF2016\\_v13.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf)
- Commissione Europea, 2018a. A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. COM(2018) 773.
- Commissione Europea, 2018b. In-depth analysis in support of the commission communication COM(2018) 773. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy.
- CRPA, 2018. Studio per la valutazione degli effetti sulle emissioni delle trasformazioni in corso nel settore degli allevamenti, a cura di CRPA, Reggio Emilia, 2018.
- D'Elia I. e Peschi E., 2013. Lo scenario emissivo nazionale nella negoziazione internazionale. ENEA. RT/2013/10/ENEA
- D'Elia I. e Peschi E., 2016. How national integrated air quality models can be used in defining environmental policies: the revision of the nec directive. ENEA. RT/2016/30/ENEA. Disponibile su: <https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/6758/507/RT-2016-30-ENEA.pdf>
- De Vita A. et al., 2020. ASSET Study on Technology pathways in decarbonisation scenarios. Disponibile su: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/599a1d8e-509a-11eb-b59f-01aa75ed71a1>
- DG ECFIN, 2018. The 2018 Ageing Report. Economic & Budgetary Projections for the 28 EU Member States (2016-2070). Disponibile su: [https://ec.europa.eu/info/publications/economy-finance/2018-ageing-report-economic-and-budgetary-projections-eu-member-states-2016-2070\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/economy-finance/2018-ageing-report-economic-and-budgetary-projections-eu-member-states-2016-2070_en)
- EUROSTAT, 2019a. Statistiche sulla produzione di latte vaccino. Disponibile su: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- EUROSTAT, 2019b. Statistiche sulla produzione e consumo di uova. Disponibile su: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=apro\\_ec\\_strhen&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=apro_ec_strhen&lang=en)
- FAO, 2019. Statistiche sulla produzione e consumo di uova. Disponibile su: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- FAO, 2018. Global Agriculture Perspectives System (GAPS) in FAO. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Rome. <http://www.fao.org/publications/fofa/en/>
- Fertilizers Europe, 2019. Forecast of food, farming and fertilizer use in the European Union 2018-2028. Disponibile su: [www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Forecast\\_2018\\_Web.pdf](http://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Forecast_2018_Web.pdf)
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Disponibile su: [www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html)
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponibile su: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)
- IRPP Bref, 2017. A cura di: Germán Giner Santonja, Konstantinos Georgitzikis, Bianca Maria Scalet, Paolo Montobbio, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho; Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs; EUR 28674 EN; doi:10.2760/020485. Disponibile su: [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC107189\\_IRPP\\_Bref\\_2017\\_published.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC107189_IRPP_Bref_2017_published.pdf)
- ISMEA, 2019a. Consumi alimentari delle famiglie italiane. Disponibile su: <http://www.ismeamercati.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/3562>
- ISMEA, 2019b. Statistiche sui consumi di carne. Disponibile su: <http://www.ismeamercati.it/carni>
- ISPRA, 2021. National Inventory Report 2021 – Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2019. ISPRA Rapporti 341/2021. Disponibile su: [www.isprambiente.gov.it/resol-veuid/73e0f2b9fe454e7cac210c71341eb15f](http://www.isprambiente.gov.it/resol-veuid/73e0f2b9fe454e7cac210c71341eb15f)
- Mantzou, L., Wiesenthal, T., Neuwahl, F. and Rozsai, M., 2019. The POTEnCIA Central scenario: an EU energy outlook to 2050, Publications Office of the European Union, Luxembourg. Disponibile su: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a3c2af84-facf-11e9-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>
- MIPAAF, 2016. Linee guida agricole per la riduzione delle emissioni di ammoniacale nel Bacino Padano. Disponibile su: [www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/ID-Pagina/15873](http://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/ID-Pagina/15873)
- MIPAAF, 2017. Linee guida per lo sviluppo dell'agricoltura di precisione in Italia. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. Disponibile su: [www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/12069](http://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/12069)
- MISE, 2020. Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima. Ministero dello Sviluppo Economico. Disponibile su: [www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC\\_finale\\_17012020.pdf](http://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf)



# ANALISI SPERIMENTALE SULLA DEGRADAZIONE ANAEROBICA DI SACCHETTI IN CARTA O IN BIOPLASTICA PER LA RACCOLTA DEL RIFIUTO ALIMENTARE

Valeria Venturelli\*, Giovanni Dolci, Arianna Catenacci, Francesca Malpei, Mario Grosso

Politecnico di Milano, DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Sez. Ambientale.

**Sommario** – In Italia, la quantità di bioplastiche compostabili (conformi allo standard tecnico UNI EN 13432:2002) raccolte con il rifiuto organico è in costante crescita (+210% negli ultimi tre anni). La legislazione italiana prevede che questi manufatti debbano essere accettati da tutti gli impianti di trattamento biologico, siano essi aerobici o anaerobici. Tuttavia, lo standard richiede la sola valutazione della degradabilità aerobica, mentre non è generalmente necessario testare il comportamento in condizioni anaerobiche. Questo aspetto è analizzato nel presente articolo, con la valutazione della degradabilità anaerobica di uno specifico manufatto in bioplastica, ovvero i sacchetti utilizzati per la raccolta del rifiuto alimentare, il cui utilizzo è ampiamente diffuso in Italia. In dettaglio, sono state eseguite prove di biometanazione (BMP – Biochemical Methane Potential) in condizioni termofile su quattro tipologie di sacchetti in bioplastica, includendo sia quelli specificamente progettati per la raccolta del rifiuto alimentare sia gli shopper, che possono essere riutilizzati allo stesso scopo dopo il primo utilizzo per il trasporto della spesa. Le prove sono state effettuate confrontando il comportamento dei sacchetti in bioplastica con quello di un sacchetto in carta specificamente realizzato per la raccolta del rifiuto alimentare. I risultati delle prove indicano una buona degradabilità (>71%) dei sacchetti in bioplastica. Tuttavia, essi sono caratterizzati da particolari cinetiche di degradazione, con un andamento a gradini o una prolungata fase di latenza iniziale, che ne limitano la conversione in metano nel caso di alimentazione continua. Al contrario, prospettive molto interessanti sono offerte dal sacchetto in carta, che mostra, in aggiunta a una buona degradabilità anaerobica (74%), una cinetica di degradazione molto rapida.

**Parole chiave:** prove di BMP, sacchetto per la raccolta del rifiuto alimentare, carta, bioplastica, digestione anaerobica.

## EVALUATION OF THE ANAEROBIC DEGRADATION OF FOOD WASTE COLLECTION BAGS MADE OF PAPER OR BIOPLASTIC

**Abstract** – In Italy, the amount of compostable bioplastics (fulfilling the technical standard UNI EN 13432:2002) collected with the organic waste is constantly growing (+210% in the last three years). The Italian market of biodegradable and compostable bioplastics was originally driven by bags used for food waste collection, for shopping at the groceries and for containing loose foods like fruit and vegetables at the supermarket. In recent years there was a robust growth

of the sector of other packages as well as rigid items such as disposable tableware. According to the Italian legislation, these items must be accepted by all biological treatment plants (both aerobic and anaerobic). Anyway, the standard UNI EN 13432:2002 requires only the assessment of the aerobic degradability, while it is generally not necessary to test the behaviour under anaerobic conditions. This aspect is in contrast with the increasing diffusion of anaerobic digestion plants observed in recent years. In particular, in Italy, about 2.9 million tonnes of food waste were sent to anaerobic digestion or integrated (anaerobic/aerobic) plants in the year 2019, compared to only 1.7 million tonnes sent to composting. For this reason, the present research was performed with the aim to assess the anaerobic degradability of bioplastic bags for the food waste collection (typically employed in Italy for this purpose) at the laboratory scale. In detail, BMP (Biochemical Methane Potential) tests were performed under thermophilic conditions on four commercial types of bioplastic bags, including both bags specifically designed for the food waste collection and shoppers, that can be reused for the same purpose after being used for the overall shop at the supermarkets. Both types are made with the Mater-Bi® polymer, a compostable bioplastic according to the UNI EN 13432:2002 standard, whose composition is 70% polybutylene adipate terephthalate, 20% starch, and 10% additives. The tests were performed comparing the behaviour of bioplastic bags to that of a paper bag specifically designed for the food waste collection. Results of BMP tests indicated a maximum anaerobic degradability for bioplastic bags in the range 71% – 93%, resulting for three out of the four tested bags higher than that of the paper bag, equal to 74%. As regards the kinetic behaviour, three out of the four bioplastic bags showed stepped degradation trends, similarly to what typically observed for the anaerobic degradation of starch-based biopolymers. The stepped trend was modelled by means of the combination of two Gompertz models. The degradation kinetic of the fourth bioplastic bag, described by means of a Gompertz model, was also peculiar, since it showed a lag phase lasting up to more than 10 days. As regards the examined paper bag, the kinetic described by a Gompertz model was very fast and characterised by a very short lag phase (about 1 day). The degradation kinetic modelling was useful to estimate the anaerobic degradability of bags when digested under continuous feeding conditions (i.e. conditions similar to the real management at full-scale anaerobic digestion plants). The particular degradation kinetics of bioplastic bags limit their conversion into methane in these conditions. In particular, assuming an anaerobic digestion process characterised by a hydraulic retention time of 21 days (a typical value in full-scale digesters treating the food waste

\* Per contatti: Via Golgi, 39. 20133, Milano, 20133.  
Tel. 02.23996418. E-mail: valeria.venturelli@mail.polimi.it

under thermophilic conditions), the degradability (in the range 44% – 69%) resulted sensibly lower than that of the examined paper bag, equal to 70%, in contrast to what observed in terms of maximum degradabilities.

**Keywords:** *BMP tests, food waste collection bag, paper, bioplastic, anaerobic digestion.*

*Ricevuto il 7-6-2021. Modifiche sostanziali richieste il 7-9-2021. Modifiche sostanziali richieste il 27-9-2021. Accettazione il 7-10-2021.*

## 1. INTRODUZIONE

Le bioplastiche costituiscono una categoria di polimeri caratterizzati da biodegradabilità, biogenicità o da entrambe le proprietà. La prima, riconosciuta in accordo con gli standard europei UNI EN 13432:2002 per gli imballaggi e UNI EN 14995:2007 per gli altri manufatti (UNI EN, 2002; UNI EN, 2007), descrive la capacità del materiale di essere degradato da parte di microorganismi, mentre la seconda indica la rinnovabilità della materia prima di cui il materiale è composto.

In Italia, il mercato delle bioplastiche biodegradabili e compostabili deve il suo primo sviluppo ai sacchetti per la raccolta del rifiuto organico domestico e a quelli monouso per il trasporto a casa della spesa, in seguito all'emanazione di normative che ne hanno imposto l'utilizzo in luogo dei sacchetti in plastica tradizionale (Decreto Legislativo 205/2010, Legge 28 del 24 marzo 2012).

Successivamente, la Legge 123 del 13 agosto 2017 ha esteso l'obbligo di utilizzo di manufatti biodegradabili e compostabili ai sacchetti ultraleggeri (spessore inferiore a 15 micrometri), includendo quelli forniti come imballaggio primario per alimenti sfusi (ad esempio nei supermercati per i reparti ortofrutta). Recente è inoltre l'immissione sul mercato di imballaggi in bioplastica biodegradabile e compostabile (soprattutto nel settore alimentare) e di manufatti monouso, tra cui si annoverano principalmente le stoviglie.

La progressiva introduzione di tali manufatti ha portato a un consistente incremento della quantità di rifiuti in bioplastica compostabile conferiti con il rifiuto organico. Tale materiale costituisce attualmente il 3,9% in peso del rifiuto organico (periodo 2019/2020), in consistente crescita rispetto all'1,5% del periodo 2016/2017 (CIC-COREPLA, 2020).

In merito al destino dei manufatti in bioplastica quando questi sono conferiti con il rifiuto organico agli impianti di trattamento biologici, è importante sottolineare che si riscontrano alcune criticità primariamente associate ai pretrattamenti meccanici utili alla rimozione degli elementi in plasti-

ca tradizionale, incompatibili con i processi biologici. In particolare, gran parte dei manufatti in bioplastica viene scartata (Utilitalia, 2020) congiuntamente alla plastica tradizionale, che risulta presente ancora in quantità consistenti nel rifiuto organico (CIC-COREPLA, 2020), confluendo nel flusso di scarto destinato a recupero energetico o spesso tutt'ora inviato a smaltimento in discarica. Questo è particolarmente rilevante nei pretrattamenti degli impianti di digestione anaerobica (Utilitalia, 2020) per i quali, negli ultimi anni, è stata rilevata una sempre più crescente diffusione. Infatti, considerando la sola frazione umida del rifiuto organico, costituita principalmente da scarti e residui alimentari e quindi nominata in seguito come rifiuto alimentare, nel 2019, 2,9 milioni di tonnellate sono state trattate in impianti di digestione anaerobica o integrati (digestione anaerobica seguita da post-compostaggio), rispetto alle sole 1,7 milioni di tonnellate conferite agli impianti di compostaggio (ISPRA, 2020).

I problemi e i costi associati allo scarto dei manufatti in bioplastica sono amplificati dal fatto che parte del rifiuto organico rimane adeso ai materiali scartati, che quindi esercitano un effetto di trascinamento sul rifiuto. Pertanto, si osserva un aumento rilevante degli scarti, che risultano fino a quattro volte superiori rispetto ai materiali da separare (Utilitalia, 2020; CIC-COREPLA, 2020). L'effetto di trascinamento del rifiuto organico va quindi a incrementare il flusso di scarto che deve essere trasportato e smaltito, aumentando i costi e gli impatti ambientali associati a tali attività. In aggiunta, poiché il rifiuto organico rimosso non prende parte al processo biologico, si ha una diminuzione della sua efficienza che, per il processo di digestione anaerobica, corrisponde a una minore produzione di biogas e quindi di biometano.

Nonostante tali criticità, il conferimento delle bioplastiche compostabili con il rifiuto organico è stato confermato dalle modifiche al Decreto Legislativo 152/2006, recentemente introdotte con il Decreto Legislativo 116/2020. Pertanto, tali manufatti dovranno sempre essere accettati da tutti gli impianti biologici, siano essi aerobici o anaerobici. Nell'ipotesi che in futuro i pretrattamenti degli impianti biologici siano capaci di discernere fra manufatti in plastica e in bioplastica (o che i primi non vengano più conferiti con il rifiuto organico), e che più in generale le bioplastiche siano compatibili con le configurazioni impiantistiche, è necessario che queste ultime siano degradabili nei differenti processi biologici. In base allo standard tecnico

UNI EN 13432:2002 (UNI EN, 2002), è d'obbligo effettuare prove di degradabilità aerobica dei materiali, mentre non è necessario testare anche la biodegradabilità e la disintegrabilità anaerobica a meno di casi particolari (non ulteriormente specificati). In tali condizioni, lo standard impone che la percentuale di biodegradazione sia almeno il 50% in termini di produzione di biogas rispetto al valore massimo in un periodo di massimo due mesi, superiore ai tempi di residenza idraulici tipici degli impianti (generalmente compresi tra 20 e 30 giorni). Tuttavia, poiché come già evidenziato si tende sempre più a conferire il rifiuto alimentare a impianti di digestione anaerobica, è importante verificare il comportamento delle bioplastiche anche in queste condizioni. In aggiunta ai diversi manufatti sempre più diffusi sul mercato, ciò è primariamente vero per i sacchetti, in cui il rifiuto alimentare è contenuto.

In Italia, ad esclusione dei materiali impropri (per esempio le plastiche convenzionali), la maggior parte del rifiuto alimentare viene raccolta in sacchetti in bioplastica compostabile, la cui degradabilità anaerobica è stata studiata nel presente lavoro. In parti-

colare, sono stati testati sia sacchetti in bioplastica specificamente realizzati e venduti per la raccolta del rifiuto alimentare (di seguito sacchetti dedicati) sia sacchetti utilizzati per contenere i prodotti acquistati nei supermercati (di seguito shopper), che vengono spesso riutilizzati per la raccolta del rifiuto alimentare. Entrambe le tipologie di sacchetti sono realizzate in Mater-Bi®, una bioplastica compostabile secondo lo standard UNI EN 13432:2002 e costituita per il 70% da polibutilene adipato co-terefthalato (PBAT), per il 20% da amido e per il 10% da additivi (Elfehri Borchani et al., 2015).

La degradazione dei substrati organici in condizioni anaerobiche viene generalmente indagata mediante prove di biometanazione (BMP, Biochemical Methane Potential – potenziale biochimico di metanazione). Nella letteratura scientifica, alcuni recenti studi hanno effettuato prove di BMP su film di Mater-Bi® (Battista et al., 2021; Dolci et al., 2021; Calabrò et al., 2020; Vasmara e Marchetti, 2016), prodotti in Mater-Bi® (Cazaudehore et al., 2019) o film realizzati con miscele a base di amido ad esso assimilabili (Zhang et al., 2018; El-Mashad et al., 2012). In Tabella 1 sono riportati i substrati

**Tabella 1 – Descrizione e risultati degli studi della letteratura scientifica relativi a prove di BMP su Mater-Bi® o bioplastiche a base di amido**

Riferimento	Bioplastiche testate	Risultati delle prove di BMP su Mater-Bi® e bioplastiche a base di amido
Battista et al. (2021)	Piatto in fibre cellulosiche di canna da zucchero Posate in bioplastiche di amido Shopper in Mater-Bi® Oggetti in acido polilattico (PLA) Granuli di poliidrossialcanoati (PHA)	Shopper in Mater-Bi® Condizioni mesofile: 201 NmLCH <sub>4</sub> /gSV
Calabrò et al. (2020)	Sacchetto in Mater-Bi® Tappo biogenico per bottiglia di vino Piatto a base di cellulosa	Sacchetto in Mater-Bi® Estremamente variabile Condizioni mesofile: fino a 152 NmLCH <sub>4</sub> /gSV Condizioni termofile: fino a 186 NmLCH <sub>4</sub> /gSV
Cazaudehore et al. (2019)	Capsule di caffè realizzate con tre differenti bioplastiche (Mater-Bi®, Vegemat®, Eco-vio®)	Capsula di Mater-Bi® Condizioni mesofile: 68 NmLCH <sub>4</sub> /gSV Condizioni termofile: 247 NmLCH <sub>4</sub> /gSV
Dolci et al. (2021)	Sacchetto dedicato in Mater-Bi® Shopper in Mater-Bi®	Condizioni mesofile: 42 – 57 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (sacchetto dedicato in Mater-Bi®) 60 – 86 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (shopper in Mater-Bi®) Condizioni termofile: 263 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (sacchetto dedicato in Mater-Bi®) 127 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (shopper in Mater-Bi®)
Zhang et al. (2018)	4 tipologie di film a base di cellulosa Film in diacetato di cellulosa 2 tipologie di film a base di amido Film in PLA Pellet a base di PLA	Condizioni mesofile: 113 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (film a base di amido 1) 69 NmLCH <sub>4</sub> /gSV (film a base di amido 2) In aggiunta, le due bioplastiche a base di amido esaminate hanno mostrato una degradazione minima nelle prove in semi-continuo in cui sono state alimentate giornalmente insieme a rifiuto alimentare
Vasmara e Marchetti (2016)	Film in Mater-Bi® PLA rigido	Film in Mater-Bi® Condizioni mesofile: 33 NmLCH <sub>4</sub> /gSV Condizioni termofile: 113 NmLCH <sub>4</sub> /gSV
El-Mashad et al. (2012)	Film ottenuto da amido di mais Cannuccia/tazza in PLA Film in PHA	Film ottenuto da amido di mais Condizioni termofile: 187 NmLbiogas/gSV

testati nei predetti studi e i risultati delle prove di BMP su Mater-Bi® e bioplastiche a base di amido. In questi studi, è stata osservata una degradabilità anaerobica del Mater-Bi® generalmente molto limitata in condizioni mesofile. In particolare, la produzione di metano inferiore, pari a 33 NmLCH<sub>4</sub> per grammo di solidi volatili (SV), è stata osservata da Vasmara e Marchetti (2016). Risultati di poco superiori sono stati ottenuti da Dolci et al. (2021) – fra 42 e 86 NmLCH<sub>4</sub>/gSV, Cazaudehore et al. (2019) – 68 NmLCH<sub>4</sub>/gSV e Zhang et al. (2018) – fra 69 e 113 NmLCH<sub>4</sub>/gSV. Inoltre, Dolci et al. (2021) ha osservato una degradabilità anaerobica del substrato su base COD (Chemical Oxygen Demand) compresa nell'intervallo 9% – 15%. Solo Battista et al. (2021) ha ottenuto una produzione finale di metano significativamente più elevata (201 NmLCH<sub>4</sub>/gSV), corrispondente tuttavia a tempi di prova estremamente lunghi (250 giorni). Rispetto a quanto ottenuto in condizioni mesofile, in condizioni termofile è stata riscontrata una maggiore degradabilità anaerobica per gli stessi substrati. In particolare, le produzioni di metano inferiori sono state ottenute da Vasmara e Marchetti (2016) – 113 NmLCH<sub>4</sub>/gSV e El-Mashad et al. (2012) – 187 NmLbiogas/gSV. In studi più recenti sono state osservate produzioni di metano comprese fra 127 e 263 NmLCH<sub>4</sub>/gSV, corrispondenti a una degradabilità anaerobica nell'intervallo 22% – 57% (Dolci et al., 2021), 186 NmLCH<sub>4</sub>/gSV (Calabrò et al., 2020) e 247 NmLCH<sub>4</sub>/gSV (Cazaudehore et al., 2019). La degradabilità del polimero Mater-Bi® sembra quindi essere significativamente influenzata dalla temperatura. Infatti, in prove di BMP termofile su sacchetti in Mater-Bi® (Dolci et al., 2021) sono state ottenute produzioni ultime di metano considerevolmente differenti rispetto a quanto osservato in condizioni mesofile (+48% e +520% per i due sacchetti analizzati). Queste differenze sono confermate dai risultati ottenuti da Cazaudehore et al. (2019) e Vasmara e Marchetti (2016), che hanno osservato incrementi in condizioni termofile rispetto a quelle mesofile rispettivamente del 260% e del 240%. Pertanto, mentre le condizioni mesofile sono risultate meno efficaci nella degradazione del polimero Mater-Bi®, le condizioni termofile sembrano offrire maggiori opportunità. Conseguentemente, nel presente lavoro è stata svolta un'approfondita analisi del comportamento degradativo dei sacchetti in Mater-Bi® durante il processo di digestione anaerobica in condizioni termofile, tramite prove di BMP. Tali prove sono state effettuate allo scopo di analizzare e comparare il comportamento dei sac-

chetti in bioplastica per la raccolta del rifiuto alimentare con quello di un sacchetto alternativo realizzato in carta riciclata e dotato di un fondello in cartoncino da inserire nel sacchetto prima del suo utilizzo in modo da incrementare la resistenza del fondo.

Per quanto riguarda il comportamento di tali sacchetti in carta in condizioni anaerobiche, prove di BMP precedentemente svolte su di essi (Dolci et al., 2021) hanno mostrato una buona degradabilità anaerobica sia in condizioni mesofile (produzione di metano compresa fra 235 e 272 NmLCH<sub>4</sub>/gSV, corrispondente a una degradabilità anaerobica nell'intervallo 55% – 66%) che in condizioni termofile (262 NmLCH<sub>4</sub>/gSV, corrispondente a una degradabilità anaerobica pari a 64%). Inoltre, tale materiale risulta compatibile con i pretrattamenti degli impianti biologici per il trattamento del rifiuto organico, che non ne operano la rimozione. Di conseguenza, non sussistono nemmeno le criticità associate all'effetto di trascinamento che invece interessano i manufatti in bioplastica.

## 2. MATERIALI E METODI

La degradazione anaerobica dei sacchetti per la raccolta del rifiuto alimentare è stata studiata mediante prove di BMP. In particolare, sono stati testati quattro sacchetti in bioplastica e uno in carta. I sacchetti in bioplastica esaminati includono due sacchetti dedicati, specificamente realizzati e venduti per la raccolta del rifiuto alimentare, in seguito denominati BDB1 (Bioplastic Dedicated Bag 1) e BDB2 (Bioplastic Dedicated Bag 2), e due shopper, utilizzati per contenere i prodotti acquistati nei supermercati e riutilizzabili per la raccolta del rifiuto alimentare, in seguito denominati BSB1 (Bioplastic Shopper Bag 1) e BSB2 (Bioplastic Shopper Bag 2).

Il sacchetto in carta, in seguito denominato PB (Paper Bag), è stato appositamente concepito per la raccolta del rifiuto alimentare.

La Figura 1 (a pagina seguente) riporta i sacchetti selezionati.

### 2.1. Caratterizzazione e pretrattamento dei sacchetti

Prima di essere utilizzati nelle prove, i sacchetti sono stati caratterizzati e pretrattati.

Tutti i sacchetti in bioplastica utilizzabili per la raccolta del rifiuto alimentare (dedicati e shopper) sono prodotti mediante l'estrusione di granuli di Mater-Bi®.



Figura 1 – Sacchetti esaminati nelle prove di BMP: BSB1 (A), BSB2 (B), BDB1 (C), BDB2 (D) e PB (E)

Essi possono tuttavia presentare diverse caratteristiche (colore, spessore) che possono influenzare la loro degradazione in condizioni anaerobiche. Infatti, nonostante esista un unico produttore del granulo di Mater-Bi®, in Italia sono presenti 8 e 12 sacchettifici che producono rispettivamente sacchetti dedicati e shopper. Ciascuno di essi impiega differenti coloranti e inchiostri non noti. Per considerare questa variabilità, sono stati selezionati sacchetti in bioplastica di diverso spessore (gli shopper sono più spessi dei sacchetti dedicati, in ragione della loro funzione primaria) e colore (rosso, giallo, trasparente con un laccio verde in bioplastica per la chiusura, verde).

Il sacchetto in carta esaminato, realizzato con fibre riciclate, è costituito da un sacchetto principale e da un fondello in cartoncino, fornito separatamente, da inserire al suo interno prima dell'utilizzo (22% in peso su base umida).

Per tutte le prove, i sacchetti sono stati tagliati manualmente in pezzi quadrati di lato 1 cm, come mostrato nella Figura MS1 del Materiale Supplementare (MS).

Per tutti i sacchetti sono stati determinati il peso su base umida, i solidi totali (ST), i SV e il COD.

## 2.2. Caratterizzazione dell'inoculo

Come inoculo è stato utilizzato un digestato proveniente da un impianto che effettua digestione anaerobica termofila in condizioni umide di rifiuto alimentare e fango derivante da un impianto di trattamento delle acque reflue. Prima dell'utilizzo nelle prove, il digestato è stato preincubato per 5 giorni

alla temperatura di prova (50°C) e caratterizzato in termini di ST, SV, COD e azoto totale Kjeldahl (TKN). Sono inoltre stati determinati l'azoto ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ), il pH, l'alcalinità totale (AT) e gli acidi grassi volatili (AGV) come suggerito da Holliger et al. (2016) per le prove di BMP.

## 2.3. Prove di BMP

I quattro sacchetti in bioplastica e il sacchetto in carta sono stati testati in triplo in reattori miscelati di volume pari a 600 mL, con un volume operativo di 480 mL. Le prove sono state condotte in condizioni termofile ( $50 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), mantenute per mezzo di un bagno termostatico.

Le prove di BMP sono state allestite rispettando un rapporto inoculo/substrato (I/S) pari a 2 gSV/gSV. In aggiunta a inoculo e substrato, in ciascun reattore sono state dosate tre soluzioni di minerali contenenti macronutrienti e micronutrienti (OECD, 2006) e acqua di rete per il raggiungimento del volume operativo.

Inoltre, come bianco, sono stati allestiti tre reattori senza substrato.

Il pH iniziale in ogni reattore è risultato compreso nell'intervallo 8,0 – 8,5. Per ottenere condizioni anaerobiche, prima delle prove è stato flussato  $\text{N}_2$  in ogni reattore per alcuni minuti (Holliger et al., 2016; VDI, 2016).

Per la misura del metano prodotto durante le prove è stato impiegato il sistema volumetrico AMPTS (Automatic Methane Potential Test System II, Bioprocess Control®).

Per il sacchetto in carta, il BMP finale è stato definito come la media della produzione cumulata netta di metano in condizioni normali dei triplicati nel giorno in cui la produzione netta giornaliera di ciascuno degli ultimi 3 giorni è inferiore all'1% della corrispondente produzione cumulata netta (Koch et al., 2019) e, in ogni caso, considerando una durata minima di 21 giorni (UNI/TS, 2018).

Per le prove di BMP sui sacchetti in bioplastica, è stata considerata una durata minima di 40 giorni, in linea con quanto riportato nella letteratura scientifica dove sono stati osservati andamenti a gradini delle curve delle prove di BMP effettuate su biopolimeri a base di amido (Dolci et al., 2021; Cho et al., 2011; Mohee et al., 2008; Russo et al., 2009). Il pH a fine prova è risultato compreso nell'intervallo 7,5 – 8,0 in ogni reattore.

Al termine delle prove, il digestato di ogni reattore è stato vagliato con setacci di maglia 2 mm, 0,50 mm e 0,25 mm per trattenere gli eventuali residui.

Tabella 2 – Modelli adattati ai risultati delle prove di BMP

Modello	Equazione
Primo ordine (modello A)	$M_t = S_0 \times (1 - \exp(-k_H \times t))$
Due passi (modello B)	$M_t = S_0 \times \left(1 + \frac{k_H \times \exp(-k_{VFA} \times t) - k_{VFA} \times \exp(-k_H \times t)}{k_{VFA} - k_H}\right)$
Due compartimenti (modello C)	$M_t = S_0 \times (1 - \alpha \times \exp(-k_F \times t) - (1 - \alpha) \times \exp(-k_S \times t))$
Due compartimenti e due passi (modello D)	$M_t = S_0 \times \left(\alpha \times \left(1 + \frac{k_F \times \exp(-k_{VFA} \times t) - k_{VFA} \times \exp(-k_F \times t)}{k_{VFA} - k_F}\right) + (1 - \alpha) \times \left(1 + \frac{k_S \times \exp(-k_{VFA} \times t) - k_{VFA} \times \exp(-k_S \times t)}{k_{VFA} - k_S}\right)\right)$
Gompertz (modello E)	$M_t = S_0 \times \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu_{max} \times \exp(1)}{S_0} \times (\lambda - t) + 1\right)\right)$
“Doppio Gompertz” (modello F)	$M_t = \begin{cases} S_{0,1} \times \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu_{max,1} \times \exp(1)}{S_{0,1}} \times (\lambda_1 - t) + 1\right)\right) & \text{se } t \leq t^* \\ S_{0,1} \times \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu_{max,1} \times \exp(1)}{S_{0,1}} \times (\lambda_1 - t^*) + 1\right)\right) + \\ + S_{0,2} \times \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu_{max,2} \times \exp(1)}{S_{0,2}} \times (\lambda_2 + t^* - t) + 1\right)\right) & \text{se } t > t^* \end{cases}$

$M_t$  è il BMP al tempo  $t$  (NmLCH<sub>4</sub>/gSV);  $S_0$  è il BMP finale (NmLCH<sub>4</sub>/gSV);  $k_H$ ,  $k_{VFA}$ ,  $k_F$  e  $k_S$  sono costanti cinetiche (1/giorno);  $\alpha$  è la frazione rapidamente degradabile del substrato degradabile;  $\mu_{max}$  è il massimo tasso di produzione di metano (NmLCH<sub>4</sub>/(gSV×giorno));  $\lambda$  è la durata della fase di latenza (giorni). Per quanto riguarda il modello “Doppio Gompertz”, il modello Gompertz è applicato due volte per descrivere l’andamento dei dati nei due intervalli di tempo.  $t^*$  è l’istante di tempo che separa gli intervalli di validità dei due modelli Gompertz che costituiscono l’intero modello (giorni).

### 2.3.1. Analisi cinetica

I dati delle prove di BMP sono stati quindi analizzati in termini cinetici. In particolare, per ogni substrato, sono stati inizialmente individuati gli istanti di tempo corrispondenti al raggiungimento del 50% e del 90% del BMP finale. Successivamente, differenti modelli cinetici sono stati adattati ai dati sperimentali e comparati per mezzo di diversi criteri di efficienza.

In particolare, sono stati identificati 6 modelli per l’adattamento ai risultati delle prove di BMP (Tabella 2).

I modelli A, B, C e D sono frequentemente utilizzati nella letteratura scientifica per descrivere i risultati di prove di BMP e sono basati su una descrizione biochimica del processo di digestione anaerobica. Sebbene esso sia costituito dalla successione di quattro fasi (idrolisi, acidogenesi, acetogenesi e metanogenesi), i modelli biochimicamente basati considerano la sequenza di solo una reazione di acidificazione (comprendente idrolisi e acidogenesi), in cui avviene la degradazione del substrato e la produzione di AGV, e una di meta-

nazione (acetogenesi e metanogenesi), in cui gli AGV sono convertiti a metano (Brulé et al., 2014). Il modello A è il modello più utilizzato nella letteratura scientifica per l’adattamento ai risultati di prove di BMP (Pererva et al., 2020). Esso può descrivere con efficacia i dati di produzione cumulata di metano derivanti da un processo di digestione anaerobica in condizioni batch in cui il processo limitante è l’idrolisi del substrato, modellizzata come una reazione del primo ordine.

Il modello C è stato utilizzato per descrivere dati di produzione cumulata di metano da un processo di digestione anaerobica in condizioni batch di substrati particolati, caratterizzati da una composizione chimica eterogenea, in cui il processo limitante è l’idrolisi del substrato. In particolare, il processo è modellizzato come la simultanea degradazione del primo ordine delle frazioni rapidamente e lentamente degradabili (Brulé et al., 2014).

Se l’idrolisi del substrato non costituisce la fase limitante del processo di digestione anaerobica in condizioni batch, e si verifica quindi l’accumulo temporaneo di AGV nel reattore durante la prova,

può essere utilizzato il modello B, che descrive il processo come la sequenza delle due reazioni di acidificazione e metanazione, assunte del primo ordine (Shin e Song, 1995).

Il modello D è il risultato della combinazione dei modelli B e C e permette di descrivere dati di produzione cumulata di metano da digestione anaerobica in condizioni batch di substrati particolati (Brulé et al., 2014), in cui l'idrolisi del substrato non costituisce il processo limitante.

Il modello E è utilizzato in letteratura per l'adattamento a risultati di prove di BMP con una fase di latenza iniziale (Carrère et al., 2020).

Il modello F è stato sviluppato in questa sede per l'adattamento ai risultati delle prove di BMP caratterizzati da un pronunciato andamento a due gradini, in cui ogni gradino presenta una fase di latenza iniziale. Quindi, la formulazione matematica è una funzione definita a tratti, che sfrutta il modello Gompertz per l'adattamento ai dati in entrambi gli intervalli di tempo.

Con l'ausilio del software MATLAB R2020a, i modelli descritti sono stati adattati ai risultati delle prove di BMP dei substrati esaminati, calcolando le stime dei parametri all'ottimo.

In dettaglio, per tutti i sacchetti in bioplastica, sono stati considerati i modelli A, B, C, D ed E. Inoltre, per i sacchetti in bioplastica i cui risultati delle prove di BMP sono caratterizzati da un marcato andamento a due gradini (BSB2, BDB1 e BDB2) è sta-

to considerato anche il modello F. Per il sacchetto in carta sono stati scelti i modelli A, B, C, D ed E. L'ottimizzazione è stata effettuata utilizzando il metodo dei minimi quadrati, l'algoritmo di punto interno predefinito, imponendo i vincoli fisici appropriati sui parametri dei modelli (ad esempio  $0 < \alpha < 1$  e  $k_F > k_S$ ) e scegliendo opportunamente le condizioni iniziali dei parametri.

Per ogni substrato testato è stato selezionato il modello migliore fra quelli considerati. La procedura di selezione ha previsto la comparazione dei modelli esaminati, a mezzo di 6 criteri di efficienza calcolati per ogni modello. I criteri di efficienza analizzati sono comunemente utilizzati nella letteratura scientifica e sono rilevanti per lo scopo dell'analisi (Tabella 3).

Il criterio MAE misura l'errore medio del modello; è auspicabile, pertanto, un basso valore di questo indicatore. Il criterio MAE è stato considerato nell'analisi in ragione della sua capacità di quantificare l'accordo complessivo fra i dati osservati e quelli stimati dal modello (Hauduc et al., 2015).

Il criterio REP rappresenta l'errore relativo sul BMP finale, mentre il criterio MSDE è una misura dell'errore sulla derivata. Come per il criterio MAE, sono desiderabili bassi valori di questi indicatori (Hauduc et al., 2015).

I criteri AIC, BIC e  $R^2_{adj}$  permettono di tenere in considerazione il numero di parametri del model-

Tabella 3 – Criteri di efficienza considerati nella procedura di selezione dei modelli

Criterio di efficienza	Equazione
Errore assoluto medio (MAE, Mean Absolute Error)	$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n  y_i - \hat{y}_i $
Errore relativo nel picco (REP, Relative Error in Peak)	$REP = \frac{ \max(y_i) - \max(\hat{y}_i) }{\max(y_i)}$
Errore quadratico medio della derivata (MSDE, Mean Square Derivative Error)	$MSDE = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=2}^n ((y_i - y_{i-1}) - (\hat{y}_i - \hat{y}_{i-1}))^2$
Criterio di Nash-Sutcliffe, corretto considerando il numero di parametri ( $R^2_{adj}$ )	$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
Criterio di informazione di Akaike (AIC, Akaike Information Criterion)	$AIC = \begin{cases} n \times \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right) + 2 \times k + \frac{2 \times k \times (k+1)}{n-k-1} & \text{se } \frac{n}{k} < 40 \\ n \times \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right) + 2 \times k & \text{se } \frac{n}{k} \geq 40 \end{cases}$
Criterio di informazione bayesiano (BIC, Bayesian Information Criterion)	$BIC = \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right) + k \times \ln(n)$
<i>n</i> è il numero di dati osservati; <i>k</i> è il numero di parametri del modello; <i>y<sub>i</sub></i> sono i dati osservati; <i>ŷ<sub>i</sub></i> sono i dati stimati dal modello; <i>ȳ</i> è la media dei dati osservati.	

lo, penalizzando un'eccessiva parametrizzazione (Pererva et al., 2020).

Il criterio  $R^2_{adj}$  confronta i residui del modello con i residui ottenuti per differenza con la media dei dati osservati (Hauduc et al., 2015). Per il criterio  $R^2_{adj}$  sono auspicabili valori prossimi a 1, poiché ciò implica che il modello considerato spiega integralmente la variabilità dei dati osservati.

I criteri di informazione AIC e BIC sono gli strumenti primari utilizzati per tenere in considerazione la complessità del modello (Pererva et al., 2020). Rispetto al criterio AIC, il criterio BIC penalizza più severamente i modelli più complessi (Wagenmakers e Farrell, 2004). In questo caso, sono desiderabili bassi valori dei criteri di informazione, corrispondenti al compromesso ottimale fra l'accordo del modello ai dati osservati e la sua complessità.

Infine, il modello selezionato per ogni substrato ha permesso di calcolare la sua degradabilità anaerobica in un digestore ideale, modellizzato come un reattore continuo a miscelazione completa (CSTR, Continuous Stirred-Tank Reactor), come funzione del suo tempo di residenza idraulico (HRT, Hydraulic Retention Time). Questa valutazione ha permesso una stima preliminare della degradabilità anaerobica dei substrati analizzati in condizioni più simili alla gestione reale.

Nella scelta dell'HRT per il calcolo della degradabilità anaerobica, sono state esaminate le linee guida per la progettazione e la gestione del processo di digestione anaerobica di rifiuto alimentare in condizioni termofile, che indicano valori tipici nell'intervallo 12 – 18 giorni (CITEC, 2007). È stato osservato, tuttavia, che tali impianti prevedono generalmente HRT di poco superiori (ad esempio, l'impianto da cui proviene l'inoculo opera con un HRT di 20 giorni). Tale variabilità è stata considerata nelle analisi.

In particolare, per determinare la relazione che lega l'HRT del reattore CSTR all'efficienza di conversione in esso conseguibile della frazione degradabile anaerobicamente di ogni substrato testato nelle prove di BMP, è stato considerato il bilancio di massa riferito al reattore CSTR e relativo alla frazione degradabile anaerobicamente di ogni substrato, riportato nell'Equazione 1, dove  $V$  è il volume del digestore,  $S_t$  e  $S_0$  sono le concentrazioni della frazione degradabile anaerobicamente del substrato nel digestore al tempo  $t$  e nel flusso in ingresso  $q$  e  $dS_t/dt$  e  $(dS_t/dt)_r$  sono il tasso di variazione complessivo della concentrazione della frazione degradabile anaerobicamente del substrato al

tempo  $t$  e quello dovuto al solo processo degradativo al tempo  $t$ .

$$\frac{dS_t}{dt} \times V = S_0 \times q - S_t \times q + \left(\frac{dS_t}{dt}\right)_r \times V \quad (1)$$

## 2.4. Metodi analitici

I ST e i SV sono stati determinati in doppio, secondo la procedura indicata in Standard Methods 2540 (Rice et al., 2017). Il COD totale e il TKN sono stati analizzati seguendo i metodi riportati in Standard Methods 5220 (Rice et al., 2017) e nella norma tecnica ISO 5663 (ISO, 1984), rispettivamente. Il pH è stato misurato a mezzo di una sonda multiparametrica portatile (Hach-Lange HQ40D). La concentrazione degli AGV è stata determinata secondo la procedura indicata in Standard Methods 5560 (Rice et al., 2017), utilizzando un gas cromatografo (Dani Master GC) collegato a un rivelatore a ionizzazione di fiamma. La AT è stata misurata mediante titolazione automatica con  $H_2SO_4$  fino a un pH di 4,3 (Hach-Lange BIOGAS Titration Manager). L' $NH_4^+$  è stato misurato su campioni filtrati a 0,45  $\mu m$ , utilizzando test in cuvetta spettrofotometrici (Hach-Lange).

## 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

### 3.1. Caratterizzazione dei sacchetti

I risultati della caratterizzazione dei sacchetti sono riportati in Tabella 4 (a pagina seguente). Per il sacchetto in carta, sono state caratterizzate le singole componenti (sacchetto principale in carta e fondello in cartoncino). I parametri relativi al sacchetto nel suo complesso sono stati calcolati a partire da quelli delle sue componenti, considerando il loro rapporto in peso.

### 3.2. Caratterizzazione dell'inoculo

Il digestato utilizzato come inoculo nelle prove di BMP ha le seguenti caratteristiche: ST =  $23,6 \pm 0,2$  g/kg, SV =  $13,4 \pm 0,2$  g/kg, COD =  $17,7 \pm 0,1$  g/kg, TKN =  $2,10 \pm 0,11$  gN/kg,  $NH_4^+$  =  $1,22 \pm 0,05$  gN/L, pH =  $8,0 \pm 0,1$ , AT =  $7,93 \pm 0,37$  gCaCO<sub>3</sub>/L, AGV =  $83 \pm 22$  mgCH<sub>3</sub>COOH/L.

### 3.3. Prove di BMP

In Tabella 5 sono riportati, per ogni substrato testato nelle prove di BMP, la media e la deviazione



Tabella 4 – Risultati della caratterizzazione dei sacchetti

Parametri	BSB1	BSB2	BDB1	BDB2	PB	
					sacchetto principale	fondello
Peso (g/sacchetto)	14,3	13,1	10,3	7,08	16,7	4,73
ST (g/kg)	994 ± 1	983 ± 1	980 ± 2	981 ± 2	948 ± 1	952 ± 1
SV (g/kg)	799 ± 1	863 ± 1	977 ± 2	975 ± 1	861 ± 3	811 ± 2
COD (g/kg)	1360 ± 5	1420 ± 116	1640 ± 56	1580 ± 16	1040 ± 71	925 ± 99
TKN (gN/kg)	1,25 ± 0,20	1,13	0,810 ± 0,047	0,758	1,94 ± 0,14	2,13 ± 0,10

standard del BMP finale, il coefficiente di variazione, la degradabilità anaerobica su base COD, calcolata considerando una produzione teorica di metano di 330 NmLCH<sub>4</sub>/gCOD (assumendo quindi che il 6% del COD venga utilizzato per la crescita batterica), la durata delle prove e i tempi corrispondenti al raggiungimento del 50% e del 90% del BMP finale. Le curve delle prove di BMP sono rappresentate in Figura 2.

Confrontando i risultati delle prove sui sacchetti, è possibile notare che i valori di BMP finale delle bioplastiche sono fra il 35% e il 71% più alti rispetto a quello del sacchetto in carta. Invece, in termini di degradabilità anaerobica, le differenze fra i sacchetti in bioplastica e quello in carta sono meno marcate (Tabella 5 a pagina seguente).

I risultati delle prove sui sacchetti in termini di BMP finale sono stati confrontati con la letteratura scientifica. In particolare, i BMP finali dei sacchetti in bioplastica (compresi nell'intervallo 392-497 NmLCH<sub>4</sub>/gSV) sono risultati sensibilmente più elevati rispetto ai valori riportati nella letteratura scientifica per prove di BMP effettuate su Mater-Bi® in condizioni termofile: fra +49% e +89% dei risultati migliori ottenuti da Dolci et al. (2021), fra +59% e +101% rispetto al risultato di Cazaudehore et al. (2019) e almeno +111% in confronto alle prove di Calabrò et al. (2020). Poiché le prove sono state svolte in condizioni analoghe a quelle descritte in Dolci et al. (2021) in termini di strumentazione (AMPTS che garantisce un'elevata affidabilità della misura), inoculo e conduzione della prova, queste differenze sono potenzialmente attribuibili all'evoluzione nel

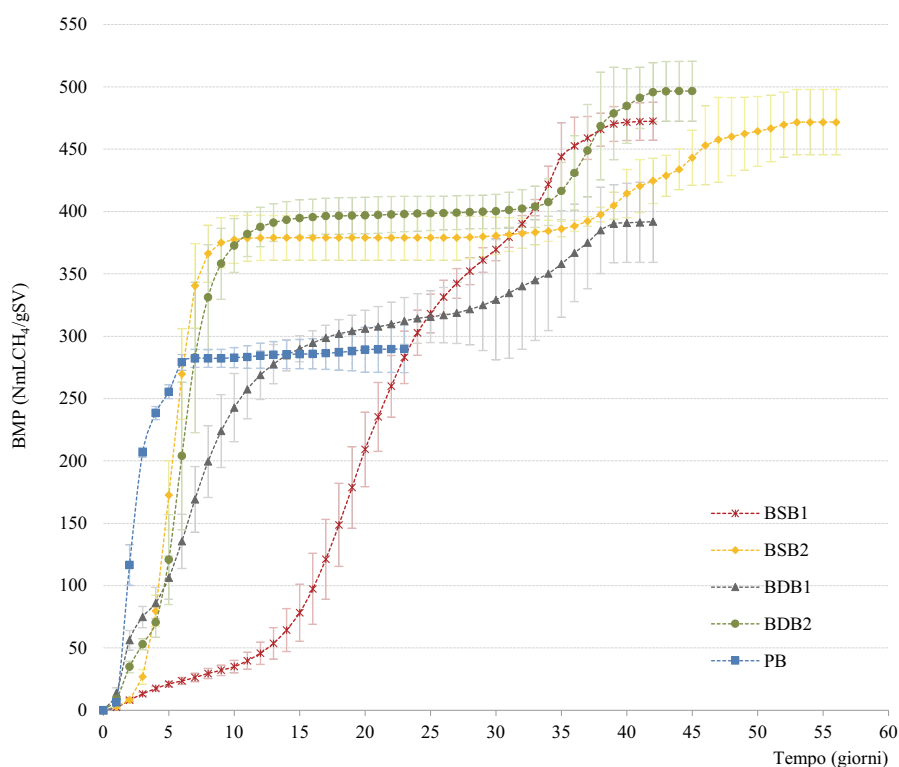


Figura 2 – Produzione cumulata netta specifica di metano (in condizioni normali:  $T = 0^{\circ}\text{C}$  e  $P = 1\text{ atm}$ ) delle prove di BMP in funzione del tempo (media e deviazione standard dei triplicati)

**Tabella 5 – Risultati delle prove di BMP: media  $\pm$  deviazione standard del BMP finale; coefficiente di variazione (CV); degradabilità anaerobica su base COD (DA); durata delle prove; tempi per il raggiungimento del 50% ( $t_{50\%}$ ) e del 90% ( $t_{90\%}$ ) del BMP finale**

Substrato	BMP finale (NmLCH <sub>4</sub> /gSV)	CV (%)	DA (%)	Durata (giorni)	$t_{50\%}$ (giorni)	$t_{90\%}$ (giorni)
BSB1	473 $\pm$ 15	3,2	84	42	22	35
BSB2	472 $\pm$ 26	5,6	87	56	6	42
BDB1	392 $\pm$ 33	8,3	71	42	8	35
BDB2	497 $\pm$ 24	4,8	93	45	7	37
PB	290 $\pm$ 19	6,6	74	23	3	6

tempo delle caratteristiche dei manufatti realizzati in Mater-Bi®. Evidenza di tale tendenza è data ad esempio dal sacchetto BDB2. Tale sacchetto (analogo modello dello stesso produttore) venduto due anni prima è stato analizzato anche in Dolci et al. (2021); la Figura MS2 del MS mostra tuttavia come già solo la colorazione risulti differente.

In merito al sacchetto in carta, il BMP finale di 290 NmLCH<sub>4</sub>/gSV è di poco superiore rispetto a quanto ottenuto in precedenti prove (+11%) (Dolci et al., 2021).

Per quanto riguarda la vagliatura del digestato al termine delle prove, non sono stati rilevati residui di substrato di dimensioni maggiori di 0,25 mm per BSB1, BSB2, BDB2 e PB. Al contrario, quantità non trascurabili di residui della bioplastica BDB1 sono state trattenute dai setacci di maglia 2 mm, 0,50 mm e 0,25 mm, principalmente attribuibili al laccio verde in bioplastica integrato nel sacchetto e utile alla sua chiusura (Figura 3).

Tali evidenze fisiche sono in accordo con i risultati di BMP finale, che, per la bioplastica BDB1, risulta essere almeno il 17% inferiore rispetto al valore riscontrato per le altre bioplastiche.

### 3.3.1. Analisi cinetica

Dal punto di vista cinetico, la degradazione della carta è sensibilmente più rapida rispetto a quella della bioplastica: per la carta 6 giorni sono sufficienti per il raggiungimento del 90% del BMP finale, mentre per le bioplastiche sono necessari almeno 35 giorni. In dettaglio, tre dei quattro sacchetti in bioplastica (BSB2, BDB1 e BDB2) hanno raggiunto il 50% del BMP finale in meno di 8 giorni e il successivo rallentamento è dovuto all'andamento a gradini della curva, tipicamente osservato nei risultati delle prove di BMP effettuate su biopolimeri a base di amido (Dolci et al., 2021; Cho et al., 2011; Mohee et al., 2008; Russo et al., 2009). Il comportamento cinetico del sacchetto in bioplastica BSB1 è totalmente differente, caratterizzato dal



**Figura 3 – Residui delle prove di BMP su BDB1 trattenuti dal setaccio di maglia 0,50 mm**

raggiungimento di solo il 6% del BMP finale nei primi 8 giorni e il 50% in 22 giorni, suggerendo che la fase idrolitica iniziale sia più lenta rispetto alle altre bioplastiche.

Per quanto concerne l'analisi cinetica, le Figure dalla MS3 alla MS7 del MS riportano i modelli considerati adattati ai risultati delle prove di BMP su BSB1, BSB2, BDB1, BDB2 e PB.

La Figura 4 (a pagina seguente) riporta una comparazione grafica dei modelli considerati in termini dei criteri di efficienza MSDE e AIC per BSB1, BSB2, BDB1, BDB2 e PB (i risultati per tutti i criteri di efficienza analizzati sono riportati nelle Figure dalla MS8 alla MS12 del MS).

Esaminando i risultati dei criteri di efficienza per ogni substrato, è possibile notare che il criterio di informazione BIC privilegia sempre il modello più semplice, cioè il modello del primo ordine (modello A). Conformemente allo scopo dell'analisi cinetica, un maggior rilievo è dato ai risultati dei criteri REP e MSDE. A eccezione di PB, questi indicatori sono sempre concordi tra di loro e con gli altri criteri di efficienza analizzati (MAE,  $R^2_{adj}$  e AIC), escluso il criterio BIC, in termini del modello favorito.

In merito a PB, il migliore modello in termini del criterio REP non corrisponde al modello preferito

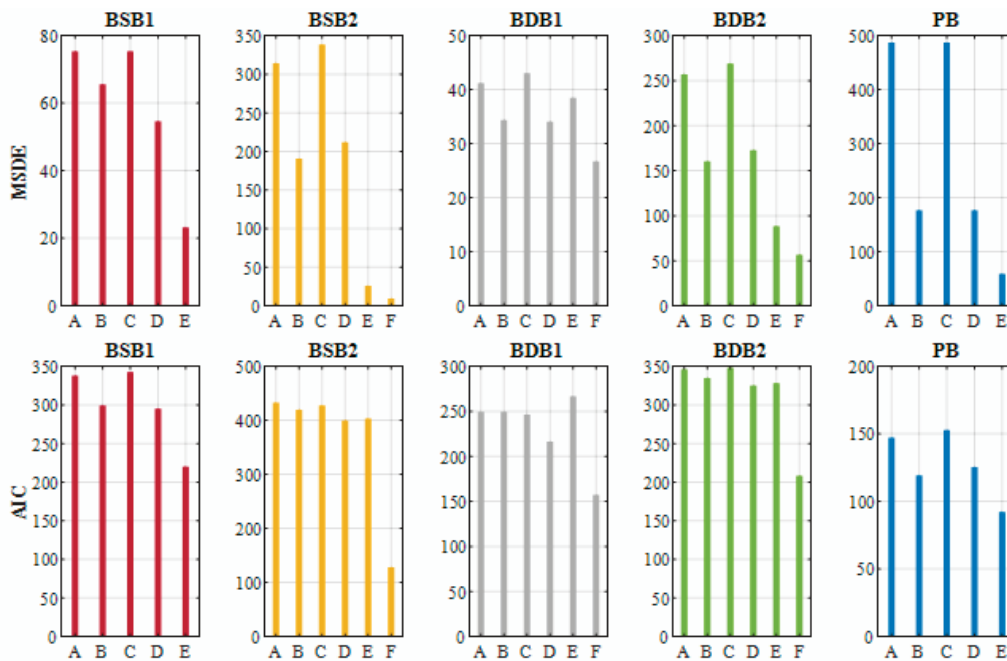


Figura 4 – Confronto dei modelli adattati ai risultati delle prove di BMP sui sacchetti in termini dei criteri di efficienza MSDE e AIC (modelli: A = primo ordine; B = due passi; C = due compartimenti; D = due compartimenti e due passi; E = Gompertz; F = “doppio Gompertz”)

dagli altri criteri di efficienza, escluso il criterio BIC. In ogni caso, occorre sottolineare che il risultato peggiore del criterio REP per PB è comunque inferiore a 0,02, corrispondente a un errore relativo sul BMP finale inferiore al 2%. Questa è la ragione per cui, per questo substrato, il modello scelto per le successive valutazioni è quello favorito da tutti i criteri di efficienza esclusi i criteri REP e BIC. Pertanto, i risultati delle prove di BMP sul sacchetto in carta sono stati descritti con il modello E (Gompertz), che rappresenta la fase di latenza iniziale necessaria agli enzimi per idrolizzare i carboidrati complessi, quali la cellulosa (Li et al., 2019). Lo stesso modello è stato scelto per descrivere i risultati delle prove di BMP sul sacchetto in bioplastica BSB1. Al contrario, il marcato andamento a gradini dei risultati delle prove di BMP degli altri sacchetti in bioplastica, probabilmente dovuto all'eterogeneità dei substrati, ha portato a propendere per il modello F (“Doppio Gompertz”). I modelli adattati ai dati scelti per descrivere la cinetica di degradazione di ciascun substrato nelle prove di BMP sono rappresentati in Figura 5.

La Tabella 6 (a pagina seguente) riporta le stime dei parametri del modello selezionato per descrivere la cinetica di degradazione di ogni substrato analizzato nelle prove di BMP.

Assumendo che il 6% del COD venga utilizzato per la crescita batterica, è stata quindi calcolata la degradabilità anaerobica su base COD teoricamente

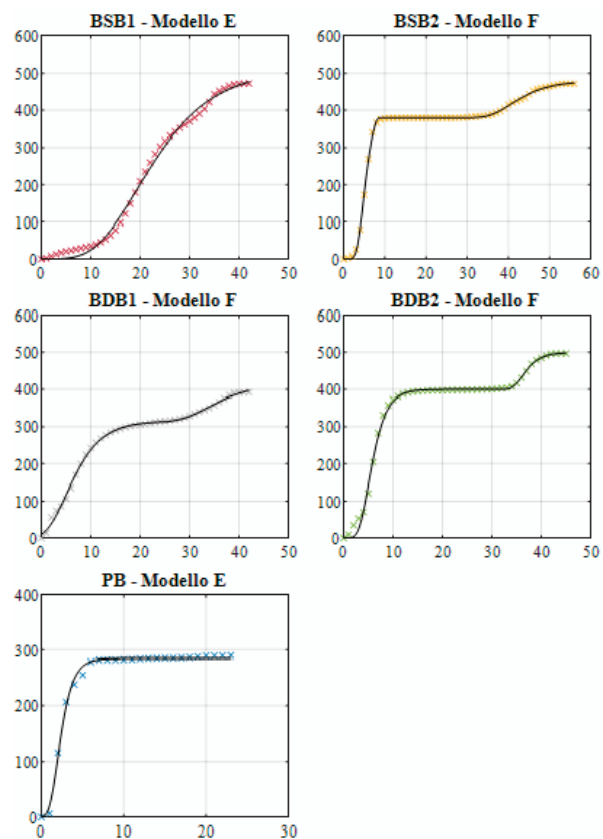


Figura 5 – Risultati delle prove di BMP sui sacchetti descritti con i modelli selezionati (E = Gompertz; F = “doppio Gompertz”); la produzione cumulata netta specifica di metano in condizioni normali ( $NmLCH_4/gSV$ ) è graficata in funzione del tempo (giorni)

**Tabella 6 – Stima dei parametri del modello selezionato per ogni substrato testato nelle prove di BMP; il significato e l'unità di misura dei simboli sono descritti in Tabella 2**

Substrato	Modello	Parametro	Stima
BSB1	E (Gompertz)	$S_0$	511
		$\mu_{max}$	22,2
		$\lambda$	10,9
BSB2	F ("doppio Gompertz")	$S_{0,1}$	425
		$\mu_{max,1}$	98,8
		$\lambda_1$	3,20
		$S_{0,2}$	101
		$\mu_{max,2}$	7,00
		$\lambda_2$	27,1
		$t^*$	8,23
BDB1	F ("doppio Gompertz")	$S_{0,1}$	316
		$\mu_{max,1}$	29,0
		$\lambda_1$	0,950
		$S_{0,2}$	102
		$\mu_{max,2}$	6,99
		$t^*$	26,0
BDB2	F ("doppio Gompertz")	$S_{0,1}$	400
		$\mu_{max,1}$	74,3
		$\lambda_1$	3,08
		$S_{0,2}$	100
		$\mu_{max,2}$	18,1
		$t^*$	32,0
PB	E (Gompertz)	$S_0$	285
		$\mu_{max}$	104
		$\lambda$	0,954

conseguibile in un reattore CSTR in corrispondenza di differenti HRT (Tabella 7).

I risultati riportati in Tabella 7 riflettono le cinetiche di degradazione osservate nelle prove. Ad esempio, per i sacchetti BSB1 e BDB1, caratterizzati da una cinetica di degradazione più lenta rispetto a quella del sacchetto PB, è possibile osservare una degradabilità anaerobica ancora contenuta in corrispondenza di entrambi gli HRT considerati (inferiore al 70% della degradabilità anaerobica massima). Il livello di degradazione di PB è invece prossimo a quello massimo già per un HRT di 12 giorni (oltre il 90% della degradabilità anaerobica massima). Inoltre, occorre sottolineare che, nonostante la degradabilità anaerobica massima sia in generale superiore per i sacchetti in bioplastica rispetto a quello in carta, la degradabilità anaerobica stimata in condizioni di alimentazione continua per entrambi gli HRT è superiore per il sacchetto in carta rispetto a quelli in bioplastica.

È importante poi sottolineare che, alla scala reale, la co-digestione con il rifiuto alimentare, caratterizzato tendenzialmente da una degradabilità anaerobica molto elevata e da una cinetica di degradazione rapida (Venturelli, 2021), può interferire in posi-

**Tabella 7 – Degradabilità anaerobica su base COD di ogni sacchetto testato nelle prove; sono riportati i valori di degradabilità anaerobica massima e di quella teoricamente conseguibile in un reattore CSTR in corrispondenza di un HRT di 12 giorni e di 21 giorni**

Substrato	Degradabilità anaerobica (%)		
	Massima da BMP	Stima per un CSTR	
		HRT = 12 giorni	HRT = 21 giorni
BSB1	84	41	56
BSB2	87	67	69
BDB1	71	38	44
BDB2	93	63	68
PB	74	68	70

tivo o in negativo con la degradazione dei sacchetti rispetto alle stime riportate in Tabella 7. Come descritto in Venturelli (2021), tali effetti sono stati osservati sottoponendo lo shopper e il sacchetto dedicato con le minori degradabilità anaerobiche (BSB1 e BDB1) e il sacchetto in carta (PB) a prove di co-digestione con il rifiuto alimentare in condizioni di alimentazione semi-continua con un HRT di 21 giorni, svolte per simulare le condizioni operative degli impianti di digestione anaerobica di rifiuto alimentare in condizioni termofile. In particolare, i risultati riportati in Tabella 8 evidenziano che la co-digestione con il rifiuto alimentare determina una degradabilità anaerobica effettiva dei sacchetti in bioplastica (12% per BSB1 e 27% per BDB1) notevolmente inferiore rispetto a quella teorica (-79% per BSB1 e -39% per BDB1) stimata dalle prove di BMP. Al contrario, prospettive molto interessanti

**Tabella 8 – Degradabilità anaerobica su base COD di ogni sacchetto testato sia nelle prove di BMP che nelle prove in semi-continuo; sono riportati i valori di degradabilità anaerobica massima, di quella teoricamente conseguibile in un reattore CSTR in corrispondenza di un HRT di 21 giorni (si veda Tabella 7) e di quella effettivamente conseguita nelle prove di co-digestione con il rifiuto alimentare in condizioni di alimentazione semi-continua con lo stesso HRT (Venturelli, 2021)**

Substrato	Degradabilità anaerobica (%)		
	Massima da BMP	Stima per un CSTR (HRT = 21 giorni)	Prove in semi-continuo
BSB1	84	56	12
BDB1	71	44	27
PB	74	70	82

sono offerte dal sacchetto in carta, per il quale è stata riscontrata una degradabilità anaerobica nelle prove di co-digestione in semi-continuo (82%) superiore a quella teorica stimata (+17%) e persino a quella massima rilevata (+11%) con le prove di BMP. Tali risultati suggeriscono che si siano verificati fenomeni di acclimatazione della biomassa durante le prove o effetti sinergici risultanti dalla co-digestione del sacchetto in carta e del rifiuto alimentare (Venturelli, 2021).

#### 4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata svolta un'approfondita analisi del comportamento degradativo dei sacchetti in carta e in bioplastica per la raccolta del rifiuto alimentare durante il processo di digestione anaerobica in condizioni termofile, tramite prove di BMP. La degradabilità anaerobica massima calcolata per i sacchetti in bioplastica analizzati nelle prove di BMP è elevata, compresa fra il 71% e il 93%, e risulta essere per tre dei quattro sacchetti superiore a quella del sacchetto in carta, pari al 74%. Tre dei quattro sacchetti in bioplastica analizzati (BSB2, BDB1 e BDB2) mostrano un andamento a gradini nei risultati delle prove di BMP, tipicamente osservato nella degradazione anaerobica di biopolimeri a base di amido, per la cui descrizione è stato appositamente sviluppato un modello cinetico ottenuto dalla combinazione di due modelli Gompertz. Anche la cinetica di degradazione del sacchetto in bioplastica BSB1 è particolare, poiché rappresentabile da un modello Gompertz caratterizzato da una fase di latenza iniziale di quasi 11 giorni. Al contrario, il sacchetto in carta analizzato ha mostrato una cinetica di degradazione molto rapida descrivibile con un modello Gompertz con una fase di latenza iniziale molto breve, di circa 1 giorno.

L'analisi della cinetica di degradazione dei sacchetti ha permesso di comprendere che i sacchetti in bioplastica sono caratterizzati da un particolare comportamento che ne limita la conversione in metano nel caso di alimentazione continua. In particolare, la descrizione modellistica ha consentito di stimare la degradabilità anaerobica teorica dei sacchetti in condizioni di alimentazione continua con un HRT di 21 giorni, che risulta compresa fra il 44% e il 69% per i sacchetti in bioplastica, inferiore rispetto a quella conseguibile per il sacchetto in carta, pari al 70%. I risultati ottenuti suggeriscono che il sacchetto in carta sia altamente compatibile con il processo di digestione anaerobica.

Inoltre, le valutazioni effettuate hanno mostrato un diverso meccanismo degradativo dei sacchetti in bioplastica analizzati. Seppur realizzati con lo stesso polimero, i differenti spessori o colori hanno quindi influenzato significativamente la degradazione. Ne sono esempio la prolungata fase di latenza per il sacchetto BSB1, assente negli altri sacchetti, o la non completa degradazione del solo sacchetto BDB1. Pertanto, le differenze osservate fra manufatti della stessa bioplastica suggeriscono di estendere le valutazioni a ulteriori bioplastiche rigide e flessibili.

#### 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Battista F., Frison N. e Bolzonella D. (2021) Can bioplastics be treated in conventional anaerobic digesters for food waste treatment? *Environ Technol Innov*, 22: 101393. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101393>
- Brulé M., Oechsner H. e Jungbluth T. (2014) Exponential model describing methane production kinetics in batch anaerobic digestion: a tool for evaluation of biochemical methane potential assays. *Bioprocess Biosyst Eng*, 37: 1759-1770. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1150-4>
- Calabrò P.S., Folino A., Fazzino F. et al. (2020) Preliminary evaluation of the anaerobic biodegradability of three biobased materials used for the production of disposable plastics. *J Hazard Mater*, 390: 121653. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121653>
- Carrère H., Antonopoulou G., Druilhe C. et al. (2020) Methods to Assess Biological Transformation of Biomass. In: Nzihou A. (eds) *Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35020-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35020-8_5)
- Cazaudehore G., Guyoneaud R., Vasmara C. et al. (2019) End-of-life of biodegradable plastics supports through anaerobic digestion: performance and microbial study. Conference proceeding: 16<sup>th</sup> IWA World Conference on Anaerobic Digestion. Delft, The Netherlands.
- Cho H.S., Moon H.S., Kim M. et al. (2011) Biodegradability and biodegradation rate of poly(caprolactone)-starch blend and poly(butylene succinate) biodegradable polymer under aerobic and anaerobic environment. *Waste Manage*, 31: 475-480. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.029>
- CIC-COREPLA – Consorzio italiano compostatori – Consorzio nazionale per la raccolta, il riciclo e il recupero degli imballaggi in plastica (2020) *Studio CIC-COREPLA, 2020: triplicano le bioplastiche compostabili nella raccolta dell'organico*. Disponibile su: <https://www.corepla.it/documenti/ebb9f5ab-8857-4411-80b3-962bf4a7b62a/CS+Studio+CIC+e+COREPLA+7lug20.pdf>
- CITEC – Comitato Impianti Tecnologia Complessa (2007). *Linee guida del Citec. Linee guida per la progettazione, realizzazione e gestione degli impianti a tecnologia complessa per lo smaltimento dei rifiuti urbani*. Hyper, Venezia.
- Dolci G., Catenacci A., Malpei F. et al. (2021) Effect of Paper vs. Bioplastic Bags on Food Waste Collection and Processing. *Waste Biomass Valori*, 12(11): 6293-6307. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01448-4>
- El-Mashad M.H., Ruihong Zhang R. e Greene J.P. (2012) Anaerobic Biodegradability of Selected Biodegradable Plastics and Biobased Products. *J Environ Sci Eng*, A1: 108-114.

- Elfahri Borchani K., Carrot C. e Jaziri M. (2015) Biocomposites of Alfa fibers dispersed in the Mater-Bi® type bioplastic: morphology, mechanical and thermal properties. *Composites Part A*, 78: 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.023>
- Hauduc H., Neumann M.B., Muschalla D. et al. (2015) Efficiency criteria for environmental model quality assessment: A review and its application to wastewater treatment. *Environ Modell Softw*, 68: 196-204. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.004>
- Holliger C., Alves M., Andrade D. et al. (2016) Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci Technol*, 74: 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- ISO – International Organization for Standardization (1984) Technical standard ISO 5663:1984, Water quality – Determination of Kjeldahl nitrogen – Method after mineralization with selenium.
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2020) Rapporto rifiuti urbani edizione 2020. Disponibile su: [https://www.isprambiente.gov.it/files/2020/pubblicazioni/rapporti/rapportorifiutiurbani\\_ed-2020\\_n-331-1.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files/2020/pubblicazioni/rapporti/rapportorifiutiurbani_ed-2020_n-331-1.pdf)
- Koch K., Hafner S.D., Weinrich S. et al. (2019) Identification of critical problems in Biochemical Methane Potential (BMP) tests from methane production curves. *Front Environ Sci*, 7: 178. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00178>
- Li P., Li W., Sun M. et al. (2019) Evaluation of Biochemical Methane Potential and kinetics on the anaerobic digestion of vegetable crop residues. *Energies*, 12(1): 26. <https://doi.org/10.3390/en12010026>
- Mohee R., Unmar G.D., Mudhoo A. et al. (2008) Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. *Waste Manage*, 28(9): 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.07.003>
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2006) Test No. 311: Anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge: by measurement of gas production. In *OECD Guidelines for the Testing of Chemicals*; OECD Publishing: Paris, France.
- Pererva Y., Miller C.D. e Sims R.C. (2020) Existing Empirical Kinetic Models in Biochemical Methane Potential (BMP) Testing, Their Selection and Numerical Solution. *Water*, 12: 1831. <http://doi.org/10.3390/w12061831>
- Rice E.W., Baird R.B. e Eaton A.D. (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 23<sup>rd</sup> Edition*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D.C., USA.
- Russo M.A., O'Sullivan C., Rounsefell B. et al. (2009) The anaerobic degradability of thermoplastic starch: polyvinyl alcohol blends: potential biodegradable food packaging materials. *Bioresour Technol*, 100(5): 1705-1710. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.026>
- Shin H.-S. e Song Y.-C. (1995) A Model for Evaluation of Anaerobic Degradation Characteristics of Organic Waste: Focusing on Kinetics, Rate-Limiting Step. *Environ Technol*, 16: 775-784. <https://doi.org/10.1080/09593331608616316>
- UNI EN (2007) UNI EN 14995:2007 Materie plastiche – Valutazione della compostabilità – Schema di prova e specificazioni.
- UNI EN (2002) UNI EN 13432:2002 Imballaggi – Requisiti per imballaggi recuperabili mediante compostaggio e biodegradazione – Schema di prova e criteri di valutazione per l'accettazione finale degli imballaggi.
- UNI/TS (2018) UNI/TS 11703:2018 Metodo per la misura della produzione potenziale di metano da digestione anaerobica ad umido – Matrici in alimentazione.
- Utilitalia (2020) La gestione e il recupero delle bioplastiche. Documento di posizionamento della Federazione approvato dal Direttivo Ambiente del 21 gennaio 2020. Disponibile su: <http://www.utilitalia.it/dms/file/open/?abfd17e5-1a71-409a-864b-2e6628565159>
- Vasmara C. e Marchetti R. (2016) Biogas production from biodegradable bioplastics. *Environ Eng Manag J*, 15(9): 2041-2048. <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.220>
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2016) VDI 4630:2016, Fermentation of Organic Materials – Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests.
- Venturelli V. (2021) Analisi sperimentale sulla degradazione anaerobica di sacchetti in carta e in bioplastica per la raccolta del rifiuto alimentare. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Politecnico di Milano.
- Wagenmakers E.-J. e Farrell S. (2004) AIC model selection using Akaike weights. *Psychon Bull Rev*, 11(1): 192-196. <https://doi.org/10.3758/BF03206482>
- Zhang W., Heaven S. e Banks C.J. (2018) Degradation of some EN13432 compliant plastics in simulated mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Polym Degrad Stabil*, 147: 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.005>

## 6. ABBREVIAZIONI

AGV	Acidi grassi volatili
AIC	Akaike information criterion – Criterio di informazione di Akaike
AT	Alcalinità totale
BDB1	Bioplastic dedicated bag 1 – Sacchetto dedicato in bioplastica 1
BDB2	Bioplastic dedicated bag 2 – Sacchetto dedicato in bioplastica 2
BIC	Bayesian information criterion – Criterio di informazione bayesiano
BMP	Biochemical methane potential – Potenziale biochimico di metanazione
BSB1	Bioplastic shopper bag 1 – Shopper in bioplastica 1
BSB2	Bioplastic shopper bag 2 – Shopper in bioplastica 2
COD	Chemical oxygen demand – Domanda chimica di ossigeno
CSTR	Continuous stirred-tank reactor – Reattore continuo a miscelazione completa
HRT	Hydraulic retention time – Tempo di residenza idraulico
MAE	Mean absolute error – Errore assoluto medio
MSDE	Mean square derivative error – Errore quadratico medio della derivata
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Azoto ammoniacale
PB	Paper bag – Sacchetto in carta
REP	Relative error in peak – Errore relativo nel picco
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	Criterio di Nash-Sutcliffe, corretto considerando il numero di parametri
ST	Solidi totali
SV	Solidi volatili
TKN	Azoto totale Kjeldahl

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

# RIMOZIONE DI CROMO DA LIQUAMI: VALUTAZIONE DELL'UPGRADING DI UN DEPURATORE DI REFLUI E RIFIUTI INDUSTRIALI

Andrea Re<sup>1</sup>, Elisabetta Zanardini<sup>2</sup>, Domiziano Ivan Basilico<sup>3</sup>,  
Marcello Rigon<sup>3</sup>, Marco Vanotti<sup>4</sup>, Cristiana Morosini<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento di Scienze Teoriche e Applicate.

<sup>2</sup> Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia.

<sup>3</sup> SEAM engineering s.r.l.

<sup>4</sup> Ecologica Naviglio S.p.A.

**Sommario** – La Decisione di Esecuzione 2018/1147 prevede un nuovo e più restrittivo limite allo scarico per il cromo, fissato a 0,01-0,3 mg L<sup>-1</sup>; tale prescrizione, per gli impianti esistenti, dovrà essere rispettata entro quattro anni dalla sua notifica. Il presente studio si è prefisso l'obiettivo di valutare, tramite lo svolgimento di Jar Test atti a testare l'attuale efficienza dello stadio di chiariflocculazione, l'upgrading di un impianto di depurazione di reflui e rifiuti industriali, al fine di comprendere se tale intervento possa essere sufficiente per rispettare il futuro limite normativo. Le prove svolte suggeriscono come sia essenziale un intervento di correzione delle tempistiche ad oggi adottate nel trattamento chimico-fisico, passando da 20 a 3 min per la coagulazione e da 7 a 30 min per la flocculazione. Utilizzando i reagenti normalmente impiegati nell'impianto, si è riscontrato un pH ottimale, per l'abbattimento del metallo, compreso nell'intervallo 8,0-8,5, ed è stato dimostrato che, aumentando del 50% i dosaggi, non si verificano incrementi significativi delle efficienze di rimozione. L'uso di latte di calce (attualmente non dosato), invece, ha portato ad ottenere risultati migliori a pH maggiori. Gli esiti dei Jar Test hanno inoltre evidenziato come il cromo residuo risulti trovarsi prevalentemente in forma disciolta: su questa è stato quindi valutato l'effetto del trattamento biologico, la cui efficienza di abbattimento si è mediamente attestata sul 20%, presentando però un importante range di variabilità. Infine, l'adozione di un eventuale trattamento di affinamento, mediante i reagenti impiegati nell'impianto, ha mostrato un'ulteriore rimozione di cromo disciolto del 16-20% circa. Tutte le soluzioni individuate, tuttavia, non sono sufficienti a garantire un adeguato margine di sicurezza rispetto al nuovo limite; sarà quindi indispensabile valutare l'implementazione di tecnologie specifiche per la rimozione avanzata del metallo.

**Parole chiave:** Decisione di Esecuzione, cromo, acque reflue industriali, Jar Test, upgrading depuratori.

## CHROMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER: EVALUATION OF AN INDUSTRIAL PLANT UPGRADING

**Abstract** – The European Decision 2018/1147 establishes a new discharge emission level for chromium, called Best Available Techniques-Associated Emission Level (BAT-AEL), which will be placed equal to 0,01-0,3 mg L<sup>-1</sup>. Therefore, the present work evalu-

ates, by Jar Tests implementation, the upgrading of an industrial wastewater treatment plant (WWTP) in order to fulfil this new requirement. We focused on the clariflocculation phase, currently operated at the WWTP. In order to achieve a higher chromium removal, the results obtained by carrying out the Jar Tests showed that it is recommended to change the duration of the clariflocculation process by switching it from 20 min to 3 min for the coagulation phase and from 7 min to 30 min for the flocculation one. The best pH value was observed in the range 8,0-8,5 by dosing the chemicals currently used at the plant. No evident benefits were obtained by increasing the chemicals dosage up to 50%. On the contrary, the introduction of lime milk (not yet used at the plant) allowed to achieve better removal efficiencies at higher pH values. Moreover, the Jar Test results pointed out that the residual chromium is mainly present in the dissolved form. For this reason, we also evaluated the biological treatment effect on this form, which resulted in an average removal efficiency of 20%. Finally, a potential refining treatment, carried out by dosing the chemicals currently used at the plant, could increase the removal of dissolved chromium of about 16-20%. All the interventions, nonetheless, are not enough to guarantee the achievement of the new emission level. The assessment of other feasible solutions and the implementation of specific and advanced technologies for chromium removal are therefore required.

**Keywords:** European Decision, chromium, industrial wastewater, Jar Tests, wastewater treatment plants upgrading.

Ricevuto il 24-9-2021; Correzioni richieste il 30-9-2021; Accettazione finale il 4-10-2021.

## 1. INTRODUZIONE

Nel corso degli anni, l'attenzione nei confronti dell'ambiente è aumentata e, grazie all'avanzamento delle conoscenze scientifiche, l'uomo è oggi in grado di rimuovere diversi tipi di inquinanti, adottando tecnologie sempre più complesse e sofisticate. L'acqua è, fra le varie matrici ambientali, quella che, a causa della sua limitata disponibilità, riveste una particolare importanza e necessita quindi di interventi volti a preservarne la fruibilità, spesso compromessa da contaminazioni di origine sia naturale, che antropica. Per questo motivo, il tratta-

\* Per contatti: Via G.B. Vico 46 (c/o Villa Toeplitz), 21100 Varese. Tel. 0332.218785; fax 0332.218779. E-mail: cristiana.morosini@uninsubria.it

mento degli scarichi civili e industriali, mediante impianti di depurazione, è fondamentale per poter riutilizzare tale risorsa e per garantire la sicurezza dell'uomo e dell'ambiente.

Nelle aree industrializzate, i metalli pesanti rappresentano una fonte rilevante di contaminazione delle acque, a causa della loro tossicità anche a basse concentrazioni (Piazzoli e Antonelli, 2018); tali inquinanti, a differenza di quelli organici, non sono biodegradabili e tendono ad accumularsi negli organismi viventi (Fu e Wang, 2011).

Oltre a rame (Cu), cadmio (Cd), nichel (Ni), arsenico (As) e piombo (Pb), il cromo (Cr), contenuto in molti tipi di effluenti industriali, desta particolare preoccupazione, in quanto il suo utilizzo in vari settori (galvanici, conciari, di finitura dei metalli e numerosi altri) ha contribuito all'inquinamento dei corpi idrici e del suolo (Sobhanardakani *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2017; Piazzoli e Antonelli, 2018). Questo metallo pesante può presentare differenti stati di ossidazione; tuttavia, le forme prevalenti in ambiente naturale risultano essere quella trivalente (Cr(III)) e quella esavalente (Cr(VI)) (Remoundaki *et al.*, 2007), differenti in termini di tossicità e mobilità. Il cromo trivalente è relativamente meno solubile e meno tossico nei sistemi acquatici di quanto non lo sia quello esavalente, caratterizzato da una forte solubilità e da un'elevata tossicità, che può indurre cancerogenesi e mutagenesi (Chen *et al.*, 2017); è comunque importante precisare che la solubilità del cromo dipende molto dal suo stato di ossidazione (EFSA, 2014) e che la presenza di composti organici nelle acque reflue può alterare questa proprietà (Remoundaki *et al.*, 2007).

Il D.Lgs 152/2006 fissa, per il cromo totale, un limite di emissione pari a 4 mg L<sup>-1</sup>, per lo scarico in fognatura, e pari a 2 mg L<sup>-1</sup> per lo scarico in acque superficiali. Nelle conclusioni contenute nella Decisione di Esecuzione 2018/1147, riguardanti l'applicazione delle migliori tecniche disponibili (*Best Available Techniques* – BATs) per il trattamento dei rifiuti, si afferma tuttavia che, per ogni inquinante, si debba raggiungere il cosiddetto BAT-*Associated Emission Level* (BAT-AEL), fissato a 0,01-0,3 mg L<sup>-1</sup> per il cromo. Il presente lavoro si pone quindi, come obiettivo, la valutazione dell'upgrading dell'impianto di trattamento di reflui e rifiuti industriali Ecologica Naviglio S.p.A., in vista dell'adeguamento a questo nuovo limite allo scarico, che, per i depuratori esistenti, è previsto entro quattro anni dalla notifica della suddetta Decisione, avvenuta il 10 agosto 2018 (ARPAE, 2018).

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1. Tecniche di rimozione del cromo

Per l'abbattimento del cromo, presente nelle acque, è possibile utilizzare differenti tecnologie, che sfruttano meccanismi chimico-fisici e biologici. Generalmente, però, il trattamento di questo metallo consiste nel passaggio di speciazione dalla forma esavalente, qualora presente, a quella trivalente, per poi separarla dal refluo (Remoundaki *et al.*, 2007).

Tra le varie tecniche, è possibile individuare la riduzione fotocatalitica, risultata efficace nella rimozione di vari metalli pesanti, tra cui anche il Cr(VI); in tale processo, quando semiconduttori fotocatalitici, come TiO<sub>2</sub>, vengono illuminati da raggi UV, vengono generati elettroni altamente riduttivi, che innescano la riduzione di ioni di metalli pesanti presenti nelle acque reflue (Ku e Jung, 2001). I processi fotocatalitici possono trattare simultaneamente composti organici e metalli pesanti, nonché trasformare composti organici non biodegradabili in biodegradabili, risultando utilizzabili come pre- o post-trattamento delle acque reflue (Yang e Lee, 2006).

Altra tecnica è l'elettrocoagulazione (EC), in cui si adottano degli elettrodi in ferro che, per dissoluzione elettrochimica, producono ossidi di ferro in ridotte concentrazioni non tossiche, portando alla co-precipitazione del cromo (Golder *et al.*, 2007). Tale processo, rispetto a quelli convenzionali di coagulazione, risulta essere più efficiente grazie all'elevata proprietà ossidativa (Li *et al.*, 2014).

La rimozione del cromo può essere conseguita anche per scambio ionico, ovvero un processo in cui ioni indesiderati o pericolosi vengono scambiati con altri accettabili, utilizzando particolari tipi di resine dette, appunto, "a scambio ionico" (Brinkmann *et al.*, 2016). Queste ultime contengono gruppi funzionali cationici o anionici, che sono in grado di scambiare gli ioni mobili con altri della medesima carica presenti in soluzione. Tale processo viene normalmente utilizzato per integrare la depurazione delle acque reflue, quindi come parte di una serie di trattamenti (Lodolo *et al.*, 2010).

Anche l'adsorbimento su carbone attivo è stato ampiamente studiato per la rimozione di metalli pesanti; esso consiste nel trasferimento di una o più componenti da una fase fluida a una solida costituita da un materiale adsorbente, generalmente molto poroso. Nel corso del suo utilizzo, tale ma-



teriale raggiunge la saturazione ed è quindi necessaria la sua sostituzione o una procedura di rigenerazione (Brinkmann *et al.*, 2016). Il carbone attivo può essere ottenuto da diversi tipi di materiali; ad esempio, alcuni studi hanno valutato la rimozione di cromo attraverso l'utilizzo di carboni ricavati da bucce di melograno (El Nemr *et al.*, 2009), scarti di granoturco (Fonseca-Correa *et al.*, 2013) e da giacinto d'acqua (Hashem *et al.*, 2020). Il processo di adsorbimento per il trattamento del cromo può essere operato anche con altri materiali innovativi, quali nanoparticelle (Alidokht *et al.*, 2011; Padmavathy *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2018) e nanocompositi di vario tipo (Li *et al.*, 2013; Ego-dawatte *et al.*, 2015).

Oltre ai trattamenti chimico-fisici appena citati, possono inoltre essere utilizzati quelli biologici, che si stanno progressivamente sviluppando grazie ai ridotti costi di gestione (Sultana *et al.*, 2014). Tali processi sfruttano l'azione di batteri (Barrera-Díaz *et al.*, 2012) o funghi (Sharma e Adholeya, 2011), nonché la sinergia tra piante e microrganismi (Papaevangelou *et al.*, 2016).

Come già accennato in precedenza, tuttavia, la rimozione del cromo viene ottenuta prevalentemente mediante un trattamento di riduzione-precipitazione. Numerosi metalli hanno un comportamento anfotero: le loro rispettive curve di precipitazione mostrano un valore minimo di solubilità in corrispondenza di un determinato pH, attorno al quale si verificano degli incrementi rilevanti della concentrazione del metallo in soluzione. Mentre per numerosi metalli, regolando il pH, si può effettuare una rimozione per precipitazione sotto forma di idrossidi insolubili, la forma esavalente del cromo deve essere prima ridotta in forma trivalente, al fine di evitare la formazione del complesso cromato, il quale non permette la creazione di un idrossido insolubile, avendo un carattere anionico (Lodolo *et al.*, 2010).

## 2.2. Caso studio

Il presente articolo ha visto, come oggetto di studio, l'impianto di trattamento di reflui e rifiuti industriali Ecologica Naviglio S.p.A., situato a Robecchetto con Induno, in Provincia di Milano.

Il depuratore riceve reflui da undici aziende tessili e conciarie; le prime si occupano principalmente di orditura, imbozzimatura, candeggio, tintura e finissaggio, mentre le seconde svolgono prevalentemente concia, riconcia, tintura, ingrasso, messa al vento e rifinitura. Nel dettaglio, il

settore tessile fornisce un volume annuo orientativo compreso tra 500.000 m<sup>3</sup> e 800.000 m<sup>3</sup>, mentre il settore conciario tra 80.000 m<sup>3</sup> e 120.000 m<sup>3</sup>. Mediamente, il 90-95% del volume totale annuo trattato proviene da quattro delle undici aziende (due tessili e due conciarie) e la quantità di rifiuti autorizzata è pari a 140.000 t anno<sup>-1</sup> (Riva e Sorlini, 2018).

L'impianto di depurazione Ecologica Naviglio S.p.A. effettua un trattamento chimico-fisico-biologico di reflui industriali e rifiuti liquidi. Nel dettaglio, il layout impiantistico prevede una sezione di ingresso delle acque reflue industriali, che, nei periodi di basso carico, possono essere convogliate insieme ad una quota di reflui provenienti dalla fognatura civile. Dopo una fase di pretrattamento, sono presenti delle vasche di accumulo e omogeneizzazione, nelle quali possono essere alimentati i rifiuti liquidi presenti in un parco serbatoi. Successivamente, viene operato un trattamento chimico-fisico di chiariflocculazione, seguito da una fase di sedimentazione, che consente la separazione tra matrice liquida e fango chimico, prima dell'invio del refluo ad un trattamento biologico, che prevede le fasi di ossidazione-nitrificazione e denitrificazione. Effettuata una fase di sedimentazione secondaria, le acque chiarificate vengono indirizzate al pozzetto di uscita dell'impianto.

Il recapito finale del depuratore è costituito dal collettore fognario intercomunale, che convoglia, al depuratore di reflui urbani del Servizio Idrico Integrato (SII) di Robecco sul Naviglio, le acque di scarico provenienti dai Comuni soci, tra cui Robecchetto con Induno (Riva e Sorlini, 2018).

L'impianto è progettato per trattare i reflui ed i rifiuti industriali in maniera tale da rispettare i limiti previsti dal D.Lgs 152/2006; tuttavia, in vista dell'abbassamento del limite allo scarico per il cromo, previsto dalla già citata Decisione di Esecuzione 2018/1147, il presente lavoro si prefigge di valutare l'opportunità di procedere ad un upgrading dell'impianto esistente che, ad oggi, sfrutta un processo di chiariflocculazione per l'abbattimento del metallo (non è richiesta una fase di riduzione del cromo esavalente in quanto questo viene recapitato già nella sua forma trivalente). Per tale ragione, lo studio in questione ha analizzato l'efficienza dell'attuale trattamento chimico-fisico, mediante allestimento di Jar Test, al fine di comprendere se il dimensionamento di questa fase fosse in grado di rispondere alle nuove e più stringenti esigenze depurative o se fosse invece necessario procedere ad una sua rivisitazione.

### 2.3. Jar Test orientativi

Uno dei parametri, studiati nelle prove di Jar Test, è stato il pH, in quanto un opportuno valore di quest'ultimo, come già detto in precedenza, è fondamentale per ottenere un adeguato abbattimento del cromo. In letteratura sono riportati diversi grafici relativi alle curve di precipitazione dei metalli, che forniscono informazioni discordanti in merito al valore ottimale da attribuire a tale parametro (WEF, 2008; Lodolo *et al.*, 2010).

È stato inoltre indagato il tempo di contatto relativo alle varie fasi che costituiscono il processo di chiariflocculazione, in quanto Ecologica Naviglio S.p.A. utilizza delle tempistiche differenti rispetto a quelle consigliate in letteratura. Ad esempio, Bruno *et al.* (2019) riportano una durata della fase di coagulazione compresa tra 30 s e 1 min (range che spesso aumenta a scala di laboratorio), mentre, per la successiva fase di flocculazione, di 30 min, a differenza dell'impianto oggetto di studio, che adotta rispettivamente delle tempistiche di 20 min e 7 min.

Infine, oltre alla valutazione dell'effetto dei reagenti dosati presso l'impianto, è stato anche investigato l'eventuale impiego di latte di calce, che risulta essere un precipitante comunemente adottato (Nur-E-Alam *et al.*, 2020).

A tal fine, sono state effettuate tre serie di Jar Test sul refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico, secondo lo schema riportato in Tabella 1 e descrit-

te dettagliatamente nel seguito. Si precisa che il campione prelevato e utilizzato nelle prove risulta essere istantaneo.

#### 2.3.1. Jar Test 1: simulazione dell'impianto esistente

Il primo Jar Test è stato svolto per valutare l'efficacia della fase di chiariflocculazione esistente in impianto. Prima di tutto, sono stati preparati quattro becher da 500 mL di refluo (prelevato a monte del trattamento chimico-fisico) e, dopo aver effettuato una leggera miscelazione per tenere in sospensione i solidi presenti, è stato dosato il coagulante (poliammina 20%), impostando gli agitatori alla "flash mix" di 120 rpm (*revolutions per minute*) per 20 min (tempo normalmente impiegato nel depuratore per la fase di coagulazione).

Nel dettaglio, l'impianto abitualmente effettua un dosaggio di poliammina pari a 0,20 mL L<sup>-1</sup>, quindi sono stati aggiunti 0,10 mL per ciascun becher. Per ottenere i valori di pH di interesse, sono state effettuate le opportune correzioni mediante aggiunta di soda (20%) e acido cloridrico, monitorando periodicamente il tutto con un pH-metro.

Trascorsi i 20 min previsti per la coagulazione, sono stati aggiunti 0,5 mL di flocculante (polielettrolita cationico) in ciascun becher (considerando i dosaggi effettuati nell'impianto) e gli agitatori sono stati impostati alla "slow mix" di 30 rpm per 7 min, così da eseguire la fase di flocculazione, controllando periodicamente il pH. Al termine di que-

Tabella 1 – Jar Test orientativi

Jar Test	N° campione	pH [-]*	Tempo di coagulazione [min]	Tempo di flocculazione [min]	Tempo di sedimentazione [min]
1) Simulazione dell'impianto esistente	1	7,0	20	7	15
	2	7,5			
	3	8,0			
	4	8,5			
2) Tempi di contatto ottimizzati	5	7,0	3	30	15
	6	7,5			
	7	8,0			
	8	8,5			
3) Tempi di contatto ottimizzati e utilizzo di latte di calce	9	7,0	3	30	15
	10	7,5			
	11	8,0			
	12	8,5			

\* L'intervallo di pH 7,0 – 8,5 è stato scelto sulla base delle curve di precipitazione dei metalli presenti in letteratura (WEF, 2008; Lodolo *et al.*, 2010) ed è stato utilizzato un passo di 0,5 in modo tale da ottenere quattro campioni, uno per ogni miscelatore del dispositivo Jar Test. Si precisa che i pH riportati in questa Tabella sono valori obiettivo; a seguito delle analisi di laboratorio, infatti, si potrebbero osservare valori leggermente diversi a causa dell'errore di misura associato al pH-metro utilizzato nelle prove.

st'ultima, sono stati fermati gli agitatori, le pale sono state rimosse e il refluo è stato lasciato in quiete per 15 min per consentire la sedimentazione dei fiocchi. Infine, sono stati prelevati dei campioni da inviare ad analisi, chiamati "1" (pH 7,0), "2" (pH 7,5), "3" (pH 8,0) e "4" (pH 8,5).

### 2.3.2. Jar Test 2: tempi di contatto ottimizzati

Come anticipato, l'impianto oggetto di studio, per le fasi di coagulazione e flocculazione, utilizza dei tempi rispettivamente di 20 min e 7 min, non in linea con quanto riportato in letteratura, dove si raccomanda, invece, una fase di agitazione rapida e breve per la coagulazione, seguita da una lenta e lunga per la flocculazione (Bruno *et al.*, 2019). Per questo motivo, si è deciso di impostare il secondo Jar Test in maniera tale da osservare gli eventuali cambiamenti indotti dall'adozione di tempistiche ottimali. Il procedimento seguito è quindi stato analogo al Jar Test 1, ad eccezione dei tempi di coagulazione (3 min) e di flocculazione (30 min). Anche in questo caso, sono stati prelevati dei campioni da inviare ad analisi, chiamati rispettivamente "5" (pH 7,0), "6" (pH 7,5), "7" (pH 8,0) e "8" (pH 8,5).

### 2.3.3. Jar Test 3: tempi di contatto ottimizzati e utilizzo di latte di calce

Il Jar Test 3 è stato effettuato per valutare l'impiego di latte di calce, ottenuto, in questo caso, mi-

scelando 10 g di idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) con 100 mL di acqua e impiegato, al posto della soda, per correggere il pH, nonché come coagulante (in aggiunta alla poliammina), come suggerito in letteratura (Nur-E-Alam *et al.*, 2020). Tutti gli altri parametri sono stati mantenuti come nel Jar Test 2. Dato il pH di partenza del refluo, pari a 7,7, e vista la necessità di ottenere due campioni a pH rispettivamente uguale a 7,0 e 7,5 (come riportato in Tabella 1), in due becher non è stato dosato il latte di calce, in quanto avrebbe determinato un incremento del valore di questo parametro; è quindi stato dosato solo acido cloridrico, ottenendo conseguentemente due prove del tutto analoghe, rispettivamente, a quelle a pH 7,0 e 7,5 del Jar Test 2. In questo caso, i campioni prelevati sono stati chiamati "9" (pH 7,0), "10" (pH 7,5), "11" (pH 8,0) e "12" (pH 8,5).

## 2.4. Jar Test integrativi

A seguito dell'analisi dei risultati ottenuti dai Jar Test orientativi, si è deciso di svolgerne altri, finalizzati a valutare l'effetto di pH più alti (rispetto a quelli inizialmente testati), di dosaggi maggiori di reagenti e di un eventuale trattamento di affinamento con reagenti.

Nel dettaglio, sono state effettuate altre tre serie di Jar Test, di cui due sul refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico (Jar Test 4-5) e una su quel-

Tabella 2 – Jar Test integrativi

Jar Test	N° campione	pH [-]*	Tempo di coagulazione [min]	Tempo di flocculazione [min]	Tempo di sedimentazione [min]
4) Latte di calce	1A	8,0	3	30	15
	2A	8,5			
	3A	9,0			
	4A	9,5			
5) Dosaggi maggiori di reagenti	5A	8,0	3	30	15
	6A	8,5			
	7A	9,0			
	8A	9,5			
6) Trattamento di affinamento con reagenti	9A	7,5	3	30	15
	10A	8,0			
	11A	8,5			
	12A	9,0			

\* Nei Jar Test 4-5, uno degli obiettivi è stata la valutazione di pH maggiori rispetto a quelli inizialmente studiati, ma si è deciso comunque di considerare il range 8,0 – 9,5, in quanto dai Jar Test orientativi era emerso come il pH ottimale fosse compreso tra 8,0 e 8,5. Il Jar Test 6, invece, ha avuto come unico obiettivo la valutazione di un possibile trattamento di affinamento con reagenti ed è stato quindi considerato un range di pH intermedio tra quelli precedentemente descritti. Si precisa che i pH riportati in questa Tabella sono valori obiettivo; a seguito delle analisi di laboratorio, infatti, si potrebbero osservare valori leggermente diversi a causa dell'errore di misura associato al pHmetro utilizzato nelle prove.

lo in uscita dall'impianto (Jar Test 6) (Tabella 2). Si precisa che i campioni prelevati e utilizzati nelle prove risultano essere istantanei.

#### 2.4.1. Jar Test 4: latte di calce

Il Jar Test 4 è stato svolto per indagare ulteriormente l'effetto del dosaggio di latte di calce, dato che questo, nei Jar Test 1-2-3, è stato testato solamente per i campioni "11" e "12", portando ai migliori risultati in termini di abbattimento del cromo totale, anche se non nettamente evidenti.

Sono stati preparati quattro becher da 500 mL di refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico ed è stato corretto il pH sfruttando il latte di calce. Fatto ciò, è stato aggiunto il coagulante (poliammina 20%) negli usuali dosaggi dell'impianto (0,10 mL per becher) e gli agitatori sono stati impostati ad una fase di "flash mix" di 120 rpm per 3 min. Terminata la coagulazione, si è passati ad una fase di "slow mix" di 30 rpm per 30 min, aggiungendo il flocculante (0,5 mL di polielettrolita cationico per becher, come da dosaggi ordinari). Infine, a seguito della flocculazione, durante la quale si è monitorato periodicamente il pH, sono stati fermati gli agitatori per eseguire una sedimentazione di 15 min. Anche in questo caso, sono stati preparati dei campioni da inviare ad analisi, chiamati "1A" (pH 8,0), "2A" (pH 8,5), "3A" (pH 9,0) e "4A" (pH 9,5).

#### 2.4.2. Jar Test 5: dosaggi maggiori di reagenti

Il Jar Test 5 è stato realizzato per valutare l'effetto di un maggiore dosaggio di reagenti sull'abbattimento del cromo. La prova è stata eseguita in maniera analoga al Jar Test 4; le uniche differenze sono state i dosaggi maggiori di reagenti (incremento di coagulante e flocculante del 50%) e l'utilizzo di soda (20%), al posto del latte di calce, per l'aumento del pH. Da questa prova sono stati ottenuti i campioni chiamati "5A" (pH 8,0), "6A" (pH 8,5), "7A" (pH 9,0) e "8A" (pH 9,5).

#### 2.4.3. Jar Test 6: trattamento di affinamento con reagenti

Il Jar Test 6 è stato svolto per valutare l'effetto di un possibile affinamento a valle del trattamento biologico operato normalmente dall'impianto. Anche in questo caso, la procedura è stata analoga al Jar Test 4; tuttavia, il refluo di partenza è stato quello in uscita dall'impianto, i pH testati sono stati 7,5, 8,0, 8,5, 9,0 e, come per il Jar Test 5, è stata utilizzata soda (20%) per la correzione di quest'ultimo parametro. Dal Jar Test 6 sono stati otte-

nuti i campioni chiamati "9A" (pH 7,5), "10A" (pH 8,0), "11A" (pH 8,5) e "12A" (pH 9,0).

### 2.5. Effetto del trattamento biologico

Dato il layout impiantistico (trattamento biologico a valle di quello chimico-fisico), bisogna considerare che i risultati delle prove Jar Test (ad eccezione del Jar Test 6) fanno riferimento ad un refluo che deve essere ancora trattato biologicamente. Si è quindi deciso di valutare l'effetto del processo biologico sull'abbattimento del metallo, esaminando i dati disponibili in impianto per il cromo disciolto (ottenuto mediante filtrazione su membrana 0,45  $\mu\text{m}$ ), in ingresso e in uscita dalla fase biologica, così da stimarne sommariamente l'efficienza media di rimozione. Si precisa che tale valutazione è stata effettuata grazie all'analisi di campioni istantanei prelevati in ingresso e in uscita dal trattamento biologico. L'attenzione è stata focalizzata sul cromo disciolto in quanto, a seguito di una prima analisi dei dati forniti, si è subito notato che il cromo residuo, a valle del trattamento chimico-fisico, risulta essere essenzialmente quello presente in tale forma.

Al fine di comprendere più facilmente quanto analizzato nel presente lavoro, in Figura 1 (a pagina seguente) è riportato il layout della linea acque del depuratore Ecologica Naviglio S.p.A., insieme ai punti di campionamento selezionati.

## 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Per l'interpretazione dei risultati, si precisa che le analisi di pH, solidi sospesi totali e cromo disciolto non sono accreditate Accredia, a differenza degli altri parametri. L'incertezza, dove indicata, è stata calcolata con un fattore di copertura  $k = 2$ , a cui corrisponde un livello di probabilità di circa il 95%. I metodi utilizzati per la determinazione di tali parametri sono APAT CNR IRSA 2060 Man. 29 2003 (pH), ISO 15705:2002 cap 10.2 (COD), APAT CNR IRSA 2090B Man. 29 2003 (solidi sospesi totali) e UNI EN ISO 15587-2:2002 + UNI EN ISO 17294-2:2016 (cromo totale e cromo disciolto).

Si ricorda inoltre che tutti i campioni prelevati risultano essere istantanei.

### 3.1. Jar Test orientativi (Jar Test 1-2-3)

Di seguito si riportano le caratteristiche del refluo trattato nei Jar Test 1-2-3 (Tabella 3), nonché i ri-

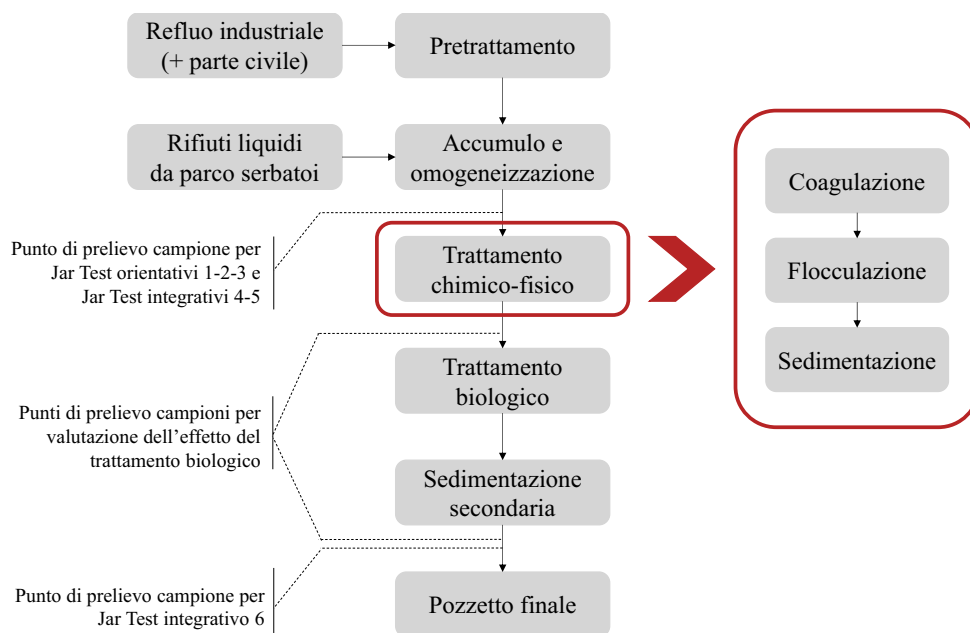


Figura 1 – Schema a blocchi della linea acque del depuratore Ecologica Naviglio S.p.A., con dettaglio dei punti di campionamento per lo svolgimento dei Jar Test e focus sul trattamento chimico-fisico di chiariflocculazione, oggetto di studio

Tabella 3 – Risultati delle analisi del refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico, su cui sono stati svolti i Jar Test orientativi 1-2-3

Parametro	Unità di misura	Risultato	Incertezza
pH	-	7,53	-
COD	mg L <sup>-1</sup>	3.260	± 231
Solidi sospesi totali	mg L <sup>-1</sup>	2.000	-
Cromo totale	mg L <sup>-1</sup>	10,7	± 1,1
Cromo disciolto	mg L <sup>-1</sup>	0,77	± 0,08

sultati delle analisi delle prime tre prove orientative (Tabella 4), con le relative efficienze di rimozione ( $\eta$ ) (Figura 2, a pagina seguente).

Analizzando i risultati dei Jar Test 1-2-3, appare evidente come adottare tempi di contatto corretti, raccomandati per le fasi di coagulazione e flocculazione, porti ad un miglioramento nell'abbattimento del cromo; inoltre, il pH ottimale risulta compreso tra 8,0 e 8,5. L'impiego del latte di calce ha dato i risultati migliori in termini di abbattimento del cromo totale; tuttavia, questi non si discostano molto da quelli ottenuti con l'utilizzo di soda.

Tabella 4 – Risultati dei Jar Test orientativi 1-2-3

	N° campione	pH [-]	COD [mg L <sup>-1</sup> ]	Solidi sospesi totali [mg L <sup>-1</sup> ]	Cromo totale [mg L <sup>-1</sup> ]	Cromo disciolto [mg L <sup>-1</sup> ]
Jar Test 1	1	7,44	616 ± 45	48	0,44 ± 0,05	0,41 ± 0,04
	2	7,99	621 ± 46	40	0,42 ± 0,04	0,31 ± 0,03
	3	8,21	638 ± 47	60	0,43 ± 0,04	0,29 ± 0,03
	4	8,46	650 ± 48	67	0,44 ± 0,05	0,30 ± 0,03
Jar Test 2	5	7,47	578 ± 43	13	0,33 ± 0,03	0,29 ± 0,03
	6	7,97	575 ± 42	18	0,26 ± 0,03	0,23 ± 0,02
	7	8,11	576 ± 42	18	0,25 ± 0,03	0,22 ± 0,02
	8	8,41	581 ± 43	26	0,26 ± 0,03	0,22 ± 0,02
Jar Test 3	9	7,36	568 ± 42	18	0,32 ± 0,03	0,29 ± 0,03
	10	7,59	564 ± 42	24	0,29 ± 0,03	0,24 ± 0,02
	11	8,17	571 ± 42	26	0,25 ± 0,03	0,21 ± 0,02
	12	8,51	576 ± 42	18	0,24 ± 0,02	0,23 ± 0,02

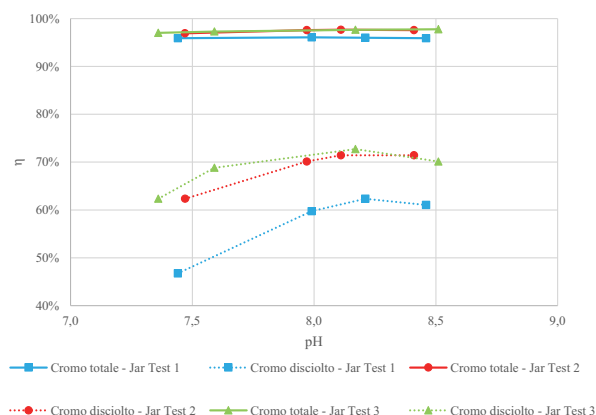


Figura 2 – Efficienze di rimozione ( $\eta$ ) per cromo totale e cromo disciolto, in funzione del pH, per i Jar Test orientativi 1-2-3

Mettendo in relazione cromo totale e cromo disciolto, si nota, inoltre, che il cromo residuo nel refluo, a valle del trattamento chimico-fisico, è sostanzialmente quello disciolto (anche questo è stato ridotto con l'adozione di tempistiche ottimali). Nel Jar Test 1 (simulazione delle condizioni operative dell'impianto), tutti i campioni non hanno rispettato il nuovo limite per il cromo previsto dalla Decisione di Esecuzione, mentre, nei Jar Test 2 e 3, tre campioni su quattro hanno rispettato tale limite.

### 3.2. Jar Test integrativi (Jar Test 4-5-6)

Di seguito si riportano le caratteristiche delle due tipologie di refluo trattate, rispettivamente, nei Jar Test 4-5 (ingresso trattamento chimico-fisico) (Tabella 5) e nel Jar Test 6 (uscita impianto) (Tabella 6), nonché i risultati delle analisi delle tre prove

Tabella 5 – Risultati delle analisi del refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico, su cui sono stati svolti i Jar Test integrativi 4-5

Parametro	Unità di misura	Risultato	Incertezza
pH	-	7,83	-
COD	mg L <sup>-1</sup>	1.470	± 105
Solidi sospesi totali	mg L <sup>-1</sup>	980	-
Cromo totale	mg L <sup>-1</sup>	3,31	± 0,34
Cromo disciolto	mg L <sup>-1</sup>	0,27	± 0,03

Tabella 6 – Risultati delle analisi del refluo in uscita dall'impianto, su cui è stato svolto il Jar Test integrativo 6

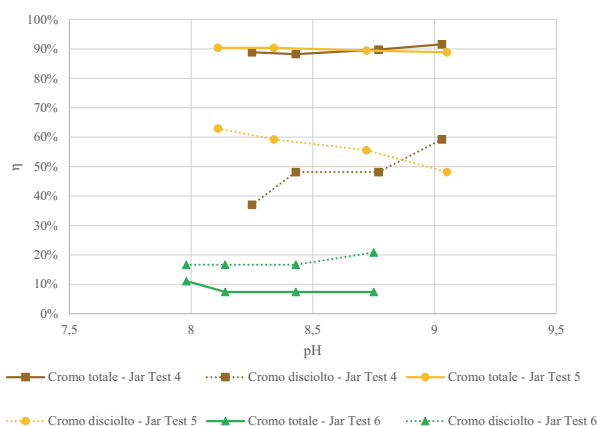
Parametro	Unità di misura	Risultato	Incertezza
pH	-	8,17	-
COD	mg L <sup>-1</sup>	106	± 9
Solidi sospesi totali	mg L <sup>-1</sup>	30	-
Cromo totale	mg L <sup>-1</sup>	0,27	-
Cromo disciolto	mg L <sup>-1</sup>	0,24	± 0,02

integrative (Tabella 7) con le relative efficienze di rimozione ( $\eta$ ) (Figura 3).

I Jar Test 4-5 sono stati effettuati sul refluo in ingresso al trattamento chimico-fisico dell'impianto, come i Jar Test 1-2-3; nonostante ciò, è importante precisare che questi due reflui, dato che sono stati campionati in giornate differenti, non sono identici. Ad esempio, quello utilizzato nei primi test è caratterizzato da concentrazioni di cromo totale, cromo disciolto e solidi sospesi totali pari, rispettivamente, a 10,7 mg L<sup>-1</sup>, 0,77 mg L<sup>-1</sup> e 2.000 mg L<sup>-1</sup>, a dif-

Tabella 7 – Risultati dei Jar Test integrativi 4-5-6

	N° campione	pH [-]	COD [mg L <sup>-1</sup> ]	Solidi sospesi totali [mg L <sup>-1</sup> ]	Cromo totale [mg L <sup>-1</sup> ]	Cromo disciolto [mg L <sup>-1</sup> ]
Jar Test 4	1A	8,25	527 ± 39	120	0,37 ± 0,04	0,17 ± 0,02
	2A	8,43	536 ± 40	100	0,39 ± 0,04	0,14 ± 0,01
	3A	8,77	519 ± 38	110	0,34 ± 0,04	0,14 ± 0,01
	4A	9,03	506 ± 38	110	0,28 ± 0,03	0,11 ± 0,01
Jar Test 5	5A	8,11	495 ± 37	110	0,32 ± 0,03	0,10 ± 0,01
	6A	8,34	496 ± 37	130	0,32 ± 0,03	0,11 ± 0,01
	7A	8,72	509 ± 38	150	0,35 ± 0,04	0,12 ± 0,01
	8A	9,05	513 ± 38	120	0,37 ± 0,04	0,14 ± 0,01
Jar Test 6	9A	7,98	111 ± 10	26	0,24 ± 0,02	0,20 ± 0,02
	10A	8,14	113 ± 10	30	0,25 ± 0,03	0,20 ± 0,02
	11A	8,43	160 ± 13	32	0,25 ± 0,03	0,20 ± 0,02
	12A	8,75	159 ± 13	28	0,25 ± 0,03	0,19 ± 0,02



**Figura 3 – Efficienze di rimozione ( $\eta$ ) per cromo totale e cromo disciolto, in funzione del pH, per i Jar Test integrativi 4-5-6**

ferenza del refluo esaminato per i Jar Test integrativi, dove queste concentrazioni sono risultate, rispettivamente, pari a  $3,31 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $0,27 \text{ mg L}^{-1}$  e  $980 \text{ mg L}^{-1}$ .

Mentre i risultati del Jar Test 5, in cui per la correzione del pH è stata utilizzata soda, confermano un migliore abbattimento del cromo a pH compreso tra 8,0 e 8,5, come già evidenziato nei primi test effettuati, dal Jar Test 4, invece, si evince che, con l'impiego del latte di calce, si ottiene un incremento della resa di rimozione aumentando ulteriormente il pH. Tale evidenza suggerisce l'opportunità, come prospettiva futura, di investigare l'effetto di valori ancora più alti del suddetto parametro sulle efficienze di abbattimento del metallo. L'utilizzo di un maggiore dosaggio di reagenti (Jar Test 5), se confrontato con il Jar Test 4, non sembra portare ad evidenti benefici nella rimozione del cromo totale.

Il Jar Test 6, invece, ha interessato il refluo in uscita dall'impianto, caratterizzato da concentrazioni di cromo totale, cromo disciolto e solidi sospesi totali rispettivamente pari a  $0,27 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $0,24 \text{ mg L}^{-1}$  e  $30 \text{ mg L}^{-1}$ . Come si evince da Tabella 7, un eventuale trattamento di affinamento, operato con i reagenti normalmente utilizzati nell'impianto, non porta né ad evidenti benefici, in termini di abbattimento del cromo, né a sensibili cambiamenti variando il pH; tuttavia, tale prova ha comportato un'ulteriore riduzione del 16-20% circa del cromo disciolto.

Sebbene nei Jar Test 4-5 si sia partiti da una concentrazione di cromo totale minore (rispettivamente di  $3,31 \text{ mg L}^{-1}$  e  $10,7 \text{ mg L}^{-1}$ ), rispetto a quella dei primi test effettuati, e nonostante l'avvicinamento al BAT-AEL, va comunque evidenziato come quest'ultimo non sia mai stato rispettato, ad eccezione della prova, a pH 9,03, del Jar Test 4. Variazioni

**Tabella 8 – Concentrazioni di cromo disciolto in ingresso e in uscita dal trattamento biologico (dati forniti dai gestori), con la relativa stima, di prima approssimazione, dell'efficienza di rimozione**

N° analisi	$Cr_{\text{dis,in bio}} [\text{mg L}^{-1}]$	$Cr_{\text{dis,out bio}} [\text{mg L}^{-1}]$	$\eta_{\text{bio}} [\%]$
BIO-1	$1,11 \pm 0,12$	$0,39 \pm 0,04$	$\approx 65$
BIO-2	$0,28 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,04$	$\approx -54^*$
BIO-3	$0,46 \pm 0,05$	$0,38 \pm 0,04$	$\approx 17$
BIO-4	$0,56 \pm 0,06$	$0,45 \pm 0,05$	$\approx 20$
BIO-5	$0,64 \pm 0,07$	$0,39 \pm 0,04$	$\approx 39$
BIO-6	$0,31 \pm 0,03$	$0,44 \pm 0,05$	$\approx -42^*$
BIO-7	$0,47 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,04$	$\approx 15$
BIO-8	$1,36 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,05$	$\approx 67$
BIO-9	$0,86 \pm 0,09$	$0,47 \pm 0,05$	$\approx 45$
BIO-10	$0,75 \pm 0,08$	$0,58 \pm 0,06$	$\approx 23$

\* Le efficienze di rimozione negative potrebbero essere imputabili alla normale variabilità insita in un refluo reale.

nelle caratteristiche iniziali del refluo trattato dall'impianto potrebbero quindi determinare un avvicinamento o un superamento del limite citato.

### 3.3. Effetto del trattamento biologico

In Tabella 8 si riportano i dati (messi a disposizione dai gestori) di concentrazione di cromo disciolto in ingresso e in uscita dal trattamento biologico (indicati rispettivamente con  $Cr_{\text{dis,in bio}}$  e  $Cr_{\text{dis,out bio}}$ ) con la relativa efficienza di rimozione ( $\eta_{\text{bio}}$ ), stimata sommariamente sulla base delle due concentrazioni precedenti. Si precisa che i campionamenti sono stati effettuati in diverse giornate di Gennaio e Febbraio 2020, ad eccezione del campionamento "BIO-1", svolto a Luglio 2019.

Dai dati a disposizione si deduce, in prima approssimazione, un'efficienza media di rimozione del cromo disciolto pari a circa il 20%.

Assumendo questo rendimento di rimozione, quindi, è possibile determinare il cromo disciolto in uscita dal trattamento biologico (quindi in uscita dall'impianto) per i campioni dei Jar Test 1-2-3 (Tabella 9, a pagina seguente) e 4-5 (Tabella 10, a pagina seguente).

A tali valori di cromo disciolto, in uscita dal trattamento biologico (e, quindi, dall'impianto), bisognerebbe aggiungere anche il cromo sospeso che, tuttavia, può essere rimosso inserendo una filtrazione finale nel layout impiantistico. Bisogna inoltre ricordare che il valor medio di efficienza di rimozione (20% circa) del trattamento biologico è

**Tabella 9 – Stima di prima approssimazione della concentrazione di cromo disciolto in uscita dal trattamento biologico per i Jar Test orientativi 1-2-3**

	N° campione	Cr <sub>dis,in bio</sub> [mg L <sup>-1</sup> ]*	Cr <sub>dis,out bio</sub> [mg L <sup>-1</sup> ]
Jar Test 1	1	0,41	0,33
	2	0,31	0,25
	3	0,29	0,23
	4	0,30	0,24
Jar Test 2	5	0,29	0,23
	6	0,23	0,19
	7	0,22	0,18
	8	0,22	0,18
Jar Test 3	9	0,29	0,23
	10	0,24	0,19
	11	0,21	0,17
	12	0,23	0,19

\*I valori di Cr<sub>dis,in bio</sub> di questa Tabella corrispondono alle concentrazioni di cromo disciolto di Tabella 4.

**Tabella 10 – Stima di prima approssimazione della concentrazione di cromo disciolto in uscita dal trattamento biologico per i Jar Test integrativi 4-5**

	N° campione	Cr <sub>dis,in bio</sub> [mg L <sup>-1</sup> ]*	Cr <sub>dis,out bio</sub> [mg L <sup>-1</sup> ]
Jar Test 5	1A	0,17	0,14
	2A	0,14	0,11
	3A	0,14	0,11
	4A	0,11	0,09
Jar Test 6	5A	0,10	0,08
	6A	0,11	0,09
	7A	0,12	0,10
	8A	0,14	0,11

\*I valori di Cr<sub>dis,in bio</sub> di questa Tabella corrispondono alle concentrazioni di cromo disciolto di Tabella 7.

stato calcolato sulla base di soli dieci dati disponibili in impianto, peraltro molto diversi l'uno dall'altro, come si evince da Tabella 8.

Alcuni studi hanno focalizzato l'attenzione sull'abbattimento del cromo operato dal processo a fanghi attivi. Barth *et al.* (1965), ad esempio, riportano come tale processo non sia molto efficace nell'abbattimento di certi metalli (tra cui il cromo) e come questi ultimi siano presenti, nell'effluente finale, principalmente in forma solubile. Bisogna tuttavia precisare che tale studio è stato condotto su un impianto tradizionale a fanghi attivi a scala pilota;

inoltre, il cromo indagato è stato quello in forma esavalente. L'impianto Ecologica Naviglio S.p.A., invece, oltre che essere un depuratore *full scale*, prevede anche fasi di ossidazione-nitrificazione e denitrificazione e tratta cromo già prevalentemente presente in forma trivalente. Stasinakis *et al.* (2003) confermano un ridotto abbattimento per il Cr(VI), ma riportano efficienze di rimozione di Cr(III) disciolto elevate (fino al 95% circa) per concentrazioni di quest'ultimo, nell'influente, che variano da 0,1 mg L<sup>-1</sup> a 10 mg L<sup>-1</sup>. Tali risultati sono stati tuttavia ottenuti in *lab scale*, sfruttando un *Sequencing Batch Reactor* (SBR), in presenza di una concentrazione di biomassa nel reattore di 800 mg L<sup>-1</sup> e con un'età del fango di 2 d. Lo studio in questione, di fatto, evidenzia come questi due ultimi parametri possano influire sull'abbattimento del cromo trivalente disciolto: l'aumento di concentrazione di biomassa nel reattore e la diminuzione dell'età del fango determinano un incremento di efficienza di rimozione. Se, per il primo parametro, ciò è associato alla maggiore disponibilità di siti di assorbimento, per il secondo i meccanismi coinvolti sono incerti. Per il Cr(VI) disciolto, invece, l'influenza di questi fattori non è altrettanto evidente. Data l'importante variabilità riscontrabile in un depuratore *full scale* operante in continuo, come Ecologica Naviglio S.p.A., l'effetto del trattamento biologico richiede sicuramente un ulteriore approfondimento. Tornando al caso in esame e facendo comunque riferimento alle concentrazioni del solo cromo disciolto (ipotizzando quindi l'inserimento di una fase di filtrazione finale, a valle del trattamento biologico, per la rimozione del cromo sospeso), stimate sommariamente in uscita dall'impianto e riportate in Tabella 9 e Tabella 10, ad eccezione del campione "1", si nota il rispetto del BAT-AEL di 0,3 mg L<sup>-1</sup>; uno scostamento leggermente più evidente da quest'ultimo si osserva nei due Jar Test integrativi (5-6), rispetto ai Jar Test orientativi (1-2-3). Bisogna però ricordare che il refluo di partenza dei Jar Test 4-5 presenta una concentrazione di cromo disciolto pari a 0,27 mg L<sup>-1</sup>, già al di sotto del BAT-AEL, a differenza di quello utilizzato nei Jar Test 1-2-3, in cui tale concentrazione è risultata pari a 0,77 mg L<sup>-1</sup>.

#### 4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha investigato l'opportunità di adottare alcuni accorgimenti tecnici per operare l'upgrading dell'impianto Ecologica Naviglio S.p.A. in vista dell'adeguamento al nuovo limite allo scarico per il cromo, previsto, per i depurato-



ri esistenti, entro quattro anni dalla notifica della Decisione di Esecuzione 2018/1147 e fissato a 0,01-0,3 mg L<sup>-1</sup>.

Un'analisi della letteratura ha evidenziato l'esistenza di diversi processi implementabili per la rimozione di tale metallo, quali precipitazione, riduzione-precipitazione, riduzione fotocatalitica, elettrocoagulazione, scambio ionico, adsorbimento e processi biologici. Dal momento che, ad oggi, l'impianto oggetto di studio opera già un trattamento di chiariflocculazione, si è deciso di valutare, in primis, l'eventuale effetto, sulle efficienze di abbattimento del cromo, di alcune modifiche apportate a tale fase del trattamento.

I Jar Test svolti hanno indicato che, per migliorare le rese di rimozione del metallo, bisogna prima di tutto modificare i tempi di coagulazione e flocculazione attualmente adottati nel depuratore, passando da 20 min a 3 min per la coagulazione e da 7 min a 30 min per la flocculazione. Inoltre, hanno mostrato che il valore di pH ottimale deve essere compreso nell'intervallo 8,0-8,5, nel caso di utilizzo di soda come basificante, mentre, nel caso di impiego di latte di calce (ad oggi non dosato in impianto), hanno messo in evidenza come pH maggiori permettano di conseguire abbattimenti migliori. In quest'ultimo caso, sarebbe opportuno svolgere altri test a pH > 9; tuttavia, sarebbe contestualmente indispensabile valutare l'eventuale impatto di tale incremento di pH sulla fase biologica dell'impianto, successiva al trattamento chimico-fisico.

È stato testato anche l'incremento del 50% del dosaggio dei reagenti normalmente utilizzati in impianto (Jar Test 5), che, però, non ha portato a benefici rilevanti nella rimozione del cromo, se paragonati a quelli conseguibili con il Jar Test 4.

Attraverso il Jar Test 6, è stato preso in considerazione anche un possibile trattamento di affinamento mediante i reagenti usualmente utilizzati nell'impianto (coagulante e flocculante), grazie al quale è stata ottenuta un'ulteriore riduzione, del 16-20% circa, del cromo disciolto.

I Jar Test, svolti su campioni di refluo prelevati in ingresso al trattamento chimico-fisico, hanno inoltre evidenziato (grazie ad un confronto tra le concentrazioni di cromo totale e di cromo disciolto) che, a seguito del processo di chiariflocculazione, il cromo residuo si trova prevalentemente in forma disciolta. È stato quindi valutato l'effetto del trattamento biologico su quest'ultima: un'analisi dei dati forniti dai gestori, relativi alle sezioni in ingresso ed in uscita dalla fase biologica, ha indica-

to un'efficienza media di rimozione biologica del 20% circa, estremamente variabile a seconda delle condizioni di funzionamento dell'impianto e, quindi, non totalmente affidabile.

Confrontando i valori di concentrazione di cromo totale e cromo disciolto, si nota inoltre che un'adeguata filtrazione potrebbe consentire di rimuovere il cromo sospeso residuo presente nel refluo in uscita dal trattamento biologico.

In conclusione, per l'impianto oggetto di studio è possibile intervenire adottando una serie di accorgimenti; tuttavia, le soluzioni individuate non sono sufficienti a garantire un adeguato margine di sicurezza rispetto al BAT-AEL di 0,01-0,3 mg L<sup>-1</sup>, stabilito per il cromo dalla Decisione di Esecuzione 2018/1147: variazioni nelle caratteristiche iniziali del refluo trattato dall'impianto potrebbero comportare un avvicinamento o un superamento del BAT-AEL. Sarà dunque indispensabile valutare anche altri interventi da implementare sull'impianto esistente, nonché optare per l'utilizzo di tecnologie specifiche di rimozione avanzata del metallo indagato. Tra queste ultime si riportano, ad esempio, elettrocoagulazione, adsorbimento, scambio ionico e processi biologici; è importante, tuttavia, precisare che alcune di queste tecniche hanno ancora ridotta applicazione in impianti a scala reale. In futuro, sono previste ulteriori sperimentazioni finalizzate ad individuare la migliore tecnologia applicabile al caso in esame.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Alidokht L., Khataee A.R., Reyhanitabar A., et al. (2011). Reductive removal of Cr(VI) by starch-stabilized Fe<sup>0</sup> nanoparticles in aqueous solution. *Desalination*, vol (270): 105-110.
- APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici) e IRSA-CNR (Istituto di Ricerca sulle Acque-Consiglio Nazionale delle Ricerche) (2003). *Metodi Analitici per le Acque*. Vol. 1.
- ARPAE (Agenzia Regionale Prevenzione, Ambiente ed Energia dell'Emilia-Romagna). *Ecoscienza* (2018), vol (4): anno IX.
- Barrera-Díaz C.E., Lugo-Lugo V. e Bilyeu B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, vol (223-224): 1-12.
- Barth E.F., Ettinger M.B., Salotto B. V., et al. (1965). Summary report on the effects of heavy metals on the biological treatment processes. *Water Pollution Control Federation*, vol (37), 86-96.
- Brinkmann T., Giner Santonja G., Yükseler H. et al. (2016). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector.

- Bruno P., Di Bella G., Campo R. et al. (2019). Chiariflocculazione in continuo in impianto bench scale per il trattamento di reflui industriali salini contaminati da idrocarburi. *Ingegneria dell'Ambiente*, vol (6): 17-29.
- Chen H., Dou J. e Xu H. (2017). Removal of Cr(VI) ions by sewage sludge compost biomass from aqueous solutions: Reduction to Cr(III) and biosorption. *Applied Surface Science*, vol (425): 728-735.
- EFSA (European Food Safety Authority) (2014). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water. *EFSA Journal*, vol 12 (3): 3595.
- Egodawatte S., Datt A., Burns E.A., et al. (2015). Chemical insight into the adsorption of chromium(III) on iron oxide/mesoporous silica nanocomposites. *Langmuir*, vol (31): 7553-7562.
- El Nemr A. (2009). Potential of pomegranate husk carbon for Cr(VI) removal from wastewater: Kinetic and isotherm studies. *Journal of Hazardous Materials*, vol (161): 132-141.
- Fonseca-Correa R., Giraldo L. e Moreno-Piraján J.C. (2013). Trivalent chromium removal from aqueous solution with physically and chemically modified corncob waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol (101): 132-141.
- Fu F. e Wang Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, vol (92): 407-418.
- Golder A.K., Samanta A.N. e Ray S. (2007). Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, vol (53): 33-41.
- Hashem M.A., Hasan M., Momen M.A. et al. (2020). Water hyacinth biochar for trivalent chromium adsorption from tannery wastewater. *Environmental and Sustainability Indicators*, vol (5): 100022.
- Jiang D., Huang D., Lai C., et al. (2018). Difunctional chitosan-stabilized Fe/Cu bimetallic nanoparticles for removal of hexavalent chromium wastewater. *Science of the Total Environment*, vol (644): 1181-1189.
- Ku Y. e Jung I.-L. (2001). Photocatalytic reduction of Cr(VI) in aqueous solutions by UV irradiation with the presence of titanium dioxide. *Water Research*, vol (35): 135-142.
- Li H., Chi Z. e Li J. (2013). Covalent bonding synthesis of magnetic graphene oxide nanocomposites for Cr(III) removal. *Desalination and Water Treatment*: 1-10.
- Li J., Bai J., Huang K. et al. (2014). Removal of trivalent chromium in the complex state of trivalent chromium passivation wastewater. *Chemical Engineering Journal*, vol (236): 59-65.
- Lodolo A., Cortesi A. e Casanova M. (2010). *Depurazione delle Acque nell'Industria Galvanica*. Trieste: Edizioni Università di Trieste (EUT).
- Nur-E-Alam Md., Mia Md. A.S., Ahmad F., et al. (2020). An overview of chromium removal techniques from tannery effluent. *Applied Water Science*, vol (10): 205.
- Padmavathy K.S., Madhu G. e Haseena P.V. (2016). A study on effects of pH, adsorbent dosage, time, initial concentration and adsorption isotherm study for the removal of hexavalent chromium (Cr (VI)) from wastewater by magnetite nanoparticles. *Procedia Technology*, vol (24): 585-594.
- Papaevangelou V.A., Gikas G.D. e Tsihrintzis V.A. (2016). Chromium removal from wastewater using HSF and VF pilot-scale constructed wetlands: Overall performance, and fate and distribution of this element within the wetland environment. *Chemosphere*, vol (168): 716-730.
- Piazzoli A. e Antonelli M. (2018). Feasibility assessment of chromium removal from groundwater for drinking purposes by sorption on granular activated carbon and strong base anion exchange. *Water Air Soil Pollution*, vol (229): 193.
- Remoundaki E., Hatzikioseyan A. e Tsezos M. (2007). A systematic study of chromium solubility in the presence of organic matter: consequences for the treatment of chromium-containing wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol (82): 802-808.
- Riva A. e Sorlini S. (2018). *Autorizzazione Integrata Ambientale: Proposte per Ottimizzarne l'Applicazione negli Impianti di Trattamento Acque Reflue e Rifiuti Liquidi*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli S.p.A.
- Sharma S. e Adholeya A. (2011). Detoxification and accumulation of chromium from tannery effluent and spent chrome effluent by *Paecilomyces lilacinus* fungi. *International Biodegradation & Biodegradation*, vol (65): 309-317.
- Sobhanardakani S., Parvizimosaed H. e Olyaie (2013). Heavy metals removal from wastewaters using organic solid waste-rice husk. *Environmental Science and Pollution Research*, vol (20): 5265-5271.
- Stasinakis A.S., Thomaidis N.S., Mamais D. et al. (2003). Chromium species behaviour in the activated sludge process. *Chemosphere*, vol (52): 1059-1067.
- Sultana M.Y., Akratos C.S., Pavlou S., et al. (2014). Chromium removal in constructed wetlands: a review. *International Biodegradation & Biodegradation*, vol (96): 181-190.
- WEF (Water Environmental Federation), (2008). *Industrial Wastewater Management, Treatment, and Disposal*. Third Edition. McGrawHill.
- Yang J.-K. e Lee S.-M. (2006). Removal of Cr(VI) and humic acid by using TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *Chemosphere*, vol (63): 1677-1684.

## 6. RIFERIMENTI NORMATIVI

- Decisione di Esecuzione (UE) 2018/1147 della Commissione del 10 agosto 2018 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) per il trattamento dei rifiuti, ai sensi della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- ISO 15705:2002 Water quality. Determination of the chemical oxygen demand index (ST-COD). Small-scale sealed-tube method.
- UNI EN ISO 15587-2:2002 Qualità dell'acqua. Digestione per la determinazione di alcuni elementi in acqua. Digestione con acido nitrico.
- UNI EN ISO 17294-2:2016 Qualità dell'acqua. Applicazione della spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS). Parte 2: Determinazione di elementi selezionati, compresi gli isotopi dell'uranio.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano sentitamente il personale di Ecologica Naviglio S.p.A. e, in particolare, Alberto Riva per la gentile concessione dei dati riguardanti il dimensionamento e l'esercizio dell'impianto e Camillo Campioli per la preziosa assistenza fornita in fase di raccolta dei dati e di esecuzione delle analisi.

ROAD TO  
ECOMONDO  
2021

f i n t y  
ecomondo.com

# ECOMONDO

Leading  
the ecological  
transition.

**26-29 OCTOBER 2021**  
RIMINI EXPO CENTRE - ITALY

Ecomondo as a driver for a healthy,  
efficient and productive sustainable  
industry.

organized by

**ITALIAN  
EXHIBITION  
GROUP**  
Providing the future

in collaboration with



**ITCA**  
ITALIAN TRADE AGENCY

simultaneously with

**KEY ENERGY**  
THE RENEWABLE ENERGY EXPO

# ABBATTI I COSTI DI SMALTIMENTO RIDUCENDO LO SCARTO QUASI A ZERO CON I NOSTRI EVAPORATORI



 **+3000**  
evaporatori  
installati

 **Economia  
circolare e  
sviluppo  
sostenibile**

 **Impianti  
Zero liquid  
discharge**

 **Tailor made**

## LE MIGLIORI SOLUZIONI PER OGNI APPLICAZIONE



**PRESSOFUSIONE**



**PIATTAFORME DI  
SMALTIMENTO**



**VULCANIZZAZIONE  
GOMMA**



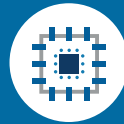
**LAVANDERIE  
INDUSTRIALI**



**GALVANICA**



**TRATTAMENTO  
DEL PERCOLATO  
DA DISCARICHE**



**ELETTRONICA E  
SEMICONDUCTORI**



**PACKAGING**



**TRATTAMENTO  
DIGESTATO**



**CHIMICA  
FARMACEUTICA**



**LATTIERO-  
CASEARIO**



**LAVORAZIONI  
MECCANICHE**



**ALIMENTARI**



**AROMI E  
ERBORISTERIA**



**CONCENTRAZIONE  
DEI MOSTI**



**VERNICIATURA  
INDUSTRIALE**



**PROCESSI DI  
STAMPA**



**TRATTAMENTI  
TERMICI**

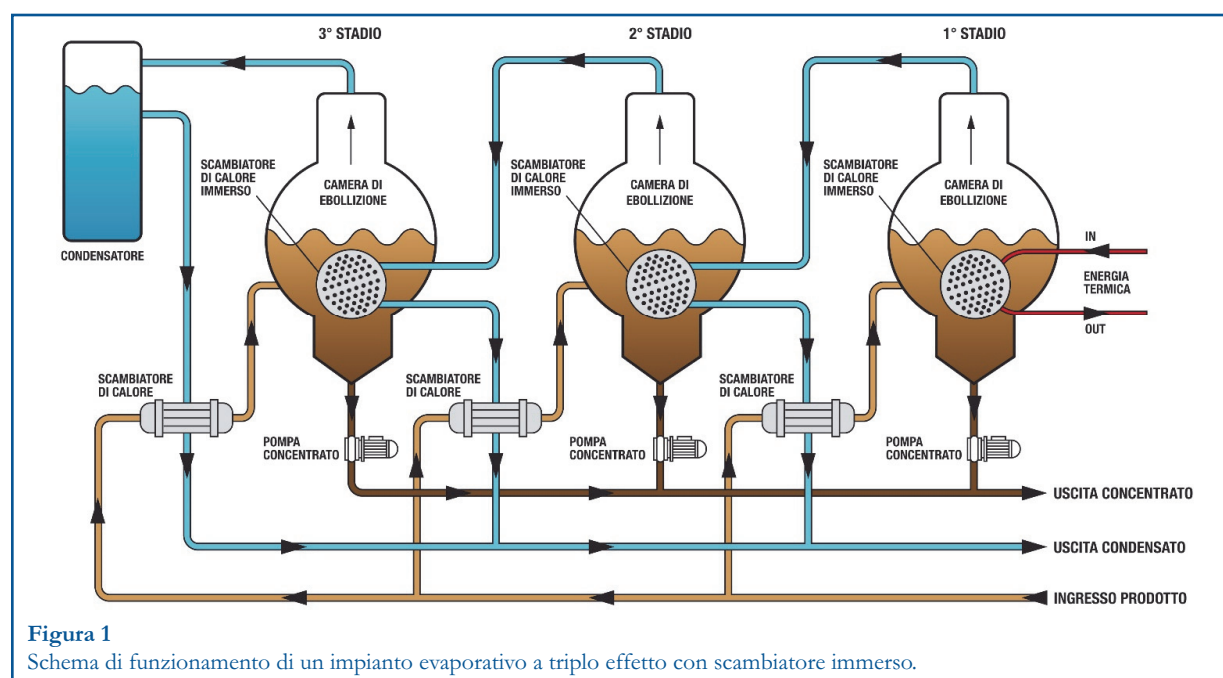
La tematica del trattamento acque interessa tutti gli ambiti industriali, in quanto questo aspetto non dipende da grandezza o campo applicativo dei vari processi: ogni azienda al termine del proprio ciclo produttivo giunge alla realizzazione di un prodotto finito e di una serie di scarti solidi, emissioni gassose e/o reflui liquidi che per legge non possono essere rilasciati nell'ambiente ma necessitano di opportuni trattamenti.

All'interno dell'ampio ventaglio di tecnologie e soluzioni sviluppate da Eco-Techno spicca il trattamento evaporativo sottovuoto mediante fonte termica, basato quindi sull'utilizzo di vapore o acqua calda come utilities per riscaldare i reflui liquidi fino all'evaporazione (e purificazione) dell'acqua in essi contenuta. L'evaporazione sottovuoto è una tecnologia consolidata di trattamento delle acque di scarto che consente la separazione della frazione acquosa da una miscela concentrata di sostanze inquinanti altobollenti, la cui concentrazione cresce all'aumentare della durata del trattamento. Solitamente, tale soluzione di risulta è destinata successivamente a smaltimento; talvolta, tale tecnologia può essere impiegata

anche per la concentrazione di miscele diluite da riciclare all'interno dei processi produttivi, ed ha lo scopo quindi di aumentare la purezza dei composti da recuperare. Nello specifico il presente articolo sarà focalizzato sulla trattazione inerente agli evaporatori a singolo e multiplo effetto con scambiatore interno, una realtà consolidata e diffusa in questo ambito del trattamento acque.

Di seguito, per una migliore comprensione del funzionamento degli impianti menzionati, viene rappresentato lo schema di funzionamento di un impianto di evaporazione sottovuoto con scambiatore immerso a tre stadi (Figura 1).

A livello ingegneristico il cuore di questi impianti è costituito da vessel cilindrici orizzontali con fondi torosferici in acciaio, chiamati caldaie (o camere evaporative); a seconda delle necessità di trattamento gli impianti possono essere a singolo stadio o multistadio, fino ad un numero massimo di tre caldaie. All'aumentare del numero di stadi aumenta di conseguenza il risparmio energetico, derivante dal fatto di incrementare la produzione e quindi la quantità di evaporato, mantenendo al contempo costante





**Figura 2**  
ECO DPM 3 – Evaporatore termico a triplo effetto.

l'alimentazione, la quale viene inviata allo scambiatore di preriscaldamento prima di entrare in caldaia. Negli impianti multistadio la configurazione standard prevede che le caldaie lavorino in "parallelo", il che significa che tutte le caldaie ricevono la stessa alimentazione separatamente ed evaporano il refluo in modo indipendente dalle altre; ciò che viene caricato all'interno di una caldaia non entra in contatto con le alimentazioni degli altri stadi e viene

il consumo energetico complessivo. Ogni caldaia è dotata di uno scambiatore a fascio tubiero interno, alloggiato nella parte inferiore dell'unità, e di una sezione superiore cilindrica denominata "duomo" destinata al convogliamento dell'evaporato in cui è presente un demister (il lettore perdoni la sineddoche ormai divenuta nel linguaggio tecnico una costante nel campo dei *mist eliminators*), ovvero una sezione di eliminazione delle nebbie in cui un certo volume è occupato da corpi di riempimento (fili intrecciati, anelli pall, raschig, ecc.), i quali hanno la funzione di ostacolare il trascinarsi di sostanze inquinanti all'interno del distillato. La forma e la struttura interna dell'evaporatore ricordano dei classici ribollitori Kettle, largamente impiegati nell'industria petrolchimica per l'evaporazione parziale delle miscele di idrocarburi. Per poter evaporare l'alimentazione in ogni caldaia è necessario che gli stadi operino a pressione decrescente dal primo all'ultimo, dato che a valori decrescenti di pressione corrispondono temperature di ebollizione decrescenti. Il vuoto viene creato mediante degli eiettori, uno per stadio, in cui il fluido motore è acqua in pressione movimentata da un'apposita pompa ed il fluido aspirato è costituito da aria e acqua condensata. Il funzionamento in continuo della pompa crea una depressione costante nelle caldaie e nelle linee del distillato, che consente l'evaporazione continua del solvente della miscela in caldaia. In tutti gli impianti, a seguito della condensazione, il distillato viene aspirato nel circuito del vuoto attraverso l'eiettore ed inviato nel mantello di un secondo scambiatore di calore che ha una duplice finalità: funge sia da serbatoio per il distillato che da recupero termico a vantaggio del-

concentrato separatamente da queste. L'unica interazione tra gli stadi, come verrà esplicitato nel paragrafo successivo, è l'impiego del vapore prodotto in ogni stadio per riscaldare lo stadio successivo. Durante il processo evaporativo l'acqua calda o il vapore (a seconda della disponibilità) vengono alimentati al primo stadio all'interno dello scambiatore di calore – lato tubi – e cedono calore al refluo presente all'interno della caldaia (lato mantello). Mantenendo la pressione in caldaia sufficientemente bassa (ben al di sotto della pressione atmosferica), viene realizzata l'evaporazione della frazione acquosa contenuta nel refluo a temperature minori rispetto alla normale temperatura di evaporazione dell'acqua a condizioni atmosferiche. Il vapore prodotto, aspirato dal vuoto, viene incanalato allo stadio successivo, dove entra nello scambiatore di calore lato tubi e condensa, riscaldando il refluo che si trova ad una temperatura inferiore rispetto allo stadio precedente, grazie alle condizioni di vuoto più spinto. Questo schema si ripete fino all'ultimo stadio, in cui la condensazione dei vapori uscenti dal duomo della caldaia viene realizzata mediante condensatore esterno a piastre, il quale sfrutta come utility acqua proveniente da torri di raffreddamento o dry cooler. In un impianto a multiplo effetto, la temperatura di lavoro del primo stadio è uno dei gradi di libertà del sistema, in quanto può essere scelta dall'operatore in relazione alla qualità del vettore termico di riscaldamento disponibile. La portata di fluido di riscaldamento viene quindi regolata per mantenere la temperatura di lavoro il più possibile costante comandando l'apposita valvola di regolazione. Gli stadi successivi al primo non dispongono di una vera e

propria regolazione di processo, bensì la regolazione della temperatura di lavoro delle caldaie ha un fondamento fisico: la temperatura viene regolata dal bilancio tra il calore scambiato ed il calore di evaporazione, e tra la portata di evaporato e la portata aspirata dal circuito del vuoto.

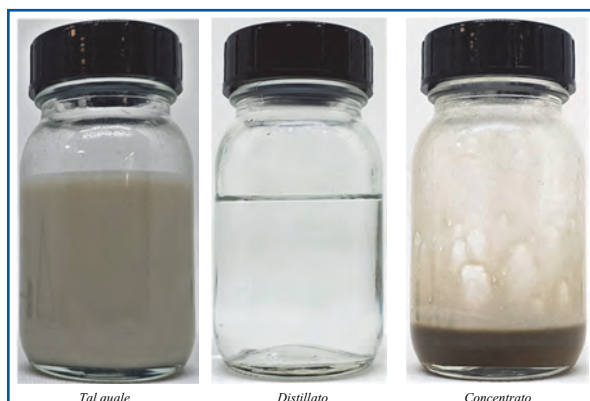
L'aspirazione del vuoto causa il calo della pressione misurata all'interno delle caldaie, con conseguente calo della temperatura di ebollizione dell'acqua; il calore fornito attraverso lo scambiatore, se è sufficientemente elevato da produrre una quantità di evaporato avente portata volumetrica superiore alla portata aspirata dal circuito del vuoto, causa l'aumento della pressione nella camera di evaporazione e quindi della temperatura di ebollizione del refluo. L'incremento della temperatura continua fino a che non si ha il calo del calore scambiato per riduzione del  $\Delta T$  dello scambiatore: quando si raggiunge l'equilibrio tra il calore scambiato ed il calore di evaporazione la temperatura si assesta e rimane pressoché costante durante il processo evaporativo. Non installando dunque un sistema di regolazione della pressione in caldaia, il lavoro delle pompe da vuoto è sempre sfruttato al 100%, efficientando così il consumo elettrico. Nella condizione ottimale di design il consumo di un impianto evaporativo monostadio è di circa 600 kcal/kg di distillato; per gli impianti a doppio effetto il consumo di calore quasi si dimezza, scendendo a 320 kcal/kg di distillato, mentre negli impianti a triplo effetto il consumo cala fino a 220 kcal/kg di distillato. La diminuzione del calore necessario all'evaporazione non è precisamente inversamente proporzionale al numero di stadi, in quanto la portata di evaporato cala leggermente passando dal primo all'ultimo stadio: è necessario, infatti, che il calore fornito al primo stadio sia nella quantità giusta, oltre che per evaporare il tal quale presente nel primo stadio, anche per riscaldare il tal quale nello stadio successivo fino alla temperatura di ebollizione. Questo calore, detto "sensibile", è alla base della discrepanza dell'entità del calore scambiato ad ogni stadio. A titolo di esempio per un impianto a tre effetti di taglia 10.000 litri/giorno, nella condizione di ottimo di design, i 416,6 litri/ora evaporati vengono così ripartiti: nel primo stadio ne vengono evaporati 147,8 litri/ora, nel secondo 137,8 litri/ora e nel terzo 131 litri/ora. La lieve differenza di portata tra due stadi consecutivi, condensando, produce la quantità calore necessaria al riscaldamento dell'alimentazione dello stadio successivo fino alla temperatura di bolla (e a coprire la minima variazione delle entalpie di evaporazione dovuta alla differente temperatura di ebollizione tra gli stadi). Tale discorso vale ovviamente sia per le utilities di riscaldamento

che per quelle di raffreddamento, dove il consumo ridotto è invece relativo all'energia elettrica richiesta nell'impiego di una torre evaporativa o dry cooler di taglia inferiore rispetto a quanto servirebbe per un impianto mono effetto.

Questa tipologia di impianti viene impiegata nel trattamento di reflui con portate variabili tra i 4.000 ed i 30.000 litri al giorno, e quindi in un range di potenzialità produttiva che potremmo definire intermedio tra basse ed alte portate di alimentazione. Si possono ottenere elevati fattori di concentrazione per i reflui trattati, con tempi per ogni ciclo di evaporazione che vanno mediamente dalle 10-12 ore fino a 2-3 giorni ed oltre. Alla base dello studio di progetto di ogni impianto viene considerata la compatibilità tra ogni refluo in esame ed un ampio ventaglio di leghe di acciaio e materie plastiche impiegabili nella realizzazione di ogni parte dell'impianto, col fine di prevenire eventuali problemi di corrosione.

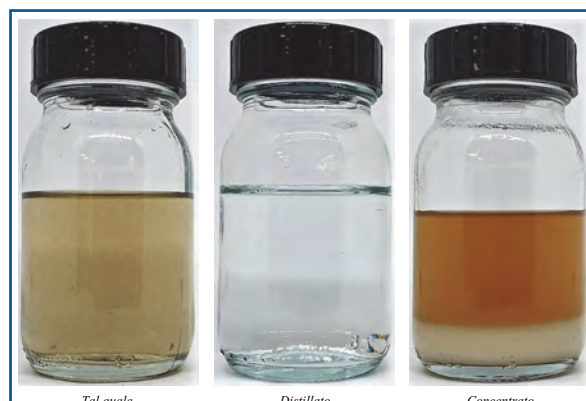
Un vantaggio non trascurabile derivante dall'impiego di questa classe di evaporatori sta nel fatto che tali impianti sono in grado di lavorare efficientemente con fonti di calore di recupero, provenienti per esempio da impianti di cogenerazione, ritorni di condense, recupero termico da fumi: è quindi possibile condurre gli impianti sfruttando fonti di calore a costo basso o nullo, in modo tale da abbattere enormemente i costi operativi dell'impianto di evaporazione. Infatti, in tal caso l'unico costo di conduzione dell'impianto è quello relativo al consumo elettrico (contributo minimo, imputabile alle sole pompe da vuoto, di ricircolo e di scarico del concentrato) e alla produzione di acqua di raffreddamento. Solitamente sono in possesso di tali fonti secondarie di energia aziende che conducono processi galvanici e trattamenti superficiali su metalli in genere, le pressofusioni, le aziende alimentari, solo per citarne alcune.

Un altro dei vantaggi degli impianti multistadio con scambiatore immerso, è che riescono a sfruttare le utilities meno pregiate, quali vapore a 1 barg e acqua anche a temperature di molto inferiori ai "canonici" 90°C: questi impianti, infatti, possono utilizzare come vettore di riscaldamento anche acqua a temperature inferiori agli 80°C, a seconda del numero di stadi e della temperatura dell'acqua fredda disponibile per la condensazione dei vapori. Queste utilities di recupero, disponibili a temperature relativamente basse rispetto alle controparti prodotte con appositi sistemi di generazione (quali per esempio i generatori a bruciatore), consentono di ridurre la formazione di incrostazioni causate generalmente dagli hot spots nello scambiatore: la bassa differenza di temperatura tra utility e concentrato fa decrescere la probabilità di

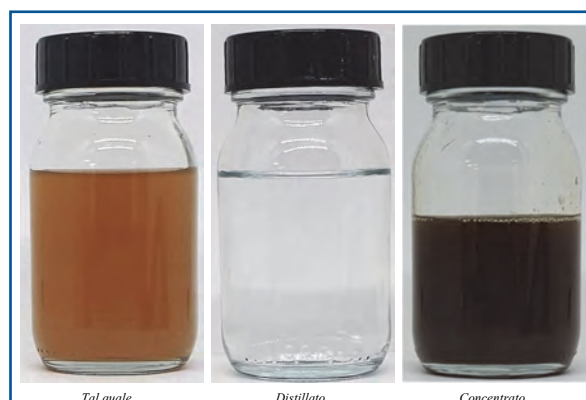


**Figura 3**  
Campioni di emulsione derivante da pressofusione, concentrazione raggiunta: 95%. La rimozione di olio è superiore al 98%.

formazione delle incrostazioni, conducendo un processo di concentrazione più graduale, con grande vantaggio nella conduzione del ciclo evaporativo. Tra le svariate categorie di reflui trattabili mediante evaporazione sottovuoto, spiccano le emulsioni di olio in acqua, le quali sono largamente impiegate nella manifattura metalmeccanica, in particolare nelle pressofusioni, nelle lavorazioni meccaniche, nel processo di quenching, solo per citarne alcuni. Tali miscele si presentano solitamente come fluidi torbidi, i quali contengono in media il 3-5% di prodotto non acquoso. Questa parte non evaporabile è primariamente composta da olio, limatura disciolta di metalli, distaccanti, sali e tensioattivi. Questi ultimi, impiegati solitamente nei processi di lavaggio, sono sostanze capaci di emulsionare la fase oleosa con quella acquosa: tuttavia, la loro presenza rappresenta un ostacolo al processo evaporativo se non viene adeguatamente considerata e prevenuta la loro capacità di destabilizzare il processo di evaporazione mediante formazione di schiuma e violente ebollizioni. La corretta combinazione tra antischiuma, e un efficace demister consente di ottenere un distillato limpido e pulito nella maggior parte dei casi. Nel settore delle pressofusioni questa tipologia di impianto trova largo impiego, poiché le potenzialità giornaliere di trattamento (4.000 ÷ 30.000 L/giorno) soddisfano la produzione industriale media di tale categoria di reflui; trattando le emulsioni con questo tipo di tecnologia, si è infatti in grado di ottenere fattori di concentrazione anche superiori alle 15-20 volte. L'evaporatore multistadio a scambiatore immerso, oltre ad emulsioni, è in grado di trattare efficacemente svariate altre tipologie di reflui, tra le quali vernici, tensioattivi, polietilenglicole e soluzioni saline tra i principali. Questi ultimi rappresentano una casistica comune all'interno dell'industria chimica, in cui gli scarti reflui sono formati da soluzioni aven-



**Figura 4**  
Campioni di soluzione di Sodio Solfato ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), con precipitazione del 20-25% di sale solido; successivamente al processo di evaporazione è possibile separare il sale, ottenendo così un sottoprodotto di valore.



**Figura 5**  
Campioni di miscele acquose di PEG 400. La concentrazione di PEG nel concentrato è pari al 96%, con una percentuale di recupero superiore al 99%.

ti sia una componente organica derivante dai solventi di processo, sia una frazione secca costituita da molteplici ioni e quindi specie saline chimicamente e fisicamente differenti. Un fenomeno correlato a questa classe di composti è la formazione di depositi e incrostazioni sulla superficie esterna degli scambiatori di calore dovuta alla precipitazione dei sali contenuti nei reflui, in particolare in presenza di un'elevata durezza, costituita principalmente da  $\text{CaCO}_3$  (calcite),  $\text{CaSO}_4$  (gesso) e  $\text{MgCO}_3$  (magnesite). Tali depositi vengono contrastati ricorrendo a periodici lavaggi delle caldaie mediante specifici detergenti appositamente studiati durante le analisi di laboratorio ed i test effettuati sugli impianti pilota, in modo da definire i dettagli di processo e progetto necessari per lo scale-up impiantistico.

**Eco-Techno Srl**  
E-mail: [sales@eco-techno.it](mailto:sales@eco-techno.it)  
Web: [www.eco-techno.it](http://www.eco-techno.it)





Dal 1925 la società KSB Italia S.p.A. di Concorezzo (MB) opera sul mercato e rappresenta in Italia gli interessi del Gruppo KSB, nato nel 1871 e fornitore mondiale di pompe, valvole e sistemi all'avanguardia per il trasporto di fluidi. Il Gruppo è presente in tutti i continenti con società commerciali, stabilimenti produttivi e centri service e fornisce un'ampia gamma di prodotti e servizi per innumerevoli applicazioni, in particolare per il settore civile, per i processi industriali, per il settore energetico, per l'estrazione, il trattamento e il trasporto di acqua e acque cariche, per gli impianti tecnologici e per il settore estrattivo.



## AMAREX – ELETTROPOMPE SOMMERGIBILI PER IL CONVOGLIAMENTO DI ACQUE REFLUE

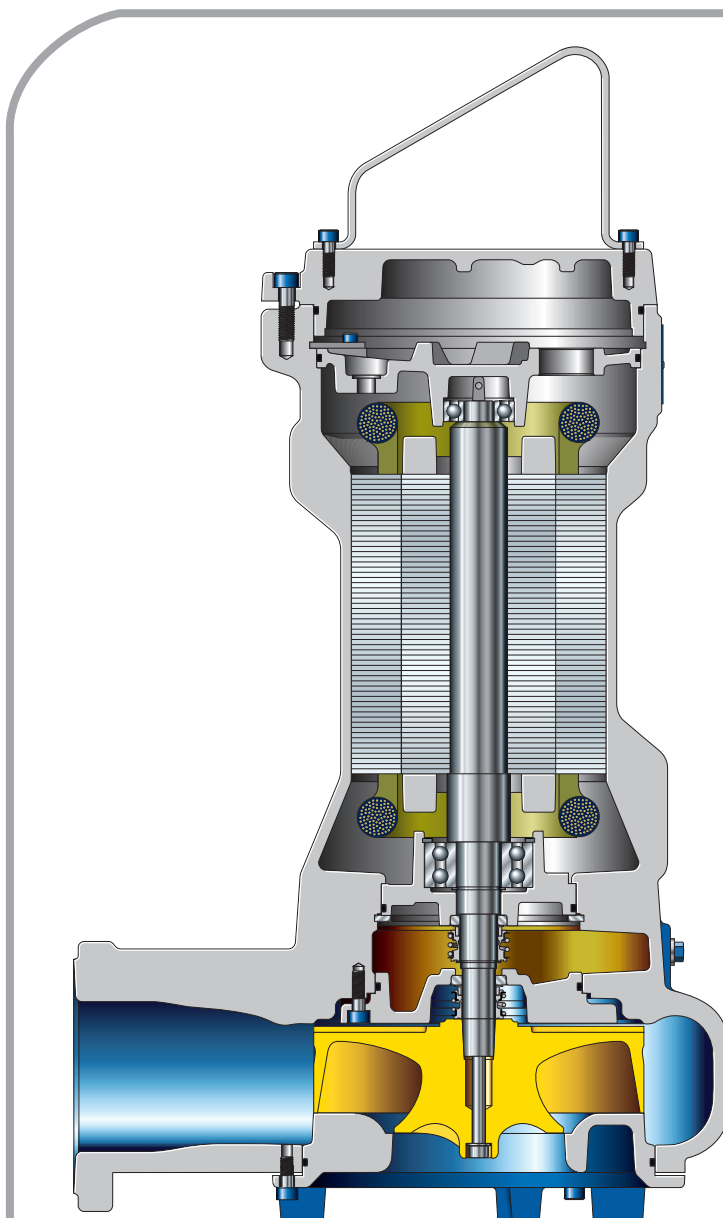
Le pompe Amarex trovano applicazione nelle reti di drenaggio, nonché nel trasporto di acque cariche e di acque pluviali, rispondendo alle aspettative dei gestori di tutti i tipi di edifici, delle municipalizzate e dei siti industriali.

Le pompe Amarex di KSB sono ottimizzate per l'efficienza e il risparmio energetico. La caratteristica anti-intasamento delle giranti riduce notevolmente le esigenze di manutenzione rispetto alle pompe di design convenzionale. Una grande varietà di materiali e tenute meccaniche assicura all'utente il trasporto di un'ampia gamma di fluidi corrosivi e abrasivi. Il riempimento con olio ecocompatibile e non tossico, garantisce la lubrificazione continua delle tenute meccaniche. Le pompe possono essere riparate facilmente. Alla fine del loro ciclo di vita, la maggior parte dei componenti possono essere separati e riciclati.

Si tratta di pompe impiegate nella gestione di acque cariche, fognature, e per il trasporto di acque piovane. Queste pompe possono gestire acque reflue con corpi solidi e sostanze con parti filamentose, liquidi contenenti aria, gas e fango, acque sanitarie e acque grigie; sono dotate di giranti a vortice (F-max) o di giranti a due canali (D-max). Il cliente può così scegliere il giusto tipo di girante in base alle proprie necessità: basse portate di acque reflue a prevalenze elevate o portate elevate a prevalenze ridotte. La versione D-max può essere dotata opzionalmente del D-flector, che aumenta significativamente la resistenza agli intasamenti in particolare da salviette umidificate.



Figura 1  
Pompa Amarex KSB



Una grande varietà di materiali e tenute meccaniche assicura all'utente il trasporto di un'ampia gamma di fluidi corrosivi e abrasivi. La caratteristica anti-intasamento delle giranti riduce notevolmente le esigenze di manutenzione rispetto alle pompe di design convenzionale; l'elevato rendimento idraulico combinato con l'elevata efficienza dei motori IE3, riduce il costo energetico durante il funzionamento. La gamma raggiunge una massima prevalenza di 42 metri e una portata massima di 320 m<sup>3</sup>/h. Durante la fase di progettazione, i progettisti hanno attribuito grande importanza al raggiungimento di un'elevata durata di vita. Ciò è garantito da un grande motore di azionamento, da robusti cuscinetti a rulli e da un albero in acciaio inossidabile resistente alla corrosione. Il riempimento con olio ecocompatibile e non tossico, garantisce la lubrificazione continua delle tenute

meccaniche. Come tutte le pompe di questo tipo, l'installazione nel pozzetto della pompa avviene tramite un piede di accoppiamento. Un'ampia gamma di ganci di adattamento permette l'utilizzo del piede di accoppiamento di altri produttori in modo da facilitare il montaggio anche in caso di un cambio di marca. La tenuta tra il piede di accoppiamento e la flangia premente della pompa è costituita da un anello a profilo a U di nuova concezione, assolutamente impermeabile e duraturo. Inoltre, gli utenti possono scegliere con quale tipo di guida posizionare le pompe sul piede di accoppiamento, staffa singola, funi di guida, singolo o doppio tubo di guida.

# IL DESIGN INNOVATIVO CONTRO GLI INTASAMENTI.



Amarex – La nuova elettropompa KSB per il convogliamento di acque reflue spicca per la caratteristica anti-intasamento delle giranti, che riduce notevolmente le esigenze di manutenzione rispetto alle pompe di design convenzionale e per il suo alto rendimento idraulico combinato a un motore ad alta efficienza. [www.ksb.it](http://www.ksb.it)

KSB Italia S.p.A · Via Massimo D'Azeglio 32 · 20863 Concorezzo (MB)

► La nostra tecnologia. Il vostro successo.

Pompe • Valvole • Service





**MOBILE WATER SERVICES**  
*Ogniqualvolta hai bisogno di noi.*

## WATER TECHNOLOGIES



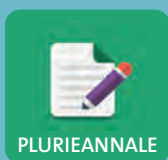
La flotta di Veolia Mobile Water Services, composta da impianti mobili di trattamento dell'acqua a noleggio. Questo servizio è ideale per soddisfare richieste di:

- Chiarificazione
- Filtrazione su media
- Filtrazione con membrane di ultrafiltrazione ed osmosi inversa
- Addolcimento e deionizzazione
- Flottazione
- Degasaggio
- Produzione di acqua pura e ultrapura



Il servizio offerto da Mobile Water Services permette di:

- Sostituire impianti obsoleti di trattamento acque
- Fornire volumi supplementari di acqua a specifica
- Pre-trattare acque con caratteristiche variabili nel tempo
- Spostare le spese in conto capitale (CAPEX) nei costi operativi (OPEX)



Ideale quando il budget degli investimenti è già impegnato o limitato.

Veolia Water Technologies Italia SPA - Mobile Water Services  
 Via Lampedusa 13 • 20131 MILANO • cel. 345 7065970  
[mobilewaterservices@veolia.com](mailto:mobilewaterservices@veolia.com) • [www.mobilewaterservices.com](http://www.mobilewaterservices.com)



Resourcing the world



La carenza d'acqua rappresenta una seria minaccia per il settore manifatturiero in quanto può compromettere la continuità operativa. Emilio Turchi di Veolia Mobile Water Services spiega come garantire un approvvigionamento idrico sicuro con unità mobili di trattamento dell'acqua.

Recenti studi hanno dimostrato che la carenza d'acqua è un problema che peggiora con gli anni, più rapidamente di quanto ci si aspettasse, e costituisce una minaccia globale che coinvolge tutti i continenti. Sempre più persone vivono in zone in cui l'acqua scarseggia a causa del degrado irreversibile delle falde acquifere e delle poche piogge che non riescono a reintegrarne il consumo.

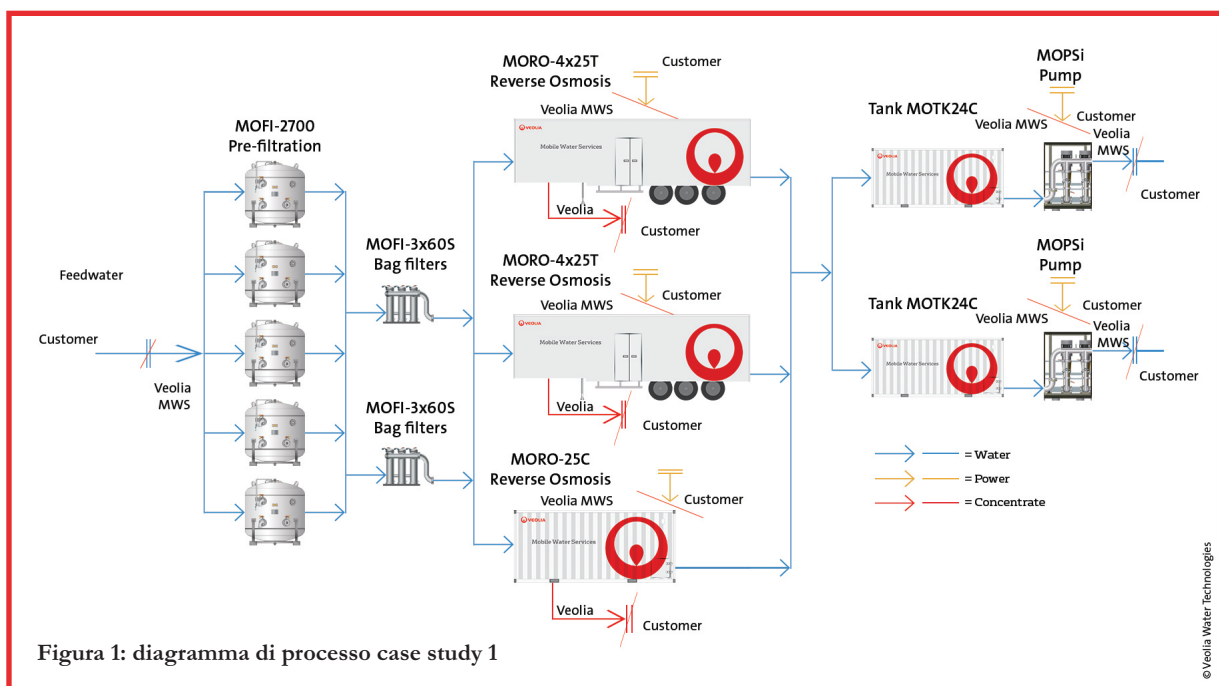
Nell'ultimo decennio, la siccità ha colpito cento milioni di persone al mondo, causando cento miliardi di dollari di perdite. La Banca Mondiale ha stimato che nel 2050 le regioni più colpite dalla carenza d'acqua vedranno un calo del loro PIL del 6%.

L'acqua è un elemento fondamentale in svariati processi produttivi. Nonostante siano stati adottati processi innovativi per ottimizzarne l'utilizzo e il riuso, l'acqua utilizzata per la manifattura in Italia rimane sempre una quantità notevole.

Le aziende fanno affidamento sui processi di trattamento acque per garantire un approvvigionamento sicuro e costante di acqua purificata. Senza l'acqua di processo, necessaria per il trasporto, per la pulizia, per apportare energia in forma di vapore e per i processi di raffreddamento, la produzione potrebbe essere compromessa. Il trattamento e il riuso delle acque sono quindi fondamentali per la produzione e più ancora per la protezione dell'ambiente e la sostenibilità.

Le principali sfide che le industrie si trovano ad affrontare in materia di acqua sono: garantire una fornitura adeguata per tutti i processi altamente dipendenti da questa risorsa ed assicurare che la contaminazione delle sorgenti sia fronteggiata tempestivamente là dove si verifici.

La carenza d'acqua determina un peggioramento della qualità dell'acqua stessa, a causa della minore



possibilità di diluire gli inquinanti o l'acqua salata, che si infiltra sempre più spesso nelle falde acquifere costiere. Il cambiamento climatico aggraverà quasi certamente questi impatti negativi in futuro, con siccità sempre più frequenti e gravi in tutta Italia e nel mondo.

Per evitare problematiche legate all'acqua, le aziende stanno quindi implementando strategie di conservazione di questa risorsa, esaminando le opportunità di recupero e riuso, ristrutturando i processi di utilizzo esistenti e valutando possibili fonti d'acqua alternative.

La fornitura di servizi di trattamento acque con unità mobili è un'attività consolidata e Mobile Water Services di Veolia è un partner di fiducia per soddisfare queste esigenze impellenti. Infatti, un sistema temporaneo di trattamento acque è una soluzione perfetta, soprattutto in caso di emergenza, poiché può sostenere una fornitura continua di acqua trattata per tutti gli scenari imprevedibili come, ad esempio, affrontare cambiamenti stagionali a breve termine o cambiamenti imprevedibili nella fornitura di acqua grezza di un impianto.

I servizi idrici mobili di Veolia costituiscono, quindi, una soluzione vantaggiosa perché possono garantire la continuità operativa ed evitare costosi tempi di inattività.

L'utilizzo di unità mobili a lungo termine è diventato anche un'alternativa interessante rispetto agli elevati costi di investimento iniziali richiesti dalla tecnologia di trattamento permanente delle acque.

La riduzione dei budget, l'enfasi sulla continuità operativa e il desiderio di una gestione dell'acqua sempre più flessibile e conveniente hanno fatto sì che i servizi idrici mobili di Veolia diventassero una soluzione alternativa economicamente vantaggiosa, capace di offrire assistenza in caso di

emergenza e di soddisfare i fabbisogni idrici temporanei.

Le applicazioni tipiche degli impianti mobili includono il trattamento di acque con elevato contenuto di cloruri e alta conducibilità, solidi sospesi, grassi ed olii, alto contenuto microbiologico o di sostanze organiche e l'utilizzo di fonti alternative.

### Case Study

#### *La scarsità d'acqua provoca un aumento della salinità nell'acqua di alimentazione*

L'impianto di demineralizzazione di un'azienda, composto da quattro linee della capacità di 200 m<sup>3</sup>/h ciascuna, in condizioni normali richiedeva la rigenerazione giornaliera delle resine di una linea per produrre, in totale, 600 m<sup>3</sup>/h di acqua demi.

Negli ultimi anni l'azienda ha dovuto affrontare difficoltà a causa di stagioni secche più lunghe che hanno influito sull'efficienza dell'impianto. La falda principale ha subito un aumento della salinità, soprattutto durante l'autunno e l'inverno, quando forti correnti e forti venti hanno spinto l'acqua di mare verso la terraferma.

Di conseguenza, l'azienda è stata costretta a rigenerare le resine quattro volte al giorno. Ad un ritmo di sei ore per ogni rigenerazione, l'impianto ha ridotto la sua produttività di 200 m<sup>3</sup>/h. La rigenerazione delle resine è diventata troppo frequente per produrre la quantità adeguata di acqua demineralizzata necessaria alla produzione. Mobile Water Services è intervenuta fornendo due unità mobili ad osmosi inversa MORO 4x25T con sistema di prefiltrazione, serbatoi di accumulo e pompa su skid per produrre 200 m<sup>3</sup>/h di acqua demi, con una riduzione del sale superiore al 95%. Il team di Mobile Water Services ha anche fornito l'assistenza tecnica durante l'intero periodo di noleggio.



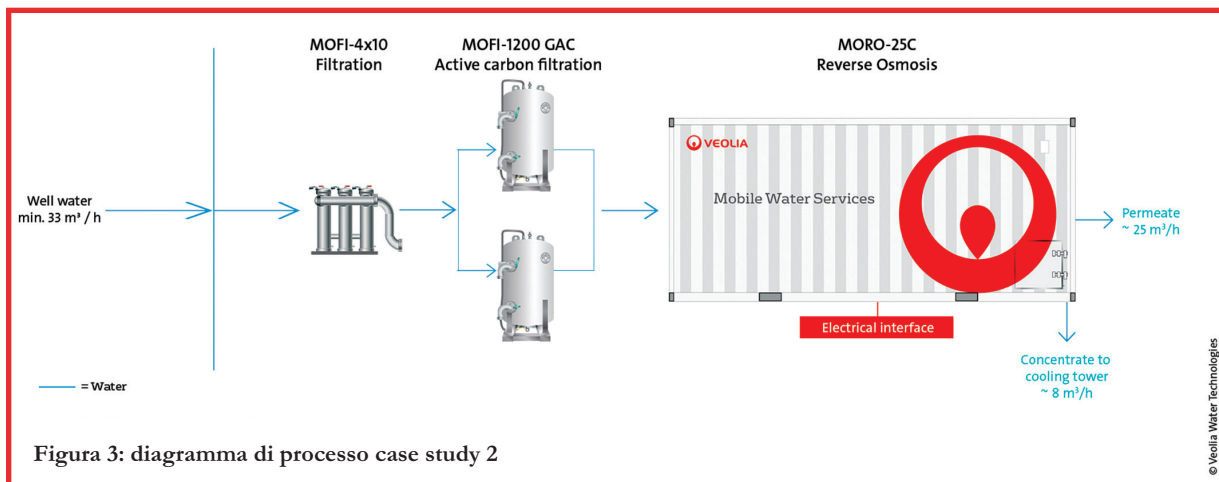


Figura 3: diagramma di processo case study 2

### Case Study

#### Soluzioni modulari per mitigare gli impatti della siccità

La grave carenza d'acqua ha messo a rischio il processo produttivo in uno stabilimento di una multinazionale. A causa di una persistente siccità, l'azienda idrica locale aveva, infatti, dovuto limitare la fornitura d'acqua allo stabilimento per garantire l'approvvigionamento di acqua potabile alla popolazione locale. Conseguentemente, è stato necessario produrre ulteriore acqua trattata alla qualità richiesta, trattando fonti alternative, per rifornire adeguatamente la centrale elettrica e i processi produttivi dello stabilimento. Mobile Water Services ha fornito un'unità mobile di filtrazione su sabbia MOFI 4x10, due unità di filtrazione mobili MOFI 1200 GAC con carbone attivo ed un'unità mobile di osmosi inversa MORO 25 C per garantire l'approvvigionamento idrico secondo le specifiche.

#### Una soluzione in evoluzione

Un impianto mobile può essere costituito da due o tre unità o sistemi montati su skid, assemblati in modalità plug-and-play. Il design modulare di molti dei servizi idrici mobili di Veolia consente di combinare una varietà di configurazioni di processo, per trattare

acqua di rete, di pozzi, di fiumi o riserve idriche e persino acque reflue.

La portabilità dei container li rende perfetti per sfruttare al meglio lo spazio disponibile, eliminando o riducendo la necessità di costruire nuove infrastrutture per ospitare l'attrezzatura. È possibile gestire qualsiasi numero di unità in parallelo o in serie per fornire la portata richiesta, e la loro modularità consente l'adozione di componenti o passaggi di trattamento aggiuntivi per funzionalità aggiuntive o per aumentare la produttività, anche quando servono solo per brevi periodi. Una considerazione finale, e forse la più importante, è che queste unità modulari possono essere facilmente sostituite nel corso del tempo con altre di tecnologia più recente e aggiornata, garantendo che i sistemi di trattamento delle acque in azienda siano sempre all'avanguardia.

#### La consapevolezza è fondamentale

Sono molti i vantaggi che i servizi idrici mobili di Veolia Mobile Water Services possono portare agli enti pubblici e all'industria che si trovino ad affrontare la sfida della carenza d'acqua. È necessario, però, un deciso cambiamento di prospettiva per aiutare le aziende a passare da una situazione di vulnerabilità, per la carenza d'acqua, ad una preparazione adeguata per far fronte a questo urgente problema. Con la crescita della consapevolezza, vedremo utilizzare sempre più spesso i servizi idrici mobili, a sostegno della pianificazione finanziaria e della continuità operativa e per mantenere gli impianti di trattamento delle acque resilienti ed efficienti.



Veolia Water Technologies Italia spa  
www.veoliawatertechnologies.it





# #ECCELLENZAITALIANA

L'immagine dell'Italia nel mondo non è fatta solo di food, di moda, di design. Nella raccolta e rigenerazione degli oli lubrificanti usati siamo al primo posto in Europa. È un primato per l'ambiente. Un merito di tutti.  
**UN'ECCELLENZA ITALIANA.**



**CONSORZIO NAZIONALE  
PER LA GESTIONE, RACCOLTA  
E TRATTAMENTO DEGLI OLI  
MINERALI USATI**

CONOU.IT





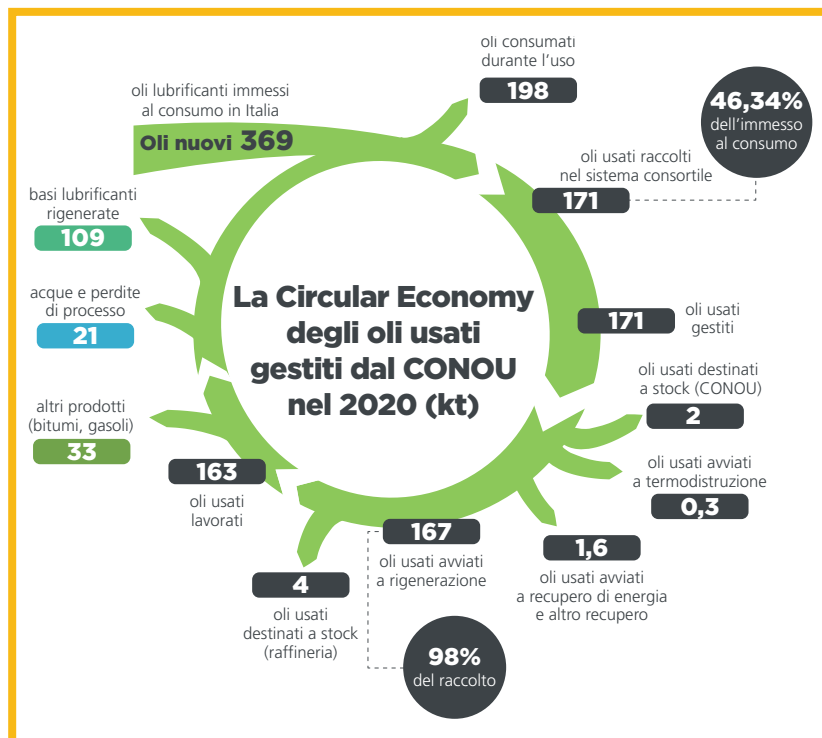


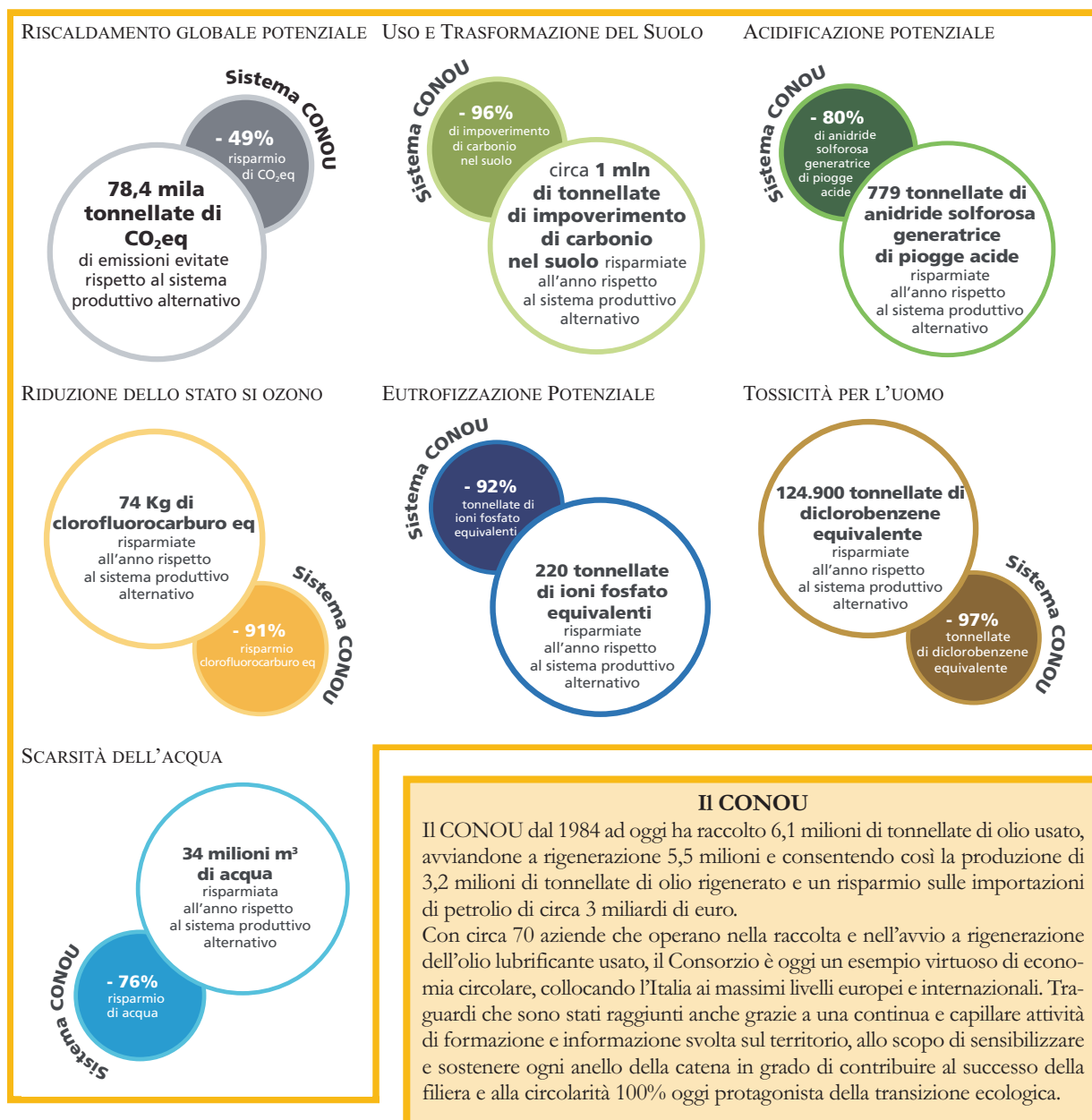
## CONOEU, UNA FILIERA CIRCOLARE AL 100% ANCHE NELL'ANNO DELLA PANDEMIA

Un successo dell'economia circolare italiana ed europea. Con 171mila tonnellate di olio minerale usato raccolte nel 2020, il CONOEU ha raggiunto per il 3° anno consecutivo il traguardo del massimo raccogliabile nel Sistema. Dell'olio raccolto, il 98% è stato avviato a rigenerazione, generando significativi benefici ambientali e un rilevante risparmio sulla bilancia energetica del Paese con una riduzione di circa 46,7 milioni di euro sulle importazioni di greggio in Italia. Risultati d'eccellenza, rivelati dal Rapporto di Sostenibilità CONOEU 2020, che confermano il Consorzio Nazionale degli Oli Usati come esperienza virtuosa nel campo dell'economia circolare. Il CONOEU, forte di una filiera che raccoglie, gestisce e avvia a rigenerazione l'olio lubrificante usato in tutta Italia, ha saputo centrare l'obiettivo della circolarità completa e della salvaguardia ambientale anche nell'ultimo anno attraversato dall'emergenza pandemica da Covid-19. Uno sforzo corale che ha interessato tutti gli attori del Sistema consortile che hanno garantito la continuità operativa della raccolta e del recupero a nuova vita degli oli usati a tutela dell'ambiente e della salute pubblica. Protezione dell'ecosistema, lotta ai cambiamenti climatici, difesa delle specie animali e innovazione tecnologica: sono questi gli asset strategici su cui poggia l'attività del Consorzio che, nonostante le difficoltà imposte dall'emergenza pandemica, continua a essere riconosciuto co-

me un'eccellenza a livello europeo, dove mediamente si recupera solo il 40% dell'olio immesso al consumo e se ne rigenera solo il 60%.

Evidenze rilanciate dal Rapporto di Sostenibilità 2020, redatto con il supporto di Deloitte Italia e revisionato da Ernst&Young, presentato il 30 settembre scorso e commentato da autorevoli rappresentanti delle istituzioni come la Sottosegretaria al MiTE Vannia Gava, Ermete Realacci, Presidente della Fondazione Symbola, l'europarlamentare Simona Bonafè, Stefano Ciafani, Presidente di Legambiente, Rossella Muroli, Vicepresidente della Commissione Ambiente alla Camera, Maria Alessandra Gallone, della Commissione Ambiente del Senato e Giovanni





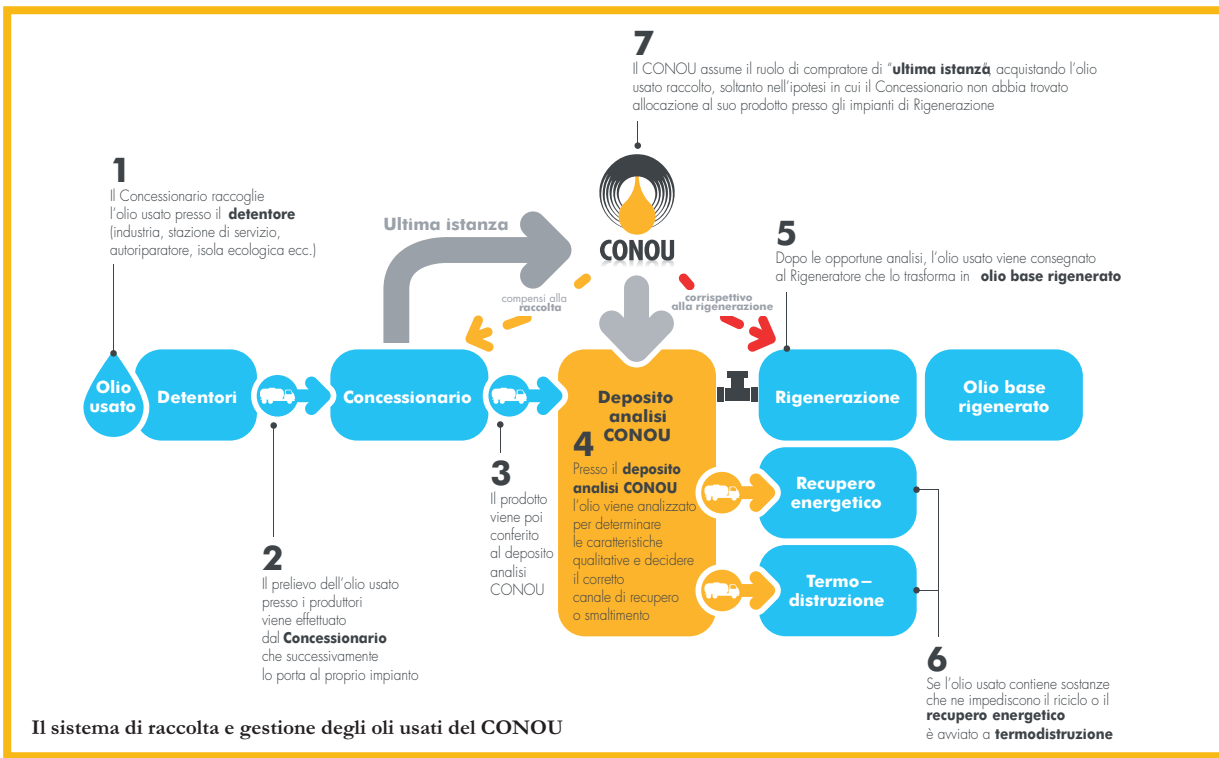
Battista Zorzoli, Presidente dell'AIEE (Associazione Italiana Economisti dell'energia).

*“Il Rapporto di Sostenibilità del CONOU, in tempi in cui tanto si parla del fenomeno deteriore del “Greenwashing”, si distingue grazie ad alcuni parametri come la trasparenza, raccontando tutto della Filiera, dai successi alle difficoltà e alle sfide; la compliance e gli standard internazionali GRI; la correttezza dei numeri, la condivisione e la partecipazione di tutte le aziende della Filiera, a cui chiediamo non solo dati, ma anche idee, prospettive e strategie. Infine il nostro Rapporto si distingue per l'evidenza dei grandi benefici ambientali che la nostra Circolarità genera. Ogni anno ci proponiamo, con successo, di migliorarlo in ognuno di questi aspetti”* ha ricordato il Presidente Riccardo Piunti nel corso dell'evento di presentazione dell'RdS.

■ **La circular economy degli oli usati gestiti dal Consorzio**

Dalla mancata emissione di anidride carbonica al risparmio di risorsa idrica, l'attività di gestione circolare degli oli minerali usati realizzata dal CONOU ha apportato benefici ambientali su un'ampia scala, consentendo di salvaguardare l'ambiente con effetti positivi per la salute umana e l'economia, al contrario del sistema produttivo alternativo, che prevede la produzione di basi lubrificanti da fonti fossili, con conseguente estrazione di materie prime. Di seguito i numeri degli impatti ambientali evitati:

- 78,4 mila tonnellate di emissioni di CO<sub>2</sub>eq evitate, con un impatto inferiore del 49% rispetto al sistema alternativo;
- 1 milione di tonnellate di impoverimento di carbonio nel suolo risparmiate all'anno;



- 34 milioni m<sup>3</sup> di acqua risparmiata all'anno, con un impatto inferiore del 76%;
- - 97% di tonnellate di clorobenzene equivalente prodotte, tossico per l'uomo.

■ **L'impatto sulla Salute dell'uomo e sulla Qualità dell'ecosistema**

Il Rapporto di Sostenibilità 2020 del CONOU evidenzia un importante impatto sulla salute dell'uomo e sulla qualità dell'ecosistema. Riguardo il primo parametro, il Sistema CONOU ha consentito un risparmio di 3.441 anni di vita "sana" all'anno. Per quanto riguarda la qualità dell'ecosistema invece, nel 2020 il Sistema CONOU ha contribuito a salvare 3,2 specie viventi.

■ **L'impatto economico e occupazionale del CONOU**

L'attività di recupero degli oli usati ha impatti positivi sul sistema Paese, soprattutto grazie alla riduzione del fabbisogno di materie prime: le 167 mila tonnellate complessivamente avviate a recupero in Italia nel 2020 hanno consentito un risparmio di circa 47 milioni di euro sulle importazioni di greggio. L'attività del Consorzio ha generato, poi, esternalità positive anche in termini economici e sociali, con un impatto economico totale pari a 67,9 milioni di euro e impiegando 1.185 persone lungo la Filiera.

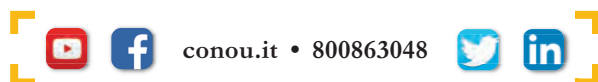
■ **Focus sulla qualità della raccolta**

La qualità dell'olio lubrificante usato, raccolto nel 2020, è stata la sfida centrale per l'efficacia della ri-

generazione. Nonostante l'incremento dell'olio di provenienza industriale e da emulsioni, che ha apportato delle criticità per la presenza di inquinanti nell'olio stesso, il CONOU ha proseguito la sua attività di sensibilizzazione alla corretta gestione e stoccaggio del rifiuto, riuscendo a preservare l'integrità del ciclo degli oli usati.

■ **Circolarità, innovazione e comunicazione driver del futuro**

“Oltre a quella della qualità – ha dichiarato il Presidente del CONOU, Piunti – il Consorzio affronta le sfide dell'innovazione, intesa in senso tecnologico e digitale, e della comunicazione ambientale. Il primo profilo vede il CONOU impegnato nel sostegno attento alle realtà della sua Filiera, chiamata a ottimizzare le proprie performance attraverso l'aggiornamento e l'evoluzione industriale, gestionale e di processo. Allo stesso modo sarà fondamentale nel prossimo futuro, mantenere e rafforzare il dialogo con il pubblico e tutti gli stakeholder del Consorzio allo scopo di veicolare il messaggio di sensibilizzazione ambientale di cui è portavoce, ricorrendo a tutti gli strumenti più attuali e innovativi a disposizione. A partire dai canali social che rappresentano oggi uno dei principali veicoli per il confronto con le nuove generazioni.”





# Il nuovo significato di efficienza energetica.

Migliorare l'utilizzo dell'energia è la sfida più importante che l'uomo dovrà affrontare nei prossimi anni. Il miglior modo per ridurre i consumi energetici è la loro ottimizzazione.

In Ecogenerazione integriamo al meglio sistemi di produzione energetica combinata come COGENERAZIONE o TRIGENERAZIONE, con tecnologie di TRATTAMENTO E RECUPERO ACQUE INDUSTRIALI.

Risparmiare migliorando le performance. Oggi si può.

[www.ecogenerazione.it](http://www.ecogenerazione.it)

**eco**  
**GENERAZIONE**  
Tecnologie Energetiche e Ambientali

# RISPARMIO ENERGETICO E SCARICO ZERO IN ZINCATURA



Ottenere la massima riduzione degli scarti in galvanica minimizzando i consumi energetici, un traguardo possibile e con risultati immediati.

Questa la sfida raccolta da Ecogenerazione per l'ottenimento dello scarico zero presso una zincatura in Lombardia.

## Lo Storico

Al Cliente era già stato installato, anni prima, un evaporatore sottovuoto doppio effetto alimentato ad acqua calda per il trattamento dei risciacqui alcalini delle linee di zincatura. L'impianto, un evapo-concentratore con scambiatori a fascio tubiero, è stato installato da Eco-Techno nel lontano 2007 e permetteva di trattare circa 6000 litri al giorno con un dispendio energetico dimezzato rispetto a un impianto mono stadio.

Prima dell'installazione l'impianto veniva alimentato con acqua calda prodotta da una caldaia industriale di tipo tradizionale, ma nel 2017, grazie all'installazione di un cogeneratore da 120 kW elettrici e circa 200 termici, il fabbisogno termico per il suo funzionamento è stato garantito dal calore prodotto dalla cogenerazione con una notevole riduzione dei costi di esercizio; il sistema cogenerativo fu installato da R.T.S. Srl, azienda emiliana specializzata in progettazione e installazione di impianti da fonti rinnovabili e di cogenerazione. Questo impianto, dotato di un motore alimentato a gas naturale, ha permesso al cliente di coprire circa il 60% del fabbisogno elettrico dello stabilimento e, per l'epoca, il totale fabbisogno termico ovvero quello necessario ad alimentare l'evaporatore sottovuoto e mantenere in temperatura le vasche di lavoro (sgrassature e bagni delle linee di zincatura). Queste acque, contenenti principalmente metalli e cloruri, con basse percentuali di tensioattivi, costituiscono la tipologia di reflui più indicata per un trattamento con la tecnica dell'evaporazione sottovuoto. La separazione fisica per ebollizione, evaporazione e successiva ricondensazione, permette una sepa-

razione ottimale dell'acqua dal resto degli inquinanti definiti pesanti e quindi non evaporabili. Il condensato ottenuto, detto distillato, ha un livello di depurazione tale da poter essere reimpiegato per il rifacimento dei bagni di risciacquo o per altri usi tecnici interni.

## LA COGENERAZIONE

Il termine Cogenerazione indica la produzione combinata di energia elettrica e calore. Con un unico impianto è infatti possibile produrre contemporaneamente queste due forme di energia. I sistemi di cogenerazione vengono anche detti CHP dall'acronimo inglese Combined Heat and Power. Il vantaggio è quello di un recupero termico intrinseco: producendo energia elettrica il calore generato dal moto del sistema viene reso disponibile. Gli impianti di cogenerazione solitamente impiegati per questi utilizzi sono costituiti da motori endotermici alimentati a gas naturale che trasmettendo il moto rotatorio a un alternatore generano energia elettrica mentre il calore sviluppato dal motore viene recuperato sia dalle camicie della power unit che dai fumi di scarico. Per impianti di potenze simili a quello installato dal nostro cliente, vengono sviluppati circa 1,5 kWt per ogni kW<sub>e</sub>. Da questi sistemi è inoltre possibile generare frigoriferie: installando dei sistemi ad assorbimento (il più utilizzato è al bromuro di litio) viene invertito il ciclo termico, fornendo acqua calda si può ottenere acqua raffrescata (7-12°C). In questo caso si parlerà di TRIGENERAZIONE.



Cogeneratore

### L'evoluaizione dell'Impianto

Con il passare degli anni e la crescita della capacità produttiva dell'Azienda nostra cliente, si è reso necessario aumentare la capacità di trattamento delle acque reflue dato che ne venivano trattate solamente il 25%. Si è pensato quindi di installare un secondo evaporatore, che potesse trattare la restante parte dei volumi, riducendo al minimo il consumo energetico, data la possibilità di sfruttare il calore residuo ancora disponibile dal cogeneratore. Così, nell'autunno 2020, sfruttando la sinergia tra le aziende, è stato installato un evaporatore da 20 metri cubi giorno della stessa tipologia del precedente ma questa volta a tre stadi, il cui calore nominale necessario al suo funzionamento è proporzionalmente inferiore di circa il 30% rispetto al sistema a doppio effetto. Anche per la produzione di questo impianto è stata scelta Eco-Techno, azienda leader nella produzione di evaporatori e concentratori sottovuoto.

Il funzionamento senza sosta dell'impianto precedente, marciante da 13 anni senza aver mai dato alcun problema, ha di fatto reso semplice la scelta del fornitore e della tipologia di impianto. Dall'autunno 2020, la capacità di trattamento è quindi quadruplicata arrivando a 26 metri cubi giorno complessivi. Raggiunti questi volumi giornalieri, l'ulteriore step per minimizzare gli scarti era la ri-



duzione dei volumi dei concentrati destinati allo smaltimento. I due evaporatori generavano circa 5 metri cubi a settimana di residui in forma liquida ovvero circa il 4% del totale trattato. Per ridurre al massimo questi volumi e di conseguenza i costi legati allo smaltimento, è stato fatto un ulteriore step installando un concentratore sottovuoto di tipo orizzontale sempre alimentato ad acqua calda in grado di ridurre di altre 6 volte questi residui ottenendo un concentrato finale semi solido. Questo concentratore sfrutta il medesimo principio degli evaporatori ma è dotato di uno scambiatore esterno a sella, posto nella parte inferiore del vessel principale, e al suo interno una coclea azionata da un motoriduttore mantiene



### EVAPORAZIONE SOTTOVUOTO

L'evaporazione sottovuoto per il trattamento e recupero delle acque reflue di processo è una tecnologia presente ormai da parecchi anni, ed è spesso considerata, per alcuni campi applicativi, l'unica valida soluzione per trattare efficacemente determinate tipologie di reflui. Questi impianti pongono in ebollizione una soluzione inquinata e, facendo evaporare l'acqua in essa contenuta, permettono di recuperarla lasciando solamente una minima parte molto concentrata destinata allo smaltimento. Rispetto ai sistemi di depurazione tradizionali che producono un'acqua scaricabile, questi sistemi sono tra i pochi ad ottenere un condensato (detto anche distillato) riutilizzabile nel processo produttivo. In questo caso si può ottenere l'ambito traguardo dello "Scarico Zero". In base alla fonte energetica principale o al tipo di scambio termico esistono numerose varianti di evaporatori messe a punto per questi utilizzi, le più diffuse e conosciute sono quelle ad alimentazione elettrica, dotati di un circuito frigorifero deputato alla produzione di calore utile sia all'evaporazione che alla condensazione della soluzione trattata, oppure con alimentazione esterna ad acqua calda o vapore. In tutti i casi viene generato un vuoto nell'ambiente di evaporazione per abbassare la temperatura di ebollizione e quindi utilizzare in maniera più efficiente il calore.

Gli evaporatori impiegati per sfruttare al meglio il calore o recuperarlo se già presente, come nel caso della cogenerazione, sono sistemi con scambiatori alimentati con fonti di calore esterne come per esempio acqua calda. L'utilizzo di questo sistema permette il massimo risparmio grazie all'utilizzo di calore proveniente da cogenerazione o recuperatori di calore.

movimentato il liquido soprattutto nelle fasi di essiccazione e ne permette l'estrazione senza azioni faticose da parte del personale. Grazie a quest'ultima installazione il cliente ha di fatto ridotto gli scarti del 98,8%, con un'elevata efficienza energetica. Dopo un periodo di collaudo iniziale e fatte le opportune verifiche sui consumi energetici attuali del



cliente, è stata recentemente commissionata l'installazione di un secondo cogeneratore per permettere di coprire il totale fabbisogno termico e circa il 95% di quello elettrico. Quando ciò avverrà, l'azienda avrà ottenuto il massimo dell'efficienza energetica e del recupero di acque reflue, che la farà diventare un punto di riferimento in ambito sostenibilità energetica e ambientale a livello europeo.

**Ecogenerazione**, è nata nel 2019 dall'unione di aziende specializzate in Efficienza Energetica e Trattamento acque Reflue, presenti sul mercato da oltre trent'anni. Questa sinergia ha permesso di sviluppare soluzioni innovative e integrate garantendo il massimo in termini di efficacia ed efficienza per soddisfare due esigenze primarie nell'industria: ottimizzare / ridurre i consumi energetici, e trattare efficacemente le acque reflue derivanti dal processo produttivo intervenendo sia sul singolo bisogno che su entrambe le tematiche. L'approccio è il medesimo: studiare la migliore tecnologia cercando di ottenere il massimo in termini di efficienza e riducendo i consumi. Per soluzioni combinate viene impiegata la perfetta integrazione tra cogenerazione per la produzione combinata di energia elettrica e termica, e i migliori sistemi di trattamento e recupero dei reflui di processo.

Attraverso un'attenta analisi dei fabbisogni energetici viene individuata la migliore soluzione sia in termini impiantistici che economici avanzando proposte di intervento sempre su misura.

Vengono proposti interventi con formula EPC (Energy Performance Contract) garantendo l'efficienza del sistema per tutta la durata del contratto operando nel caso con formula ESCo (Energy Service Company), finanziando il 100% dell'intervento.

Ecogenerazione – [www.ecogenerazione.it](http://www.ecogenerazione.it)  
[info@ecogenerazione.it](mailto:info@ecogenerazione.it)



# L'END OF WASTE CARTA PER CARTA E CARTONE: UN ULTERIORE PASSO AVANTI SULLA STRADA DELLA CIRCOLARITÀ



Claudio Busca, *Responsabile Public Affairs Comieco*

Il 24 febbraio 2021 è entrato in vigore il DM 188/2020 che prevede la disciplina sulla cessazione della qualifica di rifiuto di carta e cartone. Il decreto, in altri termini, individua i criteri specifici nel rispetto dei quali i rifiuti di carta e cartone cessano di essere qualificati rifiuti “*ai sensi e per gli effetti dell'articolo 184 ter, D.Lgs 152/2006*”. L'End of Waste (“cessazione della qualifica di rifiuto”) può essere definito come il risultato di un processo di recupero che permette ad un rifiuto di tornare a svolgere un ruolo utile come prodotto. Sotto il profilo economico l'EoW pone i materiali recuperati sullo stesso

notificato a Bruxelles. Il DM 188 prevede inoltre una più puntuale disciplina anche per quanto riguarda gli impianti che recuperano la carta, introducendo specifiche previsioni sulla effettuazione delle verifiche e dei controlli.

## End of Waste e Materie Prime Secondarie

Ma qual è il nesso e la differenza con le materie prime secondarie (MPS)? Sotto il profilo normativo le MPS erano previste e regolate dall'art. 181 *bis*, D.Lgs 152/2006 poi sostituito dall'art. 184 *ter* sulla cessazione della qualifica di rifiuto, in recepimento della direttiva quadro sui rifiuti 2008/98 che ha introdotto nel quadro normativo il concetto di EoW. Concettualmente le MPS sono collegate al reimpiego effettivo ed oggettivo del materiale recuperato, in assenza del quale tornano ad essere qualificate e gestite come rifiuti. Sotto tale ultimo profilo, le MPS sono state da taluno considerate

### UN CENNO ALLA UNI EN 643

- ✓ La UNI EN 643:2014 «*Lista europea delle qualità unificate di carta e cartone da riciclare*» definisce **95 tipologie di carta da riciclare comunemente commercializzate sul mercato europeo e destinate al riciclo per la produzione di nuova carta e cartone;**
- ✓ E' una norma tecnica (UNI) e nasce per favorire la commercializzazione (vendita e acquisto) di carta da riciclare;
- ✓ Non esclude la presenza sul mercato di tipologie non ancora codificate e gli accordi tra le parti.

piano delle materie prime; sotto il profilo ambientale e sociale consente la sostituzione delle risorse naturali con materiali e sostanze derivate dai rifiuti, riducendone lo spreco. È dunque uno strumento fondamentale per l'economia circolare.

Per la filiera cartaria la disciplina introdotta dal DM 188 si pone in continuità con quella prevista dal DM 5 febbraio 1998 sulle materie prime secondarie, adeguando le specifiche merceologiche della carta recuperata agli standard tecnici della norma UNI di settore a livello europeo, la norma UNI EN 643. Elemento non banale sotto il profilo della valenza “europea” dei criteri stabiliti dal nuovo decreto che, prima della sua emanazione, è stato

dei “rifiuti depotenziati”. L'EoW si riferisce, come detto, ad un processo di recupero che trasforma un rifiuto in un nuovo materiale. Non è più, pertanto, un “rifiuto depotenziato” in attesa di diventare un non rifiuto grazie all'impiego effettivo ed oggettivo ma nasce come un vero e proprio non rifiuto. Il nesso tra la materia prima seconda e l'end of waste è che entrambi esitano da un trattamento attraverso il quale il rifiuto viene recuperato per essere utilizzato in un ciclo produttivo in luogo delle materie prime vergini.

## Le quattro condizioni per avere un End of Waste

Il concetto di End of Waste, come accennato in precedenza, entra nel quadro normativo con la Diret-



tiva 2008/98/CE (c.d. “direttiva quadro sui rifiuti”). In particolare, al Considerando 22 si legge che “... la presente direttiva dovrebbe chiarire quando taluni rifiuti cessano di essere tali stabilendo criteri volti a definire quando un rifiuto cessa di essere tale”. Al Considerando 22 fa seguito l’articolo 6 della stessa Direttiva che stabilisce le condizioni necessarie affinché un rifiuto cessi di essere tale.

In particolare:

1. La sostanza o l’oggetto sono destinati ad essere utilizzati per scopi specifici.
2. Esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto.
3. La sostanza o l’oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti.
4. L’utilizzo della sostanza o dell’oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull’ambiente o sulla salute umana.

Quando queste quattro condizioni sono simultaneamente soddisfatte ciò che esita da un processo di recupero non è più un rifiuto ma un prodotto. Le predette condizioni sono state integralmente recepite dall’art. 184 *ter*, D.Lgs 152/2006.

Vediamole più nel dettaglio.

La prima condizione implica che il bene ottenuto debba essere diffuso, ossia utilizzato in ambiti noti. L’esistenza di un mercato o una domanda per un dato bene o prodotto corrobora il suo utilizzo in comparti o settori economici in quanto rende probabile l’utilizzo stesso e meno probabile l’abbandono.

La terza condizione fa sì che la sostanza o l’oggetto debbano garantire i requisiti di utilizzo e consumo per assolvere alle prestazioni usualmente richieste e rispettare le norme di legge e tecniche relative a quella sostanza o a quel prodotto specifico.

Infine la sostanza o l’oggetto non devono essere nocivi per l’ambiente e la salute umana.

### Il DM 118/2020 per la carta e il cartone

Il Decreto Ministeriale 22 settembre 2020, n. 188, è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 9 febbraio 2021 ed è entrato in vigore il successivo 24 febbraio. Si tratta del “Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di carta e cartone, ai sensi dell’art. 184 *ter*, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152”.

#### Alcune novità: a) il lotto di carta e cartone

Tra le novità più rilevanti introdotte dal DM 188 vi è senz’altro quella del lotto. Di seguito la relativa definizione.

“*lotto di carta e cartone recuperati*”: un quantitativo di carta cartone recuperati prodotti un periodo di tempo definito, comunque non superiore a sei mesi, ed in condizioni operative uniformi. Il lotto di produzione non può essere in ogni caso superiore a 5.000 tonnellate.

Il lotto è pertanto identificato in termini di quantità. Può essere, ad esempio, il materiale prodotto in una giornata lavorativa, un carico utile o la quantità massima stoccabile. In ogni caso il legislatore si è preoccupato di stabilire un limite quantitativo e temporale: il lotto non può essere in ogni caso superiore a 5.000 tonnellate e non può superare il termine di 6 mesi.

Appare altresì importante evidenziare che la scelta del lotto è responsabilità del recuperatore (ossia, del produttore di carta e cartone recuperati) e la sua individuazione è indicata nel sistema di gestione della qualità che, come vedremo in seguito, il produttore deve applicare secondo la norma UNI EN ISO 9001.

Al lotto è inoltre correlata la “dichiarazione di conformità” che va emessa al termine della produzione del lotto stesso e che costituisce un’altra rilevante novità introdotta dal DM 188.

#### b) la dichiarazione di conformità (Art. 5 e Allegato 3)

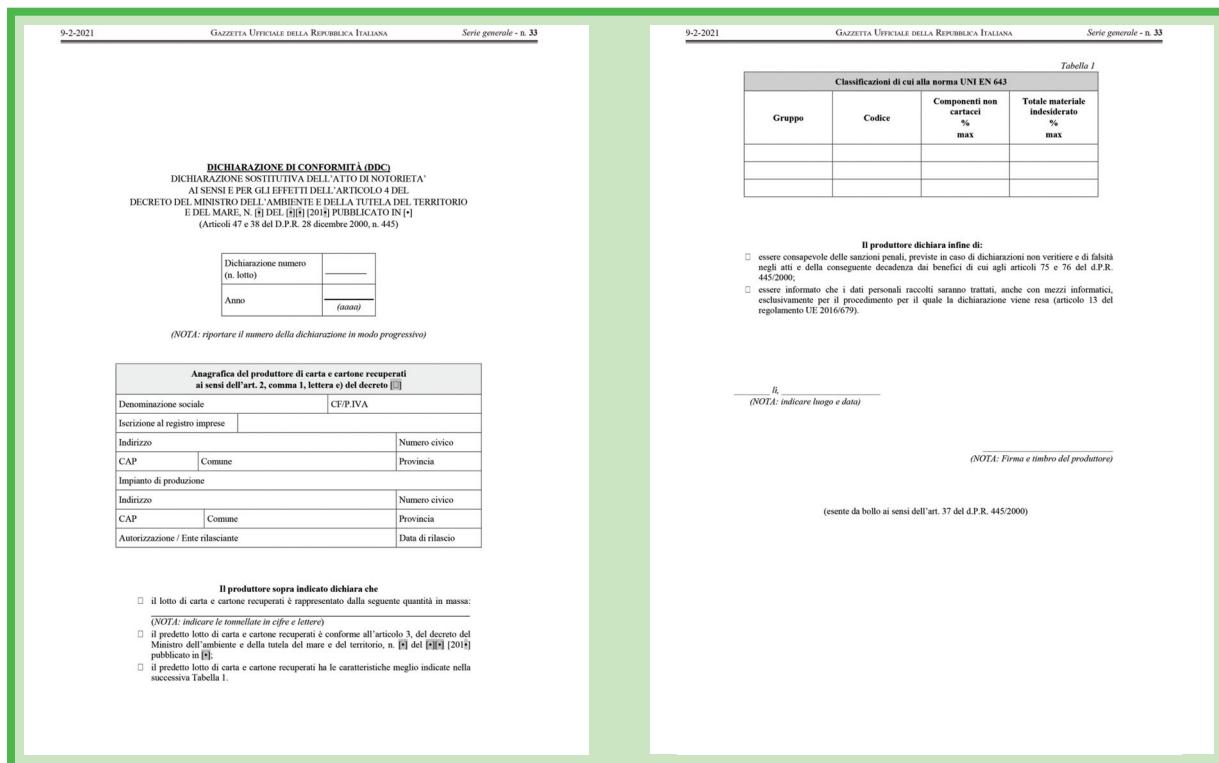
Per attestare il rispetto dei criteri della cessazione della qualifica di rifiuto al termine del processo produttivo di ogni lotto va redatta una dichiarazione di conformità secondo il modello di cui all’Allegato 3 (si veda l’infografica a pagina successiva).

La dichiarazione va inviata all’autorità competente e all’agenzia di protezione ambientale territorialmente competente; va conservata presso l’impianto di produzione o la sede legale mettendola a disposizione degli organi di controllo. Infine, ai fini della verifica della sussistenza dei requisiti per l’EoW, il produttore conserva per un anno un campione di carta e cartone recuperati.

#### c) il sistema di gestione della qualità (art. 6)

Il produttore dell’EoW deve applicare un sistema di gestione della qualità conforme alla UNI EN ISO 9001, che dunque da volontario diventa obbligatorio. Il manuale del sistema di gestione deve prevedere:

- le procedure operative per il controllo della conformità alla UNI EN 643;
- il piano di campionamento (lotto e campione).



**Come si ottiene un EoW di carta e cartone. I rifiuti ammessi all'impianto e i relativi controlli (Allegato 1, lettera b)**

L'Allegato 1, lettera b), al DM 188 elenca i codici EER dei rifiuti ammessi all'impianto:

- EER 15 01 01 imballaggi di carta e cartone;
- EER 15 01 05 imballaggi compositi;
- EER 15 01 06 imballaggi in materiali misti;
- EER 20 01 01 carta e cartone;
- EER 19 12 01 carta e cartone prodotti dal trattamento meccanico dei rifiuti provenienti

dalla raccolta differenziata di rifiuti urbani e speciali;

- EER 03 03 08 scarti della selezione di carta e cartone destinati ad essere riciclati, limitatamente ai rifiuti provenienti dalle attività di trasformazione dei prodotti a base cellulosa.

Non sono comunque ammessi i rifiuti di carta e cartone selezionati da rifiuto indifferenziato.

Nelle infografiche successive una sintesi delle fasi del controllo sui rifiuti in ingresso.

**CHI:** personale qualificato a ciò debitamente formato e addestrato;

**COSA:**

- ✓ Esame documentazione di corredo del carico
- ✓ Controllo visivo
- ✓ Accettazione del rifiuto
- ✓ Analisi merceologica almeno con cadenza annuale

- Verifica FIR o doc equipollente
- Verifica aut.ni soggetti e mezzi
- Verifica eventuali analisi eseguite sul rifiuto (per eventuale presenza contaminanti)

Per verificare corrispondenza del carico ai codici EER indicati sul doc di accompagnamento

- Pesatura e registrazione dei dati relativi al carico in ingresso
- Stoccaggio dei rifiuti in area dedicata (secondo una serie di specifiche minime elencate dai 1 a 5 dell'All 1, lett. b)
- Implementare una procedura scritta per la gestione, la tracciabilità e la rendicontazione delle non conformità

- Da prevedere nel piano di gestione qualità.
- Si presume che vada fatta per codice EER

Sono inoltre previsti controlli supplementari, anche analitici, a campione, se l'analisi della documentazione e/o il controllo visivo indichino tale necessità (ad es., se in base alla provenienza vi è il sospetto che i rifiuti siano stati o possano essere stati a contatto con sostanze pericolose). I controlli analitici per rilevare eventuale presenza su formaldeide, fenoli e nonilfenoli vanno fatti da un laboratorio accreditato in base ai parametri della Tabella 1.

Tabella 1

PARAMETRI	UNITÀ DI MISURA	VALORI LIMITE
Formaldeide	% in peso	< 0,1
Fenolo	% in peso	< 0,1
Nonilfenoli (NP)	% in peso	< 0,1
Nonilfenolietossilati (NPE)	% in peso	< 0,1

### Le caratteristiche della carta e cartone recuperata (Art. 3 e Allegato 1, lettera a)

L'art. 3 del decreto stabilisce che *all'esito di operazioni di recupero effettuate esclusivamente in conformità alle disposizioni della norma UNI EN 643, i rifiuti di carta e cartone cessano di essere qualificati come rifiuti e sono qualificati come carta e cartone recuperati se risultano conformi ai requisiti tecnici di cui all'Allegato 1.*

La carta e cartone recuperati devono risultare conformi ai requisiti indicati nella Tabella 2.

Tabella 2

PARAMETRI	UNITÀ DI MISURA	VALORI LIMITE
Materiali proibiti escluso i rifiuti organici e alimenti	-	Norma UNI EN 643
Rifiuti organici compresi alimenti	% in peso	< 0,1
Componenti non cartacei	% in peso	Norma UNI EN 643

L'accertamento di conformità ai requisiti di cui alla tabella soprastante deve avvenire con cadenza almeno semestrale e comunque al variare delle caratteristiche di qualità dei rifiuti in ingresso. L'accertamento deve essere effettuato da un organismo certificato secondo la norma UNI EN 9001 e il prelievo dei campioni deve avvenire secondo le metodiche definite norma UNI 10802.

### L'utilizzo della carta recuperata (Art. 4 e Allegato 2)

L'articolo 4 del decreto prevede che *“La carta e il cartone recuperati sono utilizzabili per gli scopi specifici elencati nell'allegato 2”*, ossia, la manifattura di carta e cartone ad opera dell'industria car-

taria oppure in altre industrie che li utilizzano come materia prima (Allegato 2).

### Il regime transitorio e l'adeguamento (art. 7)

Ai fini dell'adeguamento ai criteri previsti dal nuovo decreto, entro il 23.8.2021 il produttore era tenuto a presentare all'autorità competente:

- un aggiornamento della comunicazione se opera in regime semplificato;
- un'istanza di aggiornamento dell'AIA o dell'autorizzazione ordinaria.

Nel primo caso decorsi 90 giorni inizia l'operatività secondo il nuovo decreto; nel secondo caso è necessario che l'autorità competente si esprima.

Una volta inviato l'aggiornamento, nelle more dell'adeguamento, i materiali che esitano dalle operazioni di recupero già autorizzate possono essere utilizzati se conformi al DM 118/2020 e secondo la dichiarazione di conformità di cui all'art. 5.

In altri termini, ciò che rileva, anche nelle more dell'adeguamento, sono le caratteristiche del materiale prodotto: se sono conformi a quanto previsto dall'Allegato 1 e vengono attestate secondo la dichiarazione di conformità di cui all'Allegato 3 si avrà un EoW.

La filiera cartaria è sicuramente una filiera trainante l'economia circolare che, grazie allo sviluppo delle raccolte differenziate comunali e alla loro valorizzazione attraverso la rete del recupero e del riciclo che può contare su circa 370 impianti di recupero e oltre 50 cartiere, ha fatto della materia prima seconda la principale fonte di approvvigionamento del sistema produttivo nazionale. Basti pensare che oggi oltre il 60% della produzione cartaria nazionale deriva da fibre riciclate e nel comparto dell'imballaggio si è già oltre l'obiettivo di riciclo previsto al 2030 dalla normativa comunitaria. Sotto tale profilo, il DM 188/2020, dotando la filiera dei criteri EoW, costituisce certamente un tassello strategico alla costruzione dell'economia circolare per il sistema paese in quanto crea condizioni di mercato uniformi per l'offerta, la commercializzazione e l'utilizzo della carta recuperata, sulla base degli standard merceologici previsti dalla norma UNI di settore.

Per informazioni:

Comieco, Cons. Naz. Recupero e Riciclo degli imballaggi a base Cellulosica

[www.comieco.org](http://www.comieco.org)



# INFORMAZIONI DALLE AZIENDE

## LA NUOVA VALVOLA A FARFALLA 565 INTERAMENTE IN PLASTICA DI GF PIPING SYSTEMS BATTE IL METALLO

GF Piping Systems presenta sul mercato la sua nuova Valvola a farfalla 565. La valvola altamente affidabile, economica, leggera e interamente in plastica dimostra la sua netta superiorità rispetto alle valvole in metallo nelle applicazioni di trattamento dell'acqua.

La nuova arrivata nella famiglia di valvole a farfalla di GF Piping Systems batte le alternative in metallo, non solo nel trattamento dell'acqua ma in una vasta gamma di altre applicazioni.

La valvola a farfalla 565 è robusta ma leggera, costituita da componenti in plastica ad alte prestazioni. È applicabile fino a 16 bar e temperature rigide da -10°C a + 80°C. La valvola 565 è più leggera del 60% rispetto a una valvola in metallo comparabile, quindi una singola persona può gestirla facilmente e in sicurezza durante l'installazione. Il materiale leggero riduce anche al minimo l'energia consumata per il trasporto e l'installazione. Dopo l'installazione, i vantaggi del peso statico ridotto possono diventare ancora più significativi, ad

esempio, negli impianti del settore Marine.

La valvola a farfalla 565 è una soluzione completa per il segmento dell'acqua che risolve tutti i problemi tipici che i clienti hanno riscontrato con le valvole in metallo. Grazie alla sua maggiore resistenza alla corrosione, una maggiore durata e un uso più efficiente di energia e risorse durante la produzione industriale, la valvola fornisce una soluzione più economica e sostenibile per i clienti del trattamento dell'acqua.

Progettata per essere rapida e facile da installare, la valvola a farfalla 565 ha la stessa lunghezza di installazione delle valvole metalliche (ISO 5752 riga 20), evitando quindi costose modifiche ai sistemi di tubazioni esistenti, un chiaro vantaggio rispetto al suo avversario in metallo.

Le valvole a farfalla in metallo soffrono di usura – sia a causa di corrosione, contaminazione o uso prolungato – non sono così durevoli e devono essere sostituite. Il tempo di inattività che ne deriva porta a ritardi nelle operazioni, costi aggiuntivi di installazione e acquisto e la necessità di impiegare un esperto per installare, controllare e monitorare la nuova valvola metallica.



**+GF+**

Figura 2  
Valvola a farfalla 565

La nuova versione di GF Piping Systems, invece, è realizzata con materiali termoplastici di qualità superiore e costruita per durare, con una maggiore durata nelle applicazioni acqua e un maggiore contributo a un mondo più sostenibile.

Per saperne di più [www.gfps.com/it/Prodotti e Soluzioni](http://www.gfps.com/it/Prodotti_e_Soluzioni) → Innovation → Valvola a farfalla 565

Georg Fischer S.p.A.  
[www.gfps.com/it](http://www.gfps.com/it)  
[it.ps@georgfischer.com](mailto:it.ps@georgfischer.com)



## RISULTATO MOLTO POSITIVO PER H2O CHE DÀ APPUNTAMENTO A BOLOGNA NEL 2023

Un numero importante di qualificati operatori ha visitato le aziende AC-CADUEO che, nonostante le difficoltà organizzative e legislative imposte dalla pandemia, hanno confermato la presenza all'evento, la cui valenza tecnologica è stata completata da diverse new entry, a testimonianza del riconoscimento dell'importanza della manifestazione per la sua business community. Tre giorni intensi, in cui tutti – dalle aziende agli esperti nazionali e internazionali, dalle Istituzioni alle Utilities dagli operatori professionali agli studi tecnici – hanno potuto apprezzare le innovative proposte degli espositori e le tematiche presentate anche nell'importante agenda convegnistica in 20 convegni. Un risultato che è un segnale forte e convincente di un comparto che as-

**+GF+**



Figura 1  
Valvole a farfalla 565 con attuatori elettrici

sume un'importanza sempre più incisiva, considerata anche l'attenzione verso le tematiche ambientali che l'emergenza pandemica ha accentuato. Quest'anno, in contemporanea con ACCADUEO/H2O, la piattaforma espositiva è stata arricchita anche dagli eventi di Mirumir HESE-Hydrogen Energy Summit&Expo, ConferenzaGNL, Fuels Mobility, Dronitaly: un network di manifestazioni sinergiche con H2O/CH4 in cui si sono ritrovati tutti i protagonisti del settore, per confrontarsi e sviluppare nuove progettualità per il futuro.

Il network verrà riproposto nell'ottobre 2022 dalla piattaforma espositiva e convegnistica BolognaFiere Water&Energy, una JV tra BolognaFiere e Mirumir, all'interno del quale ci sarà un Focus ACCADUEO dedicato all'acqua; ACCADUEO/H2O nel suo tradizionale format di Mostra internazionale dell'acqua ritornerà nel 2023.

**BolognaFiere S.p.A.**  
[www.accadueo.com](http://www.accadueo.com)  
[accadueo@bolognafiere.it](mailto:accadueo@bolognafiere.it)



## AC BOILERS CONSOLIDA LA PARTNERSHIP CON ENERGY NEST: FIRMATO L'ACCORDO COMMERCIALE PER IL SISTEMA THERMAL-BATTERY™

Lo sviluppo di prodotti nell'ambito Green Energy per favorire il processo di transizione energetica è un obiettivo ormai consolidato nelle attività di AC Boilers – formerly Ansaldo Caldaie, società con esperienza da oltre 150 anni nel settore della progettazione, costruzione ed installazione di generatori di vapore di grande taglia, acquisita da Sofinter S.p.A. all'inizio degli anni 2000.

AC Boilers, a partire dal 2019, ha avviato una collaborazione con la startup norvegese Energy Nest, allo scopo di realizzare soluzioni di Energy Storage per l'immagazzinamento e il rilascio di energia termica per mezzo del vapore (perciò definite Direct

Steam) mediante l'applicazione di batterie termiche brevettate con la tecnologia ThermalBattery™ di proprietà Energy Nest.

Successivamente al primo progetto in partnership tra le due società per il sistema Direct Steam ThermalBattery™ in corso di realizzazione per YARA International in Norvegia, AC Boilers ed Energy Nest hanno rafforzato la loro collaborazione stipulando un accordo commerciale per lo sviluppo di progetti di Energy Storage. La tecnologia ThermalBattery™ permette di rendere disponibile "on demand" l'energia immagazzinata, anche da fonti rinnovabili, introducendo importanti risparmi nel consumo di energia e vantaggi nella flessibilità operativa degli impianti industriali e nelle centrali termoelettriche.

Questo sistema è basato sullo specifico materiale HEATCRETE® che garantisce un'elevata capacità di accumulo termico anche ad alte temperature ed è stato appositamente sviluppato e testato per lo stoccaggio di energia in impianti industriali. Direct Steam opera con il vapore come fluido di scambio termico e AC Boilers ha realizzato – in particolare – il progetto del sistema acqua-vapore che trasferisce alle utenze l'energia accumulata.

Il sistema è costituito da blocchi modulari di materiale HEATCRETE® all'interno dei quali sono posti i tubi in acciaio per il passaggio del vapore. Nella fase di accumulo il vapore disponibile, in eccesso rispetto alle necessità dell'impianto, rilascia ai moduli l'energia che deriva dalla sua condensazione ed il condensato è conservato in un apposito serbatoio in pressione. Nella successiva fase di scarico, il serbatoio alimenta i moduli con il condensato che da essi assorbe l'energia accumulata ed evapora generando vapore per alimentare le utenze dell'impianto, in tal modo si risparmiano consumi energetici di combustibile fossile. Le batterie termiche permettono di fornire vapore surriscaldato o saturo con operazioni estremamente flessibili che possono variare da minuti a ore.



Figura 3  
ThermalBattery™

La generazione di vapore è di fondamentale importanza nel percorso verso l'ottimizzazione dell'utilizzazione delle risorse rinnovabili e verso il miglioramento dell'efficienza energetica. Attraverso l'impiego delle batterie termiche, dunque, è possibile combinare soluzioni di Energy Storage con la produzione di vapore necessaria per i diversi processi industriali. AC Boilers è, infatti, costantemente impegnata – in tutte le sue attività operative ed in quelle di Ricerca&Sviluppo – nell'adottare un approccio sostenibile in linea con gli obiettivi internazionali per il controllo del clima e la riduzione delle emissioni.

“Questo è uno dei passi che la Società sta facendo per supportare la transizione energetica” ha dichiarato l'Amministratore Delegato del Gruppo Sofinter Ing. Roberto Testore “Noi, con le aziende del Gruppo, siamo impegnati nella produzione di sistemi per la generazione di vapore che rendono sostenibile l'impatto ambientale; le nostre attività di ricerca e sviluppo sono fondamentali per contribuire ad una reale riduzione delle emissioni e continueremo su questa strada anche con altre importanti iniziative”.

**AC Boilers**  
**formerly ANSALDO CALDAIE**  
 Ufficio comunicazione:  
[samantha.bottini@sofinter.it](mailto:samantha.bottini@sofinter.it)  
[www.acboilers.com](http://www.acboilers.com)



## AIR LIQUIDE E SARAS LANCIANO UNO STUDIO PER DECARBONIZZARE LA RAFFINERIA DI SARROCH ATTRAVERSO LA CATTURA E LO STOCCAGGIO DEL CARBONIO

Air Liquide e Saras, uno dei principali operatori europei nel settore dell'energia e della raffinazione del petrolio, hanno firmato un Memorandum of Understanding (MoU) volto a esplorare le opportunità per ridurre l'impronta di carbonio della raffineria di Sarroch, una delle maggiori raffinerie d'Europa. Nell'ambito di questo accordo, le due società valuteranno la fattibilità tecnica ed economica di soluzioni per la cattura e lo stoccaggio delle emissioni di CO<sub>2</sub> connesse ai processi della raffineria di Sarroch. Questa iniziativa è in linea con i rispettivi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile di entrambe le società.

Il Memorandum of Understanding firmato dalle due società prevede, in una prima fase, uno studio volto a considerare diverse soluzioni di cattura del carbonio, tra cui la soluzione ideata e brevettata da Air Liquide Cryocap™, e la loro applicabilità. In una seconda fase, i due partner prevedono di effettuare uno studio di fattibilità più approfondito che includerà anche soluzioni di trasporto e stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

L'implementazione di una soluzione di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS) nel sito di Sarroch consentirebbe una riduzione dell'impronta di carbonio della raffineria e delle forniture di energia elettrica alla comunità circostante. Il sito di Sarroch è infatti dotato di un impianto IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), una centrale integrata a ciclo combinato che utilizza prodotti pesanti della raffineria per produrre energia elettrica destinata a rifornire, in Sardegna, sia clienti industriali che l'uso domestico.

Nell'ambito di questo MoU, Air Liquide esplorerà anche la possibilità di ridurre l'impronta di carbonio delle sue attività produttive di ossigeno e



Figura 4  
Un momento della firma del MoU tra Air Liquide e SARAS

azoto esistenti sul sito, utilizzando energia elettrica rinnovabile nel contesto di contratti di acquisto di energia a lungo termine.

Questo accordo è in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile di Air Liquide, che includono l'obiettivo della neutralità carbonica entro il 2050. In tale contesto, il Gruppo punta non solo a ridurre l'impronta di carbonio delle sue attività, ma anche a lavorare con i suoi clienti per un'industria sostenibile e contribuire allo sviluppo di una società a basse emissioni di carbonio.

Nel contesto della propria strategia per la transizione energetica, Saras ha definito una serie di progetti che comprendono, accanto allo sviluppo di nuova capacità da fonti rinnovabili, la riduzione delle emissioni della CO<sub>2</sub> attraverso l'utilizzo di idrogeno a bassa impronta di carbonio, la produzione di carburanti "low carbon" che possano rispondere alle specifiche esigenze del mercato e l'efficientamento energetico dei propri processi produttivi.

Bruno Ponson, Direttore Generale di Air Liquide Italia, ha dichiarato: "Siamo lieti di accompagnare Saras nel suo progetto di decarbonizzazione del sito di Sarroch, mettendo a disposizione la nostra competenza nelle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>. Attraverso questa iniziativa, entrambe le società rafforzeranno una partnership esistente da oltre 30 anni estendendola alla lotta contro il cambiamento climatico. Sostenere

la decarbonizzazione dell'industria è uno dei pilastri strategici del Gruppo Air Liquide, che è impegnato ad affrontare l'urgenza del cambiamento climatico e la sfida della transizione energetica mirando a raggiungere la neutralità del carbonio entro il 2050".

Dario Scaffardi, CEO di Saras, ha dichiarato: "Questo accordo è un passo importante nell'impegno di Saras per affrontare la sfida della transizione energetica garantendo la sostenibilità del nostro sito produttivo nel medio-lungo periodo. La cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> è una tecnologia d'avanguardia con potenzialità rilevanti ed è riconosciuta come una tecnologia fondamentale per conseguire l'obiettivo di neutralità climatica. Air Liquide è da decenni uno dei principali fornitori di Saras. Siamo lieti ed orgogliosi di sviluppare questo studio con un partner d'eccellenza, con ampia e riconosciuta esperienza, e che ha già sviluppato importanti progetti analoghi, nella certezza che questa collaborazione contribuirà a definire soluzioni per affrontare efficacemente le sfide per lo sviluppo sostenibile del nostro Gruppo".

**Air Liquide Italia**  
Francesca Ficca, Tel. 02.4026513





## LA GESTIONE DEI RIFIUTI NELL'ECONOMIA CIRCOLARE

Secondo la direttiva U.E. 2018/851 e il D.Lgs 116/2020

Bernardino Albertazzi

217 pagine; Formato: 17 x 24; Prima edizione: gennaio 2021

ISBN 9788857912356; Prezzo: 32,00€

Editore: Dario Flaccovio [www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it)

Tra i più rilevanti argomenti trattati in *La gestione dei rifiuti nell'economia circolare* figurano:

- Il rifiuto: produttore e classificazione.
- La responsabilità estesa del produttore.
- La gestione dei sottoprodotti e le terre da scavo.
- La disciplina del recupero dei rifiuti-end of waste.
- Il deposito temporaneo e lo stoccaggio in azienda.

La disciplina della gestione dei rifiuti contenuta nel D.Lgs 152/2006 e s.m. è stata radicalmente modificata dal D.Lgs 116/2020, che ha recepito la direttiva UE 851/2018.

Il nuovo decreto è innovativo rispetto al testo previgente in quanto ha introdotto numerose modifiche che riguardano, in particolare, la

responsabilità estesa del produttore e una nuova classificazione dei rifiuti, nonché il Registro Elettronico dei Rifiuti, che costituisce il nuovo sistema di tracciabilità dei rifiuti. Il decreto inoltre punta molto sulla prevenzione della produzione dei rifiuti e su un nuovo modo di produrre eco-compatibile che viene denominato “economia circolare” (cioè un’economia pensata per potersi rigenerare da sola).

Il volume analizza la nuova disciplina sul tema, mettendo in rilievo le differenze rispetto a quella precedente, indirizzando così l’operatore del settore sia pubblico che privato verso la corretta interpretazione ed applicazione del nuovo testo di legge. A tal fine è arricchito da una copiosa presenza della giurisprudenza penale e amministrativa.

## STABILIZZAZIONE DEI SISTEMI IMPERMEABILI IN MEMBRANE BITUMINOSE

**Patologie di retrazione, raptazione ed estrazione. Cosa sono, come si presentano e come si contrastano**

Antonio Broccolino

248 pagine; Formato: 17 x 24; Prima edizione: ottobre 2020

ISBN 9788857912097 – Prezzo: 38,00€

Editore: Dario Flaccovio [www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it)

Un’opera che rappresenta un contributo poderoso alla precisazione della regola dell’arte, calibrato sull’obiettivo di risposte puntuali ai bisogni conoscitivi più avvertiti nell’uso delle membrane bitume-polimero.

Un’occasione che l’autore non si è fatto sfuggire per fare finalmente chiarezza su alcune patologie che, con la loro diffusione, rischiano di screditare il lavoro di molte imprese, penalizzando anche i prodotti stessi utilizzati per impermeabilizzare le coperture.

Il libro, ricco di illustrazioni, schemi, tabelle e disegni, si fa sfogliare e leggere velocemente come in un romanzo che si fa avvincente pagina dopo pagina. Dopo un quadro sintetico, ma completo sulle caratteristiche e sui materiali che compongono una membrana, l’autore passa in rassegna i sistemi di posa, le interazioni tra gli strati e le principali patologie. Il tutto con una precisione didascalica e puntuale, come un cronista che da oltre quarant’anni racconta non solo quello che progetta, ma anche ciò che si realizza durante la posa e quello che si trova a distanza di anni. E, non ultimo, come si possa evitare che insorgano le diverse patologie.





## SARDINIA SYMPOSIUM IS BACK!

La prossima edizione del **Sardinia - 18° Simposio Internazionale sulla Gestione dei rifiuti e sulla discarica sostenibile** - si terrà dall'11 al 15 Ottobre 2021 in una meravigliosa location sulla costa sud della Sardegna. Dopo un anno difficile e impegnativo come quello appena passato, non vediamo l'ora di incontrarvi di nuovo di persona per un'entusiasmante edizione piena di novità! Come da tradizione, il Sardinia 2021 includerà sessioni orali parallele, workshop pratici, presentazioni poster, business meetings e un'esposizione commerciale. Per questa edizione abbiamo in serbo nuovi format, nuove tipologie di sessioni e numerosi contenuti multimediali che si aggiungeranno alle tradizionali sessioni per creare un programma innovativo e coinvolgente: una delle grandi novità saranno le visite tecniche virtuali all'interno degli impianti più importanti del mondo! E un entusiasmante programma serale! **INVIA SUBITO UN ABSTRACT E PARTECIPA COME AUTORE!** [WWW.SARDINIASYMPOSIUM.IT](http://WWW.SARDINIASYMPOSIUM.IT)

**ULTIME NEWS!** E' nata l'Academy del Sardinia, un programma di aggiornamento promosso dall'IWWG - International Waste Working Group. Da ora fino a tutto Giugno, esperti di livello internazionale terranno (tutti i Giovedì, in inglese) un Webinar di 3 ore su diversi aspetti della gestione dei rifiuti.

**LEGGI IL PROGRAMMA E REGISTRATI:** <https://www.sardiniasymposium.it/it/training-programme>

## CALENDARIO DEI CORSI



SARDINIA ACADEMY OF WASTE MANAGEMENT

Promoted by **iwwg**

	Landfilling	Thermal treatment	Minimization and recycling	Various	Biological treatment	
February	<p>THURSDAY 25/02/2021  <b>Basics of sanitary landfilling</b>                      Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)</p>					
March	<p>THURSDAY 04/03/2021  <b>Drainage systems in landfills</b>                      Lecturer: Hans-Günter Ramke (DE)</p>	<p>THURSDAY 11/03/2021  <b>Basics of landfill aeration</b>                      Lecturer: Marco Ritzkowski (DE)</p>	<p>THURSDAY 18/03/2021  <b>Leachate recirculation: objectives, design, operation and control</b>                      Lecturer: Keith Knox (UK)</p>	<p>THURSDAY 25/03/2021  <b>Waste management and contaminated land regime(s) in European law</b>                      Lecturer: Luciano Butti (IT)</p>		
April	<p>THURSDAY 01/04/2021  <b>Landfill gas: modelling and management</b>                      Lecturer: Marco Ritzkowski (DE)</p>	<p>THURSDAY 08/04/2021  <b>Industrial waste management - New opportunities</b>                      Lecturer: Evangelos Gidarakos (GR)</p>	<p>WEDNESDAY 14/04/2021  <b>Process and technological aspects of solid waste thermal treatments</b>                      Lecturer: Umberto Arena (IT)</p>	<p>THURSDAY 22/04/2021  <b>Basics of waste recycling</b>                      Lecturer: Ian Williams (UK)</p>	<p>WEDNESDAY 28/04/2021  <b>Classification and management of contaminated masses in soil remediation projects</b>                      Lecturer: Jurate Kumpiene (SE)</p>	<p>THURSDAY 29/04/2021  <b>Treatment and disposal of incineration residues</b>                      Lecturer: Alessandra Poietтини (IT)</p>
May	<p>THURSDAY 06/05/2021  <b>Hydrogen production from waste</b>                      Lecturers: Luca Alibardi (UK), Aldo Muntoni (IT)</p>	<p>THURSDAY 13/05/2021  <b>Sustainable landfilling: concepts and design</b>                      Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)</p>	<p>THURSDAY 20/05/2021 (TO BE CONFIRMED)  <b>Landfill leachate</b>                      Lecturer: Howard Robinson (UK)</p>	<p>FRIDAY 21/05/2021  <b>Methane oxidation</b>                      Lecturers: Marion Huber-Humer (AT), Julia Gebert (NL)</p>	<p>THURSDAY 27/05/2021  <b>Anaerobic waste treatment in the Circular Economy - Basics and technical implementation</b>                      Lecturer: Michael Nelles (DE)</p>	
June	<p>THURSDAY 03/06/2021  <b>Low temperature waste conversion processes</b>                      Lecturer: Nicole Berge (US)</p>	<p>THURSDAY 10/06/2021                      14:00-17:00 UTC+1  <b>Prediction of leaching contaminants from landfilling - Part 1</b>                      Lecturers: Hans van der Sloot (NL), David Kosson (US)</p>	<p>FRIDAY 11/06/2021                      14:00-17:00 UTC+1  <b>Prediction of leaching contaminants from landfilling - Part 2</b>                      Lecturers: Hans van der Sloot (NL), David Kosson (US)</p>	<p>THURSDAY 17/06/2021  <b>Landfill remediation</b>                      Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)</p>	<p>THURSDAY 24/06/2021  <b>Chemicals of concern in waste recycling</b>                      Lecturer: Kostyantyn Pivnenko (UA)</p>	





Seguitemi anche su:



## LA RIVISTA TECNICO-SCIENTIFICA PER IL SETTORE DELL'INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE

**Ingegneria dell'Ambiente (IDA)** è una rivista scientifica ad accesso aperto (open access) nata nel 2014 da un'iniziativa della Sezione Ambientale del *Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale del Politecnico di Milano*. La rivista è **gratuita** per autori e lettori (open access) ed è dotata di un sistema di revisione paritaria (peer-review).

**Ingegneria dell'Ambiente** pubblica articoli riguardanti la ricerca tecnico-scientifica nei campi di interesse dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale e si propone come strumento in lingua italiana per raggiungere e dialogare con tecnici ambientali, liberi professionisti, funzionari della pubblica amministrazione, formatori ed Enti di controllo.

La rivista ospita contributi in lingua italiana; ma sono richiesti anche un titolo e un abstract in inglese.

I temi di interesse della rivista sono: *Tecnologie per acque di approvvigionamento e di rifiuto; Riutilizzo e recupero di energia e materia; Inquinamento dell'aria e depurazione delle emissioni in atmosfera; Inquinamento delle acque; Bonifiche dei suoli contaminati; Trattamento e gestione dei rifiuti; Valutazione di impatto ambientale; Cambiamenti climatici; Analisi del ciclo di vita; Energia e ambiente; Sistemi di gestione ambientale; Caratterizzazione, monitoraggio e modellistica dei fenomeni di inquinamento ambientale.*

**Ingegneria dell'Ambiente** pubblica Articoli di ricerca, che illustrano risultati di ricerche tecnico-scientifiche; Articoli di review, che illustrano lo stato dell'arte; Comunicazioni tecnico-scientifiche, che illustrano risultati di progetti dimostrativi o soluzioni applicative innovative; Brevi resoconti di convegni o mostre; Recensioni di volumi, italiani e stranieri, di interesse per i campi dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale; Editoriali o testi generali di inquadramento di temi di particolare rilevanza dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale, scritti con un linguaggio divulgativo (su invito della Direzione Scientifica o del Comitato Scientifico).

Per l'invio di proposte utilizzare la piattaforma all'indirizzo: [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

**Ingegneria dell'Ambiente** ha il patrocinio di  
**GITISA** (Gruppo Italiano di Ingegneria Sanitaria, [www.gitisa.it](http://www.gitisa.it));  
**AIAT** (Ass. Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio, [www.ingegneriambientali.it](http://www.ingegneriambientali.it)).  
*Ingegneria dell'ambiente è la rivista di riferimento per AIAT.*

Ingegneria dell'Ambiente è riconosciuta da **ANVUR** come rivista scientifica dell'Area 08, i suoi articoli sono riconosciuti ai fini dell'ottenimento di crediti per la formazione informale prevista degli Ordini Professionali.

Facile da installare, facile  
da gestire, facile da adattare  
Fino al **99%** di inquinanti acidi  
abbattuti



# SOLVAir<sup>®</sup>

Il nostro lavoro? Aiutare centinaia di operatori a gestire a costi contenuti le loro emissioni nel rispetto di normative sempre più severe, aumentando l'efficienza energetica dei loro impianti e migliorando i risultati industriali.

Come ci riusciamo? Offrendo soluzioni personalizzate a base di sodio per abbattere i gas acidi (HCl, SO<sub>x</sub>, HF...) nei fumi di ogni tipo di attività industriale, in tutto il mondo.

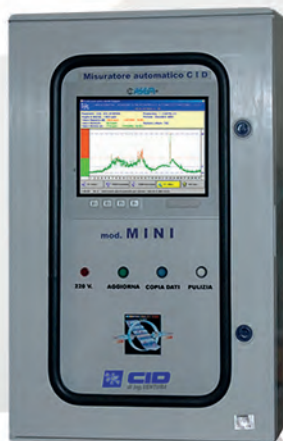
CLEAN AIR SOLUTIONS FOR HIGHER PERFORMANCE.  
[solvairsolutions.com](http://solvairsolutions.com)



Sondiamo la sicurezza e la qualità dell'acqua

SONDA TENSIOATTIVI

SONDA COD OUT



Rilevazione automatica in continuo dei parametri:

- TENSIOATTIVI
- SOLIDI SOSPESI
- BOD
- COD
- TORBIDITÀ

dal 1979

 **CID**  
Ing. VENTURA srl

**CID ING VENTURA Srl**

Via Denari 22 - 25127 BRESCIA Tel. 030 3730699 [www.venturacid.it](http://www.venturacid.it) [info@venturacid.it](mailto:info@venturacid.it)

# INDEX



VOL. 8  
NUM. 3  
2021

## EDITORIALS

The IPCC sixth assessment report – *Stefano Caserini*

Climate Change 2021 – physical-scientific bases: the main messages of the report  
– *IPCC Focal Point for Italy*

## ARTICLES

Normalisation and weighting in the life cycle assessment methodology: possible approaches and state of the art – *Giulia Cavenago, Lucia Rigamonti, Mario Grosso*

The Italian long-term strategy on reducing greenhouse gas emissions: the emission scenarios and observed historical trends – *Emanuele Peschi, Antonio Caputo, Eleonora Di Cristofaro, Marina Colaiezzi, Monica Pantaleoni, Marina Vitullo, Maria Gaeta*

Evaluation of the anaerobic degradation of food waste collection bags made of paper or bioplastic – *Valeria Venturelli, Giovanni Dolci, Arianna Catenacci, Francesca Malpei, Mario Grosso*

Chromium removal from waste-water: evaluation of an industrial plant upgrading – *Andrea Re, Elisabetta Zanardini, Domiziano Ivan Basilico, Marcello Rigon, Marco Vanotti, Cristiana Morosini*

Foto in copertina  
di mdesigner125

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2021 è sostenuta da:

