



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



N. 3/2022



## 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 stylized green graphic of horizontal lines on the left, followed by the letters "SIAD" in a bold, green, sans-serif font.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

## INDICE



**VOL. 9  
NUM. 3  
2022**

Ingegneria  
dell'Ambiente  
per il 2022  
è sostenuta da:



**auma**<sup>®</sup>  
Solutions for a world in motion



### Editoriale

**161** Notizie da Remtech: un fermento di nuove tecnologie  
*Marco Falconi*

### Articoli

**163** Valutazione del ciclo di vita di un impianto eolico offshore galleggiante:  
un caso studio italiano  
*Gaia Brussa, Mario Grosso, Lucia Rigamonti*

**178** Tecnologie, consumi energetici, costi e impatti ambientali nell'escavazione,  
lavorazione e trasporto di calcare e olivina  
*Serena De Marco, Stefano Caserini*

**194** Finale di partita sul clima: esplorare gli scenari catastrofici dei cambiamenti climatici  
*Luke Kemp, Chi Xu, Joanna Depledge, Kristie L. Ebi, Goodwin Gibbins, Timothy A. Kohler,  
Johan Rockström, Marten Scheffer, Hans Joachim Schellnhuber, Will Steffen,  
and Timothy M. Lenton*

### Comunicazioni tecnico-scientifiche

**208** Scienza e politica per la salvaguardia di Venezia  
*Paolo Cescon, Andrea Gambaro, Davide Zanchettin*

### Pubbliredazionali

**219** Un valido esempio di innovazione nell'evaporazione sottovuoto ottimizzando  
il consumo energetico

**224** Efficienza e innovazione con le soluzioni KSB in Tennacola S.p.A.

**227** Nuovo sistema smartCID composto da sonde e misuratore fanghi

**234** Imballaggi compositi a prevalente base cellulosa... e dove trovarli

**238** Unità mobili: una soluzione versatile per far fronte alle emergenze  
e a necessità temporanee

### Rubriche

**242** Informazioni dalle aziende



IdA



**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 Fabbri (*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*)Gaspere 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

**Grafica e impaginazione**

Gianluca Soddu

**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 BYNC-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. 02.23996414 – e-mail: [info@ingegneriadellambiente.net](mailto:info@ingegneriadellambiente.net)

Publicato on-line il 29 ottobre 2022.

Finito di stampare in **novembre 2022**, presso Colorshade di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 – Peschiera Borromeo (MI)

Foto: Giacomo Brini



## NOTIZIE DA REMTECH: UN FERMENTO DI NUOVE TECNOLOGIE

**Marco Falconi**

Coordinatore Scientifico di Remtech Europe

Gentili lettori, ho l'onore di essere stato invitato a scrivere l'editoriale di questo numero della rivista *Ingegneria per l'Ambiente*. Lo scrivo con la penna del Coordinatore Scientifico di Remtech Europe, per evidenziare le cose più interessanti emerse durante la conferenza. Questa edizione ha visto protagonista i PFAS (PerFluorinated Alkylated Substances), la classe di contaminanti estremamente ubiquitari che sono presenti nelle schiume antincendio in quantità percentuali e in diversi prodotti presenti nel nostro quotidiano come i cartoni della pizza, i tessuti antimacchia e impermeabili, caratteristiche peculiari date dal legame carbonio-fluoro che ne costituisce l'ossatura. Dalla conferenza sono emerse diverse criticità: per prima cosa la loro difficile definizione, perché non è facile capire cosa sono i PFAS e cosa no giacché esistono differenti descrizioni da diverse istituzioni internazio-

nali. La seconda difficoltà è la caratterizzazione poiché non esiste un protocollo analitico standardizzato per questa classe che racchiude più di 4700 composti riscontrati in commercio o nell'ambiente, secondo gli ultimi rapporti pubblicati e diversi laboratori stanno lavorando su propri protocolli per poterli poi proporre agli organi di normazione.

Tralasciando le problematiche legate all'applicazione dell'analisi di rischio, la terza criticità riguarda l'applicazione delle tecnologie di bonifica che deve trapiantare concentrazioni molto basse. Ho potuto riscontrare a Remtech un fermento di nuove tecnologie dedicate come trattamento termico o stabilizzazione per PFAS nei suoli e Surface Active Foam Fractionation (SAFF) o electrochemical oxidation per PFAS nelle acque, tecniche che stanno prendendo piede in particolare nei paesi scandinavi come Finlandia e Svezia e

dell'Europa centrale come Germania, Francia e Olanda dove i PFAS sono una priorità.

Un altro aspetto di rilievo, sono i passi da gigante che sta facendo la caratterizzazione ad alta risoluzione. Diamo per scontato tecniche come MIP che sta già entrando nel nostro panorama in particolare quando la scelta della tecnologia da adottare coinvolge l'iniezione di reagenti con raggi di influenza che con dati di permeabilità a scala centimetrica possono essere calcolati con grande precisione permettendo un'applicazione efficace. Si parla oramai di intelligenza artificiale, di modelli concettuali 3D con previsione di evoluzione nel tempo dell'area sorgente e dei pennacchi, di campionatori passivi sia per le matrici aeriformi che per le acque (senza preventivo pompaggio) che sono la frontiera della conoscenza in questo momento.

La sostenibilità degli interventi di bonifica è stata un altro fattore chiave della conferenza, osservando che anche in presenza di un'occasione unica come quella del PNRR, le risorse vanno spese bene e vanno date delle priorità chiave per non frammentare in mille rivoli le risorse economiche. Le priorità possono essere date con criteri tecnici come analisi di rischio relativa o strumenti tipo LCA anche proprietari e si tratta solo di applicarli correttamente. Interventi sostenibili significa anche ridurre al minimo indispensabile gli interventi di scavo e smaltimento per lasciare spazio a tecniche che permettano di riutilizzare il suolo che è una risorsa non rinnovabile. Ho avuto la fortuna di visitare recentemente un cantiere di bonifica a Bussi sul Tirino (Pescara) con una sperimentazione di Desorbimento Termico molto promettente che permetterà di lasciare il suolo in sito. In situazioni analoghe, ho visto big-bags di suolo che prendono la strada del trasporto transfrontaliero con elevati impatti ambientali ed economici. Un altro aspetto, il più pragmatico della sostenibilità nelle bonifiche è quello di arrivare a conclusione: *"Start the activity with the end in mind"* è un buon motto che permette di considerare il futuro sviluppo dell'area come parte essenziale della progettazione degli interventi. Ci troviamo con troppe situazioni con una caratterizzazione di decenni e con interventi che per via di cose, vengono sempre posticipati.

Finisco con il convegno su Environmental Social Governance di ASTM International a Remtech ha avuto più di 1200 iscritti, segnale della grande attenzione mondiale su questo tema. La reputazione delle aziende è fondamentale per diversi aspetti legati alla finanza e all'etica. Devo ammettere che riscontro che non sempre quello che è riportato nei Bilanci di Sosteni-



bilità è poi applicato in pratica, anche perché in molti casi, il bilancio è preparato da società di certificazione e controllato da operatori del settore marketing. Probabilmente non c'è una buona comunicazione interna all'azienda o, ma non voglio pensare male, il contenuto è conosciuto ma disatteso da altre priorità (es. economiche).

Approfitto di questo palcoscenico per un pensiero del tutto personale, come del resto è da considerare tutto questo editoriale. Non mancano le tecniche o le conoscenze o la preparazione degli enti di controllo, il progresso scientifico talvolta si scontra con un dettato normativo non riesce a stare al passo e talvolta è troppo ingessato su procedure e prassi consolidate. Su questo aspetto si può fare ancora molto, ad esempio togliendo la parte tecnica dai Decreti Legislativi che sono complicati da aggiornare e rimandandola a Decreti Ministeriali o anche a Linee Guida applicative, magari discusse ampiamente tra stakeholders di diversa estrazione e con presentazione in bozza della proposta con successiva raccolta dei commenti, discussione aperta e pubblicazione della versione finale adottata. Sarebbe un passo avanti che favorirebbe sia il progresso tecnologico sia la trasparenza nella documentazione tecnica che verrà emessa.

Infine, un pensiero per il comune di Cantiano, che con ponti distrutti e case allagate dopo la recente alluvione che ha colpito una zona delle Marche, con attività ancora piene di fango, nonostante la voglia e i sorrisi, nonostante tutto di chi non ha più nulla, ha bisogno di solidarietà per ripartire. Qui sotto i riferimenti per #cantianoriparti.

# VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DI UN IMPIANTO EOLICO OFFSHORE GALLEGGIANTE: UN CASO STUDIO ITALIANO

Gaia Brussa<sup>1,\*</sup>, Mario Grosso<sup>1</sup>, Lucia Rigamonti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA)

## Sommario

L'energia eolica offshore può fornire l'accesso a risorse aggiuntive, superando alcuni problemi relativi alle installazioni eoliche onshore. Questo lavoro consiste nella valutazione del ciclo di vita (LCA), "dalla culla alla tomba", di un parco eolico offshore galleggiante. L'impianto, previsto al largo della Sicilia e attualmente in fase di autorizzazione, sarebbe composto da 190 turbine eoliche con una potenza nominale di 14,7 MW, per un totale di 2,8 GW, installate su fondazioni galleggianti. Nel sistema modellizzato, come rappresentative della tecnologia impiegata, sono state assunte la turbina di riferimento e la piattaforma semi-sommersa con ormeggio a catenaria sviluppate dal *National Renewable Energy Laboratory*. L'unità funzionale scelta è la fornitura di 1 GWh di energia elettrica alla rete a terra: ciò significa includere nell'analisi anche il sistema elettrico necessario per la trasmissione, costituito principalmente dai cavi sottomarini. I metodi di valutazione degli impatti utilizzati sono l'EPD (2018) e il *Cumulative Energy Demand*. Dallo studio risulta che la fase di approvvigionamento di materie prime è la più

rilevante, per tutte le categorie d'impatto; in particolare, incidono i materiali per la turbina e per la struttura galleggiante. Invece, per *l'esaurimento delle risorse abiotiche* i cavi elettrici sono l'elemento più significativo. L'allontanamento dalla costa comporta, generalmente, impatti ambientali maggiori a causa dell'aumento della complessità delle infrastrutture.

In ottica di decarbonizzazione, si sottolinea che l'impatto stimato sul *riscaldamento globale* è di 31,3 t CO<sub>2eq</sub>/GWh; tale intensità carbonica risulta competitiva con altre tecnologie a basse emissioni per la generazione elettrica. Il parco eolico mostra anche una buona prestazione in termini di tempo di payback delle emissioni di gas serra e dell'energia investita per la costruzione dell'impianto, stimati rispettivamente in 2 e 3 anni, a confronto con una vita prevista di 30 anni.

**Parole chiave:** *Energia eolica, Analisi del ciclo di vita, Eolico offshore, Turbine eoliche galleggianti, Energia rinnovabile.*

## FLOATING OFFSHORE WIND FARM IN THE MEDITERRANEAN SEA: A LIFE CYCLE ASSESSMENT

### Abstract

The employment of renewable sources for power generation is fundamental to meet the increasing energy demand and at the same time tackle anthropogenic climate change. The use of wind power is encouraged considering that relies on a free and abundant energy source. In the last years, the market is moving toward offshore installations, firstly due to the lack of space for land-based wind turbines but also to limit the visual impact of wind farms and increase their social acceptability. Recently, floating offshore solutions are of growing interest since they give access to additional wind

resources, further from shore and in deeper waters, where more favourable wind conditions for power generation can be found i.e., higher wind velocity with lower turbulence and lower variability.

The present work aims to assess the environmental performance of a large floating offshore wind farm, consisting of multi-megawatt wind turbines and intended to be deployed off the west coast of Sicily (Italy). The selected case study is representative of a floating wind farm whose project has been submitted to the Environmental Impact Assessment procedure and currently is still undergoing the permitting process. Nevertheless, this project has been chosen as case study since it would become the largest floating wind farm in Europe, consisting of 190 aerogenerators with 14.7 MW rated power, for a total of 2.8 GW.

\* Per contatti: Via Valerio 119/1, Trieste. Tel. +39 3343874445  
gaia.brussa@mail.polimi.it

Ricevuto il 31-8-2022; Correzioni richieste il 9-10-2022;  
Accettazione finale il 12-10-2022.

The environmental performance is evaluated by means of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which is aimed at assessing the potential environmental impacts of the object of the study with a holistic perspective.

The selected functional unit is the delivery of 1 GWh of electricity to the onshore grid, including in the system boundaries also the electrical system for the transmission of the generated electricity to the onshore national grid. The adopted perspective for the LCA is cradle-to-grave i.e., the life cycle of the wind plant includes acquisition and processing of raw materials, transport of components, assembly and installation by means of specialised vessels, maintenance during the operational phase, disassembly and end-of-life. The chosen impact assessment methods are the EPD (2018) which involves eight impact categories, and the Cumulative Energy Demand (CED), related to direct and indirect energy consumption. Based on the estimated impacts, carbon and energy payback time (CPBT and EPBT) have been evaluated since they are found to be significant indicators for the effective communication of the results related to the sustainability of renewable energy plants. In the modelled system the NREL (National Renewable Energy Laboratory) reference wind turbine and semi-submersible platform, moored by catenary lines, are assumed as representative of the employed aerogenerators, since their design data are publicly available. For the other main components and life cycle stages of the wind farm, several modelling assumptions were necessary to include them in the system boundaries. One major conclusion of the study is that the supply of raw materials is the hotspot in all the analysed impact categories, often covering altogether more than half of the total potential impacts. Focussing on the contributions of the single components, the wind turbine structure is the most significant one, except for the category

*Photochemical ozone creation potential* where the floating structure is the most important contributor and for *Abiotic depletion of elements* where power cables are the hotspot. Among the employed materials, steel is the most impacting, also due to the large amounts that are needed. Due to the relevance of wind power to decarbonisation, the estimated potential impact on *global warming*, also called carbon intensity, is highlighted and is equal to 31.3 t CO<sub>2eq</sub>/GWh. The performance of the wind farm, expressed by CPBT and EPBT, results in 2 years and 3 years respectively: in view of an expected 30-year lifetime, it can be concluded that the development of big offshore wind farms is convenient from the environmental point of view. From the comparison of the estimated environmental performance of the case study to other LCA studies retrieved in the literature, it can be observed that onshore and offshore bottom-fixed installations are generally less impacting, since for floating offshore deployments there are additional materials and infrastructure requirements. Among the different floating solutions, the best environmental performances are achieved by structures that allow to limit the total weight, while the overall impacts of the semi-submersible platform, modelled for the present study, are significantly affected by the heavier structure. Considering the estimated carbon intensity, the comparison with other energy sources highlights that the emission factor of wind power is much lower than the ones of fossil fuels and comparable with other low carbon and renewable technologies, despite the complex infrastructure put in place.

---

**Keyword:** *Life Cycle Assessment (LCA), Renewable Electricity Generation, Wind Energy, Offshore Wind Power, Floating Wind Turbine.*

---

## 1. Introduzione

È ormai chiaro che lo sviluppo delle fonti di energia rinnovabile sia fondamentale per ridurre le emissioni di gas serra che stanno causando il cambiamento climatico e per raggiungere i più ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione (IPCC, 2011). L'energia eolica mostra grandi potenzialità di sviluppo, con particolare riferimento alle installazioni in mare. L'eolico offshore permette, infatti, di accedere a risorse aggiuntive e con condizioni di ventosità migliori, ossia con velocità medie maggiori, minor turbolenza e minor variabilità. Inoltre, le installazioni in mare consentono di ridurre l'impatto paesaggistico ed evitare la competizione con altri usi del suolo, migliorando quindi l'accettabilità sociale di tali progetti.

Lo scopo di questo lavoro è stato valutare la prestazione ambientale di un impianto con turbine eoliche installate in mare su strutture galleggianti, applicando la metodologia dell'analisi del ciclo di vita o LCA, dall'inglese *Life Cycle Assessment*. Questo tipo di

analisi è significativa perché può dimostrare i benefici ambientali dati dalla generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili rispetto a quella da fonti fossili. Infatti, durante la produzione di energia eolica non ci sono emissioni dirette, a differenza dei processi in cui si sfrutta una combustione; nello stesso tempo, uno studio LCA permette di considerare tutte le fasi del ciclo di vita di una turbina eolica e delle infrastrutture di un impianto eolico, così da valutare anche le emissioni e gli impatti ambientali generati dal consumo di materiali ed energia, non limitandosi alla fase operativa.

Una fase potenzialmente critica del ciclo di vita di una turbina eolica che può essere analizzata tramite una LCA è il fine vita. Si ipotizza che gran parte dei componenti, essendo metallici, possano essere riciclati: alcune stime considerano che tra l'85% e il 90% di una turbina eolica sia riciclabile (WindEurope, 2020). Tuttavia, la gestione del materiale che costituisce le pale del rotore, ossia la plastica rinforzata con fibre di vetro (GFRP dall'inglese *glass-fibre reinforced plastic*)

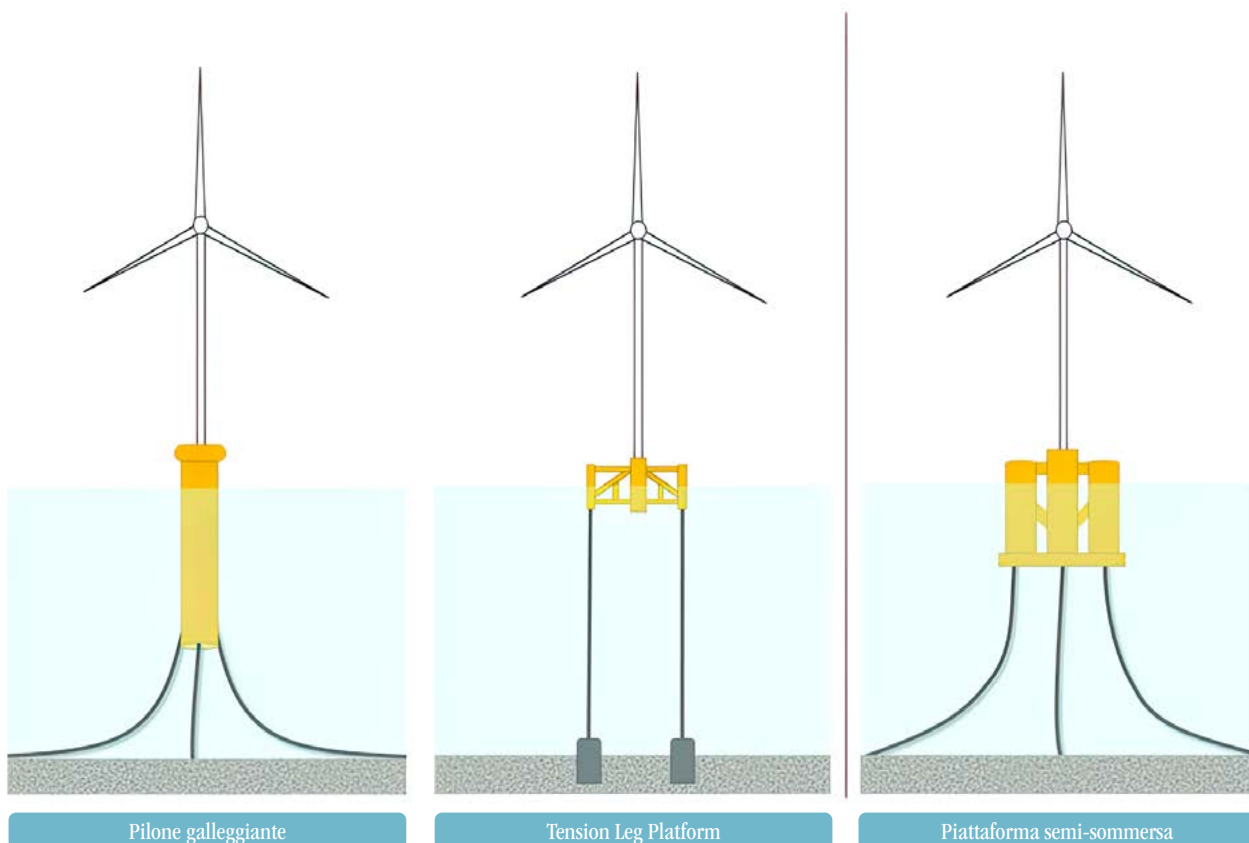


è ancora problematica: essendo un materiale composito e progettato per resistere ai carichi e alla fatica, risulta particolarmente difficile separare i suoi costituenti per riciclarlo (Beauson et al., 2022); pertanto viene generalmente incenerito o smaltito in discarica (Mishnaevsky, 2021). Ciononostante, continuano gli sforzi e gli investimenti nello sviluppo di tecnologie di recupero e riciclo, che ad oggi sono disponibili a diversi gradi di maturità ma non ancora applicabili a livello industriale o comunque non in modo economicamente vantaggioso (WindEurope, 2020). Infatti, sebbene per le pale di nuova progettazione si possano preferire soluzioni di eco-design, in modo da aumentarne la riciclabilità e concentrarsi sulla prevenzione del rifiuto, sarà comunque necessario provvedere alla gestione delle pale delle turbine esistenti che verranno dismesse nei prossimi anni: le stime di WindEurope prevedono che, a partire dal 2025, verranno generate annualmente 25.000 tonnellate di rifiuti costituiti dalle pale delle turbine a fine vita (WindEurope, 2021). Includendo nello studio LCA anche le ipotesi sul trattamento dei rifiuti generati al momento della dismissione del parco eolico è possibile valutare la rilevanza degli impatti associati, rispetto alle altre fasi del ciclo di vita, ed eventualmente confrontare diverse opzioni di gestione.

### 1.1. Impianti eolici offshore

Attualmente, gli impianti eolici offshore si trovano soprattutto in zone in cui la profondità del mare è limitata e dove possono essere utilizzate fondazioni che raggiungono il fondale, chiamate *bottom-fixed*. Esistono diverse tipologie di fondazioni fisse, ma tutte sono adatte ad applicazioni dove la batimetria è limitata, raggiungendo al massimo i 70 metri di profondità (Bhattacharya, 2019). Tuttavia, è stato stimato che l'80% delle risorse eoliche offshore si trova in acque con profondità superiori a 60 metri (Lee e Zhao, 2021). Pertanto, l'interesse a sviluppare soluzioni galleggianti è cresciuto e al momento esistono tre principali tipologie di struttura (Rhodri e Marc, 2015) (Figura 1):

- A) pilone galleggiante: struttura cilindrica riempita parzialmente con materiale di zavorra in modo che le parti inferiori siano più pesanti, mentre quelle superiori sono vuote e più leggere; in questo modo si mantiene in posizione verticale;
- B) *Tension Leg Platform* (TLP): struttura galleggiante semisommersa, generalmente reticolata, ancorata al fondale con cime di ormeggio verticali in tensione;
- C) piattaforma semi-sommersa: struttura più massiccia, generalmente costituita da tre o quattro co-



**Figura 1.** Rappresentazione schematica delle principali strutture galleggianti; adattato da (WindEurope, 2017).



Figura 2. Layout dell'impianto; adattata da (Med Wind, 2020a).

lonne vuote collegate tra loro, al cui interno vengono inseriti dei materiali come zavorra, ad esempio inerti ma anche acqua di mare prelevata sul posto.

Per rimanere in posizione, tutti i sistemi devono essere ormeggiati e ancorati al fondale, sfruttando le tecnologie già disponibili per le imbarcazioni. La scelta della specifica configurazione e tipo di ancora dipende da condizioni ambientali locali e del fondale (Rhodri Marc, 2015).

Nella letteratura scientifica sono disponibili diverse analisi del ciclo di vita di turbine e impianti eolici. Le soluzioni onshore sono state analizzate in numerosi studi (Jungbluth et al., 2005; Ardente et al., 2008; Martínez et al., 2009; Treméac et al., 2009; Guezuraga et al., 2012; Bonou et al., 2016; Wang et al., 2019) mentre la ricerca sulle applicazioni offshore è ancora limitata: sono disponibili alcuni studi LCA su turbine ed impianti *bottom-fixed* (Bonou et al., 2016; Wang et al., 2019; Raadal et al., 2014) e solo un numero esiguo su soluzioni galleggianti (Raadal et al., 2014; Weinzettel et al., 2009; Garcia-Teruel et al., 2022). Gli stessi produttori di turbine hanno applicato la metodologia LCA per analizzare i loro prodotti: i risultati sono pubblicamente disponibili sia per turbine onshore (Razdan e Garrett, 2017; Razdan e Garrett, 2019) che per turbine offshore (Siemens AG, 2014a; Siemens AG, 2014b; Siemens-Gamesa, 2017).

Allo stato attuale, nella letteratura scientifica, la disponibilità di studi LCA che analizzano turbine eoliche offshore con potenza nominale superiore ai 5 MW è ancora limitata (Raadal et al., 2014; Weinzettel et al., 2009; Garcia-Teruel et al., 2022; Siemens AG, 2014b; Siemens-Gamesa, 2017). Mancano, quindi, analisi del

ciclo di vita che si concentrino su turbine eoliche di grandi dimensioni e con potenza in linea con le applicazioni commerciali e le tendenze di mercato. Attualmente, infatti, diversi dei principali produttori di turbine hanno già annunciato la commercializzazione dal 2024 di turbine con potenza fino a 15 MW (Lee e Zhao, 2021).

### 1.2. Caso studio

Il sistema oggetto di analisi è schematizzato in Figura 2 e fa riferimento al progetto preliminare di un grande impianto eolico di tipo galleggiante progettato per essere realizzato nel Mar Mediterraneo, nello specifico, circa 60 chilometri al largo della costa occidentale della Sicilia. L'impianto è soggetto alla procedura di valutazione di impatto ambientale (VIA) e attualmente è ancora in corso la fase di verifica preliminare, anche detta di *scoping*: in questa fase sono definiti i contenuti e il grado di dettaglio con cui si elaborerà lo studio d'impatto ambientale (SIA) definitivo.

Secondo la documentazione disponibile (Med Wind, 2020a), è prevista l'installazione di 190 aerogeneratori di grande taglia, con potenza nominale di 14,7 MW, in linea con gli ultimi sviluppi della tecnologia per l'eolico offshore. Le dimensioni delle turbine di tale potenza corrispondono a massimo 250 metri di diametro del rotore e circa 150 metri di altezza della torre, per un'altezza massima di quasi 300 m, in punta alla pala quando si trova allineata con la torre.

Nel sito scelto per l'impianto la profondità dei fondali varia tra 100 e 900 metri in modo irregolare, per

questo motivo è stato necessario prevedere l'installazione delle turbine su fondazioni di tipo galleggiante, invece che fisse sul fondale. In generale, per la scelta del posizionamento del parco eolico si deve tenere conto di diversi fattori che caratterizzano il sito: non solo profondità e caratteristiche dei fondali ma anche distanza dalla terraferma, condizioni di moto ondoso, correnti e soprattutto ventosità. Al fine di ridurre l'impatto paesaggistico e l'impatto acustico, può essere conveniente considerare siti a maggiore distanza dalla costa; d'altra parte, questa scelta aumenta la necessità di infrastrutture per la trasmissione di elettricità su lunga distanza. Per l'impianto in analisi sono previste tre sottostazioni offshore di trasformazione e conversione (abbreviate come OTM dall'inglese *Offshore Transformer Module*), una per ogni sottocampo del parco eolico: le OTM rappresenteranno i collettori elettrici di ciascun sottocampo e l'interfaccia tra l'impianto di produzione e la rete di trasmissione di energia elettrica verso la terra ferma. Inoltre, per la trasmissione, vengono impiegati lunghi tratti di cavi sottomarini di diverso tipo, sia per l'interconnessione tra le turbine e le OTM che tra le OTM e il punto di approdo a terra, da cui poi un breve tratto di cavi terrestri fornisce il collegamento ad una cabina di conversione, già parte della rete elettrica nazionale. Si sottolinea che il collegamento elettrico per la trasmissione dell'energia prodotta è particolarmente rilevante in termini di lunghezza perché l'approdo è stato previsto in Campania: infatti, viste le potenze in gioco, la capienza della rete elettrica siciliana è troppo ridotta. La Tabella 1 riassume le principali caratteristiche del sistema elettrico dell'impianto (Med Wind, 2020b).

La produttività di un impianto eolico è legata ad una serie di fattori: la disponibilità e le caratteristiche delle risorse eoliche, l'orografia e la rugosità del terreno, la curva di potenza della turbina fornita dal produttore

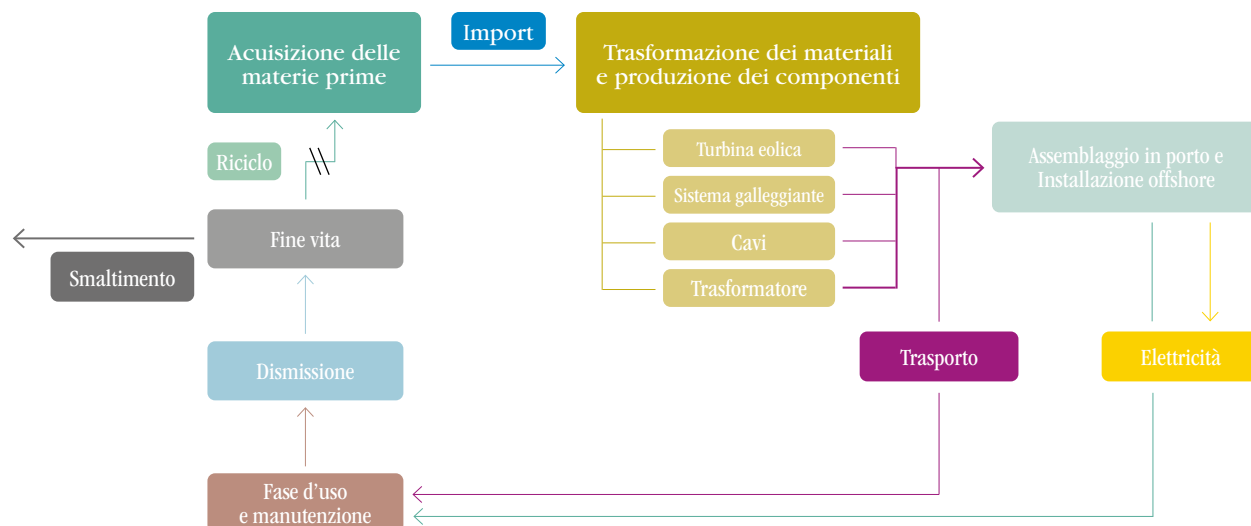
e le perdite di scia, ossia le perdite energetiche dovute all'interferenza tra gli aerogeneratori di uno stesso parco eolico che, estraendo energia dal vento, ne riducono la velocità. Dalla relazione tecnica di analisi della producibilità del sito (Med Wind, 2020c), è stata dedotta la stima della produzione energetica lorda (9.345,6 GWh/anno), ossia la produzione di energia dal parco eolico calcolata tenendo conto dell'orografia e della rugosità del sito, della curva di potenza della turbina scelta e della distribuzione della velocità del vento a flusso libero, stimata all'altezza del mozzo in ogni posizione della turbina, e infine decurtata anche delle perdite di scia (-6,4%). Come indicato nella stessa relazione (Med Wind, 2020c), per la stima della produzione energetica netta annua (8.804,5 GWh/anno), invece, sono state considerate le perdite dettate dalle seguenti efficienze: disponibilità degli aerogeneratori (97%), efficienza elettrica (97%), performance della turbina (99%), condizioni atmosferiche e degradazione delle pale (99%), manutenzione delle sottostazioni (99%), disponibilità della rete (99,9%) e altri fattori (99%). In Tabella 2 sono riassunti i risultati delle stime di producibilità e si riporta il fattore di capacità (*capacity factor* in inglese) dell'impianto che risulta essere pari a 34,4%. Infatti, a causa dell'aleatorietà della risorsa eolica, la producibilità di un impianto eolico spesso è espressa in termini di fattore di capacità, ossia il rapporto tra l'effettiva energia generata in un certo periodo di tempo (tipicamente un anno) e l'output teorico che sarebbe prodotto nello stesso tempo se l'unità funzionasse, senza interruzioni, alla capacità nominale. Per gli impianti eolici, mediamente, il fattore di capacità oscilla fra il 20 e il 40% (Med Wind, 2020c) con valori superiori, fino al 50%, nel caso di impianti offshore (Raadal et al., 2011; Arvesen e Hertwich, 2012). Considerati gli sviluppi più recenti, alcuni produttori di turbine hanno ipotizzato di raggiungere fattori di capacità ancora più alti, intorno al 60% (Vestas, 2022; General Electric, 2022).

**Tabella 1.** Caratteristiche del collegamento elettrico.

| Caratteristiche  | Valore | Unità di misura |
|--|--------|-----------------|
| Numero di sottostazioni offshore                                   | 3      | -               |
| Tensione dei cavi sottomarini di interconnessione (tra le turbine) | 66     | kV              |
| Lunghezza dei cavi sottomarini di interconnessione                 | 1.112  | km              |
| Tensione dei cavi sottomarini di export                            | 500    | kV              |
| Lunghezza di cavi sottomarini di export                            | 690    | km              |
| Tensione dei cavi terrestri  | 500    | kV              |
| Lunghezza dei cavi terrestri                                       | 75     | km              |

**Tabella 2.** Stime della producibilità dell'impianto.

| Caratteristiche                           | Valore  | Unità di misura |
|---|---------|-----------------|
| Numero turbine                            | 190     | -               |
| Potenza nominale turbina                  | 14,7    | MW              |
| Produzione energetica lorda               | 9.345,6 | GWh/anno        |
| Produzione energetica netta annua stimata | 8.804,5 | GWh/anno        |
| Ore equivalenti nette                     | 3.009   | h/anno          |
| Fattore di capacità                       | 34,4 %  |                 |
| Vita utile dell'impianto                  | 30      | anni            |



**Figura 3.** Rappresentazione schematica dei confini del sistema.

## 2. Materiali e metodi

Le prestazioni ambientali del parco eolico sono state valutate con la metodologia LCA, finalizzata a quantificare i potenziali impatti ambientali dell'oggetto di studio lungo tutto il suo ciclo di vita. L'oggetto di un'analisi LCA, chiamato anche "sistema di prodotto", può essere qualunque attività umana o prodotto che svolge una determinata funzione. La metodologia è stata applicata in accordo con le norme ISO 14040 (ISO, 2021) e ISO 14044 (ISO, 2021); nei successivi paragrafi (2.1, 2.2, 3) sono sintetizzati i contenuti più rilevanti delle quattro fasi principali che compongono una LCA: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, valutazione dell'impatto e interpretazione dei risultati.

### 2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Nella prima fase si definiscono l'obiettivo dello studio e il campo di applicazione, quindi, in particolare, il sistema da studiare, le sue funzioni, i confini del sistema (cioè quali processi sono inclusi nell'analisi), le ipotesi e le limitazioni.

L'analisi è stata svolta considerando come unità funzionale del sistema "la fornitura alla rete elettrica a terra di 1 GWh di energia elettrica prodotta". Questo tipo di definizione comporta che vengano incluse nell'analisi non solo le turbine galleggianti, ma anche il sistema elettrico necessario per la trasmissione dell'energia generata.

La prospettiva adottata per la definizione dei confini del sistema è "dalla culla alla tomba" e, quindi, le fasi incluse nel ciclo di vita sono (Figura 3): approvvigionamento delle materie prime, lavorazione dei materiali e produzione dei componenti, trasporto dei com-

ponenti prodotti, assemblaggio in porto e installazione con imbarcazioni specializzate, manutenzione durante la fase operativa, dismissione e fine vita.

#### 2.1.1. Modellizzazione del fine vita

Per includere la fase del fine vita nel sistema studiato in uno studio di LCA è necessario scegliere quale dei diversi approcci metodologici disponibili adottare. Soprattutto nel caso si tratti di prodotti riutilizzabili oppure di materiali riciclati o riciclabili, a seconda dell'approccio scelto, i risultati possono variare sensibilmente.

Nello specifico, in questo studio, è stato necessario definire come attribuire gli impatti ambientali generati dalla gestione dei rifiuti. Si è scelto di adottare l'*approccio 100-0* (Tagliabue, 2015), così come suggerito nelle *General Program Instructions* (GPI), ossia il riferimento normativo dello schema International EPD System (International EPD®, 2021). Questo approccio applica il principio "chi inquina paga" che prevede che chi genera il rifiuto debba farsi carico degli impatti derivanti dalla sua successiva gestione mentre nel caso di materiali riciclati gli impatti della "prima vita" del materiale non influiscono sugli usi successivi.

Nella pratica, a seconda del destino dei rifiuti prodotti dal sistema, diverse fasi della catena di gestione andranno incluse nei confini del sistema analizzato:

- la raccolta e il trasporto vanno sempre inclusi e di conseguenza gli impatti che ne derivano sono attribuiti al sistema di prodotto che genera il rifiuto;
- in caso di riciclo, solo i pretrattamenti sono inclusi, mentre il processo propriamente di riciclo è escluso;
- nel caso di incenerimento o recupero energetico, gli impatti dei possibili pretrattamenti e della com-

bustione sono attribuiti al sistema che ha generato i rifiuti, mentre il beneficio del possibile recupero energetico non viene considerato;

- in caso di smaltimento in discarica, tutti gli impatti devono essere attribuiti al sistema che ha generato i rifiuti.

### 2.1.2. Categorie d'impatto e metodo di caratterizzazione

L'analisi è stata condotta utilizzando il software SimaPro 9.3, sviluppato da Pré Consultant, che permette di creare un modello virtuale dell'oggetto di studio e applicare diversi metodi di caratterizzazione. Il metodo scelto per la valutazione degli impatti è l'EPD (2018) che prevede otto categorie d'impatto: cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione, formazione di ossidanti fotochimici, esaurimento delle risorse abiotiche – elementi, esaurimento delle risorse abiotiche – combustibili fossili, scarsità idrica e riduzione dello strato di ozono (PRé Sustainability, 2020). Questo metodo è pensato per la redazione della Dichiarazione Ambientale di Prodotto, dall'inglese *Environmental Product Declaration* (EPD), ed è stato scelto in modo da poter includere nella stima degli impatti potenziali i risultati delle EPD disponibili per le catene di ormeggio e per i trasformatori ad alta tensione, di cui non erano disponibili altri dati per l'inventario. Inoltre, il metodo *Cumulative Energy Demand* (CED) è stato utilizzato per stimare gli usi diretti e indiretti di energia primaria, sia utilizzata durante l'intero ciclo di vita sia incorporata nell'impianto stesso (Frischknecht et al., 2007).

### 2.1.3. Indici di payback

A partire dai risultati, sono stati poi valutati i cosiddetti indici di payback che, in generale, indicano il tempo necessario a recuperare un investimento e che, nel caso specifico della produzione di energia da fonti rinnovabili, possono essere declinati in termini di emissioni di gas serra ed energia. Il *carbon payback time* (CPBT) indica in quanti anni si recuperano le emissioni di gas serra stimate sull'intero ciclo di vita, assumendo le emissioni "risparmiate" evitando di impiegare una fonte di energia fossile. Nel caso di questa analisi, la fonte energetica fossile assunta per stimare le emissioni risparmiate è il gas naturale, in particolare in impianto con ciclo combinato (dataset di ecoinvent 3.7.1. "*Electricity, high voltage {IT} | electricity production, natural gas, combined cycle power plant | Cut-off, U*"); tale scelta è stata dettata dal fatto che probabilmente rimarrà il combustibile fossile più diffuso nel futuro prossimo.

L'*energy payback time* (EPBT) si riferisce, invece, all'energia primaria investita per la costruzione

dell'impianto recuperata attraverso la generazione di energia dall'impianto stesso sull'intero ciclo di vita e al netto dell'energia spesa durante la fase operativa, compresa la manutenzione.

Secondo questi indici, un impianto risulta tanto più conveniente quanto prima "ripaga" gli investimenti in termini di emissioni ed energia.

### 2.1.4. Analisi di sensibilità e confronti

Oltre all'analisi dello scenario base, sono state svolte alcune analisi di sensibilità per valutare l'influenza sui risultati di alcune ipotesi e assunzioni (Brussa, 2022). Qui si è deciso di riportare solo quella riguardante il fine vita della plastica rinforzata con fibra di vetro, ossia del materiale che costituisce le pale del rotore. Questa scelta deriva dall'interesse nel confrontare l'opzione di gestione attualmente più diffusa e potenzialmente critica, cioè l'incenerimento, con le prospettive future di riciclo. Inoltre, sono stati fatti alcuni confronti: in primis, i risultati dell'impianto modellizzato sono stati confrontati con quelli corrispondenti al prelievo di uno stesso quantitativo di energia elettrica dalla rete italiana, con il mix energetico del 2018 (disponibile nel materiale supplementare SM.1). In aggiunta, si è effettuato un confronto anche con i risultati di altri studi LCA di turbine e impianti eolici disponibili in letteratura, nonché con altre fonti energetiche.

## 2.2. Raccolta dati e analisi d'inventario

La seconda fase prevede la raccolta dati per compilare l'inventario: in questo caso, non avendo a disposizione dati primari, è stata considerata la letteratura scientifica e dati di background disponibili nelle banche dati. Il database ecoinvent versione 3.7.1 (con l'approccio *allocation, cut-off by classification*) è stato utilizzato in supporto all'analisi (Ecoinvent centre, 2018).

### 2.2.1. Acquisizione delle materie prime

La prima fase del ciclo di vita dell'impianto eolico è rappresentata dall'approvvigionamento dei materiali necessari: questa fase comprende le operazioni per estrarre le materie prime, la loro trasformazione e la successiva importazione in Italia. Per includere anche il trasporto dei diversi materiali dai principali Paesi produttori al sito di produzione dei vari componenti sono stati utilizzati i dataset "*market*" disponibili in ecoinvent, che già contengono le distanze medie per l'importazione di un certo materiale in un certo Paese.

Considerate le indicazioni del progetto preliminare, per il dimensionamento della turbina e della fondazione galleggiante sono stati assunti come riferimento i rapporti tecnici del *National Renewable Energy*

Laboratory, del Dipartimento dell'energia degli Stati Uniti per la *International Energy Agency* (IEA) *Wind Technology Collaboration Programme* (TCP) (IEA Wind TCP Task 37, 2022). Infatti, nel corso del 2020 sono stati resi pubblici i report con le specifiche di progettazione di una turbina eolica da 15 MW (detta *IEA 15-240-RWT*) (Gaertner et al., 2020) e della piattaforma semi-sommersa (*VolturnUS-S Semi-submersible Platform*) su cui potrebbe essere installata (Allen et al., 2020); tali tecnologie sono state ritenute verosimilmente rappresentative delle scelte progettuali.

Nei rapporti sopraccitati sono indicate le masse dei principali componenti della turbina e della piattaforma galleggiante. La massa totale della turbina risulta pari a 2.254 tonnellate, ripartite tra torre, rotore e navicella, mentre la massa totale della piattaforma semi-sommersa si attesta a 4.014 tonnellate di acciaio a cui dovranno essere aggiunte 13.840 tonnellate di zavorra, in parte costituita da materiali inerti (2.540 t) e il resto da acqua di mare, prelevabile sul posto. I dati di inventario dettagliati sono disponibili nel materiale supplementare SM.2 ed SM.4.

Quando non direttamente indicato nei report di Gaertner et al. (2020) ed Allen et al. (2020), l'assortimento dei materiali necessari per i diversi componenti è stato ricavato da altri studi LCA su turbine eoliche e adattato alla turbina in analisi. Nello specifico per la torre si è fatto riferimento a Raadal et al. (2014) e per il rotore a Wang et al. (2019). Risulta che la torre sia costituita al 93% da acciaio basso legato e il rotore principalmente da plastica rinforzata con fibre di vetro (57%), acciaio cromato (21%) e ghisa (22%). Le frazioni in massa delle restanti materie prime necessarie sono riportate nel materiale supplementare (Tabella SM.3).

Sebbene la piattaforma semi-sommersa fosse già dimensionata per sostenere la turbina da 15 MW, sarebbe stato necessario stimare la lunghezza degli ormeggi in funzione della batimetria del sito di installazione delle turbine: per evitare di introdurre incertezze aggiuntive, non conoscendo i dettagli necessari per tale dimensionamento, è stata fatta l'ipotesi che la profondità del fondale nel sito fosse costante e pari a 200 metri, così da utilizzare la lunghezza delle catenarie indicata da Allen et al. (2020). Nota la lunghezza necessaria per gli ormeggi, gli impatti corrispondenti sono stati stimati a partire dai risultati dell'EPD delle catene (Vicinay Sestao S.L. EPD, 2019).

Le tre sottostazioni offshore di trasformazione e conversione sono state modellizzate in modo semplificato: sono state incluse solo la struttura galleggiante su cui saranno installate, compreso l'ormeggio, e un trasformatore ad alta tensione da 1000 MVA, estrapolando i dati da un'EPD (Tamini Trasformatori S.r.l. EPD, 2019).

Infine, le diverse tipologie di cavo e le rispettive necessità di materie prime sono state ricavate a partire dagli inventari disponibili in altri studi (Schleisner, 2000; Jorge et al., 2012) seguiti dalle necessarie estrapolazioni per adattarle. La logica alla base della modellizzazione dei cavi elettrici è stata quella di mantenere l'assortimento di materiali richiesto per la tipica struttura multistrato, soprattutto nel caso di quelli sottomarini (Ardelean e Minebbo, 2015). I dettagli dell'inventario per le diverse tipologie di cavo sono disponibili nel materiale supplementare SM.2.

### 2.2.2. Trasformazione dei materiali e trasporto dei componenti

La produzione dei componenti è stata modellizzata solo come lavorazione dei materiali, utilizzando i dataset di lavorazione delle materie prime presenti in ecoinvent 3.7.1, analogamente a quanto fatto da Wang et al. (2019) e Weinzettel et al. (2009).

La fase di trasporto dei componenti è stata inclusa ipotizzando le distanze da percorrere via terra e via mare per raggiungere la Sicilia. Nello specifico, sono state assunte le distanze per i componenti delle turbine come proposti da Razdan e Garret (2019) per un generico sito produttivo in Europa a cui sono stati sommati dei tratti aggiuntivi per considerare il trasporto fino alla costa occidentale della Sicilia. Lo strumento *SeaRate*, raccomandato da Zampori e Pant (2019) per la *Product Environmental Footprint* (PEF), è stato utilizzato per fare le stime sulle distanze e i mezzi di trasporto. Le ipotesi sulle distanze aggiuntive possono essere consultate nel materiale supplementare SM.2.

### 2.2.3. Assemblaggio e installazione

Le operazioni di assemblaggio delle strutture possono, generalmente, essere eseguite in porto; nella modellizzazione sono state incluse in termini di consumi energetici sia di diesel che di elettricità a media tensione per i mezzi di sollevamento. In particolare, l'utilizzo di elettricità è stato stimato a partire dal dato 0,5 kWh/kg di materiale da sollevare, analogamente a quanto indicato nel dataset di ecoinvent "*wind power plant construction, 2MW, offshore, moving parts {GLO}*".

Il principale vantaggio della piattaforma semi-sommersa, rispetto ad altre strutture galleggianti, è che può essere rimorchiata al sito di installazione in mare, già con la turbina montata. Pertanto, la fase di installazione è stata modellizzata in termini di consumi di carburante per le navi specializzate, ad esempio, i rimorchiatori. Da diverse fonti di letteratura (Rhodri e Marc, 2015; Garcia-Teruel et al., 2022; Sanden e Vold, 2010; Arvesen et al., 2013) sono stati dedotti il numero di imbarcazioni necessarie per l'installazione, il consumo giornaliero a seconda della tipologia di nave e i

giorni di lavoro necessari, differenziando le ipotesi per le turbine e le sottostazioni.

#### 2.2.4. Fase operativa e manutenzione

La durata della fase operativa è stimata, nel progetto preliminare, pari a 30 anni, durante i quali l'impianto fornirà l'energia elettrica e verrà sottoposto ad una serie di interventi di manutenzione, programmati o eccezionali, ossia in caso di malfunzionamenti. La fase d'uso è stata, quindi, modellizzata in termini di parti di ricambio necessarie per la manutenzione, includendo il loro approvvigionamento, mentre il trasporto del personale addetto alla manutenzione non è stato incluso. Inoltre, sono stati inclusi l'occupazione del fondale marino e la trasformazione dell'uso del suolo, considerando l'area interessata dall'intervento pari a 2.422,5 km<sup>2</sup> (Med Wind, 2020).

#### 2.2.5. Dismissione

Al termine della vita utile stimata, ci sono due possibilità per l'impianto: il *repowering* (ripotenziamento) oppure la dismissione (WindEurope, 2020). Nel presente studio viene assunta la dismissione dell'impianto che prevede il trasporto dell'aerogeneratore galleggiante nuovamente in porto e il suo smontaggio. La modellizzazione è quindi la stessa della fase di assemblaggio e installazione.

#### 2.2.6. Fine vita

Per svolgere uno studio di LCA completo è necessario includere nell'analisi il fine vita, ossia la gestione dei rifiuti prodotti al termine della vita utile dell'impianto; tuttavia, questo non è facile perché ci sono diverse incertezze, legate soprattutto al fronte temporale (Bonou et al., 2016), ossia al contesto normativo, alle future tecnologie di trattamento e ai mercati corrispondenti che si avranno al termine della vita utile delle

turbine. Per includere il fine vita degli aerogeneratori nei confini del sistema, generalmente, è necessario definire uno scenario in cui, per i diversi materiali o componenti, si ipotizza il tipo di gestione. Infatti, per acciaio e alluminio ma anche cavi di rame e componenti elettronici esistono processi di riciclo ormai consolidati. La questione rimane aperta, invece, per il materiale che costituisce le pale del rotore, ossia la plastica rinforzata con fibre di vetro (GFRP dall'inglese *glass-fibre reinforced plastic*). Ciononostante, tra trent'anni, quando è prevista la dismissione delle turbine, è plausibile che le opzioni per il riciclo dei materiali compositi, come la plastica rinforzata con fibre di vetro, avranno raggiunto un livello di maturità tecnologica tale per cui potranno essere applicate a scala industriale. Con queste premesse, nel presente studio è stato deciso di analizzare e confrontare due scenari: nello scenario base si ipotizza l'incenerimento della GFRP, considerando il materiale composto da 40% plastica e 60% vetro (Fonte et al., 2021), mentre nello scenario futuro se ne assume il riciclo. Gli scenari assunti per il fine vita dei singoli materiali e componenti sono disponibili nel materiale supplementare (SM.3).

### 3. Risultati e discussione della valutazione degli impatti

I potenziali impatti totali per unità funzionale (GWh) stimati con il metodo EPD, per le otto categorie d'impatto previste, e i risultati del metodo CED sono riportati nella Tabella 3.

#### 3.1. Analisi dei contributi

In Figura 3 è rappresentata graficamente l'analisi dei contributi rispetto al potenziale impatto totale per ogni categoria analizzata. Si noti che al fine di rendere tale rappresentazione più dettagliata sono state riprese le sei fasi del ciclo di vita descritte nella sezione 2.2, scorporate

**Tabella 3.** Potenziali impatti totali per le 9 categorie di impatto esaminate, riferite all'unità funzionale (1 GWh) nello scenario base.

|   | Categoria di impatto                                       | Unità  | Impatto totale |
|---|--|--|----------------|
| 1 | Riscaldamento globale                                      | kg CO <sub>2eq</sub>                           | 31.323         |
| 2 | Acidificazione   | kg SO <sub>2eq</sub>                           | 183,8          |
| 3 | Eutrofizzazione  | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> <sub>eq</sub> | 67,8           |
| 4 | Formazione di ossidanti fotochimici                        | kg NMVOC <sub>eq</sub>                         | 130,8          |
| 5 | Esaurimento delle risorse abiotiche – elementi             | kg Sb <sub>eq</sub>                            | 1,7            |
| 6 | Esaurimento delle risorse abiotiche – combustibili fossili | MJ, net calorific value                        | 362.589        |
| 7 | Scarsità idrica  | m <sup>3</sup> <sub>eq</sub>                   | 15.714         |
| 8 | Riduzione dello strato di ozono                            | kg CFC-11 <sub>eq</sub>                        | 2,59E-03       |
| 9 | Cumulative Energy Demand                                   | GJ   | 409,6          |



**Figura 4.** Analisi dei contributi per le 8 categorie di impatto stimate con il metodo EPD e per la CED (per la legenda delle categorie d'impatto si veda la Tabella 3).

randone alcune in modo da mettere in evidenza anche i contributi dei diversi componenti. Nello specifico, il contributo totale della fase di approvvigionamento delle materie prime è stato suddiviso, nel grafico, tra i seguenti elementi dell'impianto: torre, navicella, rotore, fondazione galleggiante, cavi elettrici e sottostazione offshore. Il contributo delle catene di ormeggio comprende il loro intero ciclo di vita così come dichiarato nell'EPD. Le fasi successive, invece, si riferiscono al complesso degli elementi dell'impianto.

Per quanto riguarda i risultati nelle categorie di impatto del metodo EPD, se considerata nel suo insieme, la fase di approvvigionamento dei materiali risulta nettamente la più impattante dell'intero ciclo di vita per tutte le categorie d'impatto: l'acquisizione delle materie prime è infatti responsabile di oltre il 50% dei potenziali impatti totali, tranne che per la categoria *Riduzione dello strato di ozono*. Considerando, invece, i contributi dei singoli elementi dell'impianto a questa prima fase del ciclo di vita, risulta che la struttura della turbina eolica (come insieme di rotore, torre, navicella) apporta il contributo maggiore in 5 categorie su 8: nello specifico varia tra 32% per la categoria *Eutrofizzazione* e 18% per la *Riduzione dello strato di ozono*. L'approvvigionamento dei materiali per la struttura della fondazione galleggiante risulta, invece, l'hotspot per la *Formazione di ossidanti fo-*

*tochimici*, essendo responsabile del 25% degli impatti totali. L'impatto potenziale per la categoria *Esaurimento delle risorse abiotiche – elementi* è, invece, determinato per più della metà (52%) dall'acquisizione delle materie prime per i cavi elettrici. Per la categoria *Riscaldamento globale*, infine, i contributi di turbina eolica e struttura galleggiante sono ugualmente significativi.

Da un'analisi più dettagliata dei tre macro-componenti della turbina eolica risulta che:

- per la torre, l'acciaio dà il contributo più significativo agli impatti dell'approvvigionamento delle materie prime in 6 categorie su 8;
- tra i materiali del rotore, la plastica rinforzata con fibra di vetro è quello più impattante in quasi tutte le categorie tranne che l'*Esaurimento delle risorse abiotiche – elementi* dove l'acciaio cromato è più rilevante;
- tra i materiali e componenti della navicella, i magneti permanenti sono l'elemento con il contributo maggiore agli impatti totali in 6 categorie su 8, mentre nelle altre categorie il trasformatore a basso voltaggio è responsabile di un contributo superiore.

Per quanto riguarda la fondazione galleggiante, è nuovamente l'acciaio a determinare una porzione significativa degli impatti totali dell'approvvigionamento. Infine, per quanto riguarda i cavi elettrici il ca-



vo sottomarino di export si è dimostrato il più rilevante: questo contributo si spiega sia per la lunghezza che per il suo peso specifico per metro di lunghezza (materiale supplementare SM.2).

Le fasi del ciclo di vita successive all'acquisizione delle materie prime contribuiscono in modo più limitato ai potenziali impatti totali. I trasporti e il fine vita hanno impatti che sono poco rilevanti rispetto al totale: il loro contributo si mantiene sotto al 3% per tutte le categorie analizzate. I contributi delle fasi di assemblaggio, manutenzione e dismissione, invece, variano tra il 3% e il 16% a seconda della categoria di impatto.

Per quanto riguarda i risultati relativi alla *Cumulative Energy Demand*, i contributi complessivi per l'approvvigionamento della turbina eolica (25,4%) e della fondazione galleggiante (25,6%) ricoprono la metà del potenziale impatto totale: ciò significa che sono gli elementi che determinano in maniera più significativa i consumi di energia, non solo per l'uso diretto ma anche incorporati nei materiali che li costituiscono. I risultati relativi alla CED suddivisi per fasi del ciclo di vita sono disponibili nel materiale supplementare (Tabella SM.10).

### 3.2. Indici di payback

Considerando che l'energia eolica, così come le altre fonti rinnovabili, è fondamentale per ridurre le emissioni del settore elettrico e contrastare gli effetti dell'utilizzo dei combustibili fossili sul cambiamento climatico, è importante il risultato sulla categoria del *riscaldamento globale*: le emissioni potenziali di gas climalteranti, espresse in CO<sub>2</sub> equivalente, risultano pari a 31,3 t CO<sub>2eq</sub>/GWh.

Considerato il fattore d'impatto sul cambiamento climatico dell'elettricità prodotta dal gas naturale in impianto a ciclo combinato (456.117 kg CO<sub>2eq</sub>/GWh e quindi 3,8·10<sup>6</sup> t CO<sub>2eq</sub>/anno), il CPBT risulta pari a 2 anni. Invece, l'EPBT risulta essere leggermente superiore a 3 anni: in molti studi LCA disponibili in let-

teratura per le turbine eoliche con fondazioni fisse è risultato inferiore ad un anno (Siemens AG, 2014a; Siemens AG, 2014b; Siemens-Gamesa, 2017), mentre nel caso di installazioni galleggianti (Raadal et al., 2014; Weinzettel et al., 2009; Garcia-Teruel et al., 2022) i risultati variano tra 0,4 anni e 4,3 anni, a seconda del tipo di struttura analizzata.

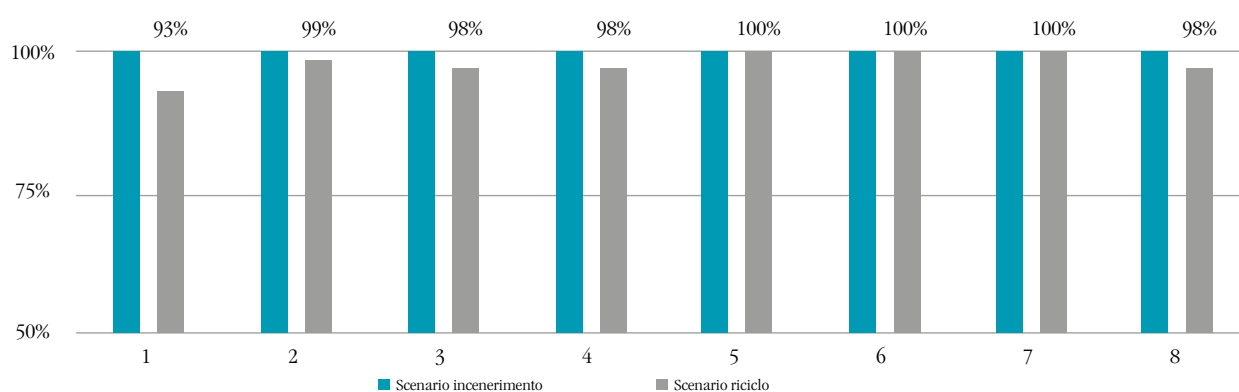
Gli indici di payback devono essere interpretati rispetto ai 30 anni di vita utile dell'impianto e pertanto si può concludere che gli investimenti in termini di emissioni ed energia per la realizzazione dell'impianto verrebbero ampiamente ripagati.

### 3.3. Analisi di sensibilità e confronto con il mix elettrico nazionale

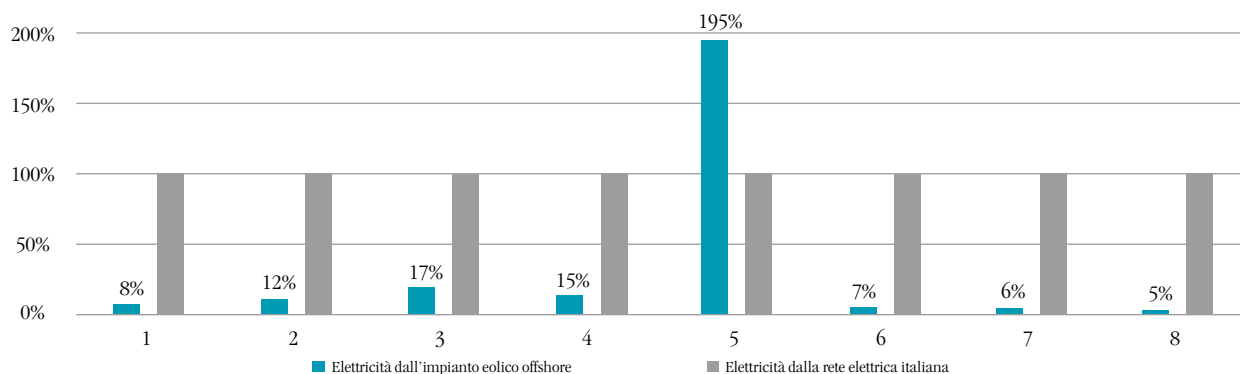
L'analisi di sensibilità per valutare lo scenario alternativo di fine vita della plastica rinforzata in fibra di vetro è stata svolta considerando separatamente la fase di fine vita del rotore; pertanto, i risultati, in termini di variazioni percentuali, sono riferiti alla solo fine vita piuttosto che all'intero ciclo di vita. Ciononostante, non sono stati evidenziati miglioramenti significativi, posto che si considerano rilevanti solo variazioni almeno del ±10% rispetto allo scenario base. I risultati del confronto vengono riportati graficamente in Figura 5.

È evidente che l'approccio modellistico scelto per il fine vita influenza tali risultati. L'esclusione dalla valutazione dello specifico trattamento di riciclo potrebbe essere vista come una limitazione allo studio; tuttavia, questa scelta modellistica permette di evitare le problematiche legate alla modellizzazione dei processi specifici per il riciclo della plastica con fibra di vetro, che al momento non sono ancora applicati a scala industriale e di cui, quindi, non sarebbero stati disponibili dati specifici.

Di seguito, si riportano, inoltre, i risultati del confronto tra 1 GWh di energia elettrica fornito dall'impianto eolico offshore, così come descritto e analizzato



**Figura 5.** Risultati dell'analisi di sensitività sul solo fine vita della plastica rinforzata con fibre di vetro; potenziali impatti totali per le 8 categorie di impatto esaminate con il metodo EPD (per la legenda delle categorie d'impatto si veda la Tabella 3).



**Figura 6.** Risultati del confronto tra 1 GWh prodotto dall'impianto eolico modellizzato e 1 GWh prelevato dalla rete elettrica italiana; potenziali impatti totali per le 8 categorie di impatto esaminate con il metodo EPD, riferite all'unità funzionale (per la legenda delle categorie d'impatto si veda la Tabella 3).

nello studio, e 1 GWh prelevato dalla rete elettrica nazionale: la Figura 6 lo rappresenta graficamente.

È evidente che l'elettricità dall'impianto eolico ha prestazioni ambientali molto migliori, tranne che per la categoria *Esaurimento delle risorse abiotiche – elementi*, in cui, invece, ha impatti quasi doppi. Nuovamente si conferma che l'approvvigionamento di materiali critici, come ad esempio il rame, è un elemento di attenzione che dovrà essere tenuto in debita considerazione nel momento della progettazione di impianti di questo genere.

### 3.4. Confronto con la letteratura

Il confronto con altri studi LCA disponibili in letteratura non risulta sempre immediato. Sebbene la scelta dell'unità funzionale sia spesso analoga, ossia un'unità di energia elettrica generata, gli impatti potenziali stimati dipendono fortemente dalla produttività

dell'impianto: di fatto, aumentando la produttività, si riducono gli impatti per unità di elettricità generata, perché con la stessa infrastruttura si produce più energia elettrica. La produttività dell'impianto, nella realtà, è legata alle condizioni specifiche del sito in cui viene costruito l'impianto e ad altre scelte progettuali. Tuttavia, questo tipo di informazioni non sono sempre disponibili a chi conduce uno studio LCA di una turbina o di un impianto eolico, quindi, possono risultare necessarie una serie di assunzioni, soprattutto, sul fattore di capacità e sulla vita utile delle turbine. Nella loro rassegna bibliografica, Arvesen e Hertwich (2012) hanno sottolineato una certa variabilità nei diversi studi LCA con riferimento a questi due parametri. Generalmente, la vita utile delle turbine si attestava a 20 anni, per gli impianti sia onshore che offshore, sebbene nelle analisi economiche, si considera che le turbine installate in mare possano restare operative fi-

**Tabella 4.** Confronto con altre analisi del ciclo di vita inerenti a turbine e impianti eolici disponibili in letteratura.

| Autore, anno               | Specifiche                          | Potenza nominale [MW] | Fattore di capacità [%] | Vita utile [anni] | Impatto sul riscaldamento globale [gCO <sub>2</sub> eq/kWh] | Energy Payack Time [anni] |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|---|---------------------------|
| Siemens AG, 2014a          | <i>Bottom-fixed</i>                 | 4                     | 51%                     | 20                | 10  | 0,88                      |
| Siemens AG, 2014b          | <i>Bottom-fixed</i>                 | 6                     | 50%                     | 25                | 7   | 0,79                      |
| Siemens-Gamesa EPD, 2017   | <i>Bottom-fixed</i>                 | 8                     | 49%                     | 25                | 6   | 0,62                      |
| Weinzettel et al., 2009    | Sway<br>( <i>Tension Leg Spar</i> ) | 5                     | 46%                     | 20                | 11,5  | 0,43                      |
| Raadal et al., 2014        | <i>Tension Leg Platform</i>         | 5                     | 51%                     | 20                | 19,2  | 1,7                       |
|                            | Pilone galleggiante                 | 5                     | 51%                     | 20                | 25,3  | 2,2                       |
|                            | Piattaforma semi-sommersa           | 5                     | 51%                     | 20                | 31,4  | 2,7                       |
| Garcia-Teruel et al., 2022 | Pilone galleggiante                 | 6                     | 50%                     | 25                | 39,3  | 3,3-4,3                   |
|                            | Piattaforma semi-sommersa           | 9,5                   | 40%                     | 25                | 33,9  | 2,8-3,7                   |
| Questo studio              | Piattaforma semi-sommersa           | 14,7                  | 34,4%                   | 30                | 31,3  | 3                         |

no a 30 anni. Con riferimento al fattore di capacità, invece, la tendenza riscontrata è quella di fare assunzioni molto ottimistiche, anche oltre il 50% nei casi offshore, e non in linea con gli attuali dati da misurazioni sul campo. Nel presente studio, sono stati assunti i valori indicati nel progetto preliminare (Med Wind, 2020a) ossia 30 anni di vita utile delle turbine e fattore di capacità pari a 34,4%. Da Arvesen e Hertwich (2012) è stato osservato che gli studi in cui le assunzioni erano basate su dati progettuali, nonostante fossero stime più accurate, risultavano spesso svantaggiati rispetto ad altri studi in cui le assunzioni erano solo ipotetiche.

Nella tabella 4 risulta evidente come l'impianto analizzato in questo studio è svantaggiato dal punto di vista del *fattore di capacità*, che è nettamente inferiore; d'altra parte, però, la vita utile delle turbine è superiore a quella assunta negli altri studi. Un altro elemento di differenza tra i diversi studi di LCA è l'approccio modellistico adottato per il fine vita: infatti, gli studi che adottano l'approccio dell'espansione dei confini del sistema e assegnano ai materiali riciclati un credito per l'evitata produzione di materia prima vergine, hanno tendenzialmente risultati migliori (Siemens, 2014a; Siemens, 2014b; Siemens-Gamesa, 2017; Raadal et al., 2014). Dal confronto emerge, inoltre, che i risultati delle turbine fisse (*bottom-fixed*) sono migliori sia come impatto sul riscaldamento globale che come energy payback time. Mentre, tra i diversi design galleggianti, la *Tension Leg Platform* e il pilone galleggiante risultano essere meno impattanti della piattaforma semi-sommersa. Si osserva comunque che gli altri due studi che hanno analizzato la piattaforma semi-sommersa (Raadal et al., 2014; Garcia-Teruel et al., 2022) presentano risultati confrontabili con quelli del presente studio.

Infine, confrontando il risultato con gli intervalli dei fattori di emissioni di altre fonti energetiche, così come indicati da Turconi et al. (2013), si conferma che l'eolico, anche offshore, presenta intensità carbonica ( $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ ) tra le più basse.

#### 4. Conclusioni

Al fine di ridurre le emissioni di gas climalteranti relative alla produzione di energia elettrica è ormai chiaro che sia necessario investire in tecnologie di generazione basate sulle fonti rinnovabili. Tuttavia, anche le tecnologie che sfruttano fonti di energia rinnovabili non sono prive di impatti ambientali, soprattutto se non si considera unicamente la fase operativa. La metodologia dell'analisi del ciclo di vita può quindi essere utilizzata per stimare quantitativamente le emissioni di gas serra relative all'intero ciclo di vita dell'impianto, non solo relative alla fase operativa, ma

soprattutto determinate dalla produzione e dalla gestione, anche a fine vita, dei componenti dell'impianto oggetto di studio. Oltre al cambiamento climatico, uno studio LCA può dare indicazioni anche su altri impatti ambientali ed eventuali co-benefici. In particolare, gli impianti eolici offshore riescono a generare più energia di quelli installati a terra e in modo più stabile nel tempo rispetto al fotovoltaico, tanto da essere considerata una fonte di energia variabile ma che potrebbe coprire il carico di base (IEA, 2019). Inoltre, l'installazione su fondazioni galleggianti permette di accedere alle risorse eoliche anche più lontano dalla costa, riducendo l'impatto visivo dell'impianto ed evitando di interferire con altre attività produttive. Tuttavia, gli impianti offshore richiedono infrastrutture più complesse e turbine con masse maggiori, che possano resistere alle sollecitazioni in mare aperto per lunghi periodi.

Per le categorie di impatto analizzate nello studio LCA, i potenziali impatti ambientali sono determinati soprattutto dalla fase di approvvigionamento delle materie prime, in particolare per la struttura della turbina e della fondazione galleggiante semi-sommersa; si potrebbero migliorare le prestazioni ambientali dell'impianto scegliendo, ad esempio, strutture galleggianti più leggere come la *Tension Leg Platform*. I contributi dati al totale degli impatti stimati dal sistema elettrico per la trasmissione dell'energia generata e dalle fasi di installazione, manutenzione e smissione, inclusa la gestione dei rifiuti, sono risultati mediamente o poco rilevanti ma devono essere interpretati alla luce della mancanza di dati progettuali specifici e quindi limitati da una serie di approssimazioni ed ipotesi.

Considerando i risultati degli indici di payback, si può affermare che l'impianto ripaga gli investimenti in termini di emissioni ed energia; inoltre, l'intensità carbonica rientra negli intervalli riscontrati in letteratura per l'eolico e sono di ordine di grandezza confrontabile con quelli di altre fonti rinnovabili come il fotovoltaico e l'idroelettrico.

In conclusione, un impianto eolico galleggiante di grande taglia richiede ingenti quantità di materiali e, sebbene non emetta gas serra e inquinanti atmosferici nella fase operativa, presenta degli impatti non trascurabili sull'intero ciclo di vita. Ciononostante, si può comunque concludere che l'utilizzo delle risorse eoliche permette di ridurre molto gli impatti sul riscaldamento globale rispetto alle alternative basate sulle fonti fossili.

Si noti, infine, che i risultati sono influenzati dalle ipotesi e approssimazioni fatte nella modellizzazione e che per ottenere risultati più accurati e con minori incertezze sarebbe necessario disporre di dati primari desumibili dal progetto esecutivo dell'impianto. ■

## Riferimenti bibliografici

- Allen C., Viselli A., Dagher H. et al. (2020) Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine: Technical Report. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Ardente F., Beccali M., Cellura M., Brano V.L. (2008) Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1): 200-217.
- Arvesen A. e Hertwich E.G. (2012) Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8): 5994-6006.
- Arvesen A., Birkeland C. e Hertwich E.G. (2013) The importance of ships and spare parts in LCAs of offshore wind power. *Environmental Science & Technology* 47(6): 2948-2956.
- Beauson J., Laurent A. e Rudolph D.P. et al. (2022) The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 155 (2022) 111847.
- Bhattacharya S. (2019) Overview of a Wind Farm and Wind Turbine Structure. In: *Design of Foundations for Offshore Wind Turbines*. John Wiley & Sons, Inc., 1-50.
- Brussa G. (2022) Life Cycle Assessment of a Floating Offshore Wind Farm: An Italian Case Study. Tesi di laurea magistrale non pubblicata, Politecnico di Milano.
- Bonou A., Laurent A. e Olsen S. I. (2016) Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy* 180: 327-337.
- Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. et al. (2011) Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press.
- Fonte R. e Xydis G. (2021) Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of Environmental Management* 287: 112269.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J. et al. (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3. Swiss centre for Life Cycle Inventories.
- Gaertner E., Rinker J., Sethuraman L. et al. (2020) Definition of the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine: Technical Report. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Garcia-Teruel A., Rinaldi G., Thies P. R. et al. (2022) Life cycle assessment of floating offshore wind farms: An evaluation of operation and maintenance. *Applied Energy* 307: 118067.
- Garrett P. e Ronde K. (2012) Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18(1): 37-48.
- General Electric (2022) Haliade-X offshore wind turbine. Record-setting offshore wind technology. Disponibile su: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine> (Ultimo accesso: 29/98/2022).
- Guezuraga B., Zauner R., Polz W. (2012) Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy* 37(1): 37-44.
- IEA Wind TCG Task 37 (2022) Systems Engineering in Wind Energy. Disponibile su: <https://iea-wind.org/task37/>
- International Energy Agency (2019) Offshore Wind Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report.
- International EPD® System (2021) General Programme Instructions for the International EPD System: Version 4.0.
- International EPD® System website (2022) List of Impact Indicators & Impact Assessment Methods. Disponibile su: <https://www.environdec.com/resources/indicators> (Ultimo accesso 19/3/2022).
- ISO (2021) ISO 14040:2006+A1:2020: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- ISO (2021) ISO 14044:2006+A2:2020: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- Jorge R.S., Hawkins R.T. e Hertwich E.G. (2012) Life cycle assessment of electricity transmission and distribution – Part 1: Power lines and cables. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17(1): 9-15.
- Jungbluth N., Bauer C., Dones R. et al. (2005) Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10: 24-34.
- Lee J. e Zhao F. (2021) Global Offshore Wind Report 2021. Global Wind Energy Council (GWEC).
- Martinez E., Sanz F., Pellegrini S. et al (2009) Life-cycle assessment of a 2MW rated power wind turbine:

- CML method. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14: 52-63.
- Mishnaevsky L., Jr (2021) Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials* 14: 1124.
  - Documentazione preliminare del Progetto Med Wind (2020). Disponibile su: <https://va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/7634/11063>
    - a) Studio preliminare ambientale (R.02 del 10/10/2020)
    - b) Relazione elettrica (R.06 del 10/10/2020)
    - c) Relazione tecnica analisi di producibilità del sito (R.07 del 10/10/2020)
  - PRé Sustainability (2020) SimaPro database manual: Methods library. Version 4.15.
  - Raadal H.L., Vold B.I., Myhr A. et al. (2014) GHG emissions and energy performance of offshore wind power. *Renewable Energy* 66: 314-324.
  - Razdan P. e Garrett P. (2017) Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V117-3.45 MW Wind Plant. Disponibile su: <https://www.vestas.com/en/sustainability/reports-and-ratings#lca-download>
  - Razdan P. e Garrett P. (2019) Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V117-4.2 MW Wind Plant. Disponibile su: <https://www.vestas.com/en/sustainability/reports-and-ratings#lca-download>
  - Rhodri J. e Marc C.R. (2015) Floating Offshore Wind: Market and Technology Review. Carbon Trust on behalf of the Scottish Government.
  - Schleisner L. (2000) Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable Energy* 20(3): 279-288.
  - Siemens AG (2014a) Environmental Product Declaration. A clean energy solution – from cradle to grave: Offshore wind power plant employing SWT-4.0-130.
  - Siemens AG (2014b) Environmental Product Declaration. A clean energy solution – from cradle to grave: Offshore wind power plant employing SWT-6.0-154.
  - Siemens Gamesa (2017) Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD Offshore Wind Turbine. Disponibile su: <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/offshore/brochures/siemens-gamesa-environmental-product-declaration-epd-sg-8-0-167.pdf>
  - Tagliabue L. (2015) Modellazione di riciclo, riuso e recupero energetico nelle analisi del ciclo di vita dei prodotti: un confronto fra le equazioni disponibili nella normativa tecnica. *Ingegneria dell'Ambiente* 2(3).
  - Tamini Trasformatori S.r.l. (2019) Environmental Product Declaration: GREEN Power Transformer. Disponibile su: <https://www.environdec.com/library/epd958>
  - Tremeac B. e Meunier F. (2009) Life cycle analysis of 4.5 and 250 W wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(8): 2104-2110.
  - Turconi R., Boldrin A. e Astrup T. (2013) Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28: 555-565.
  - Vestas (2022) V236-15.0 MW<sup>TM</sup>. Disponibile su: <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/V236-15MW> (Ultimo accesso: 29/08/2022).
  - Vicinay Sestao S.L. (2019) Environmental Product Declaration: Mooring Chain R3-R3S, R4-R4S and R5 Quality steel for Offshore Industry. Disponibile su: <https://www.environdec.com/library/epd476>
  - Vold B.I. e Sanden I.L. (2012) Life cycle analysis of floating wind turbines with regard to internal and external factors compared with bottom-fixed wind turbines. Tesi di laurea.
  - Wang S., Wang S. e Liu J. (2019) Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbine. *Journal of Cleaner Production* 210: 804-810.
  - Weinzettel J., Reenaas M., Solli C. et al. (2009) Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy* 34: 742-747.

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

# TECNOLOGIE, CONSUMI ENERGETICI, COSTI E IMPATTI AMBIENTALI NELL'ESCAVAZIONE, LAVORAZIONE E TRASPORTO DI CALCARE E OLIVINA

Serena De Marco<sup>1,\*</sup>, Stefano Caserini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Milano.

## Sommario

Recenti studi mostrano come non sia più possibile raggiungere l'obiettivo emissioni nette zero senza rimuovere CO<sub>2</sub> dall'atmosfera. Alcune strategie climatiche quali l'alcalinizzazione degli oceani o l'enhanced weathering, consistenti nella dissoluzione di rocce o minerali quali calcare o olivina in acqua marina o suolo, possono rimuovere da milioni a miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno a fronte di altrettanto alti quantitativi di materie prime, costi e consumi energetici. In questo studio sono analizzati tre anelli della catena di lavorazione di queste materie prime, estrazione, triturazione e trasporto, in modo da identificare componenti e processi che causano dispendi energetici ed economici. Dai risultati emerge che nell'escavazione, il consumo energetico dovuto alla movimentazione dei materiali e al trasporto (~3.8 kWh t<sup>-1</sup>) incide sul totale (~5 kWh t<sup>-1</sup>) per circa l'80% e almeno il 50% di questo totale è prodotta da motori diesel. La domanda energetica della macinazione a grana fine è ~3 kWh t<sup>-1</sup> per diametri finali di ~1 mm e 822 kWh t<sup>-1</sup> per diametri di ~2 μm. Il consumo energetico nella macinazione ultra-fine (< 10 μm) è paragonabile a quello della calcinazione (~988 kWh tCaCO<sub>3</sub><sup>-1</sup>) necessaria per la produzione di calce spenta. Per quanto riguarda i costi operativi, l'escavazione si aggira intorno a 1.5 € t<sup>-1</sup> mentre la triturazione, molto più variabile, tra ~2 € t<sup>-1</sup> per diametri finali di 50 μm e ~80 € t<sup>-1</sup> per diametri di 2 μm. Il trasporto di lungo raggio è energeticamente oneroso qualora venga condotto su strada tramite camion a diesel e per lunghe distanze; oltre i 100 km, si possono superare i 40 kWh t<sup>-1</sup>.

Per ciascuna attività, è possibile ottenere riduzione dei consumi energetici fino a circa il 40% con investimenti in nuove tecnologie e nell'efficienza energetica. L'elettrificazione e l'uso di energie rinnovabili può ulteriormente ridurre l'impronta carbonica di queste attività.

**Parole chiave:** *Calcare, Olivina, Escavazione, Trattamenti, Impatti Ambientali, Risparmio Energetico.*

## TECHNOLOGIES, ENERGY CONSUMPTIONS, COSTS AND ENVIRONMENTAL IMPACTS IN THE EXCAVATION, PROCESSING AND TRANSPORTATION OF LIMESTONE AND OLIVINE

### Abstract

Recent research shows that it is no longer possible to achieve net-zero emission target without removing CO<sub>2</sub> from the atmosphere. Some Carbon Dioxide Removal (CDR) techniques such as Ocean Alkalinization (spreading of alkaline materials over seawater) and Enhanced Weathering (accelerated dissolution of minerals such as olivine in the ground) may sequester from millions to billions of atmospheric CO<sub>2</sub> per year (Caserini et al., 2021a; Beerling et al., 2020). Worldwide implementation requires extracting and processing equally large amounts of raw materials, mostly given by limestone and olivine-rich rocks, with high costs and energy consumptions. Hence, three main stages of the process chain of such raw materials, have been analysed so as to elucidate components and processes leading to the higher-than-average energy consumptions. Specifically, mining, comminution and long-haul transportation have been surveyed in each of their sub-stages. Mining has been broken down in drilling, blasting and material handling and hauling whereas comminution in crushing, grinding and milling. Environmental impacts in the excavation have also been discussed. Overall, it has been found that material handling and hauling is the crucial stage in the extraction. The energy consumption is of ~3.8 kWh t<sup>-1</sup> against the total which is of ~5 kWh t<sup>-1</sup>. Its energetic impact is thus of 80% over the total and at least 50% of the total energy consumed for tonne of ore mined is caused by diesel engines. Long-haul transportation has been analysed through four transport modes: road, train, maritime and inland waterways transportation via large ships and barges/small vessels respectively. It appears that land transportation, if carried out by diesel-powered trucks and for long distances, is the most energy intensive transport mode; maritime

IdA



\* Per contatti: Piazza Leonardo Da Vinci, 20133 Milano. serena.demarco@polimi.it

Ricevuto il 30-8-2022; Correzioni richieste il 5-10-2022; Accettazione finale il 12-5-2022.

transportation is the cheapest; rail transportation is the most efficient. Road transportation, if distance is greater than 100 km, may exceed 40 kWh t<sup>-1</sup>. The other pivotal stages are grinding and milling. Here, the energy demand can greatly vary with the kind of equipment used, the geological hardness of the rock and most of all, with the diameter of the end-product. Calculations show that energy consumption is ~ 3 kWh t<sup>-1</sup> for diameter grain size of ~ 1 mm and ~ 822 kWh t<sup>-1</sup> for ~ 2 μm (Strefler et al., 2018). These processes never produce particles with a single size but distribution of particles with different sizes. The micronized scale can be necessary since dissolution in the water of alkaline materials is largely controlled by particle grain size; the lower the diameter, the fastest the dissolution (Rinder et al., 2021). Electricity is the primary source of energy used to power equipment. Another extremely energy intensive operation is calcination. It is required if slaked lime (Ca(OH)<sub>2</sub>) is used instead of mined and ground limestone (CaCO<sub>3</sub>). Thus, a comparison has been

done. It has been found out that, in calcination, energy consumption may require up to ~988 kWh tCaCO<sub>3</sub><sup>-1</sup>, which is a contribution reached only in the ultra-fine milling. For what concerns operating costs, in the excavation the total cost is about ~ 1.5 €t<sup>-1</sup> whereas in comminution, similarly to the energy consumptions, costs are much more variable, ranging from ~2 € t<sup>-1</sup> for diameter grain size of 50 μm and ~80 € t<sup>-1</sup> for 2 μm. (Strefler et al., 2018). Other influencing factors are the cost of electricity, labour costs and fluctuations in the market prices. Nevertheless, both material handling, hauling and milling can lower their current energy consumption of at least 37%, if investment on new technologies, policies to upscale renewables, energy efficiency and electrification could take place at a fast-enough pace and within a wider system approach.

**Keyword:** *Limestone, Olivine, Excavation, Processing, Environmental Impacts, Energy Saving.*

## 1. Introduzione

### 1.1. Obiettivo della ricerca

L'ultimo rapporto IPCC (2022) evidenzia come la neutralità climatica a metà secolo richieda, oltre alla decarbonizzazione totale, anche l'utilizzo di tecniche di rimozione della CO<sub>2</sub> atmosferica (Negative Emission Technologies, NET) al fine di bilanciare il residuo di CO<sub>2</sub> accumulatosi nel corso dei decenni. Tale residuo è dato dalla differenza tra l'emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera e la CO<sub>2</sub> rimossa tramite sink naturali quali l'oceano o le foreste. Sono utilizzabili a questo fine tecniche quali la cattura diretta dall'aria (*direct air capture, DAC*) o l'energia da biomassa con cattura e stoccaggio del carbonio (*Bio-energy with carbon capture and storage, BECCS*).

L'implementazione a vasta scala di altre di queste NET, quali l'Alcalinizzazione degli oceani (Ocean Alkalinization, OA), l'Enhanced Weathering (EW) e/o tecniche di stoccaggio della CO<sub>2</sub> quali il Buffered Accelerated Weathering of Limestone (BAWL, Caserini et al., 2021b), richiederà, a sua volta, centinaia di milioni o miliardi di tonnellate di materie prime da estrarre, trattare e lavorare ogni anno. Le rocce a miglior tasso di rimozione di CO<sub>2</sub> sono calcare e quelle ad alto contenuto di olivina (Darton et al., 2018). Recentemente è stato mostrato come la disponibilità a scala planetaria di tali risorse naturali non sia un fattore limitante per un diffuso sviluppo delle NET (Caserini et al., 2022). Alcuni degli impedimenti principali consisterebbero, piuttosto, nei consumi e nei costi sostenuti per arrivare a confezionare il prodotto finito.

Questo studio si è proposto, pertanto, di analizzare gli aspetti energetici ed economici di tre fasi chiave

della catena di processo della produzione di calcare e olivina, ossia escavazione, lavorazione e trasporto, in modo da identificare processi e componenti che potrebbero ostacolare una capillare diffusione delle NET.

### 1.2. Le rocce nelle strategie climatiche e gli impatti ambientali

L'OA e l'EW consentono di ottenere da 1 a 3.3 Gt all'anno di assorbimenti di CO<sub>2</sub> atmosferica, per semplice potenziamento di meccanismi che avvengono già in natura ma ad una velocità di gran lunga più lento (Caserini et al., 2021a; Goll et al., 2021).

La prima tecnica consiste, in particolare, nello spargimento e dissoluzione di sostanze alcaline in acqua di mare; la seconda in una dissoluzione chimica potenziata di minerali, quali l'olivina, sul suolo. La prima, inoltre, induce un aumento dei livelli di pH marini, attualmente in diminuzione a causa dell'acidificazione del mare (Butenschön et al., 2021). Un'ulteriore azione a supporto della capacità tampone degli oceani potrebbe derivare dall'impiego di un'innovativa tecnica di stoccaggio della CO<sub>2</sub> nel fondo degli oceani sotto forma di bicarbonati (BAWL) come discusso in Caserini et al., (2021b).

In tutti i casi citati la disponibilità di minerali e/o rocce è indispensabile.

Nello studio pubblicato da Caserini et al., (2022), i principali minerali/rocce che contribuiscono alla rimozione di CO<sub>2</sub> atmosferica (*carbon dioxide removal, CDR*), ovvero calcare, olivina, magnesite e brucite, sono stati analizzati sulla base dei seguenti aspetti: disponibilità quantitativa della risorsa naturale a livello mondiale, prossimità dei depositi alle aree costie-

**Tabella 1.** Quantitativi di materie prime estratte nel 2017, di potenziale interesse per OA. Fonte: Caserini et al., (2022).

| Materia prima sfruttabile per tecniche di CDR | Rateo di estrazione attuale (anno 2017) [Mt a <sup>-1</sup> ] |
|---|---|
| Calcere                                       | 6593  |
| Magnesite                                     | 29  |
| Olivina                                       | 8.4   |
| Brucite                                       | 1.5   |
| Totale  | 6631  |

re, copertura del suolo in cui si collocano i depositi. Sebbene il focus dello studio verta sull'OA, le problematiche di fondo affrontate sono comuni a molte NET. In sintesi, le rocce carbonatiche sono maggiormente disponibili; ad esempio, entro i 10, 50 e oltre i 100 km dalla costa le riserve globali di carbonati puri al di sotto di aree senza vegetazione sono pari rispettivamente a 620 Gt, 5583 Gt e 6485 Gt. Sono stati inoltre ricavate le tonnellate all'anno estratte nel 2017, per ciascun tipo di roccia/minerale di interesse. Essi sono riportati in Tabella 1.

Per l'implementazione a larga scala delle NET la disponibilità di materie prime non costituirebbe pertanto, ad oggi, un problema. Queste risorse naturali, inoltre, non rientrano nella lista delle materie prime critiche (EU, 2020).

Le criticità maggiori da un'escavazione massiva sono:

- emissioni in atmosfera, suolo, sottosuolo, acque;

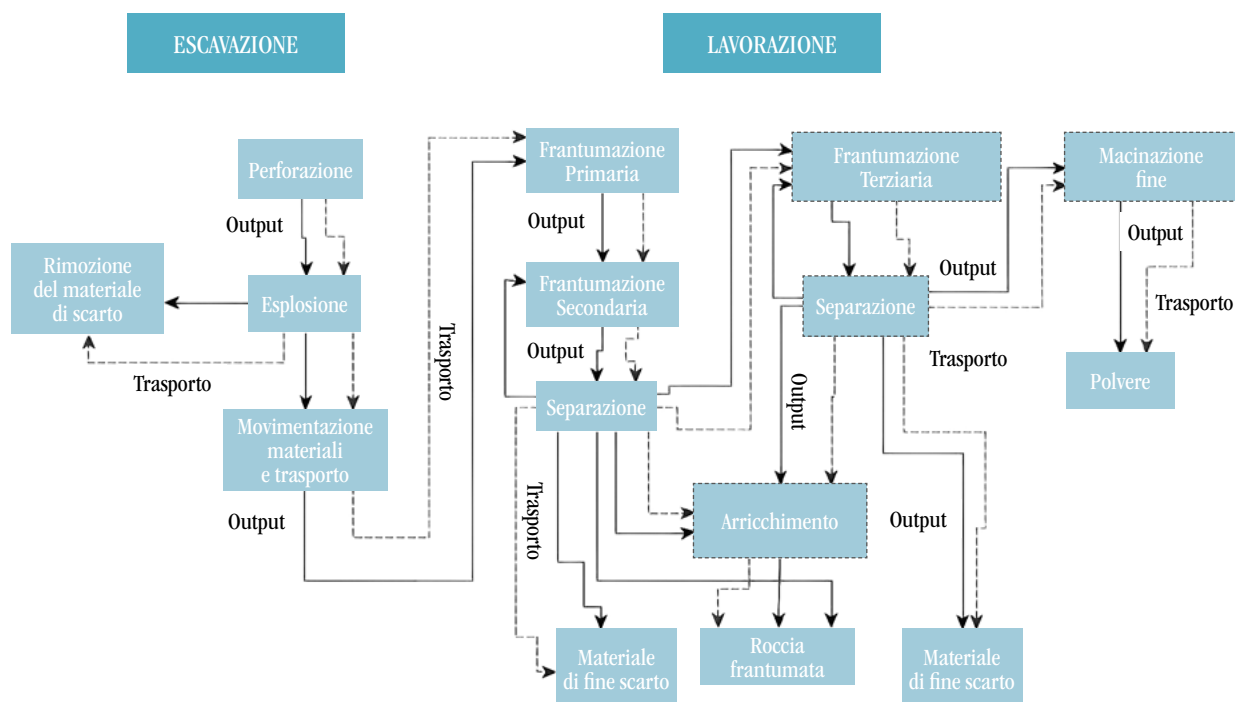
- rilascio e dispersione di metalli pesanti sotto forma di solfuri ed ossidi per opera delle acque meteoriche dilavanti o del vento;
- produzione di rifiuti di estrazione o di altro genere;
- emissione di rumore e vibrazioni;
- alterazione del paesaggio pre-esistente;
- interruzione di eventuali habitat naturali;
- modifiche all'assetto idrogeologico per interferenza delle attività estrattive con le acque di falda.

Un maggiore controllo dei processi e dei materiali in uscita, una gestione più efficiente delle risorse, la riduzione, il recupero, il riutilizzo e il riciclo dei materiali impiegati sono strategie di mitigazione prioritaria nel settore estrattivo.

## 2. Materiali e metodi

Lo studio è stato condotto ricercando costi e consumi energetici nelle fasi di escavazione, lavorazione e trasporto delle materie prime di interesse, calcare e olivina, suddivisi per attività generalmente previste o opzionali. In Figura 1 si mostra il diagramma di flusso delle operazioni.

In particolare il lavoro si è focalizzato sul calcare e sulle rocce ricche in olivina. Dati riguardanti rocce diverse, sono presenti nel Materiale Supplementare (Tabelle MS2, MS3 e MS4) poiché rappresentativi di processi eseguiti da una compagnia italiana operante nel settore (MIE, 2022) e utili per un confronto con rocce a diversa resistenza.

**Figura 1.** Diagramma di flusso delle principali fasi e sotto-fasi della catena di processo delle materie prime.

La freccia tratteggiata rappresenta il trasporto, quella continua il prodotto uscente. Il box tratteggiato è una fase opzionale, mentre quello a linee continue è una fase prevista nella generalità dei casi.



Per la raccolta di dati e informazioni, sono stati consultati libri, e-books, report e articoli scientifici, tramite database on-line a carattere prettamente scientifico come Scopus, Google Scholar, Web of science, siti gestiti da fornitori di prodotti e attrezzature, agenzie governative estere (es: US Geological Survey (USGS), US Department of Energy (USDOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (OEERE)), istituti di ricerca (es: Institute of Quarrying), società private operanti nel settore (es: Holtec, Cemex).

Alcuni autori quali Strefler et al., (2018), fanno riferimento alla legge di Bond (Bond, 1961) per il calcolo del consumo energetico richiesto nella frammentazione del materiale:

$$W = 10 \cdot W_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

In questa equazione:

- $W$ : work input o domanda energetica specifica, espresso in  $\text{kWh t}^{-1}$ , rappresenta una misura della resistenza opposta dal materiale ai processi di frammentazione;
- $W_i$ : work index, espresso in  $\text{kWh t}^{-1}$ , è un indice di resistenza specifico che varia a seconda del tipo di roccia considerata; per il calcare è di  $13 \pm 3 \text{ kWh t}^{-1}$ ; per una roccia contenente olivina come il basalto è  $22 \pm 4 \text{ kWh t}^{-1}$  (Metso:Outotec, 2021);
- $P_{80}$ : apertura del vaglio virtuale in  $\mu\text{m}$  attraverso il quale passerebbe l'80% del prodotto finale;
- $F_{80}$ : apertura del vaglio virtuale in  $\mu\text{m}$  attraverso il quale passerebbe l'80% del materiale iniziale.

Una formula più recente è stata proposta dagli stessi Strefler et al., (2018):

$$ED = 6.62 \cdot GS^{-1.162}$$

nella quale:

- $ED$  è la domanda energetica specifica valutata in  $\text{GJ t}^{-1}$ ;
- $GS$  è la dimensione del grano del prodotto finale valutata in  $\mu\text{m}$ .

### 3. Risultati e discussione

#### 3.1. Consumi energetici

##### 3.1.1. Escavazione

L'escavazione di una qualsiasi materia prima avviene per costruzione di cave di superficie, in sotterraneo o per combinazione dei due (Ridley, 2013). La natura e la posizione geografica del deposito, la sua dimensione, la profondità, il grado di concentrazione del minerale da estrarre, la sua durezza sono alcuni dei parametri che influiscono nella scelta del metodo e delle attrezzature impiegate (USGS, 2021; OEERE, 2002b).

Il calcare e l'olivina vengono generalmente estratti con metodi di superficie (USDOE, 2007; IQ, 2021; ProjectVesta, 2021).

Le tre sotto-fasi principali sono la perforazione (*drilling*), l'esplosione (*blasting*), la movimentazione dei materiali e il trasporto a corto raggio (*material handling and hauling*) (CIPEC, 2005). Quest'ultima include operazioni di scavo, carico e scarico del materiale, trasporto all'interno della cava, stoccaggio del materiale nei silos.

Con l'esplosione si ottiene un primo livello di frammentazione consistente nella formazione di micro e macro-fratture nel corpo roccioso per effetto dell'energia rilasciata dagli esplosivi. Per l'esplosione del calcare viene utilizzato il nitrato di ammonio (Prya Cement, 2022).

Il grado di frantumazione raggiunto ha diretto impatto sulle operazioni di movimentazione dei materiali, poiché sia la produttività di un caricatore/scariatore che quella di un camion sono funzione della distribuzione delle dimensioni del materiale roccioso esploso; minore è la dimensione del materiale e maggiore sarà il rateo di produttività del camion (Ozdemir et al., 2018).

L'efficacia con la quale si frattura la roccia ha ripercussioni anche successivamente poiché la resistenza del materiale alla macinazione fine dipenderà da essa. Più la roccia risulta sciolta e ben frammentata e più la resistenza del materiale ad ulteriori impatti impressi da macchine frantumatrici e/o mulini diminuisce. Le prestazioni fornite dall'esplosione dipendono, a loro volta, dal diametro dei fori effettuati nella fase di perforazione.

Le fonti principali dai quali sono stati tratti i dati sono i lavori di CIPEC (2005), Hangx et al., (2009), Brown et al., (2010) per l'olivina e OEERE (2002a; b) per il calcare.

In Tabella 2 vengono riportati i valori massimi, minimi, medi dei consumi energetici suddivisi per attività e il consumo complessivo. Riguardo all'esplosione non si ha disponibilità di dati sul calcare o sull'olivina ma i contributi energetici sono paragonabili a

**Tabella 2.** Valori medi, minimi e massimi in  $\text{kWh t}^{-1}$  del consumo energetico attribuibile alla singola attività e all'escavazione totale di una tonnellata di calcare e/o olivina.

| Attività<br>(numero fonti)                  | Consumo Energetico $\text{kWh t}^{-1}$ |        |         |
|---|--|--------|---------|
|   | Media                                  | Minimo | Massimo |
| Perforazione (2)                            | 0.5                                    | 0.3    | 0.6     |
| Movimentazione<br>materiali e trasporto (2) | 3.9                                    | 2.9    | 4.8     |
| Escavazione Totale (3)                      | 4.7                                    | 3.5    | 5.6     |

quelli della perforazione; lo studio condotto da CIPEC (2005) riporta ad esempio un valore di 0.366 kWh t<sup>-1</sup> per la perforazione e 0.504 kWh t<sup>-1</sup> per l'esplosione. Si rimanda alla Tab MS1 del Materiale Supplementare (MS) per ulteriori dettagli.

In parentesi sono riportati il numero dei dati a disposizione.

La movimentazione dei materiali e il loro trasporto risultano pertanto più impattanti della perforazione ed esplosione. Per il trasporto possono essere utilizzati camion a motore diesel e/o nastri trasportatori elettrici se il materiale è secco, pompe e condotte se acquoso.

L'uso dei combustibili fossili risulta, tuttavia, ancora molto diffuso. Quasi il 50% dell'energia totale consumata per estrarre una tonnellata di roccia è causata dall'uso di mezzi di trasporto pesanti (OEERE, 2002b) e circa l'87% dei consumi sostenuti per movimentazione e trasporto materiali deriva dall'utilizzo di motori diesel (Norgate et al., 2010; Jeswiet et al., 2015; OEERE, 2002a).

### 3.1.2. Lavorazione

In questa seconda macro-fase vengono incluse tutte le operazioni necessarie a trasformare la roccia estratta in un prodotto finito che abbia del valore economico.

Le quattro sotto-fasi sono la frantumazione grossolana (*crushing*), la separazione, la macinazione a grana fine (*grinding*), la polverizzazione (*milling*), eventuali processi di arricchimento (*enrichment*) e miglioramento (*upgrading*).

Sono tutti processi standard che non hanno subito grossi cambiamenti nel tempo, se non nell'avanzamento tecnologico di alcune macchine e nell'implementazione di processi per i quali occorre ottenere un prodotto finito ad alto valore economico (Metso:Outotec, 2021). Possono inoltre essere eseguiti a secco o ad umido.

La frantumazione si suddivide tipicamente in primaria e secondaria. Un terzo ciclo in rocce diverse dal calcare non è raro e viene perlopiù utilizzato per raggiungere granulometrie molto fini senza per questo ricorrere a mulini. A questo livello, la riduzione in diametro che si ottiene si aggira tipicamente intorno ai 5-20 mm (Mitchell et al., 2008; Cemex, 2021). Le fratture vengono create per compressione, impatto, attrito o taglio (Metso:Outotec, 2021; Abadir, 2021).

Generalmente, per il *crushing* primario, vengono utilizzati frantoi a mascelle (*Jaw crusher*) o frantoi rotanti (*Gyratory crusher*); in questi casi il meccanismo di rottura è causato da compressione (Kleemann, 2022). Per il *crushing* secondario e terziario si usa invece prevalentemente il frantoio a cono (*Cone crusher*) o il frantoio ad urto ad asse verticale (*Vertical Shaft Impact, VSI, crusher*) (Mitchell et al., 2008).

Frantoi ad urto ad asse orizzontale (*Horizontal Shaft Impact, HSI, crusher*) sono utilizzati sia triturazione primaria che per secondaria.

Nel caso del calcare i frantoi a mascelle sono largamente utilizzati nel *crushing* primario (RM Group, 2022; Prya Cement, 2022; Sanme, 2022); se il prodotto finale necessita di avere una grana fine, buona cubicità e angolarità vengono utilizzati frantoi ad urto sia nel *crushing* primario che in quello secondario (Kleemann, 2022).

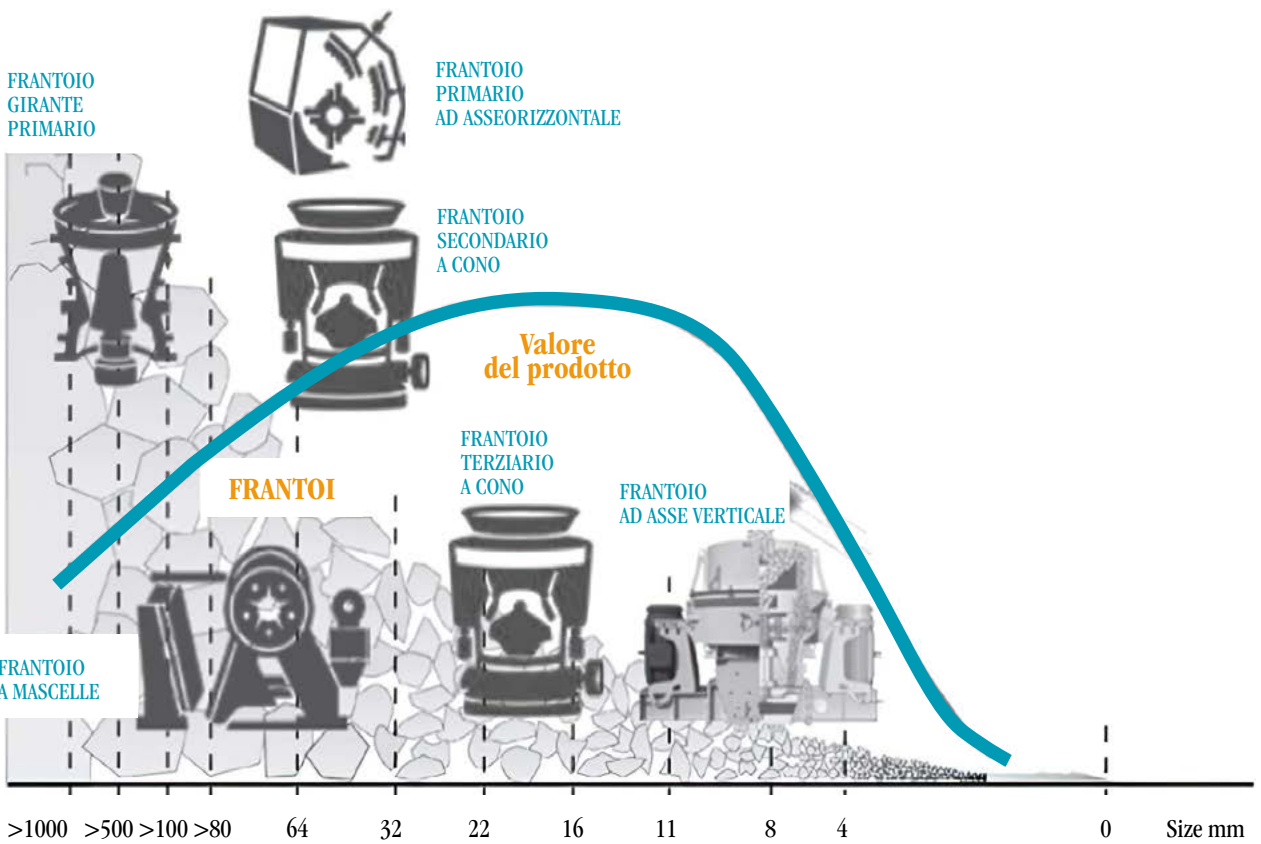
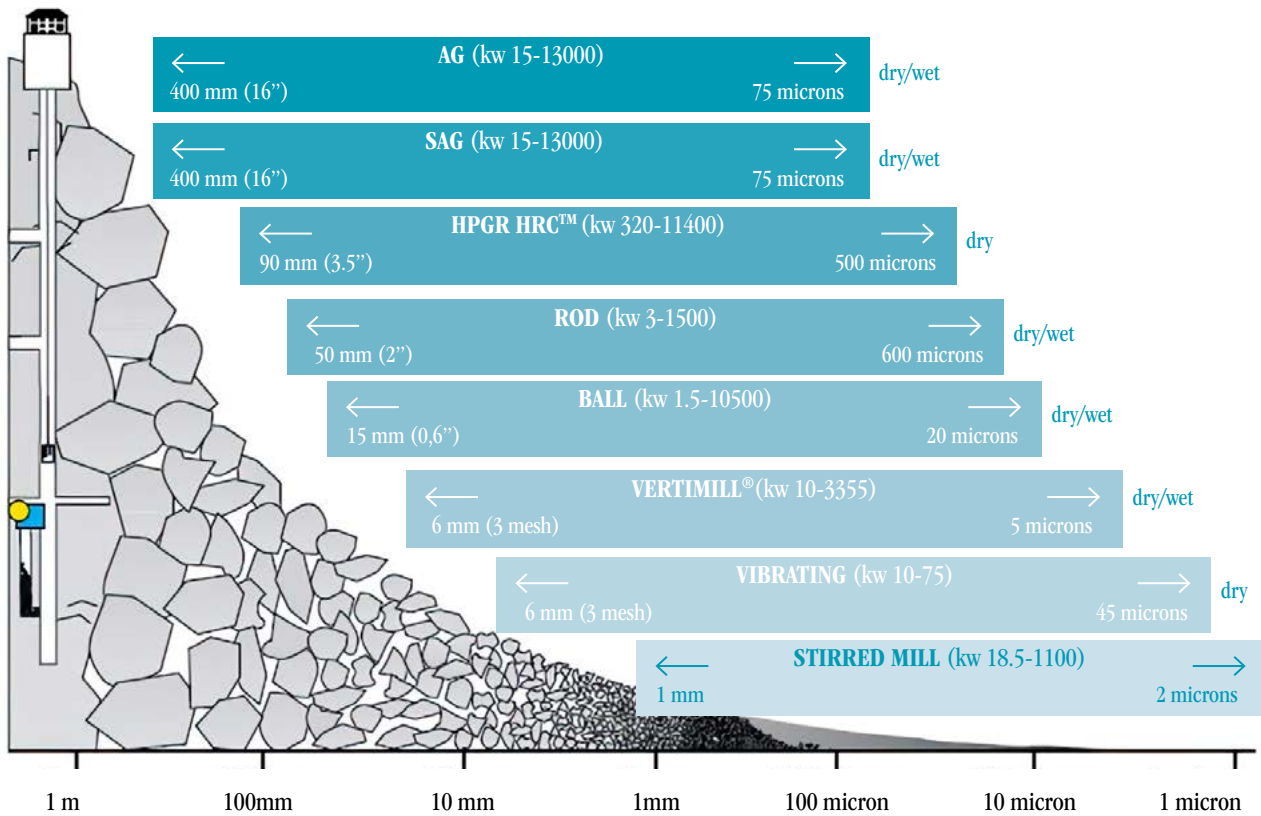
Al processo di frantumazione grossolana, segue, di norma, quello della separazione, in cui le particelle con diametri maggiori rispetto al diametro target o eventuali impurezze vengono opportunamente separate dal prodotto desiderato. Ci sono diversi metodi per eseguirlo: centrifugazione, flottazione, filtrazione, uso di cicloni, vagli oscillanti, separatori magnetici, metodi chimici (Metso:Outotec, 2021).

Si parla di macinazione a grana fine (*grinding*) quando la dimensione finale delle particelle deve essere al di sotto dei 100 µm circa e di polverizzazione (*milling*) quando si vuole portare la dimensione delle particelle allo stadio ultra-fine (< 10 µm). In entrambi i casi, l'obiettivo è la creazione di nuova area superficiale, grazie alla quale si incrementa la capacità di dissoluzione del materiale a contatto con l'acqua (Renforth, 2013a).

Le macchine con le quali viene eseguita la macinazione fine e/o polverizzazione sono mulini a tamburo, ad agitazione o a vibrazione. Esempi del primo tipo sono i mulini autogeni (*Autogenous, AG, mill*), semi-autogeni (*Semi – Autogenous, SAG, mill*), mulini a barre (*Rod mill*), mulini a palle (*Ball mill*). Esempi del secondo tipo sono i cosiddetti VERTIMILL® o mulini verticali ad agitazione (*Stirred Media Detritor, SMD*) mentre un esempio del terzo tipo è il mulino a palle vibranti (*Vibrating ball mill*) (Metso:Outotec, 2021). I mulini a rulli di macinazione ad alta pressione (*High Pressure Grinding Roll, HPGR*) sono invece utilizzati per il trattamento di rocce a diverso grado di resistenza come diamante, oro, rame, minerali industriali. Rispetto ai semi-autogeni e ai mulini a palle, l'efficienza dello sminuzzamento è più alta poiché le particelle sono costrette ad impattare in uno spazio più ristretto che le costringe ad avere meno possibilità di fuga (911Metallurgist, 2022).

Nel caso del calcare, mulini a palle, a rulli (*Raymond roller mill*), verticali (*Vertical mill*), sono alcuni tra i tipi più utilizzati (Alpa, 2022; FTM, 2022; Schenck Process, 2022).

In Figura 2 sono rappresentati i diametri ottenibili in funzione del tipo di macchina usata a seconda che si voglia eseguire della frantumazione o della macinazione fine.



**Figura 2. Impattatori.** Tipo di macchine utilizzate nella macinazione (in alto) e nella frantumazione (in basso) in relazione al diametro finale (asse orizzontale).

Fonte: Metso:Outotec (2021).

In generale, la potenza di esercizio è almeno del 5-10% inferiore alla potenza teorica delle macchine (Renforth, 2012; Workman et al., 2003; Abadir, 2021). La conseguenza è che il processo completo non è in grado di assicurare la riduzione di diametro desiderato; ciò che si ottiene è una distribuzione di dimensioni piuttosto che un insieme di particelle dotate tutte di una singola dimensione (Renforth et al., 2013b; Renforth, 2012). Le macchine sono alimentate da energia elettrica.

In Tabella 3 si mostrano valori massimi, minimi e medi dei consumi energetici suddivisi per attività. Si riporta inoltre un valore indicativo del diametro in output e input associato generalmente a questi processi. Si rimanda alle Tabelle MS3-MS4 del MS per ulteriori dettagli.

In parentesi si riporta il numero di dati a disposizione. Si fa notare che non tutte le fonti consultate specificano dettagli quali la presenza di eventuali impurezze, la resistenza a rottura della roccia, il tipo di macchina utilizzato.

Dall'analisi dei dati si evince che la domanda energetica sia inversamente proporzionale alla dimensione del diametro delle particelle del prodotto finale e direttamente proporzionale alla resistenza allo sminuzzamento opposta dalla roccia, come indicato nell'Equazione [1].

Nel grafico di Figura 3 si mostra come al procedere della riduzione del diametro i consumi tendano ad aumentare in modo esponenziale.

Il motivo è che le particelle a diametro maggiore risultano più facilmente "catturabili" e quindi sminuzzabili rispetto a quelle di diametro inferiore. Queste ultime, al contrario, richiedono un numero maggiore di impatti e quindi maggiore energia per essere opportunamente intercettate e spezzate (Wang et al., 2007). Si noti che i dati tratti da Strefler et al., (2018) sono stati ricavati applicando l'Equazione [2].

Ulteriori cause possono ricercarsi nella resistenza intrinseca del materiale, nella relazione tra la reattività del materiale e i meccanismi di rottura, nel tipo di macchina e nelle condizioni di esercizio, nelle dissipazioni di energia termica che si registrano nel passare

dalla semplice frantumazione alla macinazione fine o polverizzazione. In Tab. MS 4 nei Materiali Supplementari, si nota come pur ottenendo una riduzione di diametro minore (500  $\mu\text{m}$  del quarzo rispetto a 45  $\mu\text{m}$  del feldspato), il quarzo richiede circa il 20% di consumo energetico in più rispetto al feldspato.

Complessivamente, il consumo energetico dovuto alla triturazione grossolana e fine può raggiungere fino al 75% dell'energia totale richiesta nella sola macro-fase del trattamento (OEREE, 2002a).

L'arricchimento è infine una fase opzionale che risulta necessaria quando si vuole conferire al prodotto finale un miglioramento in valore economico. Ciò consiste in processi di lavaggio e/o separazione (Metso:Outotec, 2021).

Si possono prevedere ulteriori trattamenti qualora, come spesso accade nel caso del calcare, il prodotto lavorato debba trasformarsi in un prodotto commerciale finale con caratteristiche diverse da quello iniziale.

L'esempio tipico nell'industria delle costruzioni è la produzione di "calce viva" (*quicklime*,  $\text{CaO}$ ), consistente in un trattamento termico chiamato calcinazione o *lime burning*. In questo processo, il calcare sottoforma di carbonato di calcio viene sottoposto a temperature molto elevate ( $\sim 900\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) in forni dedicati (Eula, 2014).

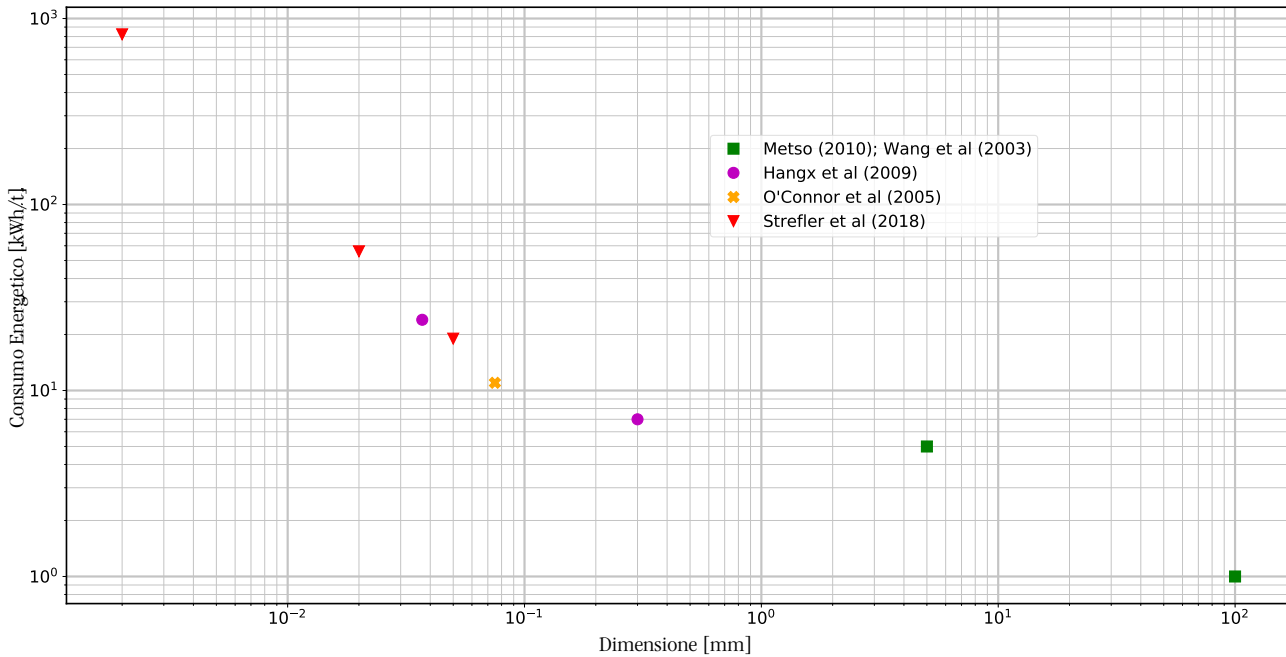
Da un confronto tra macinazione fine e calcinazione, si nota come i consumi energetici di quest'ultima siano di gran lunga maggiori. Per effettuare la sola calcinazione, il consumo energetico può spaziare tra un valore minimo di circa  $\sim 3\text{ GJ}$  per tonnellata di  $\text{CaO}$  ( $\sim 842\text{ kWh tCaO}^{-1}$ ), equivalente a  $\sim 472\text{ kWh}$  per tonnellata di  $\text{CaCO}_3$  (Eula, 2014) e un massimo di  $1764\text{ kWh tCaO}^{-1}$  equivalente a  $988\text{ kWh tCaCO}_3^{-1}$  (Jenkins, 2003). Quest'ultimo valore si raggiunge solo per polverizzazioni ricadenti nel campo dell'ultra-fino ( $<10\text{ }\mu\text{m}$ ).

### 3.1.3. Sintesi sui consumi energetici

Considerando l'intera catena di processo, lo studio condotto da USDOE (2007) conclude che le sotto-fasi di frantumazione e macinazione fine possono arrivare a rappresentare circa il 44% dell'energia totale, la separazione il 4%, la movimentazione dei materiali e il trasporto a corto raggio il 27%, la perforazione ed esplosione il 7%, processi aggiuntivi e rimanenti il 18%.

**Tabella 3.** Valori medi, minimi e massimi in  $\text{kWh t}^{-1}$  del consumo energetico attribuibile alla singola attività della lavorazione di una tonnellata di calcare e olivina.

| Attività (numero fonti)           | Consumo Energetico $\text{kWh t}^{-1}$ |        |         | Range medio del diametro mm |
|-----------------------------------|--|--------|---------|-----------------------------|
|                                   | Media                                  | Minimo | Massimo | Input-Output                |
| Frantumazione (10)                | 3.2                                    | 0.8    | 9.0     | $<500\text{-}<15$           |
| Macinazione fine e ultrafine (24) | 126                                    | 4      | 833     | $<5\text{-}<0.002$          |

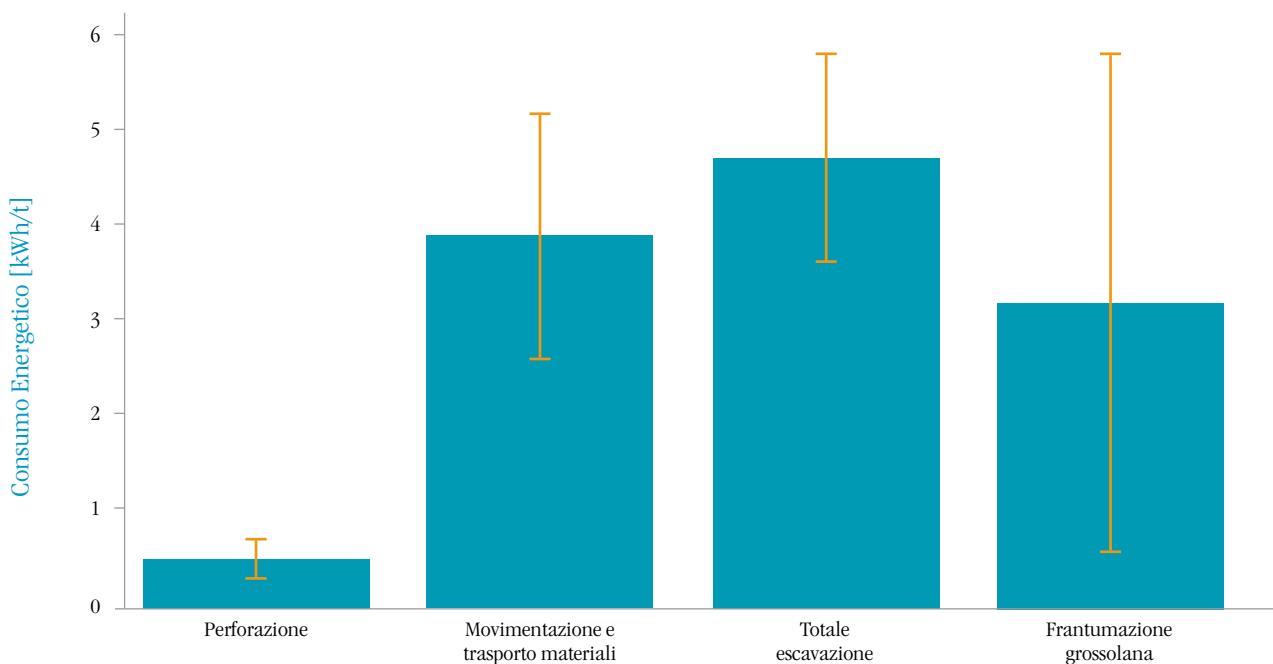


**Figura 3.** Andamento dei consumi energetici al variare della dimensione del diametro finale della particella.

Secondo lo studio condotto da OEREE (2002a) il trattamento occupa il 39% del totale, la movimentazione materiale il 42%, le restanti operazioni necessarie per estrarre la roccia dal sottosuolo il 19%. Per altri autori la sola macinazione fine potrebbe arrivare a raggiungere il 60-70% dell'energia necessaria alla manifattura del cemento (Holtec, 2019; Sayadi et al., 2014).

In Figura 4 è mostrato un grafico comparativo fra le fasi della catena di processo che possono essere me-

glio confrontate, ossia perforazione, movimentazione e trasporto materiali, frantumazione grossolana. La macinazione fine/polverizzazione è stata esclusa poiché i valori sono difficilmente sovrapponibili in quanto molto più alti. Le barre di errore (valore medio  $\pm$  deviazione standard) evidenziano inoltre come la dispersione nei dati a disposizione sia molto più alta nel caso della frantumazione. I dati sono visionabili nelle Tabelle MS1, MS3 e MS4 dei Materiali Supplementari.



**Figura 4.** Confronto fra i consumi energetici medi dell'escavazione e della frantumazione grossolana ( $P_{80} \geq 8\text{mm}$ ) con barre di errore.

### 3.1.4. Trasporto di lungo raggio

Lo spostamento dei materiali dalle cave agli impianti di trattamento e/o ai luoghi dove il prodotto finito è utilizzato avviene generalmente in due forme:

- via terra tramite camion o treni merci dedicati;
- via mare o corso d'acqua interno navigabile tramite imbarcazioni di piccola, media o grossa taglia.

Il consumo energetico varia notevolmente a seconda della distanza percorsa e dal mezzo di trasporto utilizzato. In Figura 5 si mostra un confronto fra i consumi energetici e i costi di trasporto al variare di questi due fattori.

I consumi energetici e i costi operativi unitari per chilometro e tonnellata di materiale trasportato sono riportati in Tab MS6-MS7 nei Materiali Supplementari. I diagrammi, in particolare, sono stati costruiti al variare della distanza in km e considerando i valori massimi tra consumi energetici e costi operativi nei dati a disposizione:  $0.365 \text{ kWh t}^{-1} - 0.308 \text{ € t}^{-1}$  per il trasporto su strada tramite camion (Davis et al., 2011); Ko et al., 2018; Borjesson et al., 1996);  $0.194 \text{ kWh t}^{-1} - 0.057 \text{ € t}^{-1}$  per il trasporto su ferrovia (West et al., 2002; Renforth, 2012);  $0.111 \text{ kWh t}^{-1} - 0.023 \text{ € t}^{-1}$  per il trasporto su corso d'acqua navigabile (Renforth et al., 2013a; Ko et al., 2018; Borjesson et al., 1996);  $0.017 \text{ kWh t}^{-1} - 0.002 \text{ € t}^{-1}$  per il trasporto marittimo (IMO, 2000; Renforth, 2012). I risultati sono presentati in Tab MS8 nei Materiali Supplementari.

Il trasporto ferroviario rappresenta una tra le opzioni più preferibile sia dal punto di vista logistico, che energetico che economico (BayRail Alliance, 2021). Nonostante ciò, il trasporto su strada continua a rappresentare circa il 94% del totale dell'energia consumata via terra nell'Unione Europea (EEA, 2018; Lindqvist et al., 2020).

Nel 2017, il 75% circa del trasporto merci nell'Unio-

ne Europea è stato condotto su strada, il 18% circa su ferrovia e solo il 7% tramite corsi d'acqua interni navigabili (Eurostat, 2019). La dipendenza dai combustibili fossili nel settore dei trasporti rappresenta inoltre una realtà ancora difficile da decarbonizzare (Wetzel, 2021).

### 3.2. Costi

Il costo di un processo o di un prodotto può essere influenzato e/o determinato da un insieme di fattori: il paese in cui l'energia è prodotta, il vettore energetico utilizzato per alimentare il processo, la tecnologia scelta, le fluttuazioni dei prezzi, le distanze, la modalità di trasporto, l'uso finale del prodotto.

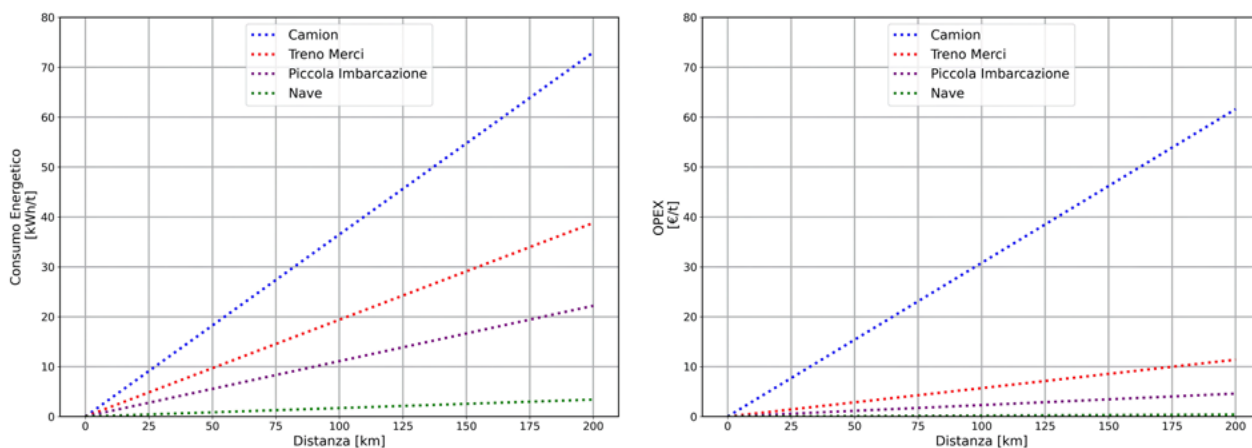
#### 3.2.1 Escavazione

Nelle attività estrattive, la domanda e il prezzo delle risorse naturali sono influenzate all'andamento dei mercati che, a loro volta, risentono di fenomeni come la volatilità dei prezzi e la ciclicità (Hojem, 2014). La geologia del corpo roccioso, il costo del lavoro e il grado di sviluppo socio-economico del paese che detiene il giacimento minerario sono ulteriori parametri incidenti sul prezzo finale della risorsa (Mohutsiwa et al., 2015).

Il grado di frammentazione della roccia e il diametro del foro da praticare sono i due parametri fondamentali nella pianificazione delle attività di perforazione ed esplosione. In termini economici, tanto migliore sarà il livello di frammentazione raggiunta, tanto maggiore saranno i costi.

Di questo aggravio ne beneficeranno tuttavia le attività successive – carico/scarico, trasporto e frantumazione – poiché al diminuire della pezzatura i prodotti diventano di più facile gestione.

Se i minerali risultano, inoltre, molto concentrati in rocce con alto livello di purezza i costi diminuiscono (Ridley, 2013).



**Figura 5.** Andamento dei consumi energetici e dei costi operativi (OPEX) al variare della distanza percorsa e del mezzo di trasporto.

Il costo della perforazione, necessario per posizionare l'esplosivo utilizzato per frantumare la roccia dipende dalla lunghezza totale del foro che si deve praticare, dal numero di fori, dalla velocità di avanzamento della macchina perforatrice, dal costo orario della perforazione, dal tipo di roccia e dallo schema progettuale con cui si intende eseguire la fase di esplosione della roccia.

Il costo di esplosione, a sua volta, dipende dal tipo di esplosivo utilizzato, dal prezzo dell'esplosivo, dal numero di fori previsti, dal quantitativo di esplosivo che si intende inserire in ciascun foro, dalla dimensione di frammentazione della roccia che si vuole ottenere, dal volume di roccia da trattare e dal suo grado di resistenza. Il costo delle successive attività di carico e scarico del materiale estratto dipenderà dal costo orario, dalla capacità e dalle specifiche tecniche della macchina escavatrice utilizzata e dai volumi di roccia da movimentare (Ozdemir et al., 2018).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva di valori massimi, minimi e medi dei costi operativi (OPEX) dell'estrazione suddivisi per tipologia di attività ed il totale. Ulteriori dettagli si trovano in Tabella MS2 nella sezione MS.

In parentesi si riporta il numero di dati a disposizione. Complessivamente in una cava a cielo aperto il costo del trasporto rappresenta il 70% del costo totale, il carico/scarico del materiale il 10%, l'esplosione il 12% e la perforazione l'8% (Mohutsiwa et al., 2015).

Le operazioni di escavazione generano inoltre significative economie di scala. Operazioni a larga scala implicano l'uso di grossi camion (~200 t) e sollevatori ma anche maggiori profitti e ciò causa una diminuzione di prezzi.

### 3.2.2. Lavorazione

I costi sono molto variabili a seconda della riduzione di diametro desiderata, del tipo di macchina utilizzata e sono perlopiù derivanti dal consumo elettrico.

Il range può andare da ~2 € t<sup>-1</sup> per 50 µm di diametro finale a ~80 € t<sup>-1</sup> per 2 µm di diametro finale (Strefler et al., 2018). Si veda Tab MS5 della Sezione MS per ulteriori dettagli.

Come discusso in precedenza, minore è il diametro dei grani del prodotto finale, maggiore è la domanda energetica e quindi il costo operativo legato al lavoro delle macchine.

La polverizzazione di un prodotto può richiedere fino al 90% dei costi operativi e al 60% dei costi investimento iniziale sostenuti da un impianto di frantumazione e macinazione (Sayadi et al., 2014).

L'elettricità inoltre è estremamente variabile a seconda del contesto geografico in cui si colloca il luogo di produzione.

### 3.2.3. Trasporto di lungo raggio

Materiali da costruzione come il calcare o la dolomite vengono valutati economicamente anche in base a delle caratteristiche fisiche e di processo. Il loro essere voluminosi, ingombranti, largamente diffusi, disponibili in natura e necessitanti di lavorazioni poco spinte li classificano come beni di largo consumo a basso valore economico.

Pertanto, risultano vendibili con profitto solo se i centri di produzione sono vicini ai mercati locali e/o ai luoghi di diretto consumo (MPRA, 2007).

In assenza di questa condizione, la voce di costo del trasporto a lungo raggio diventa preponderante rispetto ai costi di produzione.

Dalla Figura 5 si nota come, al pari del consumo energetico, i costi risultino maggiori se il trasporto è condotto su strada e inferiori per trasporti via mare tramite navi di grossa taglia.

## 3.3. Strategie per ottimizzare i consumi energetici

Pur se non sono disponibili sufficienti dati e informazioni per una stima affidabile del risparmio energetico conseguibile in ogni fase, sono riportate in seguito alcune indicazioni su alcuni tipi di interventi possibili.

### 3.3.1. Escavazione

L'efficientamento dei processi di escavazione si rifletterebbe in un aumento della longevità del deposito minerario, in un miglioramento della sua produttività, in minori costi di manutenzione, in un utilizzo

**Tabella 4.** Valori medi, minimi e massimi in € t<sup>-1</sup> del costo operativo attribuibile alla singola attività e all'escavazione totale di una tonnellata di calcare e riolite.

| Attività (numero fonti)                  | OPEX € t <sup>-1</sup> |        |         |
|--|------------------------|--------|---------|
|  | Media                  | Minimo | Massimo |
| Perforazione (2)                         | 0.2                    | 0.06   | 0.4     |
| Esplosione (2)                           | 0.2                    | 0.07   | 0.3     |
| Movimentazione materiali e trasporto (2) | 1.1                    | 0.3    | 1.9     |
| Totale escavazione (2)                   | 1.6                    | 0.5    | 2.6     |

più oculato della manodopera, in una riduzione complessiva delle spese (Holtec, 2011). Come già spiegato, una migliore pianificazione delle attività di esplosione comporta una migliore produttività del *crushing* e del *grinding* poiché particelle di minori dimensioni potrebbero by-passare fasi non necessarie con un conseguente alleggerimento del carico in ingresso per alcune operazioni; nelle attività di carico e scarico materiale si registrerebbero inoltre minori consumi.

Secondo Gorman et al., (2018), l'ottimizzazione dell'esplosione condurrebbe a un 21% di risparmio energetico di cava. Tuttavia, un aggravio in quantitativo e in costo dell'esplosivo per l'efficientamento di questa attività andrebbe valutato con attenzione poiché rimane dubbia l'efficacia garantita da questa fase nel creare il sistema di microfratture che più impatta sul rendimento della macinazione fine (Workman et al., 2009).

L'utilizzo di sistemi di rilevamento satellitari per agevolare la localizzazione dei minerali di scarto (anche detti di ganga), l'introduzione di sistemi automatici per l'espletamento di alcune operazioni come l'utilizzo di macchine perforatrici semi-automatiche o completamente automatiche con reperimento e analisi dei campioni porterebbero a migliorare la frammentazione della roccia e a ridurre la produzione di materiali di scarto (Curry et al., 2014; Holtec, 2019).

Nella movimentazione e trasporto dei materiali di cava l'uso di nastri trasportatori elettrici in connessione automatica con le attività di *crushing* permetterebbe di diminuire il consumo dei combustibili fossili che alimentano la maggior parte delle attrezzature. Sistemi di questo genere sono chiamati *in-pit crushing and conveying*. Un ulteriore esempio è l'impiego di trolley-assist dove il trasporto del materiale avviene su camion alimentati ad elettricità e inseriti in un sistema di viabilità anch'esso elettrico (Jeswiet et al., 2015). Un sistema implementato da Doppelmayer (2021) è chiamato RopeCon® e consiste nel trasporto del calcare frantumato tramite convogliatori tubolari.

### 3.3.2. Lavorazione

Gli studi condotti da Norgate et al., (2010) e USDOE (2007) indicano che sia la fase di frantumazione grossolana che quella fine hanno la potenzialità di ridurre i consumi energetici.

Un concetto-chiave è che i processi che portano alla riduzione di diametro delle particelle non dovrebbero essere il risultato di un unico passaggio ma di una catena di step successivi e separati (Wang et al., 2007).

I materiali di ganga ovvero di scarto, in particolare, non dovrebbero essere trattati insieme al materiale utile ma dovrebbero essere catturati e trattati separatamente. Ciò principalmente per limitare al minimo l'u-

tilizzo delle macchine adibite alla macinazione fine. L'uso di opportuni classificatori garantisce il raggiungimento di tali obiettivi.

In queste fasi, inoltre, la spinta verso l'utilizzo di tecnologie sempre più avanzate è cruciale.

Secondo diversi autori, *High-pressure roller mills (HPRMs)*, *High-pressure grinding rolls (HPGRs)*, *Stirred Media Mills* sono esempi di macchine tecnologicamente avanzate (Norgate et al., 2010; Curry et al., 2014; Wang et al., 2007; Gorman et al., 2018).

Lo studio di Daniel et al., (2010) ha mostrato come la sostituzione di un SAG mill con un HPGR in un tradizionale circuito SAG-Ball porterebbe a percentuali di risparmio del 15-20% in termini di energia, del 23-25% in termini di costo e del 26-39% in emissioni carboniche.

L'utilizzo di mulini a sfere a carica controllata è una soluzione alla sovrapproduzione di ultrafini e alla riduzione dei tempi di macinazione.

Benefici potrebbero inoltre derivare dall'uso combinato di tecnologie diverse. Un esempio è l'applicazione di energia ultrasonica a mulini di tipo *High pressure roller mill*. Hielscher (2021) utilizza macinazione ad umido ad ultrasuoni per il trattamento di carbonati di calcio e di ossidi di metalli. Additivi chimici possono contribuire al miglioramento della reologia del materiale poiché prevengono agglomerazioni di particelle (Wang et al., 2007).

Secondo lo studio condotto da USDOE (2007) almeno un 37% di risparmio energetico potrebbe essere raggiunto se anche il *grinding* e la movimentazione dei materiali fossero ottimizzati in modo da raggiungere il loro minimo pratico, ossia l'energia totale consumata che si otterrebbe se un'attività fosse eseguita applicando le *best practices* ed i miglioramenti derivanti dalle scoperte della ricerca scientifica.

### 3.3.3. Trasporto di lungo raggio

L'ottimizzazione energetica del sistema trasporti a lungo raggio passa inevitabilmente dallo stanziamento di incentivi miranti a far cessare la loro stretta dipendenza dall'uso di combustibili fossili.

Il passaggio all'utilizzo dell'energia elettrica come vettore energetico primario richiede investimenti in infrastrutture adibite alla ricarica e la progettazione di motori che garantiscano tassi di efficienza e competitività più alti rispetto ai tradizionali motori diesel.

Cummins e Tesla sono esempi di industrie attualmente coinvolte nella produzione di veicoli pesanti completamente o in parte elettrici (Hodgkinson et al., 2018).

ABB (2021) invece è un esempio di industria specializzata nella progettazione di sistemi elettrici di movimentazione e trasporto materiali chiamati *electric trolley truck system*.



### 3.3.4. Sostenibilità, gestione dei rifiuti e analisi del ciclo di vita

Da sempre, il massiccio sfruttamento delle risorse naturali e il tipo di operazioni connesse all'industria estrattiva sono stati considerati ambiti di difficile applicabilità delle pratiche sostenibilità (Hojem, 2014; Gorman et al., 2018). Una gestione più pianificata e una migliore organizzazione delle attività risultano elementi indispensabili al cambiamento di passo.

Nello specifico, il concetto di sostenibilità in questo ambito (ODPM, 2005) implica:

- pianificazione delle attività estrattive in un'ottica di circolarità;
- gestione più efficiente del materiale di scarto;
- uso e/o potenziamento delle tecnologie "verdi";
- massimizzazione del riciclo e del riutilizzo di sostanze (es: acqua) utilizzate in alcuni processi;
- transizione dal concetto di ciclo di vita della cava a quello di ciclo di vita del materiale estratto (Gorman et al., 2018);
- collocazione degli impianti di frantumazione nelle vicinanze delle cave in modo da ridurre le distanze;
- utilizzo di sensori per le attività di scavo e di perforazione (Norgate et al., 2010);
- valutazioni e controlli più accurati delle perdite energetiche, specialmente nelle attività di frantumazione e macinazione;
- valutazione più dettagliata sui tassi di efficienza e di riciclo realizzabili nelle varie operazioni;
- impiego di tecniche più precise e avanzate nell'estrazione.

Le cave posizionate in aree remote, potrebbero beneficiare in maniera particolare dell'utilizzo e/o potenziamento del solare e dell'eolico (Hodgkinson et al., 2018). Esiste inoltre un legame di interdipendenza tra le fonti di energia rinnovabile e l'industria estrattiva. Le prime necessitano delle ultime per essere realizzate e queste ultime dipendono dalle prime per far fronte alle fluttuazioni continue nei prezzi dei combustibili fossili dal cui utilizzo risultano dipendenti (Mellman et al., 2020).

### 3.4. Strategie per ottimizzare i costi

Un più diffuso utilizzo di tecnologie avanzate permetterebbe di ridurre in maniera drastica i costi operativi a carico dell'intera catena di processo, ma richiede maggiori costi di investimento.

Nello specifico, l'automatizzazione di una cava così come l'utilizzo di macchine del tipo *HPGR* nella macinazione fine rappresenterebbero dei passaggi chiave nell'abbandono delle strategie tradizionali.

Un approccio di sistema risulta inoltre cruciale. Ottimizzare una singola operazione potrebbe non avere ripercussioni sull'ampia scala. Capire invece le rela-



zioni esistenti tra le varie parti della catena di processo e procedere per ottimizzazioni di sistema permette di massimizzare le riduzioni dei consumi (Ozdemir et al., 2018). La cessazione di sussidi a favore dei combustibili fossili accelererebbe la transizione energetica anche nel settore dell'escavazione (Hodgkinson et al., 2018; IRENA, 2021).

## 4. Conclusioni

Il contrasto al cambiamento climatico impone l'attuazione sia di interventi di decarbonizzazione totale sia di rimozione della  $CO_2$  atmosferica. Per il raggiungimento di quest'ultimo obiettivo, si dovranno utilizzare e trattare ingenti quantitativi (miliardi di tonnellate) di materie prime perlopiù costituite da calcare e rocce ricche in olivina.

I problemi principali derivanti dal loro utilizzo sono la domanda energetica, i costi operativi e di investimento necessari per l'estrazione e la lavorazione e gli impatti ambientali provocati. In fase di escavazione le attività a maggior dispendio energetico e impatto ambientale sono la movimentazione e il trasporto dei materiali all'interno della cava. Il consumo energetico di questa attività è di  $\sim 4 \text{ kWh t}^{-1}$  e rappresenta almeno il 60% del consumo energetico totale di escavazione, che include anche le attività di esplosione e perforazione. I motori a diesel inoltre risultano ad oggi le tecnologie più utilizzate per il trasporto di corto e lungo raggio dei materiali di cava trattati e non (Norgate et al., 2010).

Le fasi di macinazione fine e polverizzazione comportano consumi superiori all'escavazione, qualora

il prodotto finito debba avere granulometrie dell'ordine del micrometro. Tanto maggiore è la riduzione di diametro richiesta, tanto maggiori saranno i consumi energetici prodotti. I consumi energetici medi si aggirano intorno ai 3 kWh t<sup>-1</sup> nella frantumazione grossolana a fronte di una riduzione di diametro di ~1 mm e 126 kWh t<sup>-1</sup> per la macinazione fine con diametri finali di ~20 µm. Un'ulteriore attività ad alto impatto energetico è la calcinazione. I consumi massimi sono in tal caso comparabili a quelli raggiunti nella polverizzazione ultra-fine, ~988 kWh tCaCO<sub>3</sub><sup>-1</sup> (Jenkins, 2003).

Il trasporto di lungo raggio costituisce un ulteriore aggravio di costi e consumi qualora le distanze tra i luoghi di estrazione e i luoghi di trattamento della materia prima o i luoghi di trattamento e di consumo ultimo superino i 100 km e siano effettuati tramite camion alimentati a combustibili fossili. Il consumo per 100 km può raggiungere i 40 kWh t<sup>-1</sup>.

Nonostante ciò, l'utilizzo di tecnologie avanzate sia in fase di escavazione, in particolare nella perforazione, sia in fase di macinazione fine e/o polverizzazione, hanno la potenzialità di imprimere miglioramenti alle prestazioni energetiche e riduzione dei costi operativi di gestione. Lo studio condotto da USDOE (2007)

stima che almeno un 37% di risparmio energetico potrebbe essere raggiunto nella macinazione fine e nella movimentazione dei materiali se ciascuna di queste attività fosse condotta in maniera tale da raggiungere il loro minimo pratico. Il minimo pratico consiste nell'energia totale consumata che si otterrebbe se un'attività fosse eseguita applicando best practices ed i risultati della ricerca scientifica.

Ulteriori strategie consistono nello stanziamento di incentivi a favore dell'elettrificazione, soprattutto nei trasporti, l'utilizzo di fonti rinnovabili in buona sostituzione dei combustibili fossili e una significativa e rapida riduzione dei sussidi a favori di questi ultimi (IRENA, 2021).

Infine, la minimizzazione degli impatti ambientali, la riduzione dei consumi energetici e dei costi produrrebbero risultati limitati se non si intervenisse con un approccio di sistema (Ozdemir, 2018). Ottimizzare una singola operazione comporterebbe infatti scarsi benefici sull'intera catena. Individuare e capire le relazioni esistenti tra le varie parti della catena di processo e lavorare affinché la fase precedente riduca gli oneri energetici della fase successiva sono cruciali per ottenere vantaggi diffusi e di lungo termine. ■

## Riferimenti bibliografici

- 911Metallurgist (2022) High Pressure Grinding Roll, HPGR. Disponibile a: <https://www.911metallurgist.com/equipment/high-pressure-grinding-rolls/>. Consultato in Luglio 2022.
- Abadir M. (2021) CHE 301(A): Unit Operations Chapter 4: Size reduction. Available at: <https://scholar.cu.edu.eg/?q=magdi/classes/che-301a-unit-operations-chapter-4-size-reduction>. Consultato in Agosto 2021.
- ABB (2021) Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Disponibile a: <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>. Consultato in Settembre 2021.
- Alpa (2022) Expert in high-value treatment of calcium carbonate. Disponibile a: [https://caco3.alpapowder.com/?search\\_calcium&campaignid=11874937330&adgroupid=117067011084&feeditemid&targetid=kwd-17543339979&device=c&reative=587782534944&keyword=limestone%20grinding%20mill&gclid=Cj0KCQjw54iXBhCXARIsADWpsG-lPrZTGeuMHI4-ioxaKF9LpptUpmINwAp-CnHUV0VBbPfrhF98UqwaAuP1EALw\\_wcB](https://caco3.alpapowder.com/?search_calcium&campaignid=11874937330&adgroupid=117067011084&feeditemid&targetid=kwd-17543339979&device=c&reative=587782534944&keyword=limestone%20grinding%20mill&gclid=Cj0KCQjw54iXBhCXARIsADWpsG-lPrZTGeuMHI4-ioxaKF9LpptUpmINwAp-CnHUV0VBbPfrhF98UqwaAuP1EALw_wcB). Consultato in Luglio 2022.
- BayRail Alliance (2021) "Why trains?" Disponibile a: [https://www.bayrailalliance.org/why\\_trains/](https://www.bayrailalliance.org/why_trains/). Consultato in Ottobre 2021.
- Beerling D.J., Kantzas E.P., Lomas M.R. et al (2020) Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Bond F. (1961) Crushing and Grinding Calculations, Part I – Part II. *British Chemical Engineering*, 6(6): 378-385; 543-548. Disponibile a: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/11/Bond-F-C-1961-Crushing-and-Grinding-Calculations.pdf>. Consultato in Luglio 2021.
- Borjesson P. e Gustavsson L. (1996). Biomass transportation. *Renewable Energy* 9(1-4): 1033–10336. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88456-4](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88456-4)
- Brown T., Coggan J., Evans J. et al. (2010). Underground Mining of Aggregates. Mineral Industries Research Organization. Disponibile a: <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/56411.pdf>.
- Butenschön M., Lovato T., Masina S. et al. (2021) Alkalinization Scenarios in the Mediterranean Sea for Efficient Removal of Atmospheric CO<sub>2</sub> and the Mitigation of Ocean Acidification. *Frontiers in Climate*,

- Sec. Negative Emission Technologies, 3, 614537  
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.614537>
- Caserini S., Storni N. e Grosso M. (2022) The Availability of Limestone and Other Raw Materials for Ocean Alkalinity Enhancement. *Global Biogeochemical Cycles*, 35 (5).  
<https://doi.org/10.1029/2021GB007246>
  - Caserini S., Cappello G., Righi D., Raos G. et al (2021b) Buffered accelerated weathering of limestone for storing CO<sub>2</sub>: Chemical background. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 112, 103517.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103517>
  - Caserini S., Pagano D., Campo F. et al (2021a) Potential of Maritime Transport for Ocean Liming and Atmospheric CO<sub>2</sub> Removal. *Frontiers in Climate, Sec. Negative Emission Technologies*, 22, 575900.  
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.575900>
  - Cemex (2021). How Cement is Made. Disponibile a: <https://www.cemex.co.uk/cement-production-process.aspx>. Consultato in Agosto 2021.
  - CIPEC (2005). Benchmarking the energy consumption of Canadian open-pit mines. Canadian Industry Program for Energy Conservation, Mining Association of Canada, Natural Resources, Canada. Disponibile a: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/publications/industrial/mining/open-pit/Open-Pit-Mines-1939B-Eng.pdf>. Consultato in Luglio 2021.
  - Curry J., Ismay M. e Jameson G. (2014). Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. *Minerals Engineering* 56: 70-80.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.02>
  - Daniel M., Lane G. and McLean E. (2010). Efficiency, economics, energy and emissions-emerging criteria for comminution circuit decision making. XXV International Mineral Processing Congress 2010. Brisbane, Australia, 6-10 September 2010.
  - Darton R.C. e Yang A. (2018) Removing Carbon Dioxide from the Atmosphere – Assessing the Technologies. *Chemical Engineering Transactions*, 69: 91-96. <https://doi.org/10.3303/CET1869016>
  - Davis S., Diegel S., Boundy R. (2011). Transportation Energy Data Book. Edition 31. Center for Transportation Analysis: Energy and Transportation Science Division. [https://tedb.ornl.gov/wp-content/uploads/2019/03/Edition31\\_Full\\_Doc.pdf](https://tedb.ornl.gov/wp-content/uploads/2019/03/Edition31_Full_Doc.pdf)
  - Doppelmayr (2021) An innovative conveying system for difficult terrain. Doppelmayr Transport Technology. Disponibile a: <https://www.doppelmayr.com/products/ropecon/>. Consultato in Agosto 2021.
  - EEA (2018) Sectoral Profile – Transport. Disponibile a: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/>. Consultato in Settembre 2021.
  - EU (2020) Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report (2020). European Commission. Disponibile a: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en). Consultato in Luglio 2022.
  - Eula (2014) A competitive and efficient lime industry. Cornerstone for a Sustainable Europe. Technical Report. European Lime Association. Disponibile a: [https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/02/A-Competitive-and-Efficient-Lime-Industry-Technical-report-by-Ecofys\\_0.pdf](https://www.eula.eu/wp-content/uploads/2019/02/A-Competitive-and-Efficient-Lime-Industry-Technical-report-by-Ecofys_0.pdf). Consultato in Luglio 2022.
  - Eurostat (2019) Energy, transport and environment statistics. 2019 edition. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/10165279/KS-DK-19-001-EN-N.pdf/76651a29-b817-eed4-f9f2-92bf692e1ed9>. Consultato in Novembre 2021.
  - FTM (2022) Limestone Grinding Mill. Fote Heavy Machinery. Disponibile a: <https://www.environmental-expert.com/products/ftm-limestone-grinding-mill-681626> Consultato in Luglio 2022.
  - Goll D.S., Ciais P., Amann T., Buermann W et al. (2021) Potential CO<sub>2</sub> removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nature Geoscience*, 14: 545–549. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>
  - Gorman M. e Dzombak D. (2018). A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. *Resources, Conservation and Recycling* 137: 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>
  - Hangx S. e Spiers J. (2009). Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: A critical analysis of viability. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3: 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.001>
  - Hielscher (2021). Ultrasonic Wet-Milling and Micro-Grinding. Hielscher Ultrasound Technology. Disponibile a: [https://www.hielscher.com/mill\\_01.htm](https://www.hielscher.com/mill_01.htm).
  - Hodgkinson J. e Smith M. (2018). Climate change and sustainability as drivers for the next mining and metals boom: The need for climate-smart mining and recycling. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.01>
  - Hojem, P. (2014). Making Mining sustainable: overview of private and public responses. Report

- published by Luleå University of Technology.  
Disponibile a: [https://www.ltu.se/cms\\_fs/1.124549!/file/rapport%20making%20mining%20sustainable%20low.pdf](https://www.ltu.se/cms_fs/1.124549!/file/rapport%20making%20mining%20sustainable%20low.pdf). Consultato in Agosto 2021.
- Holtec (2011). Quarry Optimisation. Holtec Consulting India. Disponibile a: <http://www.holtecnnet.com/index.php?id=73>. Consultato in Agosto 2021.
  - Holtec (2019). The changes in production technology, and what comes next? Holtec Consulting India. A collection of essays and recollections on the occasion of INTERCEM 100. Disponibile a: <http://www.holtecnnet.com/index.php?id=73>. Consultato in Agosto 2021.
  - IPCC (2022) IPCC's Sixth Assessment Report (AR6), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Working Group III contribution: Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponibile a: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>. Consultato in Luglio 2022.
  - IQ (2021). What is the Quarrying Process? The Institute of Quarrying. Disponibile a: <https://www.quarrying.org/about-quarrying/quarrying-explained>. Accesso nel Luglio 2021.
  - IRENA (2021) World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponibile a: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications). Consultato in Settembre 2021.
  - Jenkins (2003) What are shaft kilns for lime manufacture. IFRF Online Combustion Handbook. International Flame Research Foundation.
  - Jeswiet J., Archibald J., Thorley, U. et al (2015) Energy Use in Premanufacture (Mining). Procedia CIRP 29: 816 – 821 The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.071>
  - Kleemann (2022) Tecnica di frantumazione. Disponibile a: <https://www.wirtgen-group.com/it-it/prodotti/kleemann/tecnologie/tecnica-di-frantumazione/>. Consultato in Luglio 2022.
  - Ko S., Lautala P. e Handler R. (2018) Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics. Journal of Cleaner Production 200:205–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.241>
  - Lindqvist D., Salman M. e Bergqvist R. (2020). A cost benefit model for high-capacity transport in a comprehensive line-haul network. European Transport Research Review 12(60). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00451-5>
  - Mellman, J., East, D., e Knight, A. (2020) Mining and Renewable energy -- a greener way forward. Disponibile a: <https://renewablesnow.com/news/mining-renewable-energy-a-greener-way-forward-721937/>. Consultato in Agosto 2021.
  - Metso (2010) Basics in Mineral Processing, 7<sup>th</sup> Edition. Metso Corporation.
  - Metso: Outotec (2021). Basics in Minerals Processing. 12th edition. Metso Outotec Corporation. Disponibile a: <https://www.mogroup.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/> Consultato in Agosto 2022.
  - MIE (2022) Personal Communication. Minerali Industriali Engineering. [www.mineraliengineering.it](http://www.mineraliengineering.it)
  - Mitchell C., Mitchell P. and Pascoe R. (2008). Quarry fine minimisation: can we really have 10 mm aggregate with no fines? Walton, G. (Ed.) Proceedings of the 14th Extractive Industry Geology Conference (p. 37-44). EIG Conferences, 109p.
  - Mohutsiwa M. e Musingwini C. (2015). Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(8):789-797. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A17>
  - MPRA (2007). The Economic Value of Industrial Minerals and Rocks for Developing Countries: A Discussion of Key Issues. MPRA Paper N. 2214. Munich Personal RePEc Archive. Disponibile a: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/2214>. Consultato in Luglio 2021.
  - Norgate T. e Haque N. (2010) Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. Journal of Cleaner Production 18(3): 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
  - O'Connor W., Dahlin D., Rush G. et al (2005). Aqueous mineral carbonation: mineral availability, pretreatment, reaction parameters, and process studies. DOE/ARC-TR-04-002, 2005. doi:10.13140/RG.2.2.23658.31684
  - ODPM (2005) Future issues for sustainable mineral extraction. Minerals Matters – 12. Office of the Deputy Prime Minister. Disponibile a: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/mineralsYou/mineralsEnvironment.html>. Consultato in Luglio 2022.
  - OEERE (2002a) ITP Mining: Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry. Chapter 1 – Mining Overview. Industrial Technology Program. US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponibile a: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>. Consultato in Luglio 2021.

- OEERE (2002b) ITP Mining: Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry. Chapter 9 – Limestone and Crushed Rock. Industrial Technology Program. US Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponibile a: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>. Consultato in Luglio 2021.
- Ozdemir B. e Kumral M. (2018). A system-wide approach to minimize the operational cost of bench production in open-cast mining operations. *International Journal of Coal Science and Technology* 6: 84–94. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0234-1>
- ProjectVesta (2021) Olivine and Dunite Reserves and their position in ophiolites. Disponibile a: <https://legacy.projectvesta.org/wiki/olivine-and-dunite-reserves-and-their-position-in-ophiolites/>. Consultato in Dicembre 2021.
- Prya Cement (2022) Limestone crushing. Disponibile a: <https://www.priyacement.com/products/processes2.html>. Consultato in Luglio 2022.
- Renforth P. (2012) The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10: 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.011>
- Renforth P, e Kruger T (2013b). Coupling Mineral Carbonation and Ocean Liming. *Energy and Fuel*, 47: 4199-4207. <https://doi.org/10.1021/ef302030w>
- Renforth P, Jenkins B. e Kruger T. (2013a). Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 60: 442-452. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.006>
- Ridley J. (2013) *Ore Deposit Geology*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>
- Rinder T. e von Hagke C. (2021). The influence of particle size on the potential of enhanced basalt weathering for carbon dioxide removal – Insights from a regional assessment. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128178. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128178>
- RM Group (2022) Dominate Your Jobsite With a RUBBLE MASTER Limestone Crusher. Mobile Jaw and Impact Crusher. Disponibile a: <https://www.rubblemaster.com/us/materials/natural-rock/limestone>. Consultato in Luglio 2022.
- Sanme (2022) Do You Know the Use of Limestone Crusher? Disponibile a: <http://sanmechina.com/Do-You-Know-the-Use-of-Limestone-Crusher.html>. Consultato in Luglio 2022.
- Sayadi A., Khalesi M. e Borji, M. (2014). A parametric cost model for mineral grinding mills. *Minerals Engineering* 55: 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.013>
- Schenck Process (2022) Raymond® Roller Mill. Disponibile a: <https://www.schenckprocess.com/technologies/milling-grinding/mills/Raymond-Roller-Mill>. Consultato in Luglio 2022
- Strefler J., Amann T., Bauer N. et al. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letter* 13 (3): 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- USDOE (2007) Mining Industry Energy Bandwidth Study. Technical Report. US Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Energy Efficiency Office, Advanced Manufacturing Office. United States. Disponibile a: <https://doi.org/10.2172/1218653>. Consultato in Luglio 2022.
- USGS (2021) How do we extract minerals? US Geological Survey. Disponibile a: [https://www.usgs.gov/faqs/how-do-we-extract-minerals?qt-news\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/how-do-we-extract-minerals?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products). Consultato in Dicembre 2021.
- Wang Y. e Forssberg E. (2007) Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution. *China Particology*, 5, 3, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.04.003>
- Wang Y. e Forssberg E. (2003). International Overview and Outlook on Comminution Technology. Luleå Universitet: Department of Chemical Engineering and Geosciences. Report pubblicato da Swedish Mineral Processing Research Association, Stoccolma. Disponibile a: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997848/FULLTEXT01.pdf> Consultato in Ottobre 2022.
- West T. e Marland G. (2002) A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems and Environment* 91(1-3):217-232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)
- Wetzel B. (2021) Key Challenges of Alternative Energy Use in Transportation. Disponibile a: <https://www.breakthroughfuel.com/blog/challenges-of-alternative-energy-in-transportation>. Consultato in Novembre 2021.
- Workman L., e Eloranta J. (2003). The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption. Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique..

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

## FINALE DI PARTITA SUL CLIMA: ESPLORARE GLI SCENARI CATASTROFICI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

**Luke Kemp<sup>a,b,\*</sup>, Chi Xu<sup>c</sup>, Joanna Depledge<sup>d</sup>, Kristie L. Ebi<sup>e</sup>, Goodwin Gibbins<sup>f</sup>, Timothy A. Kohler<sup>g,h,i</sup>, Johan Rockström<sup>j</sup>, Marten Scheffer<sup>k</sup>, Hans Joachim Schellnhuber<sup>i,l</sup>, Will Steffen<sup>m</sup>, and Timothy M. Lenton<sup>n</sup>**

<sup>a</sup> Centre for the Study of Existential Risk, University of Cambridge, United Kingdom.

<sup>b</sup> Centre for the Study of Existential Risk, e Darwin College, University of Cambridge, United Kingdom.

<sup>c</sup> School of Life Sciences, Nanjing University, China.

<sup>d</sup> Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance, University of Cambridge, , United Kingdom.

<sup>e</sup> Center for Health and the Global Environment, University of Washington, Seattle, USA.

<sup>f</sup> Future of Humanity Institute, University of Oxford, United Kingdom.

<sup>g</sup> Department of Anthropology, Washington State University, Pullman, USA.

<sup>h</sup> Santa Fe Institute, Santa Fe, USA.

<sup>i</sup> Cluster of Excellence ROOTS – Social, Environmental, and Cultural Connectivity in Past Societies, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany.

<sup>j</sup> Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.

<sup>k</sup> Department of Environmental Sciences, University of Wageningen, The Netherlands.

<sup>l</sup> Earth System Science Department, Tsinghua University, Beijing, China.

<sup>m</sup> Fenner School of Environment and Society, The Australian National University, Canberra, Australia.

<sup>n</sup> Global Systems Institute, University of Exeter, United Kingdom.

### Sommario

Una gestione prudente del rischio richiede di prendere in considerazione gli scenari che rappresentano i casi peggiori. Eppure, riguardo ai cambiamenti climatici, tali futuri potenziali sono poco compresi. I cambiamenti climatici di origine antropica potrebbero causare un collasso della società su scala globale o un'eventuale estinzione dell'umanità? Fino a oggi questo è rimasto un argomento pericolosamente inesplorato. Tuttavia, ci sono buoni motivi per sospettare che i cambiamenti climatici possano provocare una catastrofe globale. Analizzare i meccanismi alla base di queste conseguenze estreme potrebbe contribuire a galvanizzare l'azione, migliorare la resilienza e fornire informazioni ai decisori politici, anche riguardo alle misure di emergenza. Accenniamo alle conoscenze attuali sulle probabilità di cambiamenti climatici estremi, trattiamo del perché è di importanza vitale capire i casi peggiori, mostriamo i motivi per cui preoccuparsi di sviluppi catastrofici, definiamo i

termini chiave e proponiamo un programma di ricerca. Il programma prende in esame quattro grandi domande: 1) Che possibilità hanno i cambiamenti climatici di innescare eventi di estinzione di massa? 2) Quali sono i meccanismi che possono causare nell'umanità morbidità e mortalità di massa? 3) Quali sono i punti deboli delle società umane rispetto ai rischi a cascata innescati dai cambiamenti climatici, come quelli derivanti da conflitti, instabilità politica e rischi finanziari sistemici? 4) Come sintetizzare utilmente queste molteplici evidenze – insieme ad altri pericoli globali – in una “valutazione integrata della catastrofe”? È ora che la comunità scientifica affronti la sfida di una migliore comprensione dei cambiamenti climatici catastrofici.

**Parole chiave:** *cambiamenti climatici catastrofici, cambiamenti climatici, traiettorie del sistema Terra, Antropocene; punti critici.*

## CLIMATE ENDGAME: EXPLORING CATASTROPHIC CLIMATE CHANGE SCENARIOS

### Abstract

Prudent risk management requires consideration of bad-to-worst-case scenarios. Yet, for climate change, such potential futures are poorly understood. Could anthropogenic climate change result in worldwide societal collapse or even eventual human extinction? At present, this is a dangerously underexplored topic. Yet there are ample reasons to suspect that climate change could result in a global catastrophe. Analyzing the mechanisms for these extreme consequences could help galvanize action, improve resilience, and inform policy, including emergency responses. We outline current knowledge about the likelihood of extreme climate change, discuss why understanding bad-to worst cases is vital, articulate

reasons for concern about catastrophic outcomes, define key terms, and put forward a research agenda. The proposed agenda covers four main questions: 1) What is the potential for climate change to drive mass extinction events? 2) What are the mechanisms that could result in human mass mortality and morbidity? 3) What are human societies' vulnerabilities to climate triggered risk cascades, such as from conflict, political instability, and systemic financial risk? 4) How can these multiple strands of evidence – together with other global dangers – be usefully synthesized into an “integrated catastrophe assessment”? It is time for the scientific community to grapple with the challenge of better understanding catastrophic climate change.

**Keyword:** *catastrophic climate change, climate change, Earth system trajectories; Anthropocene, tipping elements.*

### Introduzione

Quanto possono peggiorare i cambiamenti climatici? Già nel 1988 la dichiarazione scaturita dalla Conferenza di Toronto, che rappresenta una pietra miliare, descriveva le conseguenze ultime dei cambiamenti climatici come potenzialmente “secondo solo a una guerra nucleare globale”. Nonostante l'allarme lanciato decenni fa, la catastrofe climatica è relativamente poco studiata e pochissimo compresa.

La possibilità di impatti catastrofici dipende dalla magnitudine e dalla velocità dei cambiamenti climatici, dai danni inflitti ai sistemi planetari e umani, e dalla vulnerabilità e dalla reattività dei sistemi colpiti. Gli estremi di questi fenomeni, come un aumento brusco delle temperature e gli impatti a cascata, non sono stati esaminati a sufficienza. Come notato dall'IPCC, il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, sono state realizzate poche stime quantitative degli impatti globali aggregati derivanti da un riscaldamento di 3°C o più (1). Anche un'analisi testuale dei rapporti dell'IPCC ha mostrato che gli studi relativi ad aumenti di 3°C o più sono troppo poco rappresentati in relazione alla loro probabilità (2). L'analisi indica anche che nel tempo l'oggetto degli studi contenuti nei rapporti dell'IPCC si sia spostato verso aumenti di 2°C o inferiori <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002876>. La ricerca si è concentrata sugli impatti degli aumenti di temperatura di 1,5°C e 2°C, e sono pochi gli studi su gli impatti climatici potrebbero ripercuotersi a cascata o innescare crisi più grandi.

Una valutazione accurata dei rischi dovrebbe considerare come questi si diffondono, interagiscono, si amplificano e vengono aggravati dalle reazioni uma-

ne (3), ma neanche le più semplici analisi dei “rischi compositi” generati dall'interazione dei rischi climatici con le cause dei cambiamenti climatici vengono usate a sufficienza. Eppure, è così che i rischi si concretizzano nel mondo reale. Per esempio, un ciclone distrugge le infrastrutture elettriche rendendo la popolazione vulnerabile a una successiva ondata di calore letale (4). Recentemente abbiamo visto rischi compositi emergere tra i cambiamenti climatici e la pandemia di COVID-19 (5). Come sottolineato dall'IPCC, i rischi climatici stanno diventando più complessi e difficili da gestire e si stanno ripercuotendo a cascata in diverse regioni e in diversi settori (6).

Perché ci si è concentrati sui valori più bassi di riscaldamento e su analisi semplici dei rischi? Un motivo è lo standard di riferimento degli obiettivi internazionali: l'obiettivo dell'Accordo di Parigi di limitare il riscaldamento ben al di sotto dei 2°C, con l'aspirazione di 1,5°C. Un'altra ragione è che la scienza del clima tende a “peccare di scarsa drammaticità” (7), a non essere allarmista, e a questo si aggiunge il processo dell'IPCC basato sul consenso (8). Le valutazioni complesse dei rischi, pur essendo più realistiche, sono anche le più difficili.

Questa cautela è comprensibile, eppure è inadeguata ai rischi e ai danni potenziali. Sappiamo che l'aumento delle temperature ha una distribuzione “coda grassa”: eventi estremi con bassa probabilità e alto impatto (9). È probabile che i danni non siano lineari e abbiano code ancora più pesanti (10). La posta è troppo alta per astenersi dall'esaminare gli scenari ad alto impatto e bassa probabilità. La pandemia di COVID-19 ha sottolineato il bisogno di tenere in considerazione e prepararci a rischi globali infrequenti ad

alto impatto e ai pericoli sistemici che possono derivarne. Una gestione prudente dei rischi richiede di valutare scrupolosamente gli scenari dei casi peggiori. Il programma di ricerca “Finale di partita sul clima” (Climate endgame) che abbiamo proposto mira a esplorare direttamente i rischi peggiori associati ai cambiamenti climatici di origine antropica. Per presentarlo riassumiamo le evidenze sulla probabilità di cambiamenti estremi, vediamo perché è di importanza vitale esplorare gli scenari relativi ai casi peggiori, suggeriamo motivi di preoccupazione per una catastrofe, definiamo i termini chiave e poi spieghiamo i quattro aspetti fondamentali del programma di ricerca.

### I cambiamenti climatici peggiori

Nonostante trent'anni di sforzi ed alcuni progressi nell'ambito della Convenzione Quadro della Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico (UNFCCC), le emissioni di gas serra di origine antropica continuano ad aumentare. Anche senza considerare le risposte ai cambiamenti climatici peggiori, l'attuale traiettoria avvia il mondo a un aumento della temperatura tra 2,1°C e 3,9°C entro il 2100 (11). Se tutti i contributi determinati a livello nazionale (NDC) per gli anni Trenta di questo secolo fossero rispettati, ci si aspetta entro il 2100 un riscaldamento di 2,4°C (da 1,9°C a 3,0°C). Mantenere tutti gli impegni a lungo termine e raggiungere questi obiettivi potrebbe ridurre a 2,1°C (da 1,7°C a 2,6°C) (12). Persino queste assunzioni ottimistiche portano a traiettorie pericolose per il sistema Terra. Temperature di oltre 2°C sopra i valori preindustriali non si sono viste sulla superficie terrestre dal Pleistocene (o da più di 2,6 milioni di anni fa) (13).

Anche se le emissioni di gas serra di origine antropica cominciassero a diminuire presto, non sarebbe esclusa la possibilità futura di alte concentrazioni di gas serra o di cambiamenti climatici estremi, in particolare dopo il 2100. Ci sono dei feedback nel ciclo del carbonio e potenziali punti critici che potrebbero generare alte concentrazioni di gas serra (14), che spesso non rientrano nei modelli. Alcuni esempi comprendono lo scioglimento del permafrost artico che rilascia metano e CO<sub>2</sub> (15), l'emissione di carbonio dovuta a intense siccità e a incendi in Amazzonia (16), e l'evidente rallentamento dei feedback mitiganti come la capacità naturale di assorbimento del carbonio (17, 18). Questi feedback probabilmente non saranno proporzionali al riscaldamento, come a volte si assume. Invece, cambiamenti improvvisi e/o irreversibili possono innescarsi al raggiungimento di una certa soglia di temperatura. Tali cambiamenti sono evidenti negli archivi geologici della Terra, e il loro impatto ha avuto ricadute a cascata sui sistemi climatici-ecologici-so-

ciali interconnessi (19). Particolarmente preoccupante è una “cascata di punti critici” nella quale più elementi critici (“tipping elements”) interagiscono in modo tale che il superamento di una soglia accresce le probabilità di superarne un'altra (20). L'aumento di temperatura è fortemente dipendente dalle dinamiche globali del sistema Terra, non solo dalla traiettoria delle emissioni di origine antropica.

Nei modelli esistenti è evidente la possibilità che si raggiungano punti critici e alte concentrazioni nonostante una diminuzione delle emissioni di origine antropica. La variabilità tra gli ultimi modelli climatici del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) porta ad una sovrapposizione fra i diversi scenari. Per esempio, il risultato del quartile superiore (75°) dello scenario “A metà strada” (Shared Socioeconomic Pathway 3-7.0, o SSP3-7.0) è significativamente più caldo del quartile inferiore (25°) dello scenario con le emissioni più alte (SSP5-8.5). Le differenze di temperatura regionali tra i modelli possono superare valori tra 5°C e 6°C, in particolare nelle zone polari, nelle quali è possibile un superamento di diversi punti critici (si veda l'Appendice nel Materiale Supplementare).

Ci sono feedback ancora più incerti che, nel caso peggiore, potrebbero amplificare gli impatti fino a una transizione irreversibile a uno stato di “Terra serra riscaldata” (21) (sebbene feedback negativi potrebbero contribuire ad attenuare gli impatti sul sistema Terra). In particolare, i poco compresi feedback legati alle nubi potrebbero innescare un riscaldamento globale improvviso e irreversibile (22). Tali effetti rimangono inesplorati e in gran parte costituiscono “incognite ignote” ancora speculative e da scoprire. Per esempio, recenti simulazioni suggeriscono un'improvvisa scomparsa dei banchi di stratocumuli a concentrazioni di CO<sub>2</sub> che potrebbero essere raggiunte entro la fine del secolo, causando un riscaldamento globale aggiuntivo di circa 8°C (23). Grandi incertezze riguardo a sorprese pericolose sono un motivo per farle diventare prioritarie invece di trascurarle.

Recenti scoperte sulla sensibilità climatica all'equilibrio (ECS) (14, 24) sottolineano che la magnitudine dei cambiamenti climatici sarebbe incerta anche se conoscessimo le concentrazioni di gas serra future. Secondo l'IPCC, la nostra stima migliore per l'ECS è un aumento della temperatura di 3°C per raddoppio della CO<sub>2</sub> con un range “probabile” tra 2,5°C e 4°C (tra il 66% e 100% di probabilità). Dato che un ECS inferiore a 1,5°C è stato di fatto escluso, rimane un 18% di probabilità che possa essere superiore a 4,5°C (14). La distribuzione dell'ECS ha una “coda grassa”, con una probabilità di valori molto alti superiore a quella per valori molto bassi.



C'è un'incertezza significativa anche riguardo al futuro delle emissioni di gas serra di origine antropica. Il Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5, ora SSP5-8.5), il percorso con le emissioni più alte utilizzato negli scenari dell'IPCC, è quello che più si avvicina alle emissioni globali fino a oggi (25). Questo potrebbe non essere lo scenario che ci aspetta, a causa della forte riduzione dei prezzi delle energie rinnovabili e delle risposte politiche (26). Eppure, restano motivi di cautela. Per esempio, c'è un'incertezza significativa su variabili chiave come la domanda di energia e la crescita economica. È plausibile che tassi di crescita economica più alti possano portare ad un aumento del 35% della probabilità dello scenario RCP8.5 (27).

### **Perché esplorare la catastrofe climatica?**

Perché ci servono informazioni riguardo a plausibili casi peggiori? Per prima cosa, la gestione dei rischi e un solido processo decisionale in condizioni di incertezza richiedono una conoscenza dei casi estremi. Per esempio, il criterio Minimax (minimizzazione della massima perdita possibile) valuta le politiche in base ai loro risultati peggiori (28). È un approccio particolarmente appropriato per le aree caratterizzate da incertezze e “rischi estremi” elevati [NdR: il termine “tail risks” è stato tradotto con “rischi estremi”, ad indicare i rischi molto rilevanti associati a bassi livelli di probabilità che sono rappresentati dalle code delle distribuzioni di probabilità delle variabili climatiche, come temperature o precipitazioni intense]. La traiettoria delle emissioni, le concentrazioni future, il riscaldamento futuro e gli impatti futuri sono tutti caratterizzati da incertezza. Cioè, non possiamo oggettivamente assegnare delle probabilità ai diversi esiti (29). I danni climatici rientrano nell'ambito della “profonda incertezza”: non conosciamo le probabilità relative ai diversi esiti, l'esatta catena di cause ed effetti che li precede e nemmeno l'estensione, la tempistica o la desiderabilità di questi esiti (30). L'incertezza, profonda o no, è un motivo di cautela e vigilanza, non di noncuranza.

Gli impatti catastrofici, anche se improbabili, hanno importanti implicazioni per l'analisi economica, la creazione di modelli e le risposte della società (31, 32). Per esempio, il riscaldamento estremo e i danni conseguenti possono fare aumentare significativamente i costi sociali del carbonio (31). Comprendere le vulnerabilità e le risposte delle società umane può fornire informazioni ai decisori politici per prevenire crisi sistemiche. Alcuni indicatori delle variabili chiave possono fornire segnali di allerta tempestivi (33).

Conoscere i casi peggiori può costringere ad agire, come successe per l'idea di “inverno nucleare” che nel

1983 galvanizzò la preoccupazione dei cittadini e gli sforzi per un disarmo nucleare. Esplorare scenari di rischi gravi e temperature più elevate potrebbe consolidare un rinnovato impegno a rispettare un limite tra 1,5°C e 2°C, in quanto opzione “meno spiacevole” (34).

Comprendere gli scenari climatici catastrofici può anche fornire informazioni utili alle azioni politiche, comprese le misure di emergenza e di “ultima spiaggia” come la gestione della radiazione solare (SRM) e l'iniezione di aerosol nella stratosfera (SAI) per riflettere la luce solare (35). Il fatto di ricorrere o no a tali misure dipende dai profili di rischio degli scenari di cambiamento climatico e di SRM. Una recente analisi del potenziale rischio catastrofico della SAI ha rilevato che gli impatti diretti e sistemici non sono stati sufficientemente studiati (36). Il pericolo principale sembra derivare dallo “shock finale”: un improvviso e rapido riscaldamento nel caso di un arresto del sistema SAI. Quindi la SAI cambia la distribuzione dei rischi: l'esito mediano potrebbe essere migliore per il cambiamento climatico che sta compensando, ma la sua “coda grassa” potrebbe essere peggiore del riscaldamento (36).

Una comprensione più corretta dei cambiamenti climatici catastrofici faciliterebbe altri interventi. A livello internazionale, per esempio, potrebbe esserci “un trattato sui rischi estremi”: un accordo o protocollo che attiva impegni e procedure più stringenti quando si raggiungono indicatori di un cambiamento brusco potenziale.

### **Il potenziale per una catastrofe climatica**

Ci sono 4 motivi cruciali per cui preoccuparsi della possibilità di una catastrofe climatica globale. Primo, ci sono gli avvertimenti che ci vengono dalla storia. In passato i cambiamenti climatici (sia regionali che globali) hanno avuto un ruolo nel collasso o nella trasformazione di numerose società (37), e in ognuno dei cinque eventi di estinzione di massa nella storia della Terra verificatisi nel Fanerozoico (38). L'attuale spinta data dal carbonio si sta verificando a una velocità che non ha precedenti nella storia geologica, entro la fine del secolo le concentrazioni potrebbero superare soglie che hanno innescato precedenti estinzioni di massa (39, 40). Gli scenari peggiori nel rapporto dell'IPCC prevedono per il XXII secolo temperature che sono state così alte all'inizio dell'Eocene, ribaltando nell'arco di due secoli 50 milioni di anni con climi più freddi (41).

Questo è particolarmente allarmante, dato che le società umane si sono adattate localmente a una specifica nicchia climatica. L'inizio di società agricole urbanizzate su larga scala risale al passaggio al clima

stabile dell'Olocene circa 12.000 anni fa (42). Da allora la densità della popolazione umana ha avuto un picco all'interno di una ristretta fascia di variazione delle temperature, con media annuale di circa 13°C. Persino oggi i centri economicamente più produttivi delle attività umane sono concentrati in queste aree (43). Gli impatti cumulativi del riscaldamento potrebbero superare la capacità di adattamento delle società.

Secondo, i cambiamenti climatici potrebbero innescare direttamente altri rischi catastrofici, come quello di conflitti internazionali, o di aumento della diffusione di malattie infettive o ripercussioni di vario genere. Questi fattori potrebbero essere potenti moltiplicatori delle minacce estreme.

Terzo, i cambiamenti climatici potrebbero esacerbare le vulnerabilità e causare stress multipli indiretti (come danni economici, perdita di suolo e insicurezza idrica e alimentare) che si fondono dando origine a malfunzionamenti contemporanei a livello sistemico. Questo è il percorso del rischio sistemico. Durante questi "guasti sincronizzati" tendono a verificarsi delle crisi che si estendono oltre i confini di paesi e sistemi, come successo con la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (44). È plausibile che un improvviso cambiamento del clima possa innescare guasti sistemici che porterebbero al crollo delle società in tutto il mondo.

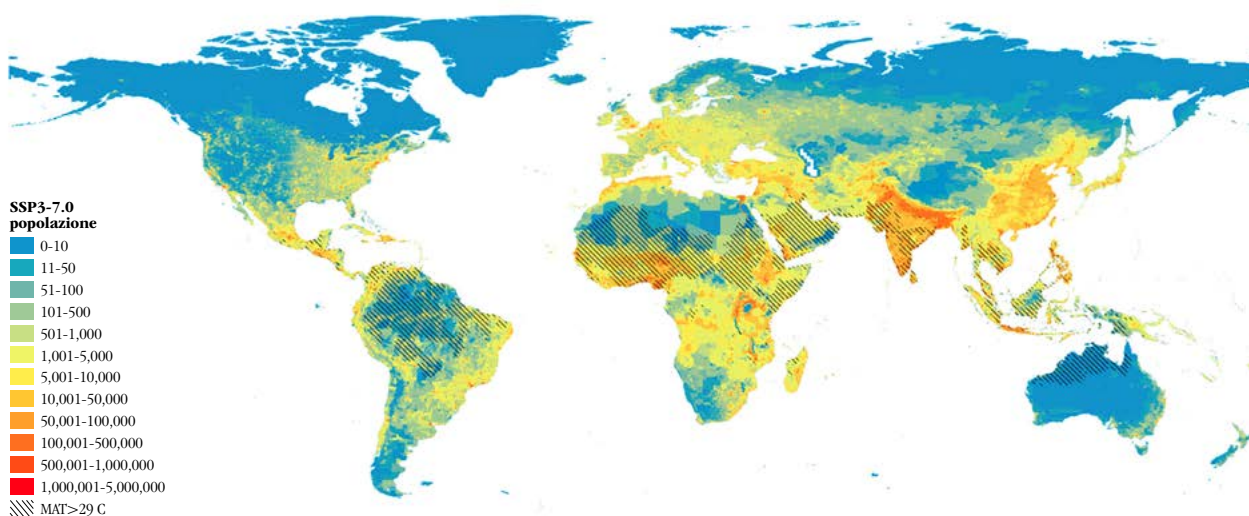
C'è un netto potenziale di rischio climatico sistemico: gli stati e le comunità più vulnerabili continueranno a subire gli impatti peggiori in un mondo in via di riscaldamento, e questo porterà a un esacerbarsi delle disuguaglianze. La Figura 1 mostra come la densità di popolazione prevista si interseca con gli estremi di una temperatura media annuale (TMA) superiore ai 29°C (temperature simili sono attualmente limitate allo

0,8% della superficie del suolo terrestre). Utilizzando lo scenario medio-alto delle emissioni e della crescita demografica (SSP3-7.0 per le emissioni, e SSP3 per la crescita demografica), entro il 2070 si prevede che circa due miliardi di persone vivranno in queste aree estremamente calde. Attualmente ci vivono solo 30 milioni di persone, principalmente nel deserto del Sahara e sulla costa del Golfo persico (43).

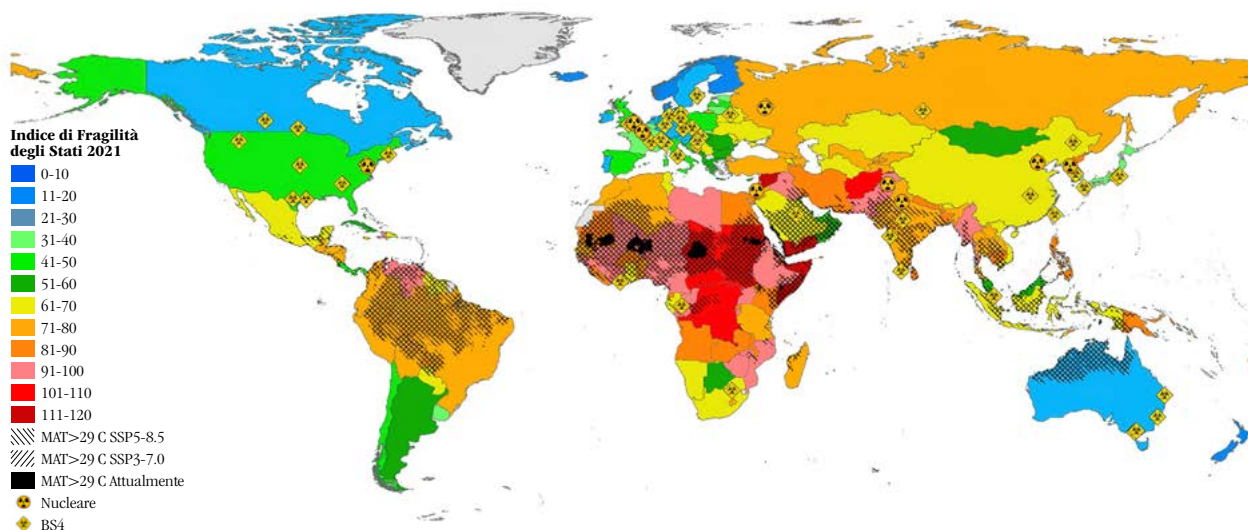
Le temperature estreme combinate con alti tassi di umidità possono influenzare negativamente la produttività di coloro che lavorano all'aperto e la resa delle principali coltivazioni di cereali. Queste condizioni di calore letale potrebbero colpire in maniera significativa le aree popolate nell'Asia meridionale e sudoccidentale (47).

La Figura 2 esamina un calore estremo da un punto di vista politico, sovrapponendo le proiezioni degli scenari SSP3-7.0 o SSP5-8.5 di una TMA >29°C intorno al 2070, e il Fragile States Index (una misurazione dell'instabilità degli stati). Colpisce la sovrapposizione degli stati attualmente vulnerabili e delle aree che in futuro subiranno un riscaldamento estremo. Se nei prossimi decenni non si porrà seriamente rimedio all'attuale fragilità politica, potrebbe crearsi una fascia di instabilità con gravi ramificazioni potenziali.

Infine, i cambiamenti climatici potrebbero minare irreparabilmente la possibilità per l'umanità di riprendersi da un altro cataclisma, come per una guerra nucleare. Potrebbero cioè creare significativi rischi latenti (Tabella 1): impatti magari gestibili in tempi di stabilità diventano terribili durante la reazione a, o la ripresa da, una catastrofe. Queste diverse cause di preoccupazione per una catastrofe sono correlate e devono essere esaminate contemporaneamente.



**Figura 1.** Sovrapposizione tra la distribuzione della popolazione e il calore estremo nel futuro. I dati del modello CMIP6 [da nove modelli GCM disponibili nel database WorldClim (45)] sono stati usati per calcolare la temperatura media annua (TMA) nello scenario SSP3-7.0 in un periodo intorno al 2070 (2060-2080) insieme alle proiezioni demografiche Shared SSP3 fino al 2070 circa (46). Le aree ombreggiate rappresentano le zone in cui la TMA supera i 29°C, mentre i colori nella topografia rappresentano le varie densità di popolazione.



**Figura 2.** Calore e fragilità: sovrapposizione tra la fragilità degli stati, il calore estremo e il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche. I dati del modello GCM [dal database WorldClim (45)] sono stati utilizzati per calcolare i tassi di riscaldamento annuale medio negli scenari SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Questo si traduce in un aumento delle temperature di 2,8°C entro il 2070 circa (48) per lo scenario SSP3-7.0 e di 3,2°C per lo scenario SSP5-8.5. Le parti ombreggiate identificano regioni in cui la MAT supera i 29°C. Queste proiezioni sono sovrapposte con il Fragile State Index (FSI) (49). Questo è necessariamente un valore grezzo, perché il FSI stima solo i livelli di fragilità attuali. Sebbene le misurazioni della fragilità e della stabilità siano messe in discussione e hanno dei limiti, il FSI fornisce uno degli indici più solidi. La figura mostra anche le capitali degli stati con armi nucleari e la dislocazione dei laboratori di massimo contenimento Biosafety Level 4 (BS4), dove vengono maneggiati i patogeni più pericolosi al mondo. Questi vengono forniti come indicatore grezzo per il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche.

## Definire i termini chiave

Sebbene gli scenari relativi ai casi peggiori rimangono poco esplorati nella letteratura scientifica, le affermazioni che etichettano i cambiamenti climatici come catastrofici non sono inconsuete. Il segretario generale delle Nazioni Unite, António Guterres, li ha definiti una “minaccia esistenziale”. Studi accademici avvertono che è probabile che un riscaldamento oltre i 5°C sia “più che catastrofico” (50) e che oltre i 6°C rappresenti “una indiscutibile catastrofe globale” (9).

L’attuale dibattito sulla catastrofe climatica è indebolito da una terminologia poco chiara. Il termine “cambiamenti climatici catastrofici” non è stato ancora definito in modo condiviso. Un rischio esistenziale è solitamente definito come un rischio che causa una perdita a lungo termine, duratura e significativa di potenziale umano (51, 52). La definizione esistente è profondamente ambigua e richiede un dibattito nella società nonché di definire quali siano i valori umani basilari, validi nel lungo termine. (52). Mentre un’esplorazione democratica dei valori è benvenuta, non è necessario conoscere i percorsi verso la catastrofe umana o l’estinzione della specie (52). Per ora la definizione esistente non fornisce solide fondamenta per un’indagine scientifica. Sugeriamo definizioni operative più chiare di tali termini nella Tabella 1, un primo passo nella creazione di un lessico per le calamità globali. Alcuni di questi termini, come quelli riferiti a ciò che costituisce un “rischio plausibile” o “contribuisce significativamente”, sono necessariamente ambigui.

Altri, come definire cosa sia una soglia del 10% o 25% della popolazione globale, sono parzialmente arbitrari (il 10% è inteso come una soglia per perdite con dei precedenti storici e il 25% inteso come una decrescita senza precedenti; vedere il *Materiale Supplementare* per approfondimenti). Occorrono ulteriori ricerche per affinare queste definizioni. Le soglie inerenti ai rischi globali di catastrofi e decimazioni sono intese a livello euristico generico e non come confini numerici. Anche altri fattori, come la morbilità e le perdite culturali ed economiche, devono essere considerati.

Noi definiamo il rischio come la probabilità che l’esposizione agli impatti e alle risposte dei cambiamenti climatici produca conseguenze avverse per i sistemi umani o ecologici. Nell’ambito del programma “Finale di partita sul clima” siamo particolarmente interessati alle conseguenze catastrofiche. Ogni rischio è composto da quattro fattori determinanti: pericolosità, esposizione, vulnerabilità e risposta (3). Abbiamo posto un riscaldamento globale di 3°C o più entro la fine del secolo come marcatore di cambiamenti climatici estremi. Questa soglia è stata scelta per quattro motivi: un tale aumento di temperatura supera abbondantemente gli obiettivi stabiliti a livello internazionale; inoltre, “motivi di preoccupazione” dell’IPCC sono classificati come rischio “alto” o “molto alto” tra i 2°C e i 3°C; ci sono sostanzialmente dei rischi maggiori di cambiamenti auto-amplificanti che renderebbero impossibile limitare il riscaldamento a 3°C; e questi livelli sono legati ad un’ancora maggiore incertezza sugli impatti.

**Tabella 1.** Definizione dei termini chiave nel programma “Finale di partita sul clima”.

| Termine                          | Definizione  |
|----------------------------------|--|
| Rischio latente                  | Rischio inattivo in certe condizioni e attivo in altre.  |
| Cascata di rischi                | Catena di rischi che si verifica quando un impatto avverso innesca una serie di rischi collegati (3).  |
| Rischio sistemico                | Il potenziale per singole rotture o dissesti di ripercuotersi a cascata generando un crollo dell'intero sistema.   |
| Cambiamenti climatici estremi    | Aumento della temperatura superficiale media di 3°C o più entro il 2100.   |
| Rischio di estinzione            | Probabilità di un'estinzione della specie umana entro un determinato arco temporale.   |
| Minaccia di estinzione           | Un fattore plausibile e significativo che contribuisce al rischio di estinzione totale.  |
| Fragilità di una società         | Probabilità che danni minori interagiscano creando un rischio di catastrofe globale o di estinzione a causa delle vulnerabilità delle società, dei rischi a cascata e di risposte inadeguate.  |
| Collasso della società           | Una significativa frammentazione socio-politica e/o fallimento degli Stati insieme a una perdita di capitale e di identità del sistema relativamente rapida, duratura e significativa; può portare ad aumenti di mortalità e morbilità su larga scala. |
| Rischio di catastrofe globale    | La probabilità di una perdita del 25% della popolazione globale e di gravi guasti ai sistemi essenziali globali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).   |
| Minaccia di catastrofe globale   | Fattore plausibile che contribuisce significativamente al rischio di catastrofe globale; la probabilità che i cambiamenti climatici possano essere una minaccia di catastrofe globale può essere denominata “cambiamenti climatici catastrofici”.      |
| Rischio di decimazione globale   | La probabilità di una perdita del 10% (o più) della popolazione globale e gravissimi guasti ai sistemi globali essenziali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).   |
| Minaccia di decimazione globale  | Un fattore plausibile che contribuisca significativamente al rischio di decimazione globale.   |
| Territorio del finale di partita | Livelli di riscaldamento globale e di fragilità della società che con sufficiente probabilità possono rendere i cambiamenti climatici una minaccia di estinzione.  |
| Caso peggiore di riscaldamento   | Il più alto livello di riscaldamento plausibile empiricamente e teoricamente.  |

### Le ricerche fondamentali fino a oggi

I tentativi più accurati di studiare direttamente o esaminare in maniera esaustiva come i cambiamenti climatici potrebbero portare all'estinzione dell'umanità o a una catastrofe globale sono entrati in libri di divulgazione come *The Uninhabitable Earth* (53) e *Our Final Warning* (10). Quest'ultimo, un'analisi degli impatti climatici a diversi gradi, conclude che un aumento della temperatura globale di 6°C “metta in pericolo persino la sopravvivenza gli esseri umani come specie” (10).

Sappiamo che i rischi per la salute peggiorano con l'aumento delle temperature (54). Per esempio, a temperature più elevate c'è già una crescente probabilità di “tracollo delle regioni-granaio” (e conseguente impennata dei prezzi del cibo) (55). Per le quattro principali regioni produttrici di mais (responsabili dell'87% della produzione mondiale) la probabilità di perdite nella produzione superiori al 10% balza dal 7% annuale con un aumento di temperature di 2°C, all'86% con un aumento di 4°C (56). L'IPCC segnala, nel Sesto Rapporto di Valutazione, che tra il 50% e il 75% della popolazione globale potrebbe essere esposta a condizioni climatiche che ne minacciano l'esistenza entro la fine del secolo a causa di calore e umidità estremi (6). Altre informazioni sulle ricerche chiave riguardanti i cambiamenti climatici estremi sono riportate nel Materiale Supplementare.

I rapporti dell'IPCC riassumono una letteratura scientifica peer-reviewed riguardante i cambiamenti cli-

matici, gli impatti e la vulnerabilità, e la mitigazione. Nonostante nel contributo del Working Group 1 al Sesto Rapporto siano stati identificati 15 elementi potenzialmente instabili nella biosfera, negli oceani e nella criosfera, molti soggetti a soglie che determinano cambiamenti irreversibili, le pubblicazioni disponibili per valutare gli scenari catastrofici sono pochissime. La sintesi più rilevante sono i “motivi di preoccupazione” pubblicati a partire dal 2001 dal Working Group II dell'IPCC. Queste sintesi intendono fornire informazioni utili a determinare quale sia la “pericolosa interferenza di origine antropica” con il sistema climatico, che l'UNFCCC ha l'obiettivo di prevenire. Le cinque tipologie di preoccupazioni sono gli ecosistemi unici e minacciati; la frequenza e severità degli eventi climatici estremi; la distribuzione globale e l'equilibrio degli impatti; gli impatti economici ed ecologici totali; e le transizioni improvvise e irreversibili su larga scala. Ogni valutazione dell'IPCC ha rilevato maggiori rischi in corrispondenza di più bassi aumenti della temperatura media globale. Nel sesto Rapporto, i rischi per tutti e cinque i motivi di preoccupazione sono stati identificati come molto alti per un aumento delle temperature tra 1,2°C e 4,5°C. Nel Quinto Rapporto per lo stesso intervallo di temperature i rischi erano molto alti soltanto per due di questi (6). Ora rischi per le cinque categorie di preoccupazioni sono già “alti” o “molto alti” per un riscaldamento compreso tra 2°C e 3°C (57).

## Un esempio di programma di ricerca: stati estremi del sistema Terra, mortalità di massa, fragilità delle società e valutazioni integrate della catastrofe climatica

Suggeriamo un programma di ricerca per i cambiamenti climatici catastrofici che si concentri su quattro filoni chiave:

- Comprendere dinamiche e impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi.
- Esplorare i percorsi dipendenti dal clima in tema di morbilità e mortalità.
- Studiare la fragilità sociale: le vulnerabilità, i rischi a cascata e le risposte ai rischi.
- Sintetizzare i risultati della ricerca in “valutazioni integrate della catastrofe”.

Il programma trae informazioni e si basa sui modelli di valutazione integrata che sono stati adattati per valutare meglio i danni su larga scala. È già stato identificato un range di punti critici (58-60), con effetti che variano da un 10% di possibilità di raddoppiare i costi sociali del carbonio (61) fino a un aumento di otto volte del suo prezzo ottimale (60). Questo richiama risultati precedenti riguardanti l'influenza dei rischi estremi (31). Anche le assunzioni dei modelli influenzano fortemente i risultati, per esempio i tassi di sconto, i tassi di crescita esogena, la propensione al rischio e le funzioni di danno.

I modelli non comprendono aspetti vasti e importanti che vengono evidenziati nel programma di ricerca: gli impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi, i percorsi verso la morbilità e la mortalità di massa e i rischi a cascata e sistemici che gli impatti di un clima estremo potrebbero innescare. Un progresso in questi ambiti permetterebbe di avere modelli e funzioni di danno più realistici e contribuirebbe a fornire stime dirette delle vittime (62), nonché una misurazione morale non-economica del rischio. Sollecitiamo la comunità dei ricercatori a sviluppare modelli integrati concettuali e semiquantitativi delle catastrofi climatiche.

Infine, invitiamo altri studiosi a esaminare e migliorare il programma che proponiamo.

### *Stati estremi del sistema Terra*

Dobbiamo comprendere gli stati potenziali a lungo termine del sistema Terra in caso di cambiamenti climatici estremi. Questo significa mappare differenti scenari di “Terra serra surriscaldata” (21) o altri scenari estremi come regimi di circolazione alternativi o ampi e irreversibili cambiamenti della copertura glaciale e del livello dei mari. Questa ricerca richiederà di tenere in considerazione le dinamiche climatiche a

lungo termine e i loro impatti su altri processi a livello planetario. Le ricerche indicano che i precedenti eventi di estinzione di massa si verificarono a causa degli effetti del superamento di una soglia nel ciclo del carbonio che noi potremmo superare nel corso di questo secolo (40, 63). Gli impatti che hanno avuto un ruolo chiave nelle precedenti estinzioni di massa, come l'ipossia e l'anossia degli oceani, potrebbero intensificarsi sul più lungo periodo (40, 64).

Studiare i potenziali punti critici e i cambiamenti irreversibili “obbligati” del sistema climatico ed ecologico è essenziale. Per esempio, i modelli della calotta glaciale antartica indicano diversi punti critici che mostrano isteresi (65). Si è scoperto che a circa 2°C di riscaldamento globale si innesca la perdita irreversibile della calotta glaciale antartica occidentale, e l'attuale configurazione della calotta non potrebbe essere ripristinata nemmeno se le temperature tornassero ai livelli attuali. Con un aumento della temperatura globale tra 6°C e 9°C potrebbe iniziare una lenta e irreversibile perdita della calotta glaciale antartica orientale, con un innalzamento del livello del mare di oltre 40 metri (65). Sarebbero utili anche studi analoghi sulla calotta glaciale della Groenlandia, il permafrost e la vegetazione terrestre. Identificare tutti i potenziali elementi critici del sistema Terra è fondamentale, tenendo conto dei più ampi confini planetari, come la biodiversità che influenzerà i punti critici (66), i feedback esterni al sistema climatico, e come gli elementi critici possano ripercuotersi a cascata l'uno sull'altro (67).

### *Morbilità e mortalità di massa*

I potenziali fattori che contribuiscono alla morbilità e alla mortalità indotte dal clima sono molti, ma è probabile che i “quattro cavalieri” del “finale di partita sul clima” siano la fame e la malnutrizione, gli eventi climatici estremi, i conflitti, e le malattie trasmesse da vettori. Saranno aggravati da ulteriori impatti come la mortalità dovuta all'inquinamento dell'aria e l'innalzamento del livello del mare. Questi andamenti richiedono ulteriori studi. Persino il calcolo empirico delle vittime dirette di stress termico è così impegnativo che negli Stati Uniti sono sistematicamente sottostimate (68). Una valutazione della letteratura su salute e cambiamenti climatici dal 1985 al 2013 (con una revisione sommaria fino al 2017) ha mostrato che su 2.143 articoli solo 189 (il 9%) comprendevano una discussione dedicata a impatti più estremi sulla salute o a rischi sistemici (legati a migrazioni, fame o conflitti) (69). I modelli raramente includono anche risposte adattative. Quindi le stime globali sulla mortalità sono incerte.

Come è possibile valutare meglio il fattore della morbilità e della mortalità di massa? 1) Identificando i pe-

ricoli composti attraverso modellizzazioni del basso dei sistemi e delle vulnerabilità (70) e rigorosi stress test sul grado di preparazione (71). 2) Applicando i modelli a scenari con temperature più elevate e periodi temporali più lunghi. 3) Integrando i rischi a cascata e i rischi sistemici (vedere la sezione seguente) nella valutazione dei rischi per la salute, per esempio incorporando la morbilità e la mortalità risultanti da un'impennata dei prezzi dei generi alimentari.

### *Fragilità della società: vulnerabilità, rischi a cascata e risposte ai rischi*

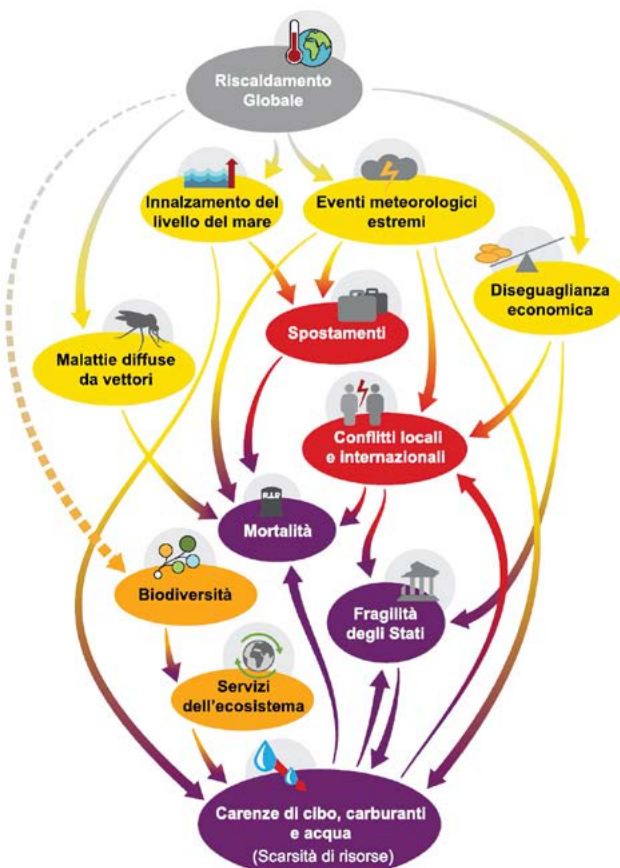
Le valutazioni del rischio più complesse sono generalmente più realistiche. I fattori determinanti del rischio non sono solo i pericoli, le vulnerabilità e le esposizioni, ma anche le risposte (3, 72). Una valutazione del rischio completa deve considerare gli impatti del clima, l'esposizione differenziata, le vulnerabilità sistemiche, le risposte delle società e degli attori e gli effetti a catena nelle varie nazioni e nei vari settori (73), che potrebbero potenzialmente portare a crisi sistemiche. Nei casi peggiori un effetto domino a spirale potrebbero aggravare continuamente il rischio iniziale.

I rischi a cascata per le società potrebbero comprendere conflitti, malattie e cambiamenti politici, e crisi economiche. I cambiamenti climatici hanno una relazione complessa con i conflitti, e tra i ruoli che potrebbero ricoprire c'è probabilmente quello di fattore di rischio (74), specialmente nelle zone di preesistenti conflitti etnici (75). Potrebbero influenzare la diffusione e la trasmissione di malattie infettive, come anche la propagazione e la gravità di diverse infezioni zoonotiche (76), creando le condizioni per nuovi focolai e infezioni (6, 77). Le epidemie possono, a loro volta, causare impatti a cascata, come nel caso del COVID-19. L'esposizione a stress ecologici e disastri naturali è un fattore determinante per la "tenuta" culturale delle società (rigorosità delle regole, rispetto della tradizione e severità delle punizioni) (78). La letteratura riguardante i danni economici mediati causati dai cambiamenti climatici è abbondante, ma non lo è altrettanto quella sui rischi estremi finanziari, come la possibilità di crisi finanziarie globali.

Si potrebbe attingere a studi passati per esaminare i rischi per la società. Cambiamenti climatici regionali relativamente piccoli sono stati collegati a trasformazioni e persino al collasso di società del passato (79, 80), forse per una diminuzione della loro resilienza e il superamento di punti critici. Ci sono alcune evidenze di rallentamenti cruciali nelle società prima del loro collasso (81, 82). Però bisogna essere attenti nel trarre delle lezioni da casi di studio premoderni. La preistoria e la storia dovrebbero essere studiate per determinare non solo come le società del passato so-

no state influenzate da specifici pericoli climatici, ma come questi effetti differiscono col cambiare delle società, per esempio per quanto riguarda la densità della popolazione, la disuguaglianza nella distribuzione della ricchezza e il regime di governance. Un tale contesto permetterà di esaminare le società passate e attuali mediante un solo sistema di analisi (37).

Nel lavoro sulla sensibilità delle società dovranno essere considerate le caratteristiche e le vulnerabilità di un mondo moderno e globalizzato, nel quale il sistema alimentare e dei trasporti possono assorbire shock. Sistemi così grandi e interconnessi hanno già delle fonti di fragilità intrinseche, in particolare se le reti sono relativamente omogenee, con pochi nodi dominanti altamente connessi a tutti gli altri (83). Altre importanti vulnerabilità attuali comprendono la rapida diffusione della cattiva informazione e della disinformazione. Questi rischi epistemici creano serie preoccupazioni per le crisi della sanità pubblica (84) e hanno già ostacolato l'azione climatica. La Figura 3 è una rappresentazione semplificata di alto livello di come si propagano i rischi a cascata.



**Figura 3.** Fattori di tracollo a cascata nel clima globale. Questo è un diagramma a loop causale nel quale una linea completa rappresenta una polarità positiva (per esempio, un feedback amplificante, non necessariamente positivo in senso normativo) e una linea tratteggiata denota una polarità negativa (cioè un feedback mitigante). Si rimanda al materiale supplementare per gli approfondimenti.

### Valutazione integrata della catastrofe

I cambiamenti climatici produrranno un mondo con cambiamenti in ecosistemi, nella geopolitica e nella tecnologia. Potremmo addirittura vedere “guerre calde” – conflitti tra grandi potenze amplificati dalla tecnologia per contendersi budget di carbonio sempre più ridotti, impatti climatici o esperimenti di gestione della radiazione solare? Simili sviluppi e scenari devono essere tenuti in considerazione per comporre un’immagine completa dei pericoli legati al clima. I cambiamenti climatici potrebbero rafforzare altre minacce che interagiscono tra loro, compresi un aumento della disuguaglianza, gli stress demografici, la cattiva informazione, nuove armi di distruzione e il superamento dei limiti planetari (85). Ci sono anche shock naturali, come eruzioni solari ed eruzioni vulcaniche ad alto impatto che presentano possibili sincronismi letali (86). È di importanza vitale studiarli, e una serie di “scenari catastrofici standardizzati” faciliterebbe la valutazione.

L’analisi sistematica del parere degli esperti, la mappatura dei sistemi e gli scenari partecipativi sono strumenti promettenti per capire queste ripercussioni a cascata (73). Per alcune di queste aree di interesse esistono progetti di ricerca che potrebbero essere finanziati (87).

L’approccio all’integrazione può essere di vario tipo. Le meta-analisi e le sintesi dei risultati delle ricerche potrebbero fornire dati utili per mappare le interazioni tra i rischi attraverso una mappatura causale, l’analisi dei pareri degli esperti e mediante approcci modellistici basati di dinamica dei sistemi. Un recente studio ha mappato le evidenze della relazione tra cambiamenti climatici, insicurezza alimentare e contributi al collasso della società (mortalità, conflitti ed emigrazione) basandosi su 41 studi (88).

Una strada particolarmente promettente è quella di riproporre i modelli complessi esistenti per studiare i rischi a cascata. La rete che ne risulta potrebbe essere valutata mediante uno “stress test” con scenari catastrofici standardizzati. Questo consentirebbe di valuta-

re quali settori possono subire crisi di approvvigionamento, tracolli, o risposte drastiche (come il divieto di esportare generi alimentari). Sono stati sviluppati dei modelli complessi per aiutare a comprendere i disastri sistemici su larga scala del passato, come la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (89): alcuni di essi potrebbero essere riconfigurati per esplorare la natura potenziale di una crisi climatica globale.

È improbabile che un crollo dei sistemi si verifichi simultaneamente su scala globale; è più probabile che si verifichi a livello regionale e si propaghi a cascata. Sebbene l’obiettivo sia quello di studiare i rischi di una catastrofe climatica a livello globale, è indispensabile incorporare la conoscenza sui danni a livello regionale.

I rischi potenzialmente catastrofici legati ai cambiamenti climatici sono difficili da quantificare, persino all’interno dei modelli. Ogni forma di modellizzazione che abbiamo menzionato potrebbe fornire una migliore comprensione dei percorsi del rischio sistemico, e suggerire linee guida probabilistiche approssimative. Eppure, a partire dai risultati si potrebbero sviluppare strumenti argomentativi per valutare il potenziale di sviluppi catastrofici a vari livelli di aumento della temperatura (90). Sarebbero strumenti da inserire in metodi deliberativi aperti e democratici con un approccio equo, inclusivo ed efficace al processo decisionale (91). Approcci simili potrebbero avvalersi dei processi decisionali in condizioni di incertezza, come il principio di minimizzazione della massima perdita possibile o ordinare le decisioni sulla base della somma pesata dei migliori e peggiori risultati, come suggerito nella rassegna sulla biodiversità di Dasgupta (92).

### Un Rapporto Speciale dell’IPCC sui cambiamenti climatici catastrofici

L’IPCC deve ancora concentrare la sua attenzione sui cambiamenti climatici catastrofici. Nessuno dei 14 rapporti speciali pubblicati finora se n’è occupato. Per il settimo ciclo di valutazione dell’IPCC è stato proposto un rapporto speciale sui “punti critici”, e noi suggeriamo di ampliarlo a tutti gli aspetti fondamentali dei cambiamenti climatici catastrofici, come sembra possibile dalla procedura decisionale dell’IPCC (93). Un simile rapporto potrebbe studiare come i feedback del sistema Terra potrebbero alterare le traiettorie delle temperature, e se queste alterazioni siano irreversibili.

Potrebbe altresì contribuire a stimolare ulteriori ricerche, proprio come successe con il rapporto speciale “Global warming of 1.5 °C” (94) che aveva suscitato nell’opinione pubblica un’ondata di preoccupazione per la gravità degli impatti causati da variazioni più basse della temperatura. L’impatto di un rapporto sui cambiamenti climatici catastrofici potrebbe essere an-



Foto: Image by Hans from Pixabay

cora più marcato. Potrebbe richiamare l'attenzione sulla posta in gioco con gli scenari peggiori. È fondamentale un finanziamento per la ricerca sui cambiamenti climatici peggiori e catastrofici.

Sarà fondamentale anche la comunicazione efficace dei risultati della ricerca. I messaggi che fanno paura possono essere controproducenti e indurre una paralisi (95), ma l'evidenza riguardo ai messaggi di speranza rispetto a quelli di paura è incerta, persino nelle meta-analisi (96, 97). Il ruolo delle emozioni è complesso, ed è necessario adeguare il messaggio ai diversi tipi di pubblico a cui è rivolto (98). Una rassegna recente del dibattito sul clima ha evidenziato l'importanza di evitare polarizzazioni politiche, di selezionare messaggeri affidabili e di scegliere contesti efficaci (99). Questo tipo di considerazioni sarà fondamentale per assicurare una discussione civica utile e accurata.

### Riferimenti bibliografici

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field et al., Eds. (Cambridge University Press, 2014).
2. F. U. Jehn, M. Schneider, J. R. Wang, L. Kemp, L. Breuer, Betting on the best case: Higher end warming is underrepresented in research. *Environ. Res. Lett.* 16, 084036 (2021).
3. N. P. Simpson et al., A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4, 489-501 (2021).
4. T. Matthews, R. L. Wilby, C. Murphy, An emerging tropical cyclone-deadly heat compound hazard. *Nat. Clim. Chang.* 9, 602-606 (2019).
5. C. A. Phillips et al., Compound climate risks in the COVID-19 pandemic. *Nat. Clim. Chang.* 10, 586-588 (2020).
6. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2022).
7. K. Brysse, N. Oreskes, J. O'Reilly, M. Oppenheimer, Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Glob. Environ. Change* 23, 327-337 (2013).
8. M. Oppenheimer et al., *Discerning Experts: The Practices of Scientific Assessment for Environmental Policy* (University of Chicago Press, 2019).
9. G. Wagner, M. L. Weitzman, *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet* (Princeton University Press, 2015).
10. M. Lynas, *Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency* (Harper Collins, 2020).
11. P. R. Liu, A. E. Raftery, Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Commun. Earth Environ.* 2, 1-29 (2021).
12. Climate Action Tracker, 2100 warming projections. Climate Action Tracker. Accessed 1 March 2022. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.
13. M. Willeit, A. Ganopolski, R. Calov, V. Brovkin, Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO<sub>2</sub> and regolith removal. *Sci. Adv.* 5, eaav7337 (2019).
14. V. Masson-Delmotte et al., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2021).
15. S. M. Natali et al., Large loss of CO<sub>2</sub> in winter observed across the northern permafrost region. *Nat. Clim. Chang.* 9, 852-857 (2019).
16. Y. Yang et al., Post-drought decline of the Amazon carbon sink. *Nat. Commun.* 9, 3172 (2018).

### Conclusioni

Ci sono molte evidenze del fatto che i cambiamenti climatici potrebbero diventare catastrofici e che potremmo entrare nella fase "finale di partita" anche con livelli modesti di riscaldamento. Capire i rischi estremi è importante per un processo decisionale robusto, dalla preparazione alla considerazione delle risposte di emergenza. Questo richiede di esplorare non solo gli scenari con temperature più alte, ma anche la possibilità che gli impatti climatici contribuiscano a rischi sistemici e a rischi a cascata. Pensiamo che sia giunto il momento di analizzare seriamente i modi migliori per espandere i nostri orizzonti di ricerca al fine di coprire tutto questo campo. Affrontare un futuro di cambiamenti climatici in accelerazione senza guardare agli scenari dei casi peggiori è, se va bene, una gestione ingenua del rischio, e se va male una follia letale. ■



17. M. R. Raupach et al., The declining uptake rate of atmospheric CO<sub>2</sub> by land and ocean sinks. *Biogeosciences* 11, 3453-3475 (2014).
18. W. Hubau et al., Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 80-87 (2020).
19. V. Brovkin et al., Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system. *Nat. Geosci.* 14, 550-558 (2021).
20. A. K. Klose, N. Wunderling, R. Winkelmann, J. F. Donges, What do we mean, 'tipping cascade'? *Environ. Res. Lett.* 16, 125011 (2021).
21. W. Steffen et al., Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 8252-8259 (2018).
22. M. Popp, H. Schmidt, J. Marotzke, Transition to a moist greenhouse with CO<sub>2</sub> and solar forcing. *Nat. Commun.* 7, 10627 (2016).
23. T. Schneider, C. M. Kaul, K. G. Pressel, Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nat. Geosci.* 12, 163-167 (2019).
24. S. C. Sherwood et al., An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000678 (2020).
25. C. R. Schwalm, S. Glendon, P. B. Duffy, RCP8.5 tracks cumulative CO<sub>2</sub> emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 19656-19657 (2020).
26. Z. Hausfather, G. P. Peters, Emissions—The 'business as usual' story is misleading. *Nature* 577, 618-620 (2020).
27. P. Christensen, K. Gillingham, W. Nordhaus, Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 5409-5414 (2018).
28. H. Kunreuther et al., Risk management and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 447-450 (2013).
29. F. H. Knight, Risk, Uncertainty and Profit (Hart, Schaffner and Marx, 1921).
30. R. Dittrich, A. Wreford, D. Moran, A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward? *Ecol. Econ.* 122, 79-89 (2016).
31. S. Dietz, High impact, low probability? An empirical analysis of risk in the economics of climate change. *Clim. Change* 108, 519-541 (2011).
32. M. L. Weitzman, Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Rev. Environ. Econ. Policy* 5, 275-292 (2011).
33. T. M. Lenton, Early warning of climate tipping points. *Nat. Clim. Chang.* 1, 201-209 (2011).
34. A. Jordan et al., Going beyond two degrees? The risks and opportunities of alternative options. *Clim. Policy* 13, 751-769 (2013).
35. C. Field et al., Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance (National Academies Press, 2021).
36. A. Tang, L. Kemp, A fate worse than warming? Stratospheric aerosol injection and catastrophic risk. *Front. Clim. Sci.* 3, 1-17 (2021).
37. T. A. Kohler, M. Rockman, The IPCC: A primer for archaeologists. *Am. Antiq.* 85, 627-651 (2020).
38. P. Brannen, The Ends of the World: Volcanic Apocalypses, Lethal Oceans, and Our Quest to Understand Earth's Past Mass Extinctions (Ecco, 2017).
39. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
40. D. H. Rothman, Thresholds of catastrophe in the Earth system. *Sci. Adv.* 3, e1700906 (2017).
41. K. D. Burke et al., Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 13288-13293 (2018).
42. P. J. Richerson, R. Boyd, R. L. Bettinger, Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis. *Am. Antiq.* 66, 387-411 (2001).
43. C. Xu, T. A. Kohler, T. M. Lenton, J. C. Svenning, M. Scheffer, Future of the human climate niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 11350-11355 (2020).
44. T. Homer-Dixon et al., Synchronous failure: The emerging causal architecture of global crisis. *Ecol. Soc.* 20, 6 (2015).
45. WorldClim, WorldClim-Global Climate Data: Free climate data for ecological modeling and GIS. Accessed 17 December 2020. <https://www.worldclim.com/node/1>.
46. International Institute for Applied Systems Analysis, SSP Database (shared socioeconomic pathways) (Version 2.0). Accessed 17 December

2020. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>.
47. J. S. Pal, E. A. B. Eltahir, Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nat. Clim. Chang.* 6, 197-200 (2016).
  48. M. Meinshausen et al., The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* 109, 213-241 (2011).
  49. Fund for Peace, Fragile States Index 2021. Accessed 12 April 2022. <https://fragilestatesindex.org/>.
  50. Y. Xu, V. Ramanathan, Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 10315-10323 (2017).
  51. T. Ord, *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity* (Bloomsbury, 2020).
  52. C. Z. Cremer, L. Kemp, Democratising risk: In search of a methodology to study existential risk. SSRN [Preprint] (2021). Accessed 1 March 2022. <https://ssrn.com/abstract=3995225>.
  53. D. Wallace-Wells, *The Uninhabitable Earth* (Crown, 2019).
  54. K. L. Ebi et al., Health risks of warming of 1.5°C, 2°C, and higher, above pre-industrial temperatures. *Environ. Res. Lett.* 13, 063007 (2018).
  55. F. Gaupp, J. Hall, S. Hochrainer-Stigler, S. Dadson, Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nat. Clim. Chang.* 10, 54-57 (2020).
  56. M. Tigchelaar, D. S. Battisti, R. L. Naylor, D. K. Ray, Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 6644-6649 (2018).
  57. Z. Zommers et al., Burning embers: Towards more transparent and robust climate-change risk assessments. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 516-529 (2020).
  58. S. Dietz, J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner, Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2103081118 (2021).
  59. T. S. Lontzek, Y. Cai, K. L. Judd, T. M. Lenton, Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy. *Nat. Clim. Chang.* 5, 441-444 (2015).
  60. Y. Cai, T. M. Lenton, T. S. Lontzek, Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO2 emission reduction. *Nat. Clim. Chang.* 6, 520-528 (2016).
  61. M. Lenzen et al., The Global MRIO Lab—Charting the world economy. *Econ. Syst. Res.* 29, 158-186 (2017).
  62. J. Nolt, Casualties as a moral measure of climate change. *Clim. Change* 130, 347-358 (2015).
  63. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
  64. J. L. Penn, C. Deutsch, J. L. Payne, E. A. Sperling, Temperature-dependent hypoxia explains biogeography and severity of end-permian marine mass extinction. *Science* 362, eaat1327 (2018).
  65. J. Garbe, T. Albrecht, A. Levermann, J. F. Donges, R. Winkelmann, The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature* 585, 538-544 (2020).
  66. J. Rockström et al., Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2115218118 (2021).
  67. N. Wunderling, J. F. Donges, J. Kurths, R. Winkelmann, Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth Syst. Dyn.* 12, 601-619 (2021).
  68. K. R. Weinberger, D. Harris, K. R. Spangler, A. Zanobetti, G. A. Wellenius, Estimating the number of excess deaths attributable to heat in 297 United States counties. *Environ. Epidemiol.* 4, e096 (2020).
  69. C. D. Butler, Climate change, health and existential risks to civilization: A comprehensive review (1989-2013). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2266 (2018).
  70. J. Zscheischler et al., Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Chang.* 8, 469-477 (2018).
  71. K. L. Ebi et al., Stress testing the capacity of health systems to manage climate change-related shocks and stresses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2370 (2018).
  72. A. Reisinger et al., “The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross-working group discussions” (International Panel on Climate Change, 2020).
  73. A. J. Challinor et al., Transmission of climate risks across sectors and borders. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 376, 20170301 (2018).

74. K. J. Mach et al., Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature* 571, 193-197 (2019).
75. C.F. Schleussner, J. F. Donges, R. V. Donner, H. J. Schellnhuber, Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 9216-9221 (2016).
76. R. Rupasinghe, B. B. Chomel, B. Martinez-López, Climate change and zoonoses: A review of the current status, knowledge gaps, and future trends. *Acta Trop.* 226, 106225 (2022).
77. R. Gibb, L. H. V. Franklinos, D. W. Redding, K. E. Jones, Ecosystem perspectives are needed to manage zoonotic risks in a changing climate. *BMJ* 371, m3389 (2020).
78. M. J. Gelfand et al., Differences between tight and loose cultures: A 33-nation study. *Science* 332, 1100-1104 (2011).
79. E. H. Cline, 1177 B.C.: The Year Civilization Collapsed: Revised and Updated (Princeton University Press, 2021).
80. D. D. Zhang et al., Climatic change, wars and dynastic cycles in China over the last millennium. *Clim. Change* 76, 459-477 (2006).
81. M. Scheffer, E. H. van Nes, D. Bird, R. K. Bocinsky, T. A. Kohler, Loss of resilience preceded transformations of pre-Hispanic Pueblo societies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2024397118 (2021).
82. M. Scheffer, Anticipating societal collapse; Hints from the Stone Age. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 10733-10735 (2016).
83. M. Scheffer et al., Anticipating critical transitions. *Science* 338, 344-348 (2012).
84. L. Kemp et al., Emerging Technologies and Dual-Use Concerns: A Horizon Scan for Global Public Health (World Health Organization, 2021).
85. W. Steffen et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 736-748 (2015).
86. L. Mani, A. Tzachor, P. Cole, Global catastrophic risk from lower magnitude volcanic eruptions. *Nat. Commun.* 12, 4756 (2021).
87. K. J. Mach et al., Directions for research on climate and conflict. *Earths Futur.* 8, EF001532 (2020).
88. C. E. Richards, R. C. Lupton, J. M. Allwood, Reframing the threat of global warming: An empirical causal loop diagram of climate change, food insecurity and societal collapse. *Clim. Change* 164, 49 (2021).
89. F. Caccioli, P. Barucca, T. Kobayashi, Network models of financial systemic risk: A review. *J. Comput. Soc. Sci.* 1, 81-114 (2018).
90. S. O. Hansson, G. Hirsch Hadorn, Eds., The Argumentative Turn in Policy Analysis: Reasoning about Uncertainty (Springer International, 2016).
91. H. Landemore, Open Democracy: Reinventing Popular Rule for the Twenty-First Century (Princeton University Press, 2020).
92. P. Dasgupta, The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review (HM Treasury, 2021).
93. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Decision framework for special reports, methodology reports and technical papers (amended in September 2008)" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).
94. Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming of 1.5 °C (Cambridge University Press, 2021).
95. M. Hulme, Is it too late (to stop dangerous climate change)? An editorial. *WIREs Clim. Chang.* 11, e619 (2019).
96. G.J. Y. Peters, R. A. C. Ruiter, G. Kok, Threatening communication: A critical re-analysis and a revised meta-analytic test of fear appeal theory. *Health Psychol. Rev.* 7, S8-S31 (2013).
97. M. B. Tannenbaum et al., Appealing to fear: A meta-analysis of fear appeal effectiveness and theories. *Psychol. Bull.* 141, 1178-1204 (2015).
98. D. A. Chapman, B. Lickel, E. M. Markowitz, Reassessing emotion in climate change communication. *Nat. Clim. Chang.* 7, 850-852 (2017).
99. R. M. Colvin et al., Learning from the climate change debate to avoid polarisation on negative emissions. *Environ. Commun.* 14, 23-35 (2019).

## Ringraziamenti

Copyright © 2022 gli Autori. Pubblicato l'1 agosto 2022 da PNAS. Questo articolo open access è distribuito sotto licenza Creative Commons Attribution License 4.0 (CC BY). Traduzione di Erminio Cella. Revisione di Sylvie Coyaud e Stefano Caserini.

Il materiale supplementare è disponibile online all'indirizzo

<http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.2108146119/-/DCSupplemental>

IdA



# SCIENZA E POLITICA PER LA SALVAGUARDIA DI VENEZIA

Paolo Cescon<sup>1</sup>, Andrea Gambaro<sup>2,\*</sup>, Davide Zanchettin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Istituto Scienze Polari – CNR, Venezia-Mestre

<sup>2</sup>Università Ca' Foscari, Venezia e Istituto Scienze Polari – CNR, Venezia-Mestre

<sup>3</sup>Università Ca' Foscari, Venezia

## Sommario

Venezia è un luogo iconico ed un paradigma di beni storici e culturali di immenso valore a rischio. Le inondazioni ricorrenti a cui è soggetto il centro storico rappresentano il sintomo più dibattuto della fragilità di Venezia, ma la città e l'ecotono lagunare che la circonda sono soggetti a vari pericoli ambientali, dall'inquinamento al sovrasfruttamento delle risorse naturali alla pressione turistica. Questo contributo si prefigge di illustrare come, a Venezia, l'alleanza tra Scienza e Politica si sia dimostrata fondamentale per affrontare le numerose crisi ambientali in cui la città è incorsa sin dalla metà del secolo scorso. A questo scopo, l'interconnessione tra interventi legislativi e iniziative scientifiche a partire dagli anni '80 del secolo scorso sono analizzati, con particolare attenzione all'innalzamento del livello relativo del mare e al progressivo peggioramento delle statistiche riguardanti gli episodi di mareggiata (gli eventi di "acqua alta"), una minaccia che ci si attende peggiori nel corso di questo secolo e contro la quale è recentemente diventato operativo un sistema protettivo basato su barriere mobili, il MoSE. Guardando oltre a Scienza e Politica, l'opinione pubblica è in grado di far riverberare la discussione su qualsiasi evento che riguarda Venezia, talora con una eco mediatica globale. Pertanto, gli autori discutono come la strada dell'alleanza tra Scienza e Politica a Venezia, se percorsa con chiarezza e rigore, potrebbe assumere una valenza storica per le grandi sfide future alle quali il pianeta e l'umanità stanno andando incontro.

**Parole chiave:** *laguna di Venezia, Ricerca Scientifica, Gestione Ambientale, Cambiamenti Climatici, Acqua Alta.*

## SCIENCE AND POLITICS FOR THE SAFEGUARDING OF VENICE

### Abstract

Venice as an iconic place and a paradigm of immense historical and cultural values at risk. The recurrent flooding of the city center is the most debated symptom of the frailty of Venice, but the city and the surrounding lagoon are subject to several environmental hazards, from pollution to exploitation of natural resources to tourism overpressure. This article aims at illustrating how the alliance between Science and Politics in Venice was fundamental to tackle the various environmental crises the city has been facing since the mid-20th century. To this purpose, the intertwining between legislative interventions and scientific initiatives since the 1980s is analyzed, with a special focus on the answers that Science and Politics has provided to the issues posed by the relative sea-level rise and worsening of flooding statistics ("acqua alta"), a threat that is expected to continue to grow through this century and against which a protective system based on mobile barriers – the MoSE – has recently become operative. Beyond Science and Politics, public opinion is capable to reverberate the discussion on any event in Venice, sometimes with a global mediatic echo. The authors thus discuss how the alliance between Science and Politics in Venice, if kept transparent and rigorous, could achieve a historical value for the grand challenges our planet and humanity are undergoing.

**Keyword:** *Venice Lagoon, Scientific Research, Environmental management, Climate change, Acqua alta.*

IdA



Per info: via Torino, 155 – 30172 Venezia-Mestre, Italia  
gambaro@unive.it

Ricevuto il 9-9-2022; Correzioni richieste il 22-9-2022;  
Accettazione finale il 5-10-2022.

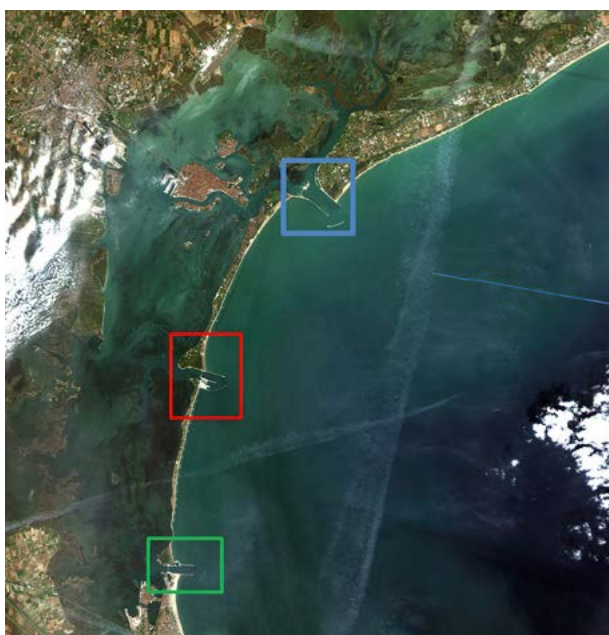
## Introduzione

Venezia e la sua laguna rappresentano un'importante realtà ambientale, urbana e industriale e nel corso della loro storia hanno sempre svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo culturale ed economico dell'area mediterranea. L'estrema complessità e fragilità dell'ecosistema lagunare veneziano e la sua convivenza con gli insediamenti umani hanno da sempre focalizzato l'attenzione della Politica e stimolato l'interesse della Scienza per garantirne la sopravvivenza e lo sviluppo.

La laguna di Venezia rappresenta quindi un esempio molto significativo nello studio del rapporto Scienza-Politica perché riferito ad un importante sistema produttivo e ad un ecosistema ambientale di transizione in continua evoluzione. Queste due realtà necessitano di una forte comprensione scientifica ed un altrettanto forte gestione politica.

Cescon e Barbante (2021) hanno indagato la collaborazione tra Scienza e Politica per affrontare le grandi crisi ambientale e climatica che attualmente minacciano il nostro pianeta. In questo lavoro viene presa in considerazione la stessa collaborazione per affrontare la salvaguardia del sistema naturale e produttivo, la conservazione di beni culturali, la difesa e la promozione della qualità ambientale di Venezia e della sua laguna.

La laguna di Venezia (Fig. 1) è un ecotono, un ambiente di transizione in continua evoluzione, minacciato da fenomeni noti quali l'acqua alta, le variazioni del livello relativo del mare, la contaminazione dei sedimenti. Venezia è preservata da secoli praticamente inalterata in un labile equilibrio mantenuto contrastandone l'evoluzione naturale tramite numerosi interventi antropici. Anche per questo, l'UNESCO ha incluso Venezia e



**Figura 1.** Laguna di Venezia con indicate le bocche di porto.

la sua laguna nella propria lista di patrimoni universali dell'umanità già nel 1987 come simbolo della "lotta vittoriosa dell'Uomo contro gli elementi, rimarcando il suo dominio su una natura ostile".

Su questa realtà e sulla sua gestione il dibattito è talvolta molto acceso per la presenza di movimenti di opinione pubblica molto attivi (es. dibattito sulla questione della morfologia lagunare) e per la eco mediatica a scala globale che suscitano i grandi fatti che avvengono in città. Un esempio recente, in grado di risvegliare prepotentemente il senso di vulnerabilità di questo sito legata a quei "cambiamenti naturali e climatici irreversibili" già menzionati dall'UNESCO, è la successione di eventi di acqua alta del Novembre 2019, che ha incluso 15 eventi oltre i 110 cm di cui 4 oltre i 140 cm e un picco di 189 cm, secondo solo al livello record del 1966 (vedasi Tabella 1).

In questo studio, al fine di valutare gli interventi della Scienza e della Politica mirati alla soluzione dei problemi, verranno presi in considerazione le tematiche della qualità delle acque, dei sedimenti e dell'innalzamento relativo del mare causato da subsidenza e cambiamenti climatici.

Nel secolo scorso agli scarichi urbani da sempre immessi in laguna per la mancanza di fognature pubbliche si sono aggiunte le immissioni derivanti dallo sviluppo del polo industriale di Marghera e le acque reflue provenienti dall'entroterra. Queste hanno determinato un notevole apporto di inquinanti industriali e agricoli e la conseguente contaminazione delle acque e dei sedimenti lagunari. Il traffico marittimo sia turistico che industriale collegati al Porto e al Polo Chimico di Marghera e l'attività di pesca hanno subito, inoltre, un forte incremento. Di fronte a queste forti pressioni antropiche, alla necessità di adeguamento della legislazione ambientale e all'attenzione del mondo della cultura internazionale, le forze politiche hanno reagito assumendo provvedimenti legislativi a favore della salvaguardia della città. Il mondo della ricerca scientifica italiana e internazionale, invece, ha avviato iniziative di studi e ricerca tese ad acquisire conoscenze da mettere a disposizione delle istituzioni e della Politica per risolvere i problemi complessi di Venezia.

## Interventi legislativi e iniziative scientifiche

A metà degli anni '80 il Comune di Venezia approvò il progetto per la realizzazione dell'impianto di depurazione consortile delle acque di scarico industriali e di quelle civili in seguito al lavoro di analisi e di studio dell'inquinamento delle acque lagunari. In quest'ottica e anche a seguito dell'alluvione di Venezia nel 1966



**Figura 2.** Acqua alta in Piazza San Marco, Venezia.

(Fig. 2) il Governo italiano approvava la legge 1973, n. 171, alla quale seguirono i provvedimenti legislativi L. n. 798/1984 e L. n. 380/1991 che costituiscono la *Legge Speciale per Venezia*. Venivano indicati obiettivi strategici, procedure e competenze delle Istituzioni Pubbliche. All'articolo 1 della legge 1973, n. 171 si afferma che *“La salvaguardia di Venezia e della sua laguna è dichiarata problema di preminente interesse nazionale. La Repubblica garantisce la salvaguardia dell'ambiente paesistico, storico, archeologico ed artistico della città di Venezia e della sua laguna, ne tutela l'equilibrio idraulico, ne preserva l'ambiente dall'inquinamento atmosferico e delle acque e ne assicura la vitalità socioeconomica nel quadro dello sviluppo generale e dello assetto territoriale della Regione”*.

Allo scopo di assicurare il raggiungimento degli obiettivi la Legge Speciale avviava alcune importanti iniziative, fra le quali la istituzione della Commissione di Salvaguardia di Venezia (art. 5 della legge 16 aprile n. 171, 1973) che esprime pareri vincolanti su interventi in ambito lagunare e il Comitato di Indirizzo Coordinamento e Controllo (detto Comitato Misto) (ex art. 4 Legge Speciale per Venezia 798, 1984) per l'attuazione di interventi previsti dalla medesima legge.

Anche alla luce degli importanti investimenti per la realizzazione delle opere per la protezione di Venezia dalle acque alte, con D.P.C.M. del 13/2/2004 veniva costituito l'Ufficio di Piano, organo tecnico collegiale di supporto al Comitato Misto ex art. 4 L.798/84 allo scopo di garantire lo sviluppo sistematico delle attività di salvaguardia di Venezia e della sua laguna. Questo

organo è inoltre chiamato ad esprimere pareri e formulare proposte di indirizzo su tematiche specifiche di competenza del Comitato Misto. L'Ufficio di Piano è composto da 12 esperti nazionali e internazionali di riconosciuta competenza ed esperienza nel campo della ricerca scientifica. Nel periodo di attività l'Ufficio ha affrontato e approfondito numerose tematiche riguardanti Venezia e la sua laguna rilasciando un significativo numero di documenti e rapporti destinati al Comitato Misto e alla Presidenza del Consiglio dei Ministri.

In considerazione dei problemi da risolvere dovuti al mantenimento dell'ecosistema lagunare veneziano e al recupero della qualità dell'ambiente della laguna, senza dimenticare i problemi socioeconomici legati al turismo e al Polo Industriale di Marghera, il decisore politico da subito stabilì che l'operatività dei due organismi istituiti dalla Legge Speciale venisse supportata dalla presenza di autorevoli membri appartenenti al mondo scientifico e politico. Nella Commissione di Salvaguardia venne quindi inserito un rappresentante del CNR, designato dal Ministero della Ricerca Scientifica, e il Ministro della Ricerca Scientifica nel Comitato Misto.

La Politica ha inoltre supportato, in modo chiaro e concreto, gli investimenti necessari alle attività di ricerca per la conservazione della città. Tali finanziamenti si sono resi necessari per l'approfondimento dei problemi geofisici, idraulici, ecologici, di inquinamento, paesaggistici e socioeconomici utili per lo sviluppo di tecnologie e metodologie di intervento adeguati a garantire il futuro di Venezia e della sua laguna. A tal riguardo, per affrontare una tale complessità mediante un approccio interdisciplinare, il Murst (Ministero dell'Università, della Ricerca Scientifica e Tecnologica) ha finanziato alla fine degli anni '90 il programma scientifico *La ricerca scientifica per Venezia – il progetto sistema lagunare veneziano* al quale hanno partecipato le Università Iuav e Ca' Foscari di Venezia, l'Università di Padova, il Consiglio Nazionale delle Ricerche ed altre istituzioni scientifiche nazionali e straniere. I risultati sono stati oggetto di approfondimento in sede scientifica e pubblicati nel 2000 a cura dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti. Questa è stata un'importante iniziativa a favore dello sviluppo di conoscenze scientifiche nello studio dell'ambiente lagunare e di aspetti culturali e socio-economici di Venezia (Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, 2000).

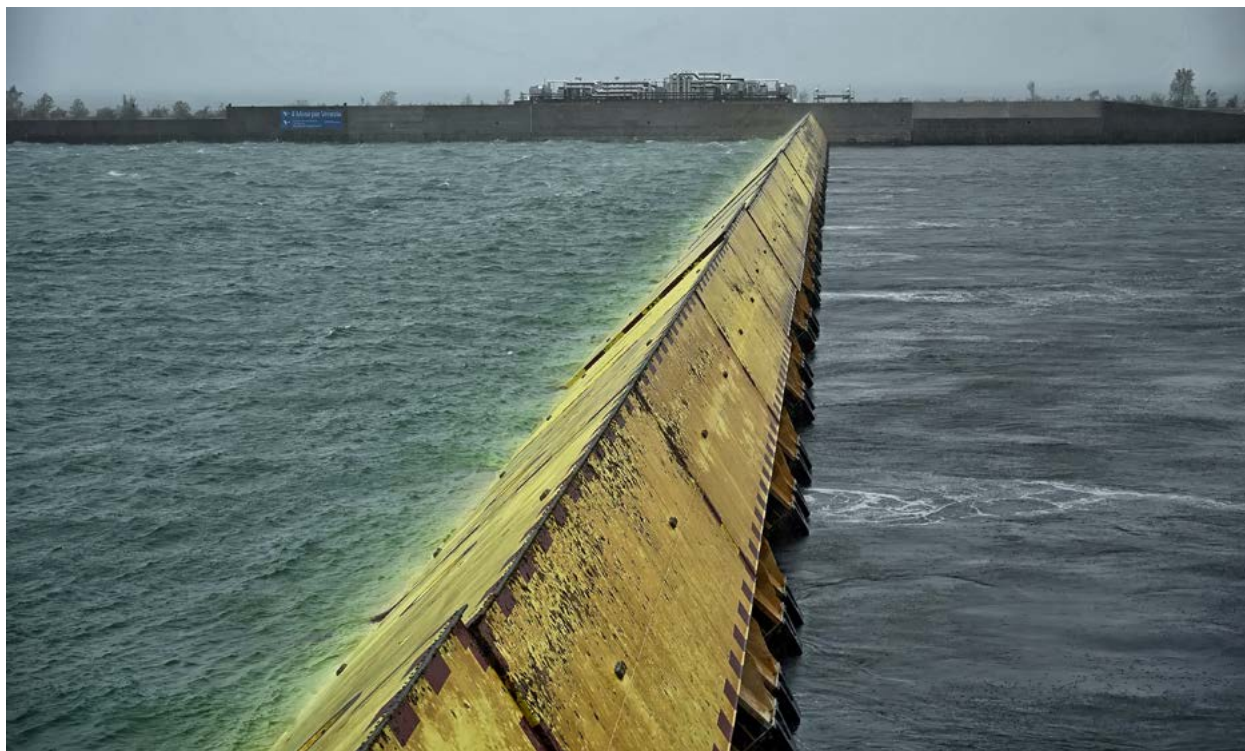
In continuità con questa iniziativa il Comitato Misto (ex art.4 della Legge Speciale per Venezia n.798/84) ha istituito nel 1998, su indicazione del MIUR, il *Consorzio di Coordinamento delle Attività di Ricerca in Laguna-CORILA* con la partecipazione di IUAV, Uni-

versità Ca' Foscari Venezia, Università di Padova, CNR e OGS dedicato alle problematiche specifiche del sistema lagunare veneziano quali: economia e aspetti sociali, architettura e beni culturali, processi ambientali, gestione dei dati. Corila coordina attività di ricerca scientifica grazie a finanziamenti nazionali della Legge Speciale, internazionali ed europei. Oltre all'attività di ricerca Corila ha effettuato indagini di monitoraggio per conto del Magistrato alle Acque di Venezia ed altre importanti attività scientifiche riguardanti la laguna, alcune ancora in corso come quelle riguardanti i cambiamenti climatici. L'attività di coordinamento scientifico delle ricerche in laguna svolte da Corila ha evitato la dannosa frammentazione di programmi e inutili sovrapposizioni. La scelta politica di istituire questo organismo è stata sicuramente opportuna e i risultati scientifici ottenuti sono considerevoli, come dimostrato dal significativo numero di pubblicazioni su riviste scientifiche qualificate, e consentono di sviluppare avanzate metodologie per la programmazione, il controllo, la gestione della salvaguardia di Venezia.

### MoSE e proiezioni climatiche

L'idea del MoSE – acronimo di “Modulo sperimentale elettromeccanico”, ovvero il sistema di barriere mobili per la protezione della città dall'*acqua alta* (Fig. 3) – risale al 1979, quando la Commissione denominata dei “Sette Saggi”, formata da autorevoli esperti internazionali e nominata dal Ministro dei Lavori Pubblici con lo scopo di redigere uno studio di fattibilità per la difesa di Venezia dall'*acque alte* a seguito dell'evento record di *acqua alta* del 1966 (vedasi Tabella 1, a pagina seguente), individua in un sistema protettivo basato su barriere mobili in grado di intercludere temporaneamente la laguna rispetto al mare la soluzione in grado di salvaguardare la laguna dall'*acqua alta* soddisfacendo al contempo le esigenze della portualità.

Vincoli paesaggistici spinsero poi verso barriere a scomparsa, quindi al MoSE. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici approva lo studio di fattibilità il 27 Maggio 1982, riconoscendo che il progetto dovrà tenere conto che a causa di fenomeni quali l'innalzamento del livello relativo del medio mare, “l'accrescimento della frequenza di chiusura delle bocche per il livello scelto (m. 1,10) potrebbe risultare incompatibile con le esigenze di navigazione”. A quarant'anni di distanza, la discussione sulla gestione del MoSE nel contesto dell'innalzamento progressivo del mare è quanto mai attuale, stimolata da un lato dalla dimostrata efficacia del MoSE, in utilizzo dal 2020 per mareggiate previste superiori ai 130 cm (vedasi l'effetto sui livelli del mare entro la laguna osservato in occasione delle prime chiusure delle barriere effettuate il 3 ed il 15 Ottobre



**Figura 3.** Sollevamento di barriera mobile (MOSE).

**Tabella 1.** Eventi severi di acqua alta registrati a Venezia (estratti da Lionello et al. 2021).

| Data                      | Picco osservato (stima componente meteorologica) |
|---------------------------|--|
| 4 Novembre 1966           | 194 cm (143 cm)                                  |
| 12, 15 e 17 Novembre 2019 | 189 cm (100 cm), 154 cm e 150 cm                 |
| 15 Gennaio 1867           | N.D. potenzialmente 181 cm                       |
| 22 Dicembre 1979          | 166 cm (106 cm)                                  |
| 1 Febbraio 1986           | 159 cm (70 cm)                                   |
| 1 Dicembre 2008           | 156 cm (62 cm)                                   |
| 29 Ottobre 2018           | 156 cm (91 cm), secondo picco a 148 cm           |
| 12 Novembre 1951          | 151 cm (86 cm)                                   |
| 11 Novembre 2012          | 149 cm   |
| 16 Novembre 2002          | 147 cm   |
| 16 Aprile 1936            | 147 cm (91 cm)                                   |
| 25 Dicembre 2009          | 145 cm   |
| 15 Ottobre 1960           | 145 cm   |
| 6 Novembre 2000           | 144 cm (87 cm)                                   |

2020, Lionello et al., 2021), dall'altro dalle stime di innalzamento futuro del mare: il MoSE è stato progettato per proteggere Venezia e la laguna da maree alte fino a 3 metri (vedasi <https://www.mosevenezia.eu/>), ma chiusure troppo frequenti o troppo prolungate potrebbero avere impatti sia sull'ecosistema lagunare che sul traffico marittimo.

Negli ultimi 20 anni molti contributi scientifici sono stati pubblicati a livello nazionale ed internazionale su questo tema e sulle possibili conseguenze di un suo significativo aumento futuro, soprattutto come conse-

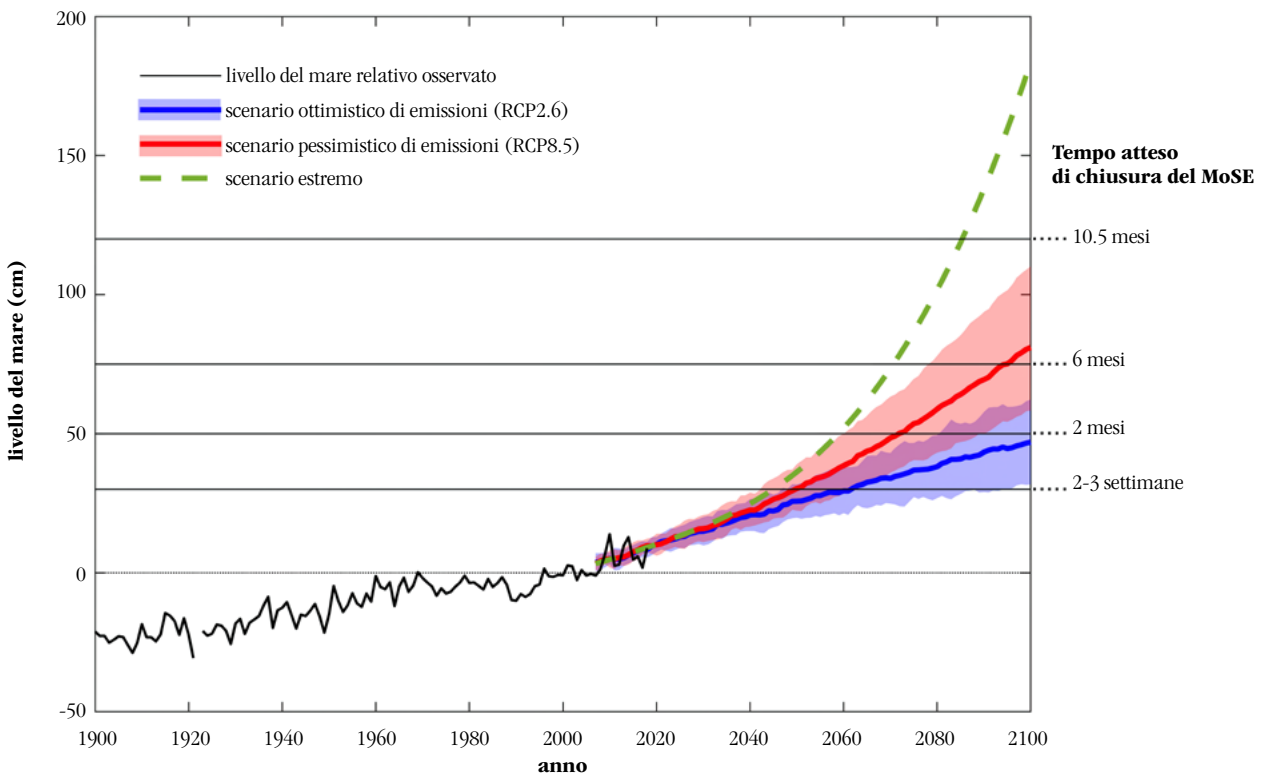
guenza del riscaldamento globale (vedasi la “special issue” su innalzamento del mare e allagamento di Venezia pubblicato recentemente sulla rivista scientifica “Natural Hazard and Earth System Science”, Lionello et al., 2021). Premesso che le variazioni del medio mare sono il primo fattore che sul lungo termine determina variazioni del rischio di allagamento a Venezia, l'aumento nella frequenza e intensità degli eventi di acqua alta legato ad un aumento futuro del livello relativo medio del mare potrebbe comportare danni anche serissimi in termini di degrado del centro storico.



Questo potrebbe accadere prima ancora che l'innalzamento del livello relativo del medio mare possa compromettere l'ecotono lagunare, soprattutto in termini di perdita di ecotopi.

Per ottenere stime di innalzamento futuro del livello relativo del medio mare è necessario combinare stime di subsidenza locale e variazioni indotte dai cambiamenti climatici. Queste stime sono ottenute con modelli numerici che rappresentano, in maniera semplificata, alcuni aspetti cruciali del clima reale, e forniscono indicazioni sulle anomalie climatiche – o proiezioni – che si potrebbero verificare a fronte di ipotesi – o scenari – di emissione di gas climalteranti da parte dell'Uomo. Per il caso specifico di Venezia, le informazioni ottenute dai modelli climatici, valide per la regione dell'Alto Adriatico, sono state elaborate unitamente ad informazioni sito-specifiche ottenute da altri modelli numerici, che riguardano soprattutto movimenti verticali del suolo (ovvero subsidenza), per ottenere stime di cambiamento del livello relativo del mare (Zanchettin et al., 2021). La subsidenza rappresenta un contributo importante e, in alcuni suoi aspetti, molto incerto da quantificare e predire. Infatti, ad uno sprofondamento naturale legato a vari processi geologici che agiscono su scale temporale delle

migliaia e dei milioni di anni, che comporta una perdita di quota del suolo stimabile in circa 1 mm/anno, va aggiunto un contributo antropico, che può agire su scale temporali molto più brevi. Storicamente, a Venezia esso è legato soprattutto all'estrazione di acqua dal sottosuolo nel territorio circostante Venezia ad uso industriale e agricolo nei primi decenni dal dopoguerra. Si stima che a causa di questa estrazione di acqua il livello del suolo a Venezia sia sprofondato di circa 10 cm tra gli anni '50 agli anni '70. Solo dopo l'evento di acqua alta eccezionale del 1966 sono stati presi provvedimenti con una regolamentazione per limitare l'estrazione di acqua dal sottosuolo, che nell'area di Marghera è passata da 500 L/s nel 1969 a 170 L/s nel 1975, fornendo fonti alternative di approvvigionamento idrico per usi industriali, agricoli e civili. Nonostante processi naturali di riempimento delle falde esauste abbiano poi consentito un recupero parziale delle quote (1-2 cm), quanto concesso nel dopoguerra in termini di sfruttamento delle falde ha impattato in modo fondamentale e persistente sul livello relativo del mare: la maggior parte della subsidenza che ha afflitto Venezia negli ultimi 100 anni ha origine antropica. Proiezioni di subsidenza antropica per il XXI secolo risultano impraticabili ma la storia recente, è stata caratterizza-



**Figura 4.** Evoluzione storica e proiezioni future del livello del mare a Venezia con indicate le stime dei tempi attesi di chiusura del MoSE nell'arco di un anno (dati da Lionello et al., 2021, e Zanchettin et al., 2021). Tre scenari sono costruiti sulla base di diverse ipotesi di emissioni antropiche di gas climalteranti e di dinamiche climatiche: blu: scenario di emissioni ottimistico; rosso: scenario di emissioni pessimistico; linea verde tratteggiata: scenario estremo in cui ad emissioni elevate si associa uno scioglimento spinto delle calotte polari, con un conseguente forte contributo di massa all'innalzamento degli oceani. Per gli scenari ottimistico e pessimistico, la linea indica l'evoluzione attesa media fornita dai modelli climatici, mentre l'ombreggiatura indica l'incertezza legata alle specificità dei modelli.

ta da un abbassamento del suolo nell'area Veneziana nel periodo 1930–1970 con velocità, a scala locale, fino a 10 o anche 20 mm/anno a causa dell'estrazione di acqua dal sottosuolo (Zanchettin et al., 2021). Questo indica il potenziale di questa componente del livello relativo del mare di produrre innalzamenti anche dell'ordine dei 10 cm/decennio.

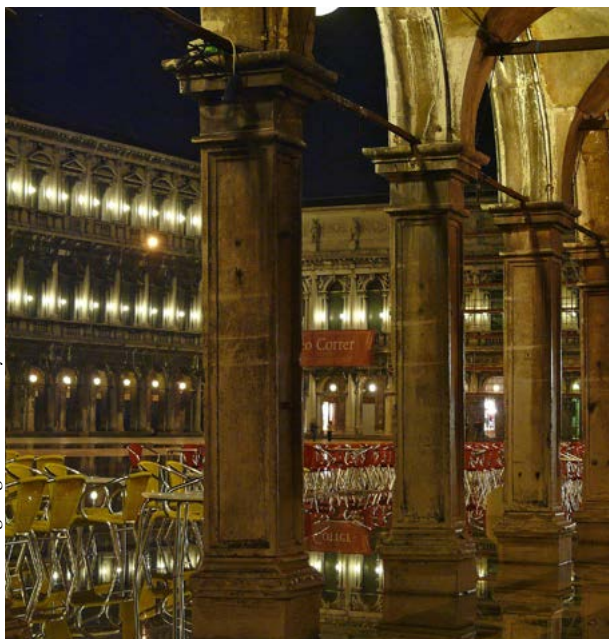
Le proiezioni di cambiamento del livello relativo del medio mare ci permettono di fare delle valutazioni circa l'operabilità del MoSE sul lungo termine, soprattutto per quanto attiene agli impatti che il suo utilizzo più o meno frequente avrebbe su processi bio-geofisici all'interno della laguna. Risultati di recente pubblicazione (vedasi Lionello et al., 2021) sono riportati in Fig. 4, dove proiezioni di innalzamento del livello relativo del mare a Venezia per due scenari di emissione (uno pessimistico, lo scenario RCP8.5, e uno ottimistico, lo scenario RCP2.6) sono messe in relazione con i tempi attesi di chiusura delle barriere del MoSE. Se nel futuro più prossimo (i prossimi due decenni) i diversi scenari di emissione non si discostano molto uno dall'altro con un innalzamento del livello del mare contenuto, sul lungo termine le differenze diventano significative, così come l'impatto sull'utilizzo del MoSE. In particolare, le proiezioni indicano che è probabile che il MoSE diventi inadeguato entro questo secolo nel caso di scenari di emissioni pessimistici (per lo scenario RCP8.5 l'altezza della mareggiata del secolo è prevista aumentare del 65% nel 2050 e del 160% a fine secolo rispetto a quanto osservato storicamente). Purtroppo, anche nel caso di scenari di emissione ottimistici (vedasi ad esempio lo scenario RCP2.6) la somma dei tempi presunti di chiusura delle barriere del MoSE annuali raggiunge le 2-3 settimane a metà secolo e i quasi due mesi a fine secolo, in entrambi i casi concentrati soprattutto in autunno. In altri termini, per un innalzamento del livello del mare pari a 50 centimetri si stima che le paratie del MoSE dovranno chiudersi in media una volta al giorno, una soluzione improponibile sia dal punto di vista ecologico che tecnico – si pensi ad esempio all'economia lagunare legata al traffico nautico attraverso le bocche a mare o agli impatti sull'ecosistema lagunare legati a modifiche alla circolazione marina in laguna e all'interruzione del respiro mareale, fondamentale per l'ossigenazione delle acque lagunari, durante periodi prolungati di chiusura.

### Politica e innalzamento del mare

Il coinvolgimento della Politica sul tema dell'innalzamento del livello relativo del mare a Venezia presente e futuro è multivalente. Innanzitutto, alla luce dell'enorme impatto potenziale sul livello relativo del medio mare dovuto a contributo antropico alla sub-

sidenza. Per quanto attiene i cambiamenti climatici, il ruolo della Politica si concretizza in azioni globali riguardo al contenimento di emissioni antropiche di gas serra e dunque di innalzamento della temperatura superficiale media del pianeta e di innalzamento del livello globale del mare. Al di là delle iniziative politiche collettive a scala globale, pare fondamentale per Venezia che il gestore sia consapevole delle variazioni attese per il futuro e pianifichi di conseguenza azioni di adattamento. A tal scopo, la comunità scientifica produce regolarmente documenti di valutazione per il decisore politico, e il sesto rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) contiene un box dedicato proprio a Venezia (Bednar-Friedl et al., 2022). Il box illustra sinteticamente la vulnerabilità dell'ecosistema e dell'economia veneziani ai cambiamenti climatici, con danni economici potenziali senza adattamento stimati tra i 7 e i 17 miliardi di euro nei prossimi 50 anni. Nell'ambito della disseminazione scientifica, la comunicazione delle incertezze associate alle proiezioni climatiche diventa fondamentale per consentire scelte politiche ben ponderate. Al momento, per l'innalzamento del livello del mare a Venezia come conseguenza dei cambiamenti climatici le incertezze riguardano principalmente da un lato la probabilità del verificarsi dei vari scenari, con lo scenario ottimistico RCP2.6 oggi ancora plausibile ma difficile da raggiungere, e dall'altro alcuni aspetti della fisica del clima, soprattutto riguardanti la risposta delle calotte polari al riscaldamento globale. Seppur le proiezioni climatiche suggeriscono che in futuro andranno inevitabilmente considerate soluzioni più radicali del MoSE per fronteggiare il fenomeno dell'acqua alta, un abisso separa le scale degli interventi per fronteggiare poche decine di centimetri di innalzamento del mare a fine secolo (come previsto dagli scenari più ottimistici) e i quasi due metri previsti per gli scenari di innalzamento più pessimistici. Cambiando prospettiva, i diversi scenari implicano tempi diversi per l'avverarsi di un innalzamento del livello del mare a Venezia ad un valore critico, da entro poche decine d'anni (per scenari pessimistici) a fine secolo (per scenari ottimistici): di nuovo, un abisso in termini di tempi disponibili per l'eventuale pianificazione e messa in opera di interventi di protezione successivi al MoSE. Finché il MoSE sarà operativo, i diversi scenari potrebbero richiedere valutazioni specifiche circa la sostenibilità ambientale dell'opera, legata anche alle cospicue risorse energetiche necessarie per garantirne il funzionamento.

È infine interessante notare che entrambi gli scenari climatici considerati, ma soprattutto lo scenario più ottimistico, forniscono un orizzonte temporale molto più lungo dei tipici mandati amministrativi; d'altro canto, mentre le proiezioni climatiche disponibili



si concentrano sulle variazioni di lungo termine, non esistono ancora previsioni di variazione del livello del mare per il futuro più prossimo, ovvero per i prossimi 10-15 anni. Serve dunque uno sforzo combinato da parte di Scienza e Politica per colmare le differenze nell'orizzonte temporale su cui ciascuna di esse opera.

### Politica, Scienza e Opinione Pubblica

Alla luce dei dati preoccupanti forniti dalle proiezioni di innalzamento del mare, non stupisce che al dibattito abbiano partecipato anche qualificati movimenti cittadini che hanno contribuito ad accrescere la cultura e la sensibilità ambientale. Il dibattito su questi problemi si è arricchito di interessanti contributi, talvolta contrastanti, che hanno favorito il coinvolgimento del mondo politico locale e della società, come si evince dal libro di Rinaldo (2009), autorevole studioso e conoscitore della realtà veneziana. Nel libro si esamina dal punto di vista culturale e scientifico la “questione Venezia”, si riporta la posizione dei movimenti ambientalisti in rapporto al Mose e si sottolinea il ruolo della cultura scientifica nel rispondere alla domanda “può buona scienza diventare buona politica?”.

L'alleanza fra Politica e Scienza per affrontare le sfide ambientali è possibile, utile e necessaria. Tuttavia, questo non significa affermare che tutti i problemi sono risolvibili grazie alla collaborazione tra Scienza e Politica. Infatti, alcune questioni sono ancora aperte e trovano difficoltà ad avere conclusione per l'esistenza di posizioni molto controverse sia all'interno della comunità scientifica che nel confronto con i movimenti culturali presenti a Venezia. Politica e Scienza dovranno maggiormente tener conto della pubblica opinione. Questa situazione rende talvolta difficile la

scelta finale da parte del Decisore Politico ed i tempi delle decisioni si allungano con evidenti ricadute negative. La nota questione del riutilizzo dei sedimenti della laguna rientra in questa categoria (Corami 2010; Cescon 2013; Morabito 2018; Corami 2020). Per questo motivo è necessario investire tempo e risorse per far comprendere i risultati scientifici all'opinione pubblica traducendoli in forme facilmente comprensibili. Questo sforzo consente di acquisire partecipazione e consenso derivante dalla convinzione che essi portano alla migliore soluzione dei problemi. Nel caso di Venezia, dato il ruolo significativo assunto dalla pubblica opinione su questioni riguardanti il futuro della città, è necessario che Politica e Scienza condividano le opportune modalità comunicative per far comprendere anche ai non addetti ai lavori i risultati scientifici (dati di fatto e non opinioni), incluse le incertezze ad essi associate. Questo modo di agire aiuta il potere politico nell'assumere le decisioni consapevolmente. Si fa presente che i principali risultati riguardanti Venezia sono stati presentati formalmente a incontri pubblici e a convegni e sono disponibili per la pubblica opinione. La trasparenza che in questi casi è fondamentale è confermata dal fatto che i ricercatori hanno operato in modo autonomo e indipendente. I risultati scientifici sono stati prodotti ricorrendo all'uso di metodologie e tecnologie avanzate. Nel caso Venezia si è formata una nuova comunità scientifica per lo studio di sistemi ambientali complessi che rappresenta un arricchimento di competenze a disposizione del Paese.

Nel contesto non possiamo dimenticare lo “Scandalò Mose” che ha comportato perdite di credibilità e sconcerto delle forze che hanno lavorato con competenza e onestà. Esso ha purtroppo trasformato un'iniziativa italiana di prestigio in un danno rilevante.

In questi ultimi anni la minaccia della crisi climatica che comporta l'aumento del livello del mare è diventata rilevante in particolar modo per le sorti di Venezia. Ciò ha determinato il significativo intervento della Accademia dei Lincei che nel novembre 2019 ha diffuso un coraggioso documento dell'autorevole studioso Seminara (Seminara G. 2019) il quale, dopo un'accurata analisi della questione “acqua alta e Mose”, nel capitolo “Venezia 20100” affronta il futuro del sistema lagunare veneziano ponendo alcune fondamentali domande di carattere tecnico-scientifico sulla sopravvivenza di Venezia e chiede il concorso del mondo della Scienza e della Cultura.

A corroborare questa posizione della “scienza italiana” interviene la comunità scientifica internazionale con 40 scienziati e letterati per sostenere, nel novembre del 2021, l'appello del prestigioso Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti rivolto al Presidente del Consi-

glio dei Ministri nel quale, dopo un'attenta disamina della futura situazione alla luce delle proiezioni regionali di IPCC propone un "approccio radicale e nuovo" "per salvare Venezia e suggerisce l'istituzione di una "nuova autorità dotata di adeguate deleghe e magari con una autorevole componente internazionale" (Ortalli, 2021).

### Conclusioni

La crisi ambientale che ha investito Venezia e la sua laguna ha trovato nell'alleanza tra Scienza e Politica lo strumento per acquisire i saperi indispensabili per affrontare il futuro di questa realtà da sempre al centro degli interessi culturali dei Paesi più avanzati. Si tratta di un significativo esempio di collaborazione in campo ambientale che potrà diventare in futuro un riferimento per lo studio e la messa a punto di

procedure per la salvaguardia di ecosistemi complessi. Il caso Venezia dimostra, inoltre, che per evitare che i risultati della ricerca scientifica pubblica, quindi indipendente, rimangano nei testi delle pubblicazioni confinate nelle biblioteche e nelle segreterie delle Istituzioni che hanno finanziato la ricerca è necessario, soprattutto in situazioni ambientali complesse, creare una interfaccia fra comunità scientifica e gli ingegneri ambientali delle imprese coinvolte negli interventi di risanamento e di protezione affinché le conoscenze acquisite siano direttamente disponibili. Analogamente perché si realizzi compiutamente il ruolo della ricerca a supporto del Decisore Politico è necessario istituire uno strumento di interfaccia fra ricercatori e opinione pubblica in modo tale che i risultati scientifici arrivino a conoscenza della rete dei movimenti in forma chiara e costruttiva. ■

### Riferimenti bibliografici

- Bednar-Friedl B., Biesbroek R., Schmidt D.N., Alexander P., Børshiem K.Y., Carnicer J., 584 Georgopoulou E., Haasnoot M., Le Cozannet G., Lionello P., Lipka O., Möllmann C., 585 Muccione V., Mustonen T., Piepenburg D. & Whitmarsh L. (2022), Europe. In: Climate 586 Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 587.
- Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, 588 D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, 589 S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK 590 and New York, NY, USA, pp. 1817–1927, doi:10.1017/9781009325844.015.
- Cescon P. e Barbante C. (2021). Politica e Scienza per Affrontare la Sfida Climatica e Ambientale. *Ingegneria dell'Ambiente* 4: 277-280.
- Cescon P., Corami F. (2013) Development of sustainable remediation techniques for polluted sediments in marine areas and in harbour. 3rd international pollution and remediation Conference, July 15/17/2013 Toronto Ontario Canada.
- Corami F. *et al.* (2010) "Sediment washing" dei sedimenti fortemente contaminati della laguna di Venezia: un approccio sostenibile. Proceedings SiCon 2010.
- Corami F. *et al.* (2020) Geospeciation, toxicological evaluation and hazard assesment of trace elements in superficial and deep sediments. *Environmental science and pollution research* 27(13), 15565-15583.
- Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti (2000). La Ricerca Scientifica per Venezia – Metodologie di Sperimentazione e di Rilevamento. Vol. II, Tomo I, Studio di Processi. Venezia, Editore Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti.
- Morabito E. *et al.* (2018) Il quadro normativo ambientale nella laguna di Venezia. Proposta di una nuova procedura di gestione dei sedimenti. *Ingegneria dell'Ambiente* vol. 5, n. 2.
- Rinaldo A. (2009). Il governo dell'acqua-Ambiente naturale e Ambiente costruito. Venezia. Marsilio Editori.
- Seminara G. (2019). Mose e Magistrato alle Acque per difendere Venezia. *Accademia dei Lincei* 25/11/2019.
- Lionello P., R. J. Nicholls, G. Umgiesser, and D. Zanchettin (2021): Venice flooding and sea level: past evolution, present issues, and future projections (introduction to the special issue). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2633–2641, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2633-2021>.
- Ortalli G., Rinaldo A., Somers Cocks A. Un appello urgente per salvare Venezia dall'innalzamento del mare. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti 22/10/2021.
- Zanchettin D., Bruni S., Raicich F., Lionello P., Adloff F., Androsov A., Antonioli F., Artale V., Carminati E., Ferrarin C., Fofonova V., Nicholls R. J., Rubinetti S., Rubino A., Sannino G., Spada G., Thiéblemont R., Tsimplis M., Umgiesser G., Vignudelli S., Wöppelmann G., & Zerbin S. (2021), Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2643-2678, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-721-2643-2021>.



# ECOMONDO

THE GREEN TECHNOLOGY EXPO

Leading  
the ecological  
transition.

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

8-11  
NOVEMBER  
2022

RIMINI EXPO  
CENTRE  
ITALY

simultaneously with

**KEY ENERGY**  
THE RENEWABLE ENERGY EXPO



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

Organized by

**ITALIAN  
EXHIBITION  
GROUP**  
Providing the future

In collaboration with



**ITCA**   
ITALIAN TRADE AGENCY

# TRATTA - CONCENTRA - RICICLA E VALORIZZA LE TUE ACQUE REFLUE

## IL FUTURO DELL'EVAPORAZIONE



LA TUA SOLUZIONE COMPLETA  
PER LO SCARICO ZERO



VALORIZZAZIONE DEI  
CASCAMI TERMICI



TRATTAMENTO DEI REFLUI INDUSTRIALI



**NEW**

EVAPORATORE A  
RICOMPRESSIONE MECCANICA

VERSIONE IBRIDA  
BASSO FABBISOGNO  
ENERGETICO

FINO AL **40%** DI SALI  
NEL CONCENTRATO

## TUTTE LE TECNOLOGIE DI EVAPORAZIONE E DI SCAMBIATORI DI CALORE



ECO DRY



ECO DPM



ECO DPM SE



ECO VR-HP



ECO VR-WW



ECO VS-HP



ECO CMV

EVAPORATORI E CONCENTRATORI SOTTOVUOTO DAL 1984



## UN VALIDO ESEMPIO DI INNOVAZIONE NELL'EVAPORAZIONE SOTTOVUOTO OTTIMIZZANDO IL CONSUMO ENERGETICO

**Ing. Massimo Gregoris<sup>1</sup>, Ing. Mattia Maggioni<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sales Manager

<sup>2</sup>Process Engineer

Nel corso dell'ultimo anno il marcato aumento dei prezzi delle materie prime, dei combustibili e dell'energia elettrica ha comportato per il settore produttivo un gravoso incremento dei costi, motivo per cui ora più che mai viene sentita la necessità di optare, all'interno dei progetti, per delle soluzioni in grado di consentire un risparmio energetico e l'ottimizzazione dei

consumi. Prendendo in esame il trattamento delle acque reflue industriali, oggi giorno è sempre più importante ricercare tecnologie che consentano di ottenere una significativa riduzione in termini di consumo energetico. È per questo motivo che ECO-TECHNO Srl, uno dei principali produttori mondiali di evaporatori per la concentrazione di soluzioni acquose, ha deciso

di investire in questa direzione. Nel campo del trattamento delle acque reflue con evaporazione sottovuoto, le soluzioni proposte hanno generalmente una componente di consumo elettrico sempre presente a cui talvolta si somma, in funzione della tipologia di impianto, una componente di consumo termico: tutti gli evaporatori termici, infatti, necessitano di un generatore esterno di utility (quali acqua calda, surriscaldata, vapore o olio diatermico).

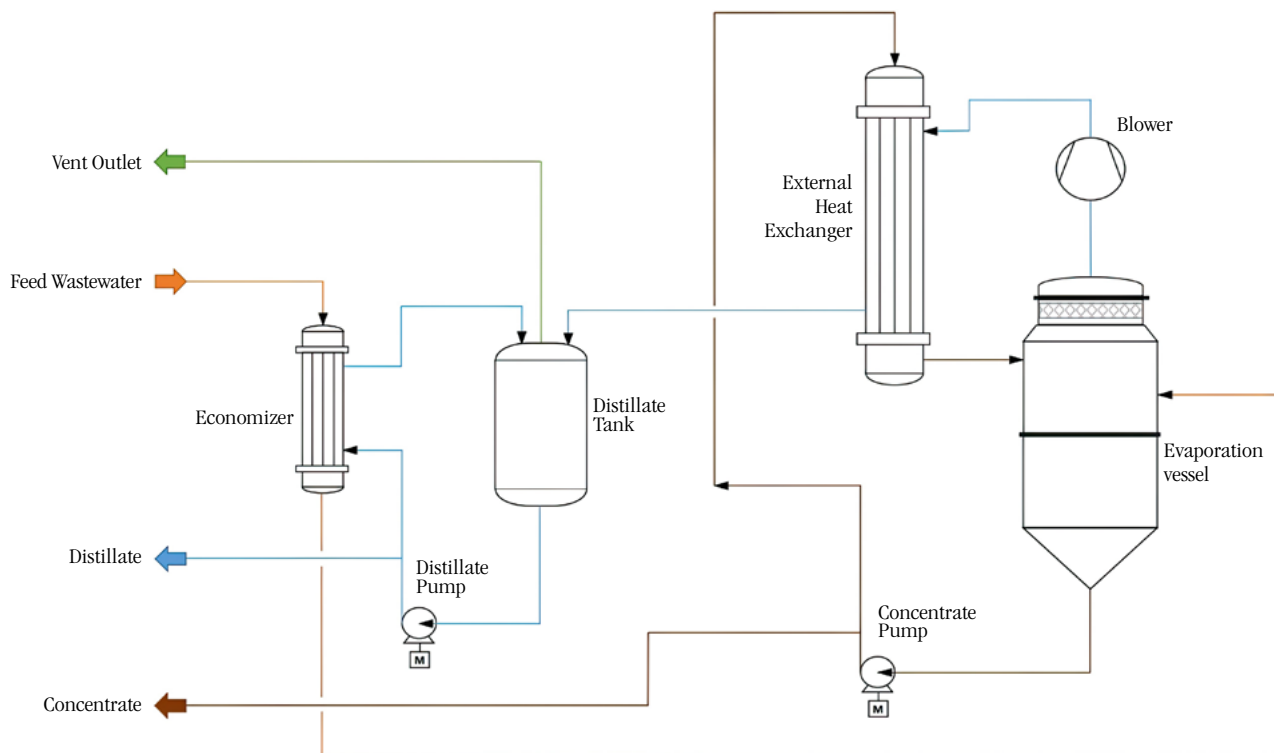
Tra le tecnologie consolidate all'interno dell'evaporazione sottovuoto spicca la ricompressione meccanica del vapore (MVR), tecnologia dalla vocazione di consumo prettamente elettrico ma che ECO-TECHNO ha recentemente implementato con un elemento di novità, costituito da un'alimentazione ibrida (elettrica + termica) per migliorarne ulteriormente i consumi e le performance di processo, rendendola più efficiente.

Il principale vantaggio della ricompressione meccanica è quello di sfruttare il calore di condensazione dell'evaporato prodotto. Infatti, il funzionamento classico degli impianti MVR prevede l'impiego dell'evaporato stesso per riscaldare il concentrato ed alimentare termicamente il processo evaporativo. In condizioni normali ciò sarebbe impossibile dal momento che le temperature del liquido che bolle e dell'evaporato prodotto da questo sono molto simili; tuttavia, comprimendo adiabaticamente questo gas è possibile ottenere un vapore a pressione e temperatura maggiore rispetto ai valori di partenza, che è quindi in grado di riscaldare il liquido concentrato.

Il funzionamento generale dell'impianto prevede le seguenti fasi, visibili nello schema riportato in Figura 1.

L'alimentazione viene trasferita dal serbatoio di stoccaggio all'evaporatore mediante una pompa dedicata; prima di entrare nella caldaia attraversa un filtro per rimuovere particelle solide e successivamente scorre all'interno di un Economizzatore avente la funzione di recupero del calore contenuto nel distillato per incrementare la temperatura del tal quale. Ovviamente questo passaggio non è effettivo nella fase di start-up, ovvero quando non si ha ancora la produzione di distillato e quindi non è possibile effettuare il preriscaldamento.

Il prodotto caricato all'interno del vessel deve quindi essere riscaldato per poter raggiungere la temperatura di evaporazione. L'incremento di temperatura solitamente ha luogo utilizzando delle resistenze elettriche o impiegando aria esterna da aspirare mediante la soffiante: in questo modo l'aria aspirata viene compressa dal macchinario e incrementa la sua temperatura per effetto del suddetto fenomeno fisico, così da poter essere impiegata nel riscaldamento del liquido. Entrambi questi metodi, tuttavia, richiedono un ingente consumo elettrico e parecchio tempo per portare il liquido alla temperatura di lavoro (circa 90°C). L'implementazione di ECO-TECHNO Srl, che consiste nell'incrementare la temperatura del liquido tramite l'iniezione di vapore o acqua calda/surriscaldata, permette di ridurre enormemente i tempi di start up e di evitare il prolungato consumo elettrico dato dalle resistenze o dalla soffiante stessa.



**Figura 1. Process Flow Diagram.** Schema di processo.



Raggiungendo la temperatura di lavoro il processo evaporativo viene auto-alimentato dall'evaporato prodotto: il contenuto della caldaia viene ricircolato forzatamente in continuo, mediante apposita pompa, ad uno scambiatore esterno a fascio tubiero e rientra successivamente in caldaia, dove evaporando viene convogliato alla soffiante che lo comprime incrementandone temperatura e pressione e lo invia al lato mantello dello scambiatore esterno. Nello scambiatore il vapore condensa cedendo il suo calore al concentrato, così da alimentare il processo evaporativo. In uscita dalla caldaia, un abbattitore di nebbie (mist eliminator) trattiene eventuali trascinati di particelle liquide o solide, così da garantire la corretta operatività del compressore. Quando la produzione di distillato ha luogo, questo viene ricircolato all'Economizzatore in modo da recuperare il calore del distillato prodotto, che in uscita dallo scambiatore di calore principale ha una temperatura prossima ai 90°C, cedendolo all'alimentazione.

Rispetto ad altri sistemi evaporativi (pompe di calore, impianti multieffetto), la ricompressione meccanica presenta un'importante differenza. Mentre in altri evaporatori lo scambio termico per l'evaporazione e la condensazione avviene in due sezioni distinte, negli MVR il processo di riscaldamento e condensazione avviene in un unico scambiatore. Pertanto, il processo si autosostiene fino a quando l'energia ceduta dal distillato è sufficiente a scaldare il concentrato, permettendone poi la successiva evaporazione in caldaia. Poiché la portata volumetrica di distillato cala con l'aumentare del tempo di concentrazione (sia perché il contenuto di acqua nel concentrato cala sensibilmente, sia perché possono verificarsi dei fenomeni di sporcamento che vanno a ridurre l'efficacia dello scambio termico), e parallelamente si ha l'innalzamento ebullioscopico del concentrato, ad un certo punto il carico entalpico del distillato in fase vapore non sarà più sufficiente a far evaporare il concentrato, causando quindi l'arresto del processo. Di conseguenza, qualora si debbano raggiungere fattori di concentrazione elevati, la ricompressione meccanica presenta una forte limitazione rispetto alle altre tipologie di evaporatori.

Tuttavia, l'introduzione da parte di ECO-TECHNO Srl di un'alimentazione ibrida, fa sì che si possa sfruttare un vettore termico per fornire al processo una quantità extra di energia che permette di sostenere il processo evaporativo e ottenere dei fattori di concentrazione maggiori rispetto alla ricompressione meccanica tradizionale, raggiungendo quindi rese paragonabili ad altri evaporatori quali i multieffetto, con un minor dispendio energetico.

Questa soluzione tecnologica, infatti, ha un consumo termico molto ridotto, in quanto il calore esterno fornito mediante utility viene impiegato solo nella fase di startup in quantità ridotte (in termini di portata e di energia termica consumata) ed occasionalmente per compensa-

re eventuali perdite di produzione imputabili all'elevato fattore di concentrazione raggiunto con il concentrato trattato. Mentre la prima ragione del consumo di utility esterna è pressoché fisiologica in quanto non è possibile far iniziare il processo evaporativo con il tal quale ancora freddo, la seconda ragione è principalmente legata all'obiettivo che l'utilizzatore dell'impianto si prefigge di raggiungere, ovvero fin dove vuole spingere la resa del macchinario. ECO-TECHNO Srl ha introdotto questa miglioria appositamente per il trattamento di soluzioni saline, raggiungendo in tal modo delle concentrazioni decisamente maggiori rispetto ad un MVR tradizionale; infatti, in queste applicazioni, nella fase terminale del ciclo evaporativo l'elevata concentrazione di sali e la loro eventuale precipitazione conduce ad un netto calo di produzione di distillato, che può essere compensato mediante il riscaldamento fornito dal fluido di servizio caldo.

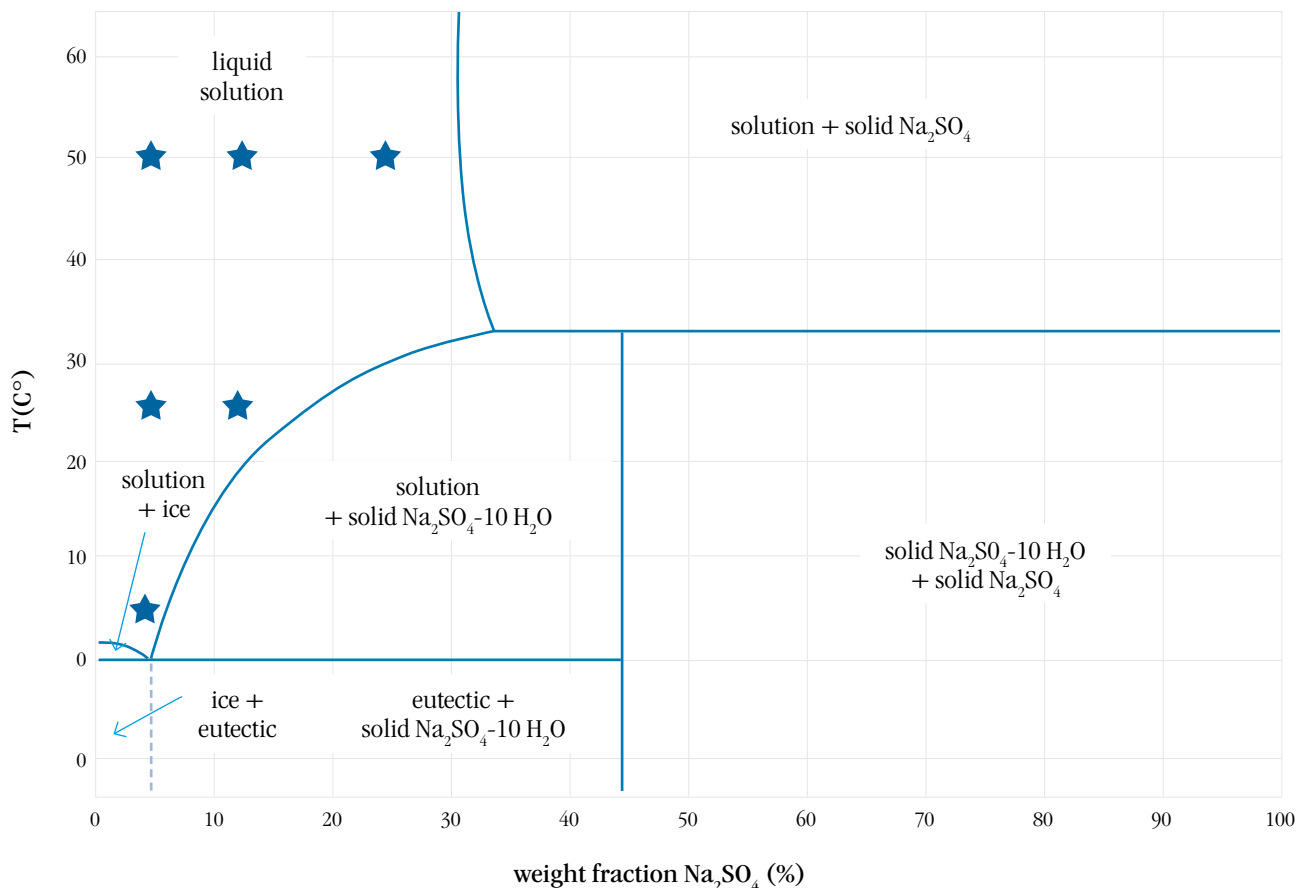
Per meglio comprendere i vantaggi di questa differente tecnologia risulta utile effettuare una comparazione in termini di consumi e di rese con i classici impianti evaporativi. A titolo di esempio, verrà presentato di seguito un recente case study di ECO-TECHNO Srl, che ha fornito riscontro pratico all'attività di progetto.

### Case study: la cristallizzazione del solfato di sodio

In termini di tipologia di reflui idonei al trattamento mediante compressione meccanica la platea di soluzioni acquose è piuttosto ampia: acque di lavaggio a bassa concentrazione di inquinanti o soluti, emulsioni oleose, soluzioni dell'industria alimentare o farmaceutica, solo per citarne alcuni. Tra le applicazioni più recenti di questa tecnologia, troviamo la cristallizzazione di soluzioni saline di solfato di sodio, processo al termine del quale viene prodotto un sale anidro (qualora siano presenti solo tracce di altre impurità). La tecnologia, infatti, riesce a gestire senza problemi l'innalzamento ebullioscopico, che per una soluzione di solfato di sodio al 40% in peso è di circa 7°C.

Il solfato di sodio si presta molto bene alla cristallizzazione tramite evaporazione in quanto il sale si presenta sottoforma di polvere fine, che viene mantenuta facilmente in sospensione dalla circolazione forzata. Inoltre, la stessa circolazione forzata permette di avere una bassa tendenza allo sporcamento e alla formazione di incrostazioni, anche ad alte concentrazioni saline.

Al di sopra dei 32,4°C e per concentrazioni superiori al 33,2% in peso, il solfato di sodio si presenta nella sua forma anidra: a questa temperatura, infatti, il composto decaidrato del solfato di sodio (sale di Glauber) si decompone per formare una fase liquida ed una fase solida anidra (Fig.2). Rispetto alla forma decaidrata ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ), il solfato di sodio anidro si presenta



**Figura 2.** Curve di solubilità di soluzioni di solfato di sodio in funzione della temperatura e della concentrazione di Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

come sale cristallino fine, che non solo è più semplice da stoccare ma soprattutto acquista valore come sottoprodotto. Se ne fa largo uso, ad esempio, nell'industria chimica, nella produzione di detersivi, nella settore del vetro o in quello tessile.

Il caso in esame riguarda un impianto di evaporazione a ricompressione meccanica "ibrido" realizzato da ECO-TECHNO Srl impiegato nella concentrazione di una soluzione di solfato di sodio, fino a raggiungere la cristallizzazione del sale, e quindi la precipitazione del solido. Il precipitato viene successivamente separato dalla corrente liquida, detta acqua madre, mediante una centrifuga di tipo pusher in continuo.

L'azienda cliente è leader mondiale nella produzione, manifattura e distribuzione di involucri artificiali per l'industria della carne, con una presenza produttiva e commerciale in tutto il mondo. Dal processo produttivo vengono generati 60 m<sup>3</sup>/giorno di una soluzione acida di solfato di sodio, che il cliente aveva necessità di trattare con un impianto a basso impatto energetico, in grado di separare la componente salina dall'acqua.

La soluzione progettata e fornita da ECO-TECHNO Srl consiste appunto in un impianto di cristallizzazione mediante ricompressione meccanica da 60 m<sup>3</sup>/giorno, realizzato in super duplex, sia per l'ambiente acido sia per garantire un'elevata resistenza all'abrasione data dai

solfati, necessaria per questo processo. Il distillato prodotto ha una conducibilità media inferiore ai 200 µS/cm, grazie a cui è stato possibile raggiungere l'obiettivo dello scarico zero. Il concentrato, invece, costituito da una miscela eterogenea di precipitato salino e liquido madre (soluzione al limite di solubilità), presenta una densità di 1,4 g/l ed una concentrazione di sale pari al 40% in peso. Tale soluzione viene inviata ad un separatore centrifugo, da cui si ottiene solfato di sodio anidro con un tenore di umidità residuo inferiore al 3%; le acque madri, invece, pari a circa 3 m<sup>3</sup>/giorno, vengono separate ed inviate ad un altro concentratore ECO-TECHNO costituito da una caldaia orizzontale con coclea interna: la caldaia è rivestita da uno scambiatore a sella, alimentato con acqua calda. Questa configurazione consente di scaricare al termine del ciclo di lavoro un concentrato salino palabile, che consente quindi il totale recupero del solfato di sodio contenuto nella soluzione di partenza.

Per mantenere sempre pulito lo scambiatore, e mantenere quindi l'efficienza del sistema costante, ECO-TECHNO ha implementato un sistema di lavaggio automatico in cui viene utilizzato il distillato caldo, evitando quindi di emungere e consumare acqua da altre fonti. Non sono richiesti pertanto dei lavaggi chimici, né tantomeno pulizie di tipo meccanico.



Il committente, quindi, ha raggiunto tutti i suoi obiettivi: recupero totale del sale e scarico zero delle acque, il tutto con un impianto a basso consumo energetico ed elevate prestazioni.

### Il confronto: MVR ibrido e MVR tradizionali

Per quanto riguarda i consumi energetici, è stato rilevato in fase di conduzione dell'impianto che la reale potenza elettrica assorbita in condizioni di funzionamento "a regime" è pari a 108 kW; la potenza termica richiesta in termini di preriscaldamento nella fase di start-up è pari a 90 kW da erogare per un tempo di circa un'ora, quindi 90 kW sulle 24 ore se consideriamo un ciclo di evaporazione di un giorno. I consumi specifici (riferiti al distillato prodotto) sono quindi di 43 Wh/L elettrici e di 1,5 Wh/L termici. Nel caso si volesse raggiungere la precipitazione del sale, come nel caso in esame, per i motivi sopra esposti si avrebbe un aumento del consumo termico nella fase finale del ciclo evaporativo: dalle rilevazioni sul campo, il consumo termico medio durante l'intero ciclo di concentrazione salirebbe in un range che va dai 4 ai 6 Wh/L, che sono ancora dei valori estremamente bassi. Anche il consumo elettrico medio salirebbe, raggiungendo valori di circa 50-55 Wh/L.

Volendo invece fare un confronto a livello di rese tra questo MVR ed un MVR tradizionale, ad alimentazione esclusivamente elettrica, possiamo affermare che l'aggiunta di un'alimentazione termica garantisce un sostanziale aumento del fattore di concentrazione ottenibile. Infatti, mentre una ricompressione meccanica tradizionale che tratta una soluzione salina può arrivare mediamente ad un 25% di TDS, un MVR ad alimentazione ibrida permette di arrivare anche al 35-40% di TDS, realizzando quindi un perfetto connubio tra performance di processo elevate e ridotti consumi energetici. Anche la scelta della circolazione forzata, rispetto a

quella naturale, permette di avere minori tempi di contatto del liquido all'interno dello scambiatore a fascio tubiero, e quindi consente di gestire al meglio reflui con elevata tendenza allo sporco o soluzioni saline che possono dar luogo a precipitazione.

Inoltre, un ulteriore elemento di confronto è quello relativo al consumo energetico durante la fase di avviamento dell'impianto. Utilizzando resistenze elettriche o la soffiante con aria, occorrono dalle due alle tre ore per portare il liquido alla temperatura di esercizio, durante le quali si ha un assorbimento elettrico di circa 100 kW (questo per un MVR da 60 m<sup>3</sup>/giorno come quello preso in esame), pari quindi a 200-300 kWh elettrici. Con la soluzione proposta da ECO-TECHNO Srl, invece, come abbiamo visto si velocizzano notevolmente i tempi di start up, i quali vengono ridotti di oltre un'ora, con un consumo termico di soli 90 kWh. Si consideri che produrre un kWh elettrico bruciando un combustibile è molto più costoso che produrre un kWh termico, in quanto per avere 1 kWh elettrico bisogna fornire circa 3 kWh termici: ne consegue che con questa soluzione, il risparmio energetico durante l'avviamento è pari a un fattore 10.

Innovare e puntare su soluzioni efficienti a basso impatto energetico si può fare, e questo ne è un perfetto esempio. È per questo motivo che ECO-TECHNO Srl continua ad investire importanti risorse in questa direzione, sviluppando nuovi modelli evaporativi volti soprattutto alla riduzione dei consumi elettrici e/o termici. ■

**Eco-Techno Srl**

E-mail: [sales@eco-techno.it](mailto:sales@eco-techno.it)

Web: [www.eco-techno.it](http://www.eco-techno.it)



IdA





## EFFICIENZA E INNOVAZIONE CON LE SOLUZIONI KSB IN TENNACOLA S.P.A.

**KSB Italia S.p.A.**



Il Gruppo KSB, nato nel 1871, è fornitore mondiale di pompe, valvole e sistemi per il trasporto di fluidi. I principali settori in cui opera sono: ingegneria di processo, building, energia, trasporto acque, trattamento acque cariche e trasporto di solidi. Grazie alla sua presenza capillare, è in grado di offrire un'assistenza completa durante l'intero ciclo di vita del prodotto e soddisfare al meglio le esigenze del cliente con soluzioni personalizzate. Il Gruppo è presente in tutti i continenti con società commerciali, stabilimenti produttivi e centri service. Dal 1925 la società KSB Italia S.p.A. opera sul mercato e rappresenta in Italia gli interessi del Gruppo.

La società Tennacola S.p.A. attraverso la propria dotazione impiantistica gestisce il Servizio Idrico Integrato (SII) delle acque, ovvero l'insieme delle operazioni per l'attingimento di acqua potabile dalle sorgenti, il trasporto verso i serbatoi e i singoli utenti, la raccolta delle acque di scarico e la loro depurazione e la reimmissione nei corpi idrici superficiali. La stazione di sollevamento fognaria in esame è situata nella Contrada di Passo Sant'Angelo nel comune di Sant'Angelo in Pontano (Macerata) e colletta i reflui civili misti, acque nere e acque meteoriche di circa 2.000 abitanti.

Dopo un'attenta valutazione delle caratteristiche e problematiche dell'impianto esistente con pompe sommergibili, KSB Italia ha risposto alle necessità del cliente proponendo una stazione di sollevamento fognario con pompe a secco.

La soluzione è caratterizzata da pompe KSB Sewabloc in esecuzione monoblocco con KSB SuPremE<sup>®</sup>, motore sincrono ad alta efficienza in classe di efficienza IE5, e con inverter PumpDrive 2 montato a bordo motore per il controllo della velocità. Una soluzione di questo tipo comporta costi di investimento iniziali dovuti alle opere civili per la realizzazione della camera di manovra

per l'alloggiamento delle pompe a secco. I vantaggi che ne derivano poi però in fase di funzionamento e gestione, sono quantificabili in termini economici in un ritorno dell'investimento iniziale che può essere valutato in un minore costo di acquisto delle pompe in relazione al diverso grado di protezione dei motori, minori consumi energetici, un minor costo di manutenzione e un minor costo di gestione.

I vantaggi della soluzione sono stati:

### **Sicurezza e affidabilità di funzionamento**

- Le pompe a secco sono contenute all'interno di una camera di manovra e questo ne garantisce una maggiore durata ed efficienza nel tempo.

### **Semplicità di gestione e manutenzione**

- È possibile accedere direttamente alla camera di manovra e avere costantemente sotto controllo il funzionamento e poter effettuare direttamente in loco parte degli interventi di manutenzione ordinaria.

### **Verifica delle prestazioni**

- Con questa tipologia di installazione è possibile inserire nel piping di impianto i manometri in aspirazione e mandata per la misura delle pressioni manometriche e quindi della prevalenza della pompa.

### **Versatilità dell'impianto**

- L'impianto non è soggetto al vincolo imposto dal diametro del piede di accoppiamento delle pompe sommergibili, pertanto in futuro le prestazioni dell'impianto possono essere modificate in modo molto semplice con adattamenti sul piping della camera di manovra.

### **Sicurezza sul lavoro**

- L'impianto ha una camera di manovra chiusa, stagna ed ermetica alle esalazioni e presenta quindi condizioni di lavoro igieniche e sicurezza per gli interventi di manutenzione e riparazione. ■



**KSB Italia S.p.A.**

Via M. D'Azeglio 32 - 20863 Concorezzo MB

E-mail: [info\\_italia@ksb.com](mailto:info_italia@ksb.com)

Web: [www.ksb.it](http://www.ksb.it)



IdA



# Sonde da campo per rilevazione in continuo

Interfaccia SmartCID per l'invio automatico dei dati registrati e visualizzati su pc, smartphone e tablet.

## SONDA TENSIOATTIVI

Per la rilevazione automatica in continuo di ppm Tensioattivi



SONDA TENSIOATTIVI

## SONDA COD OUT

Per rilevazione automatica in continuo di:  
ppm Solidi sospeso totali  
ppm BOD5, COD, Torbidità



SONDA COD OUT

## VF30 FANGHI

Misura automatica del volume dei fanghi [cc/l] e velocità di sedimentazione [m/h]

Brevetto 2021 n. 102021000028064

**NOVITA'**



VF30 FANGHI

dal 1979

 **CID**  
Ing. VENTURA srl

## NUOVO SISTEMA SMARTCID COMPOSTO DA SONDE E MISURATORE FANGHI

Ing. Arcangelo Ventura<sup>1</sup>, Ing. Davide Ventura<sup>2</sup>, Ing. Carlo Ventura<sup>3</sup>

<sup>1</sup>A.D. CID

<sup>2</sup>Responsabile R&D

<sup>3</sup>Responsabile tecnico

Il **CID ING VENTURA Srl** opera dal 1979 nel settore della depurazione delle acque reflue civili e industriali mediante la progettazione, l'esecuzione e la gestione degli impianti.

L'esperienza maturata dal 1979 nel settore specifico della depurazione delle acque ha permesso a CID di conseguire nel 1994 il Brevetto Europeo di lettura fotometrica all'infrarosso della trasmittanza dell'acqua tal quale e successiva elaborazione statistica-neurale e la realizzazione delle **Sonde inox CID** per la rilevazione

in continuo, senza l'utilizzo di reagenti, dei parametri: Solidi Sospesi, BOD5, COD, Torbidità, Tensioattivi.

Nel 2021 il sistema di telecontrollo composto dalle sonde e apparecchiature prodotte da CID è stato affiancato dal nuovo sistema **smartCID** che include oltre alle sonde inox CID il **Misuratore fanghi Vf30**, frutto del nuovo Brevetto conseguito da CID, per rilevare in automatico la quantità di fango [cc/l] e la velocità di sedimentazione  $V_{SED}$  [m/h] nei processi biologici e chimico-fisici di flocculazione.



Sonda TE  
Tensioattivi



Sonda  
CODout



Misuratore fanghi  
Vf30

**smartCID** è stato ideato come sistema di controllo intelligente snello, veloce e preciso, in una parola smart, sviluppato sulla nuova piattaforma CID open-source per l'integrazione di tecnologie eterogenee come dispositivi IoT, domotica/automazione industriale, telecamere, sistemi audio/video, Web, idoneo ai nuovi mezzi social di comunicazione e condivisione in rete dei dati.

Stante il principio di rilevazione brevettato, il sistema di misurazione in continuo CID (composto da apparecchiatura e sonde) è indicato per la gestione e telecontrollo degli impianti, per la sua versatilità e assenza di manutenzione, rappresentando un buon indicatore in continuo dello stato globale di funzionamento dell'impianto e del processo depurativo, mediante rilevazione dei parametri delle acque, dei carichi, dei flussi, degli allarmi, e dello stato delle macchine e delle apparecchiature collegate.

Le Apparecchiature e le Sonde CID sono da campo e NON da laboratorio; esse non sostituiscono ma integrano le routine analisi di laboratorio.

### **Sistema pulizia automatica sonde inox CID: CODout e TE**

Il sistema di pulizia delle sonde CID è particolarmente efficiente ed è il frutto di due anni di ricerche e verifiche poiché garantisce che il segnale emesso e ricevuto dalla coppia di fibre ottiche non sia invalidato dallo sporco o da incrostazioni che si formano inevitabilmente sui terminali inox delle fibre ottiche.

Il sistema di pulizia è pneumatico a 6 Bar ed è composto dal regolatore di pressione, dal pistoncino, valvole, raccordi, organi di trasmissione e forcina porta spazzoline. L'aria compressa giunge alla sonda mediante il cavo speciale CID e attraverso i componenti del sistema di pulizia imprime alla barra di trasmissione il moto alternato alle spazzoline in nylon direttamente sui terminali delle fibre ottiche.

La pulizia è automatica e comandata dal programma secondo il ciclo di rilevazione dati configurato dall'utente. La durata delle spazzoline è praticamente illimitata, come quella delle sonde che hanno struttura in acciaio inox.

### **MISURATORE FANGHI smartCID Vf30 per rilevare in automatico la quantità di fango [cc/l] e la velocità di sedimentazione [m/h]**

#### *Generalità*

Nei processi depurativi sia biologici che chimico-fisici di flocculazione, la fase finale di sedimentazione dei fiocchi di fango formati nel processo a monte

rappresenta il fattore determinante dell'intero trattamento poiché da essa dipendono sia le caratteristiche dell'acqua depurata che la produzione dei fanghi da smaltire.

Il volume di fango sedimentato e la velocità di sedimentazione dei fiocchi di fango, in un preciso intervallo di tempo, sono i parametri gestionali principali che indicano l'allineamento ai dati di progetto e indirizzano sulle operazioni da eseguire.

Nella gestione degli impianti di depurazione biologica uno dei parametri rilevato saltuariamente e manualmente dagli addetti alla gestione è il **Vf30** [cc/l] cioè la quantità di fango prelevato in ossidazione che sedimenta dopo 30min in cilindro o cono da 1lt. Il dato permette di stabilire quando inviare i fanghi di supero in eccesso nel processo depurativo e di indicarne la quantità più probabile da smaltire. Correlato con altri parametri il Vf30 fornisce al gestore altre fondamentali indicazioni. L'importanza del Vf30 oltre che processuale è economica poiché il trattamento e smaltimento dei fanghi di supero rappresenta mediamente il 35% dei costi gestionali dell'impianto.

A tale scopo il CID ING VENTURA SRL di Brescia ha messo a punto e brevettato la nuova apparecchiatura **smartCID Vf30** per la rilevazione automatica della quantità e velocità di sedimentazione dei fanghi basata su una complessa elaborazione delle immagini scattate dalla telecamera sul cilindro da 1.000cc, riempito con la miscela di fango che giunge in sedimentazione. Essa è indicata sia nei processi biologici che chimico-fisici di flocculazione poiché i tempi per Vf, Vsed1, Vsed2 sono impostabili dall'utente nella tabella di configurazione.

La **smartCID Vf30** è composta da due armadi in termoresina con protezione IP65 assemblati sovrapposti e provvisti di tutti i componenti necessari.

**Il quadro superiore** è completo di Modulo I/O industriale, display LCD 20x4 righe, differenziale di alimentazione 220V, alimentatore 24Vcc, router e chiavetta-sim internet, pompa peristaltica di carico-scarico, morsettiera, pulsante per avvio manuale ciclo.

**Il quadro inferiore** è completo di fondali sagomati nero e bianco, cilindro graduato con colonna di carico, barra Led, telecamera.

Alimentando a 220V. si avvia automaticamente il ciclo composto dalle fasi principali: carico, intervalli Vsed1 e Vsed2 per la velocità di sedimentazione [m/h], l'intervallo Vf per la determinazione del volume di fango [cc/lxDt], lo scarico.

I dati rilevati vengono visualizzati sul display e con gli allarmi salvati sulla memoria microSD e inviati sia sul database del server che su Telegram impostati



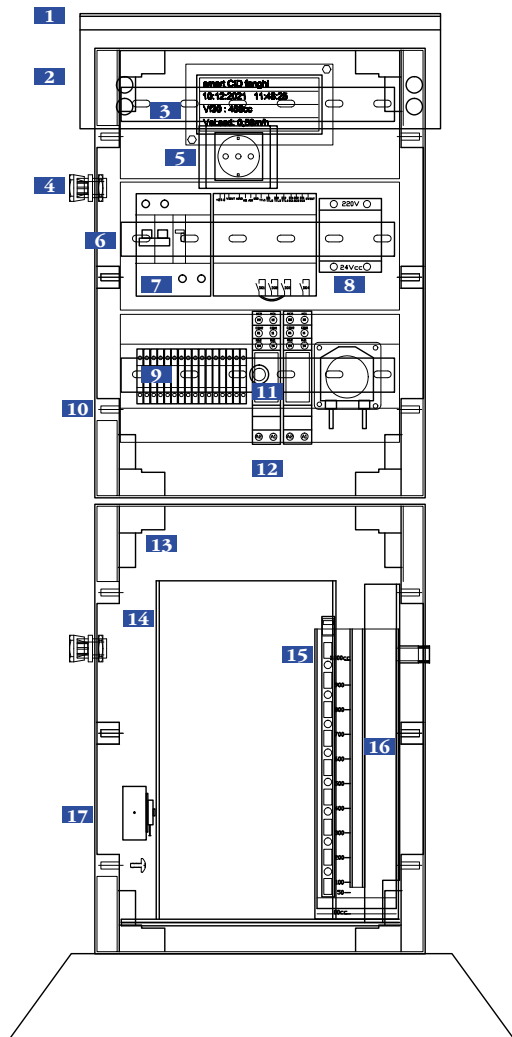
dal cliente, per renderli disponibili su pc, smartphone, tablet in modo semplice e immediato.

Collegandosi via wi-fi con pc o smartphone l'utente può visualizzare e scaricare i dati e gli allarmi registrati e accedere alla configurazione per impostare

l'intervallo in giorni per l'avvio ciclo, i tempi per Vf, Vsed1, Vsed2, la soglia di allarme per Vf, le impostazioni per l'invio sul database e con Telegram.

### smartCID Vf30 – Componentistica

- 1 Tettuccio inox presso piegato per copertura.
- 2 Armadio termoresina IP65 – RAL7035  
310x 160xH 425mm – Porta cieca con 2 chiusure.
- 3 Display 20x4 righe per visualizzare ultimo dato registrato.
- 4 Router e chiavetta-sim Internet di trasmissione dati.
- 5 Presa 220 V. per alimentatore Router.
- 6 Differenziale magnetotermico di protezione.
- 7 Modulo I/O industriale con programma precaricato e configurato.
- 8 Alimentatore Switching 24Vcc.
- 9 Relè allarme parametri P1 e P2.
- 10 Morsettiera per collegamenti.
- 11 Pulsante per comando pulizia manuale.
- 12 N°3 pannelli finestrati fissati con clip su montanti.
- 13 Armadio termoresina IP65 – RAL7035  
310x 160xH 425mm – Porta cieca con 2 chiusure.
- 14 Fondali sagomati bianco – nero opaco.
- 15 Lampada Led.
- 16 Cilindro 1.000cc graduato con colonna di carico.
- 17 Telecamera alta definizione GW.



### smartCID – Visualizzazione immagini e dati inviati da Telegram

Su PC o Smartphone è possibile, previa configurazione, ricevere automaticamente i dati e le immagini inviate dal misuratore fanghi **smartCID Vf30**.

*Avviando Telegram, cliccando sulla immagine o sui dati è possibile scaricarli.*

*ES: photo\_2021-11-25\_16-39-55.jpg*

Al termine del ciclo di rilevazione i dati vengono registrati sulla memoria microSD della **smartCID Vf30** e inviati sia sul database che con Telegram sul pc, smartphone, tablet.

Aperto Telegram e cliccando sul Bot del gruppo impostato si visualizzano, per ogni rilevazione in modo semplice e immediato, l'immagine del cilindro graduato contenente il fango sedimentato, data e ora della rilevazione, i corrispondenti valori del volume di fango [cc/l] e della velocità di sedimentazione [m/h] (vedere immagine sopra).



Nell'immagine del cilindro oltre a visualizzare il fango si vedono le linee di minimo e massimo oltre alle tre righe di lettura dei pixel in corrispondenza dell'interfaccia fango-acqua.

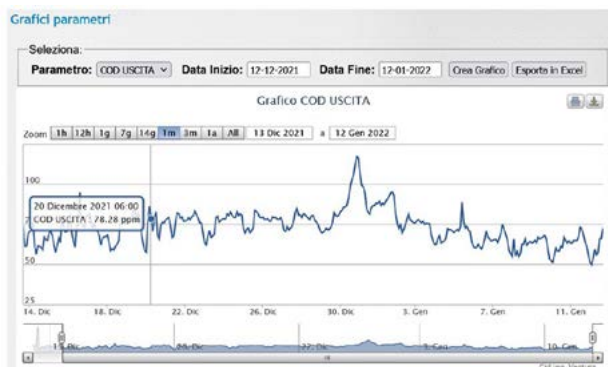
Nell'immagine sono inoltre evidenziate le caratteristiche del fango e dell'acqua surnatante.

Sulla memoria microSD vengono salvate le immagini e i dati rilevati del volume di fango [cc/l] e della velocità di sedimentazione [m/h]. Collegandosi localmente via wi-fi alla **smartCID Vf** si possono scaricare le immagini e i dati registrati in formato csv che possono essere elaborati in Excel nel formato xls per creare tabelle e grafici, (come da es. pagina seguente).

Nel caso l'utente abbia impostato il database secondo le indicazioni (M.5.5) potrà acquisire direttamente i dati in tabella e grafici (come da es. pagina seguente).

### SONDE CID mod. CODout

È particolarmente indicata per il controllo dell'acqua depurata in uscita da impianti di depurazione con trattamento biologico. Ogni sonda immersa nell'ac-



Es. Grafico ricevuto dal DataBase.

| Date,Time,Vf,Vsed            |
|------------------------------|
| 15-12-2021,21:30:36,408,0.71 |
| 05-12-2021,21:30:36,377,0.58 |
| 25-11-2021,21:30:36,311,0.72 |
| 15-11-2021,21:30:36,253,0.59 |
| 05-11-2021,21:30:36,109,0.52 |

qua rileva in continuo ogni 2 secondi i seguenti parametri: **SST (Solidi sospesi totali), BOD5, COD, Torbidità**. Per talune tipologie di scarichi è idonea a rilevare la **TOC**. Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID.

#### Caratteristiche

- Materiale e pesi: Acciaio Inox AISI304.
- Peso (solo sonda): 4 Kg.
- Dimensioni ingombro: 350 x 120 mm H=1300 mm.
- Livello immersione MIN-MAX: 150-800 mm.
- Installazione: in vasca, pozzetto, canale (NON in tubazione in pressione).
- Posizionamento: con braccio Inox di supporto fissato a parete o con catena Inox 2m, in dotazione.
- Pulizia: automatica con spazzoline in nylon mosse da pistoncino pneumatico a 6 Bar, direttamente sui terminali Inox delle fibre ottiche.
- Griglia di protezione: (per escludere il materiale grossolano) telaietti incernierati con rete di passaggio con fori  $\Phi$  1mm o piastrina antirotazione.
- Cavo speciale per collegamento alla apparecchiatura: in dotazione 20 m.
- Conduttori 5x1,5 (alimentazione e segnale) + tubo nylon 4x2 aria compressa.
- Alimentazione: 24 Vcc con cavo speciale fornito.
- Segnale analogico in uscita: 4-20 mA o 0-5V con cavo speciale fornito.
- Emittitore Infrarosso: diodo GL IRED 930 nm.
- Trasmissione segnale Infrarosso: fibre ottiche testate Inox  $\Delta=110$ mm.
- Temperatura funzionamento: in aria -10...+55°C.

#### SONDA CID mod. TE per tensioattivi

Per rilevazione in continuo ogni 2 sec. nell'acqua tal

quale dei seguenti parametri: **concentrazione dei Tensioattivi Totali – Range: 0,5-70 ppm**

Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID.

#### Principio di misurazione

La sonda **CID mod.TE** è indicata per rilevare i tensioattivi con potere schiumogeno che diminuiscono la tensione superficiale delle molecole, per cui si formano bolle piene d'aria cioè schiuma.

La concentrazione di tensioattivi totali rilevata dalla sonda con la curva di default va da 0,5 a 8ppm. Per valori superiori è necessaria la verifica preliminare. La schiuma formata nel reattore passa nel vetrino di misurazione attraversato dall'infrarosso dell'unità analogica che ne trasmette il segnale al programma che lo elabora per fornire la concentrazione in ppm dei tensioattivi.

#### Caratteristiche

- Materiale e pesi: Acciaio Inox; 12 Kg.
- Dimensioni ingombro: D 200 mm H=850 mm.
- Posizionamento: in bacinetto Inox CID con scarico del flusso d'acqua rilevato.
- Ingresso acqua da rilevare: innesto rapido per tubo 8x 6 portata massima 10 l/h.
- Pulizia: automatica temporizzata pneumatica a 6 Bar.
- Cavo speciale per collegamento all'apparecchiatura: in dotazione 20m. Conduttori 5x1,5 + tubo nylon 4x2 aria compressa.
- Alimentazione elettrica: 24 Vcc con cavo speciale fornito.
- Segnale analogico in uscita: 4-20 mA con cavo speciale fornito.
- Emittitore Infrarosso: diodo GL IRED 930 nm.
- Convertitore: analogico regolabile lineare.
- Trasmissione segnale Infrarosso: fibre ottiche testate Inox.
- Temperatura funzionamento: in aria -10...+55°C.

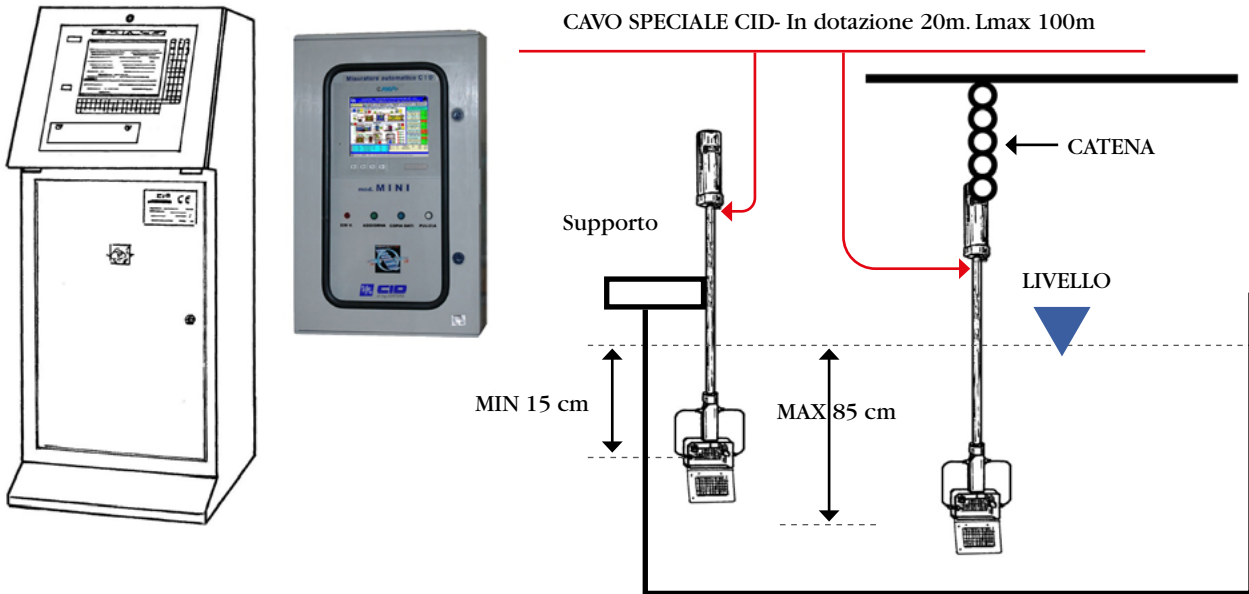
#### Funzionamento

L'acqua da rilevare entra nella sonda mediante tubo PEAD 8x 6mm con portata indicativa di 60l/h; tale alimentazione, a cura del cliente, può essere effettuata mediante pompa dosatrice (o peristaltica) temporizzata mediante relè pausa/lavoro 1min/1min.

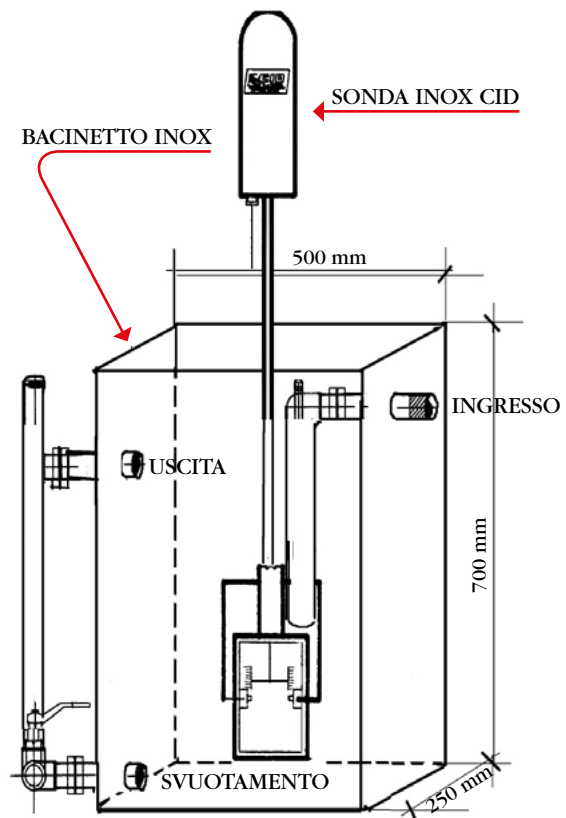
Dopo misurazione la schiuma esce dalla sonda e cade nell'acqua del bacinetto inox CID defluendo dal condotto di troppo pieno allo scarico.

La pulizia automatica del vetrino di passaggio e misura della schiuma è pneumatica, secondo il sistema di pulizia delle sonde CID, ed effettuata con le cinque "passate" al termine dell'intervallo di lettura impostato.

## Sonde CODout – installazione su vasca o canale



## Sonde CODout – installazione in bacino inox



Nel caso di afflussi in tubazione o in vasche a livello variabile o in serbatoi in pressione è necessario mandare una presa da 1" del flusso nel bacino inox CID.

- Dimensioni: 250 x 500 x H700 mm.
- Portata ingresso: max 7mc/h.
- Attacco ingresso: 1" Gas M.
- Attacco uscita: 2" Gas M.

### Manutenzione

*Misuratore fanghi smartCID Vf30  
durata totale 4,5ore/anno*

Lavaggio cilindro 1.000cc e tubi carico-scarico

**Per il lavaggio del cilindro:** spegnere il misuratore abbassando la levetta del differenziale – aprire l'anta inferiore e rimuovere il pannello nero svitare il raccordo T.P. troppo pieno, rimuovere il cilindro sfilando il tubo inserito e ruotandolo in senso orario. Aiutandosi con uno scovolo lungo pulirlo con acqua, asciugarlo e riporlo.

**Per il lavaggio del tubo:** accendere l'apparecchiatura – immergere la crepina in un secchio di acqua pulita – aprire l'anta superiore – togliere il pannello finestrato basso, dove sono montati la pompa e pulsante avvio manuale ciclo, ruotando di 90° le due viti di chiusura (il pannello verrà trattenuto da due elastici e dai tubi della pompa) – agendo sull'interruttore a 3 posizioni (CARico – 0 – SCARico) spostarlo sul CARico per qualche minuto. Richiudere e rimettere in vasca la crepina terminale del tubo.

### Sostituzione del tubo della pompa peristaltica

La durata fine vita (ovalizzazione completa) del tubo in marprene o silicone delle pompe peristaltiche è di 100 ore corrispondenti a 120 cicli di misurazione.

L'usura del tubo di marprene o silicone dopo 120 cicli di misurazione dà la diminuzione della portata del 20%.

Per assicurare il riempimento 1.000cc si consiglia di sostituire il kit ogni 4mesi o 120 cicli di misurazione.



Per la sostituzione seguire le indicazioni sotto fornite:

1. Premere col pollice e l'indice sulla parte laterale delle pompe ed estrarre il coperchietto ad archetto.
2. Scollegare i tubi di aspirazione e di mandata ruotando l'innesto portagomma.
3. Estrarre il tubetto-kit scorrendo verso l'esterno la slitta dei 2 raccordi di innesto dei tubi.
4. Prendere il nuovo kit e inserirlo facendo scorrere verso l'interno la slitta dei 2 raccordi di innesto dei tubi.
5. Collegare i tubi di aspirazione e di mandata ruotando l'innesto portagomma.
6. Rimettere il coperchietto ad archetto premendolo lateralmente e facendo scorrere i perni nelle guide.

*Sonde inox CID: CODout e TE  
durata totale 2ore/anno*

Controllo del funzionamento del sistema di pulizia

Verificare ogni mese il funzionamento del sistema di pulizia sonda premendo l'apposito pulsante per il tempo impostato in Configurazione (proporzionale alla lunghezza del cavo sonda).

Il valore della lettura istantanea dovrà essere "0.0". In caso contrario verificare la posizione delle spazzoline della sonda e quindi la linea d'aria compressa.

Scaricare la condensa formata nel serbatoio polmone del compressore di pulizia aprendo l'apposita vite.

### Pulizia manuale delle sonde CID

Si suggerisce di effettuare la pulizia sonde ogni mese soprattutto nel caso la sonda presenti incrostazioni o sia intasata da materiale.

Per la pulizia manuale è bene procedere nel modo seguente: estrarre la sonda, NON ruotarla a testa giù, appoggiarla, predisporla in verticale.

Pulire la sonda con acqua e utilizzare solamente uno spazzolino con setole di nylon (tipo spazzolino da denti) su supporto in materiale plastico o grattare con l'unghia del pollice o, nel caso non si abbia lo spazzolino, spostando a mano avanti e indietro la forcilla sostegno spazzoline. Nel caso di formazione di alghe è consigliato l'uso di Ipoclorito di sodio commerciale (candeggina). NON utilizzare polveri o paste abrasive o raschietti ma spazzoline in nylon.

**Le sonde CID TE** montano come organo di pulizia interna del vetrino il gommino in pvc la cui sostituzione va effettuata ogni 2 mesi svitando il supporto del pistoncino ed estraendo lo stantuffo; è necessario stringere con 2 chiavette n. 7 dado e controdado di fermo lasciando però libero di ruotare il gommino di pulizia. ■

**CID Ing.Ventura Srl**  
BRESCIA, Tel. 0303730699  
E-mail: [info@venturacid.it](mailto:info@venturacid.it)  
Web: [www.venturacid.it](http://www.venturacid.it)

**SIAMO  
ORGOGLIOSI  
DI VOI.**



**ALL'85%.**

Nel riciclo di carta e cartone, l'Italia è ai vertici in Europa: ha superato l'85% in anticipo sugli obiettivi del 2030. È un grande risultato, evidenzia il lavoro di tutta la filiera del riciclo degli imballaggi cellulosici e nasce dall'impegno quotidiano di cittadini e Comuni, che fanno correttamente la raccolta differenziata. Ma possiamo ancora migliorare: aumentando la quantità e la qualità della raccolta e recuperando quanto ancora resta nel rifiuto indifferenziato.

**La carta si ricicla e rinasce.**

**Garantisce Comieco.**



**comieco**

Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica

Comieco fa parte del sistema



## IMBALLAGGI COMPOSITI A PREVALENTE BASE CELLULOSICA... E DOVE TROVARLI

**Alberto Celotto**

Responsabile progetto poliaccoppiati Comieco

Pur consapevole che la citazione nel titolo del seguente articolo dell'opera "**animali fantastici e dove trovarli**" della scrittrice inglese J. K. Rowling (già autrice della saga di Harry Potter) possa apparire poco ortodossa ad una prima lettura posso però dimostrare che esistano delle analogie tra la saga fantasy e la storia recente degli imballaggi compositi a prevalente base cellulosica (che da qui in poi indicheremo sinteticamente come "compositi").

Come succede per gli "animali fantastici" protagonisti del libro, anche i compositi vengono infatti percepiti dall'opinione pubblica da taluni come elementi di progresso con effetti addirittura miracolosi e da talaltri in maniera molto diffidente sottolineandone maggiormente gli aspetti potenzialmente non positivi.

Ma procediamo con ordine.

Cerchiamo innanzitutto di rendere un po' più familiari questa tipologia di imballaggi. Si tratta di imballaggi costituiti per più del 50% in termini di peso da

carta e il cui peso del materiale non cellulosico è comunque superiore al 5% del peso complessivo.

Si tratta infatti di imballaggi cellulosici che per via della loro funzione non possono essere costituiti unicamente e solamente da fibre cellulosiche, queste infatti devono essere abbinare necessariamente ad un altro tipo di materiale per poter svolgere il compito per il quale sono stati ideati.

Fino a cinque – sei anni fa l'esempio più famoso di compositi, sia per presenza sul mercato che nel vissuto dei clienti/consumatori, erano i cartoni per bevande. Elemento presente nella vita quotidiana di tutti e quindi di immediata comprensione. Chi non ha nel suo frigorifero almeno un cartone del latte o nella propria dispensa un cartone di succo di frutta o quella della passata di pomodoro?

Il Cartone per Bevande era, ed è una tipologia di imballaggio ormai pienamente "codificato" sia per i clienti sia per i soggetti che ne curano la raccolta ed il



riciclo. L'unica variabile significativa tra i vari modelli di Cartone per Bevande e per i diversi produttori di questo articolo è la presenza o meno dello strato di alluminio, necessario laddove si debba garantire la conservazione del contenuto per diversi mesi a temperatura ambiente e non presente nei Cartoni per Bevande contenenti il latte fresco con data di scadenza di alcuni giorni e da conservare necessariamente a basse temperature in frigorifero.

Fin qui sembrerebbe tutto molto chiaro e lineare.

Il mio riferimento agli “animali fantastici” e relativa diffidenza non parrebbe finora giustificato.

Negli ultimi anni però si sono verificati due processi, che iniziati in maniera distinta sono progrediti parallelamente per intrecciarsi più volte nel loro sviluppo.

Da una parte si è consolidato nell'opinione pubblica un movimento “plastifugo” che ha determinato da parte delle aziende, specie quelle del settore Food, una ricerca di imballaggi alternativi a quelli a prevalenza polimerica usati fino a quel momento.

Dall'altra lo sviluppo delle soluzioni industriali che la filiera cartaria stava mettendo a punto proprio per progettare e realizzare imballaggi che riuscissero allo stesso tempo a soddisfare esigenze di sostenibilità, innovazione e funzionalità. Alcune volte questo sviluppo ha preso in considerazione l'accoppiamento della cellulosa con altri materiali, più spesso plastica e alluminio, necessarie come abbiamo precisato poco sopra, per poter far svolgere all'imballaggio in questione la propria funzione.

Chiunque abbia fatto una spesa in un qualsiasi negozio della grande distribuzione o nel piccolo rivenditore sotto casa ha potuto e può toccar con mano gli effetti di questi due processi.

Vasetti dello yogurt tradizionalmente prodotti con altri materiali che diventano di carta (o meglio di composito), confezioni delle merendine e dei salumi o dei biscotti che seguono lo stesso percorso.

A fronte di questa presenza sempre più importante hanno iniziato a manifestarsi le due differenti ti-

pologie di percezione sopramenzionate nei loro confronti, con due quesiti per i quali cresceva sempre più l'attenzione:

- Quanti saranno i compositi? Rimarranno un quantitativo importante (70 – 80.000 tonnellate sui 3 milioni e mezzo di carta gestiti a livello nazionale) ma limitato oppure la loro immissione nel mercato sarà tale da cambiare gli equilibri e le dinamiche di riciclo della filiera della carta e cartone?
- Quali saranno? A differenza di quanto visto con i cartoni per bevande per questi imballaggi non vi è allo stato attuale una composizione “standard” valida e un “modello” inteso come forma per la stragrande maggioranza delle casistiche. I modelli, le tipologie di imballaggi attualmente sono molteplici e non solo per quanto riguarda il materiale che si va ad accoppiare con la fibra cellulosica ma anche sulla % di fibra cellulosica contenuta nell'imballaggio.

Con l'obiettivo di, se non trovare risposte definitive, almeno iniziare ad indagare ed approfondire questi quesiti Comieco ha organizzato, sul finire del 2020, un gruppo di lavoro con rappresentanti di tutte le singole componenti della filiera del mondo carta.

I dati di questi primi due anni di attività sono interessanti, e come spesso succede anche il processo di investigazione ed analisi presenta delle specificità/peculiarità preziose per il background consortile.

Per poter raccogliere dati relativi all'ambito “qualitativo” – in prima battuta focalizzata sulla % di fibre cellulosiche presenti all'interno dei diversi compositi – è stata introdotta l'obbligatorietà da parte del Consorzio, dal 1 gennaio 2021 per i produttori di questi imballaggi, di dichiarare il contenuto di fibre cellulosiche dei loro prodotti.

Punto di riferimento fondamentale per poter dar ordine a questo flusso di informazioni è rappresentato dalla norma **UNI 11743:2019** e **Sistema di valutazione Aticelca 501-19** “Carta e cartone – Determinazione dei parametri di riciclabilità di materiali e



Figura 1. Marchio di riciclabilità previsto dalla norma UNI 11743:2019

prodotti a prevalenza cellulosa” pubblicata dall’UNI (Ente di Normazione Italiano) nell’aprile 2019, che riprendeva interamente la procedura di laboratorio del metodo di prova Aticelca 501:2017, elevandolo a norma nazionale.

Val la pena aprire una parentesi per sottolineare adeguatamente l’importanza della procedura di laboratorio del metodo Aticelca, non solo perchè questo documento rappresenti il frutto del lavoro portato avanti dal 2011 al 2017 da parte di Aticelca, Assocarta, Assografici e Comieco con il supporto tecnico di Innovhub e Lucense ma per via del fatto che grazie anche al passaggio attraverso una consultazione pubblica costituisce un caso unico a livello europeo.

Questo processo assume ancor più valore alla luce del fatto che stiamo parlando di uno strumento per informare il consumatore proprio in merito al contenuto di fibre cellulosiche degli imballaggi. Questo anche attraverso un sistema di elementi oggettivi e verificabili e di facile lettura grazie all’apposizione sull’imballaggio di un marchio associato a sua volta al livello di contenuto di fibre cellulosiche, il tipo A contiene una quantità di queste tra il 90% ed il 95%, il tipo B tra l’80% ed il 90%, il tipo C tra il 60% e l’80% ed il tipo D infine con un contenuto di fibre cellulosiche inferiore al 60%.

Grazie ai dati raccolti e analizzati con questo criterio, la situazione aggiornata a giugno 2022 ci dà un quadro in continua evoluzione ma confortante sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo.

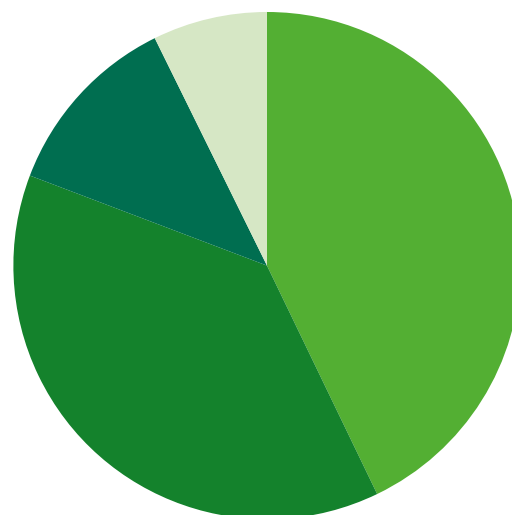
Dal punto di vista **quantitativo**, infatti dopo una crescita importante del 30% avvenuta nel corso del 2021 rispetto al 2020 si è assistito ad un 2022 di assestamento con valori di produzione che si attestano intorno ad un aumento del 3,6% rispetto al 2021.

Dal punto di vista **qualitativo** si è constatato che la stragrande maggioranza dei composti prodotti ed immessi al consumo in Italia ad oggi appartengono alle tipologie più virtuose e nobili in termini di contenuto di fibre cellulosiche ossia il tipo A e il tipo B (fig. 2) con un risultato complessivo dell’81% (43% tipo A e 38% tipo B).

Ritornando quindi alla diffidenza ed ai timori riguardo ai composti esplicitati nei due quesiti di partenza si può affermare che:

- a) Il trend di crescita dei composti, pur se rilevante non è tale da poter modificare significativamente a medio termine il quadro del riciclo della carta e cartone;
- b) I composti sono costituiti largamente da imballaggi con un contenuto di fibre cellulosiche almeno superiore all’80%;

Si tratta ovviamente delle prime considerazioni rispetto ad una tematica che rimane al centro dell’analisi del Consorzio e che continuerà nei prossimi mesi



- COMPOSITI DI TIPO A (COMPONENTE CARTA  $\geq 90\%$  E  $< 95\%$ )
- COMPOSITI DI TIPO B (COMPONENTE CARTA  $\geq 80\%$  E  $< 90\%$ )
- COMPOSITI DI TIPO C (COMPONENTE CARTA  $\geq 60\%$  E  $< 80\%$ )
- COMPOSITI DI TIPO D (COMPONENTE CARTA  $< 60\%$ )

**Figura 2.** Categoria di appartenenza dei composti prodotti ed immessi al consumo in Italia da gennaio a giugno 2022/1743:2019.

sia nel monitorare i due aspetti toccati in questo articolo sia nell’approfondire altri punti, tra i quali sicuramente gli scarti prodotti durante il riciclo di questi imballaggi da parte delle cartiere e la classificazione delle differenti tipologie di plastiche utilizzate nei diversi composti, fondamentale quest’ultima per poter costruire azioni di riciclo virtuose come già avviene per i cartoni per bevande.

Insomma... i composti devono necessariamente continuare ad essere monitorati ma iniziano a fare un po’ meno paura.

Come gli “animali fantastici” appunto. ■

Per informazioni:

**Comieco**

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

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







**WATER TECHNOLOGIES**

# Mobile Water Services

## Impianti mobili per il trattamento acque

Il servizio di impianti mobili di Veolia Water Technologies è costituito da unità mobili per il trattamento dell'acqua che consente di rispondere a situazioni di emergenza o azioni pianificate, facilitando una risposta tecnicamente ed economicamente sostenibile.

La flotta di unità mobili è composta da una vasta gamma di tecnologie per affrontare diverse tipologie di richieste: osmosi inversa, filtrazione, scambio ionico, demineralizzazione dell'acqua, addolcimento, chiarificazione, flottazione o decarbonatazione.

Contatti:  
Veolia Water Technologies Italia SpA  
Via Lampedusa 13  
20141 Milano  
[www.veoliawatertechnologies.it](http://www.veoliawatertechnologies.it)

Resourcing the world





**Veolia Water Technologies Italia S.p.A.**

## **UNITÀ MOBILI: UNA SOLUZIONE VERSATILE PER FAR FRONTE ALLE EMERGENZE E A NECESSITÀ TEMPORANEE**

**Matteo Scattolin<sup>1</sup>, Camilla Tronti<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sales Manager area service

<sup>2</sup>Marketing & Communications

L'utilizzo temporaneo di impianti mobili di trattamento acque, sia in caso d'emergenza che per attività programmate, come potrebbero essere le manutenzioni degli impianti permanenti, costituisce una valida alternativa agli elevati costi d'investimento iniziali richiesti per un nuovo impianto per la produzione di acqua di processo o per ottemperare ai limiti di scarico imposti dalla normativa vigente.

Un sistema temporaneo di trattamento acque è una soluzione ideale in caso di emergenza, poiché può sostenere un'erogazione continua di acqua trattata per tutti gli scenari imprevedibili, come ad esempio, affrontare cambiamenti stagionali a breve termine o fornire acqua di processo ad un impianto che necessariamente deve produrre in continuo, ed impedirne così costosi tempi di inattività.

Il servizio, inoltre, può risolvere problemi di carenza idrica, perché permette di trattare fonti idriche alternative, quali acque di pozzo o superficiali, ovvero implementare il trattamento dell'acqua necessaria a produrre il vapore utilizzato negli stabilimenti e trattare a monte o a valle le acque reflue dal ciclo produttivo.

Questi sono appunto alcuni degli scenari che si sono verificati in questi ultimi mesi e per i quali siamo stati chiamati ad intervenire.

A giugno, nel pieno della crisi idrica causata dalla siccità, siamo stati chiamati da Acquevenete, uno dei gestori del servizio idrico integrato presente nella regione Veneto, per intervenire nella zona del Polesine, a causa della risalita del cuneo salino sul Delta del Po. In soli due giorni siamo riusciti a consegnare, installare e avviare un'unità mobile con tecnologia ad osmo-



**Figura 1.** Unità mobile con tecnologia ad osmosi inversa installata presso Acquevenete.





**Figura 2.** Unità mobile con tecnologia ad osmosi inversa utilizzata per dei test sulla qualità dell'acqua di processo.

si inversa con portata da 100 a 120 m<sup>3</sup>/h di permeato per blending acqua potabile. L'unità ad osmosi inversa è composta da quattro skid da 25 m<sup>3</sup>/h ciascuno ed è collocata all'interno di un rimorchio MORO dotato di membrane in una disposizione 3/2/1 che forniscono, in singolo passo, fino a 100 m<sup>3</sup>/h, con una riduzione del 95% della conducibilità dell'acqua di alimentazione, e, in doppio passo, fino a 50 m<sup>3</sup>/h, con una riduzione del 99% della conducibilità, anidride carbonica esclusa.

L'unità mobile, noleggiata per due mesi, ha prodotto circa 100.000 m<sup>3</sup> totali di acqua trattata uso potabile ed ha permesso di mitigare la crisi idrica dei mesi estivi.

La stessa tipologia di unità mobile ad osmosi inversa, è stata invece utilizzata da un'azienda leader nella produzione di ingredienti a base vegetale, proteine vegetali ed eccipienti farmaceutici, per dei test sulla qualità dell'acqua di processo da utilizzare all'interno dello stabilimento produttivo volti a migliorare il ciclo idrico dell'impianto esistente.

L'unità mobile, noleggiata per sei mesi, ha una capacità di produzione fino a 100 m<sup>3</sup>/h ed include il monitoraggio online: da backoffice è possibile il collegamen-

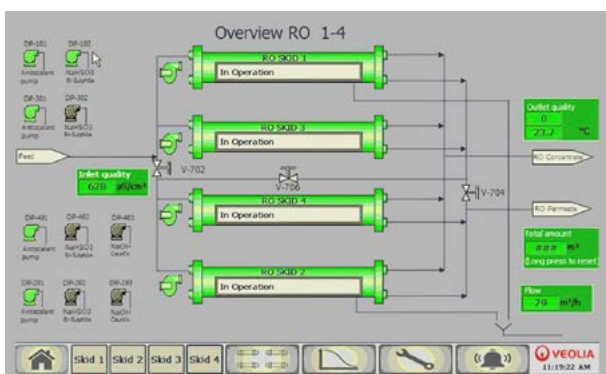
to al sistema per attività di visualizzazione stato, trend, strumentazione e impostazioni oppure, previo consenso dei requisiti di policy e sicurezza da parte del Cliente, operare a distanza, come da esempio in Figura 3.

Una diversa tipologia di unità mobile è stata invece utilizzata presso uno stabilimento del settore chimico in Sicilia. In questo caso è stato richiesto un noleggio a lungo termine delle tecnologie Actiflo™ Mini e DAF (Dissolved Air Flotation Unit). La prima è attualmente impiegata per delle prove pilota scopo di un Progetto di ricerca che sta dando risultati estremamente positivi in tema di rimozione inquinanti,, mentre la seconda per trattare l'acqua dello stabilimento per raggiungere una maggiore sostenibilità nell'area circostante.

In particolare, l'unità DAF può trattare fino a 120 m<sup>3</sup>/h di acqua reflua con 200 kg/h di solidi ed è completa di gruppi di dosaggio polielettrolita e coagulante, compressore, pompe di alimentazione, di ricircolo e di estrazione fanghi.

La stessa unità DAF è stata scelta da un'azienda leader nella produzione di gelatina e gelatina idrolizzata, per un noleggio a lungo termine di 12 mesi con possibilità di riscatto. L'applicazione in questo caso è però differente in quanto il flottatore viene utilizzato per un trattamento acque mirato alla valorizzazione del prodotto di scarto. Il fango prodotto dal trattamento, può essere così valorizzato nel ciclo produttivo.

Un'altra tipologia di noleggio è stata scelta per un'azienda leader nella produzione di gelatine bovine, di pesce e peptidi di collagene. In questo caso è stata noleggiata per un periodo di 12 mesi con possibilità di riscatto da parte del cliente, un'unità mobile con filtro a dischi Hydrotech montato su skid, dotato di pannelli filtranti da 10 µm. L'unità servirà come trattamento terziario per una maggiore sostenibilità delle acque di scarico.



**Figura 3.** Display monitoraggio online.



**Figura 4.** Installazione presso uno stabilimento del settore chimico in Sicilia.



**Figura 5.** Installazione di un'unità mobile con tecnologia DAF.

### Conclusione

I servizi con impianti mobili di Veolia Water Technologies sono in grado di adattarsi a molteplici scenari garantendo una fornitura continua di acqua trattata di qualità, sia per far fronte a situazioni pianificate nel breve, medio o lungo termine, sia per situazioni impreviste che compromettono l'approvvigionamento idrico di una città o di un impianto di trattamento acque industriale.

Le unità possono essere richieste e messe in servizio anche con un preavviso molto breve per garantire la continuità operativa, evitando costosi momenti di fermo e di inattività.

Il design modulare di molte unità mobili consente di combinare una varietà di configurazioni di processo, rendendo possibile il trattamento delle reti di approvvigionamento di città, acqua di pozzo, fiumi e bacini artificiali. A tal fine, la flotta di unità mobili è composta da una vasta gamma di tecnologie "Plug-

and-Play" che consentono di far fronte alle più svariate richieste di: osmosi inversa, filtrazione, scambio ionico, demineralizzazione dell'acqua, addolcimento, chiarificazione, flottazione o decarbonatazione.

Per la rapidità di risposta, l'ampia gamma di soluzioni e la flessibilità del servizio, le unità mobili di Veolia Water Technologies permettono di affrontare oggi le sfide di domani come il cambiamento climatico, insieme ad un maggiore stress sulle risorse idriche dovuto all'aumento della domanda. ■

**Veolia Water Technologies Italia spa**

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



# 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



# Informazioni DALLE AZIENDE

## COPERTURE in LEGA di ALLUMINIO JSF ALUROOFS

Da oltre 25 anni la **JSF ALUROOFS** di Villadangos del Paramo – Leon (E) propone sul mercato mondiale coperture in lega di alluminio per depuratori oltre che per edifici civili con centinaia di referenze in tutto il mondo e migliaia di metri quadrati coperti.

L'alluminio ha preso sempre più piede nelle coperture di depuratori rispetto alla classica vetroresina grazie alle sue caratteristiche ed ai suoi indubbi vantaggi:

- L'alluminio non si degrada con la luce ultravioletta e non trasmette la luce perché ha una bassa emissività termica. Quindi zero radiazioni verso l'interno e zero calore dall'esterno verso l'interno.
- L'alluminio non fa scintille ed è quindi un materiale ideale ovunque ci siano pericoli di esplosione o di incendi.

- Le leghe di Al non richiedono manutenzione o alcun tipo di trattamento nel tempo (vernici, gel ecc.).
- Le coperture hanno un basso profilo con un minore volume di aria da trattare.
- La struttura delle coperture in Al garantisce una qualità uniforme nel tempo. Il processo di lavorazione delle coperture in alluminio non determina o provoca modifiche o danni alle sue caratteristiche strutturali; le leghe di alluminio sono fornite allo stabilimento di lavorazione con certificati che attestano le prove effettuate per garantire la loro robustezza strutturale.
- Le coperture piane in lega di Al sono estremamente versatili e possono essere modificate e adattate alle più svariate situazioni di impiego senza alterare le loro caratteristiche strutturali e sono a tenuta stagna.
- Sono leggere e facilmente smontabili e amovibili dal personale che può avere necessità di intervenire all'interno delle vasche urgentemente. Botole, porte, valvole antidepressione, aperture,

racordi possono essere montati in ogni momento sui pannelli senza pregiudicarne le caratteristiche strutturali e la sicurezza.

- Sono autoportanti e calpestabili con la massima sicurezza del personale.
- La vetroresina ha problemi per la salute durante la lavorazione: formazione di micropolveri giudicate cancerogene negli USA.
- Al contrario della vetroresina l'alluminio è riciclabile all'infinito e la **JSF Aluroofs** garantisce per almeno 50 anni le proprie coperture.

La **JSF ALUROOFS** produce una serie di coperture adatte a tutte le applicazioni:

- **Aluplan:** coperture piane lisce per coprire vasche di piccole dimensioni;
- **Alugreca:** coperture piane grecate per coprire vasche di grandi dimensioni con luce fino a 20 m o di dimensioni maggiori con l'impiego di travi portanti in lega di alluminio;
- **Alusphere:** coperture a cupola emisferica applicabili anche per impieghi civili come coperture di palazzetti sportivi, centri commerciali, teatri ecc.;
- **Alucone:** coperture coniche per serbatoi, digestori ecc.;
- **Architectural:** rivestimenti in Alluminio per digestori o qualsiasi altra costruzione in lega di alluminio. Fra le migliaia di referenze l'azienda



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



# SOLVAir®

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)





ha la copertura **Alugreca** della vasca di ossidazione 38 x 33 m del depuratore di Torrevieja (Alicante) e la copertura **Alusphere** con Ø 53,45 m del centro commerciale di Rzesow (PL) inaugurato nella primavera del 2022. **JSF ALUROOFS** è commercializzata in Italia dalla **MORESCHINI RAPPRESENTANZE snc** che da oltre 40 anni propone sul mercato italiano la più vasta gamma di macchinari di qualità per depuratori civili ed industriali, per potabilizzatori e per le energie rinnovabili. ■

**Moreschini Rappresentanze**  
 Web: [www.moreschinisnc.it](http://www.moreschinisnc.it)  
 Mail: [moreschini@moreschinisnc.it](mailto:moreschini@moreschinisnc.it)

### Vapore come fluido di processo e per produzione di energia elettrica

Si tratta di contratti per *Boilers* di tipo industriale realizzati da Macchi, che forniranno il vapore di processo in diverse tipologie di impianti, tra cui raffinerie e impianti di liquefazione gas (LNG) e impianti chimici. Questi progetti verranno ingegnerizzati nella sede centrale di Gallarate e realizzati per la maggior parte utilizzando le officine del Gruppo Sofinter. Dodici *boilers* andranno a Ras Laffan nel più grande impianto al mondo per la produzione di GNL in Qatar e contribuiranno ad attuare l'accordo di



fornitura stipulato con il nostro Paese. La divisione Macchi, fondata nel 1959 e ora parte del Gruppo Sofinter, ha fornito più di 1200 boilers industriali per

la produzione di vapore o per il recupero di calore in 50 paesi del mondo dove è richiesto il vapore come fluido di processo e per produzione di energia elettrica.



Macchi ha ideato una tecnologia avanzata dei sistemi di combustione che permettono di gestire un alto numero di combustibili tradizionali e non, incluso l'idrogeno, riducendo al minimo le emissioni in atmosfera. ■

**Sofinter Group**  
 Per info: <https://www.sofinter.it/>  
 Web: <https://www.macchiboiler.it/>





# WASTE RECOVERY & FINAL SINKS FOR A SUSTAINABLE ECOLOGICAL TRANSITION

Politecnico di Milano,  
Campus PIACENZA  
June 5<sup>th</sup> – 7<sup>th</sup> 2023

## 6° MATER MEETING 7° INTERNATIONAL CONFERENCE ON FINAL SINKS

The event arises from the link between the fundamental goal of MatER and Final Sinks conferences. The first one aims at providing a thorough, objective representation of technologies and policies for material and energy recovery from waste, thereby contributing to move toward sustainable waste management. The second one addresses different topics regarding the handling of material flows and stocks from the resource and waste management perspective. The 3-days Meeting will comprise presentations over these indicative subjects:

- Waste prevention and management
- Material & Energy recovery from waste
- Final Sinks
- Innovative technologies and digital solutions
- Environmental sustainability
- Normative and Economic framework

**CALL FOR ABSTRACTS IS OPEN!**

**INFO & APPLICATION: [www.mater.polimi.it](http://www.mater.polimi.it)**

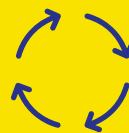


Giornata di studio

# “Rifiuti e Life Cycle Thinking”

circolarità e sostenibilità

6<sup>a</sup> edizione



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

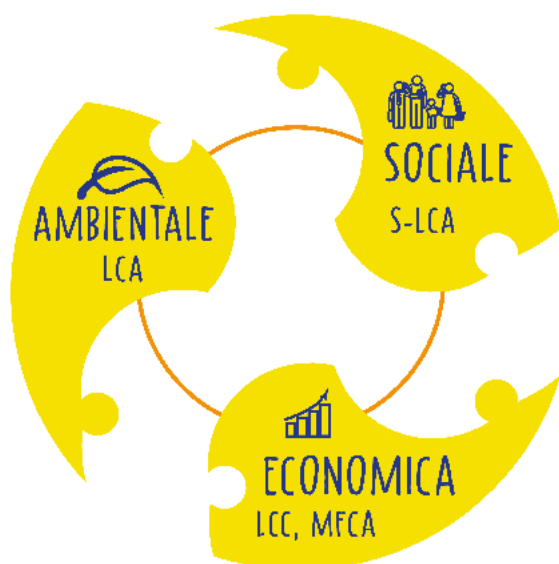
**7 MARZO 2023**

Evento in presenza presso il  
Politecnico di Milano



Assessment on WAsTe  
and REsources

La giornata è dedicata alla presentazione e discussione di lavori sul tema:  
"Circolarità e sostenibilità: il ruolo di una corretta gestione dei rifiuti e delle  
risorse e le potenzialità del Life Cycle Thinking". La call for abstracts è ora aperta!



La partecipazione all'evento è gratuita. Le modalità di iscrizione saranno comunicate successivamente sul sito [www.aware.polimi.it](http://www.aware.polimi.it).

Per partecipare alla call inviare un abstract redatto in italiano, inclusivo di titolo e contatti degli autori, di lunghezza compresa tra 2000 e 4000 caratteri (spazi esclusi) entro il 15 dicembre a [aware-dica@polimi.it](mailto:aware-dica@polimi.it)

L'accettazione verrà notificata entro il 20 gennaio. Gli autori dei lavori più meritevoli saranno invitati a preparare un articolo da inserire in una pubblicazione tematica di IDA - Ingegneria dell'Ambiente.

Evento organizzato dal gruppo di ricerca AWARE (Assessment on WAsTe and REsources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano e dal Gruppo di Lavoro Gestione e Trattamento dei Rifiuti dell'Associazione Rete Italiana LCA

**Direttori scientifici: L. Rigamonti e M. Grosso**





## STANDING IN PERFORMANCE

### Attuatori elettrici per il settore idrico

Affidabili, potenti, efficienti. AUMA offre una vasta gamma di attuatori e riduttori per tutte le esigenze.

- Automazione per tutti i tipi di valvole industriali
- Integrazione con i principali sistemi di controllo
- Elevata protezione dalla corrosione
- Assistenza e training su tutto il territorio nazionale



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

**auma**<sup>®</sup>  
Solutions for a world in motion

# INDEX

**VOL. 9**  
**NUM. 3**  
**2022**

## Editorial

News from Remtech: a ferment of new technologies  
*Marco Falconi*

## Articles

Floating offshore wind farm in the mediterranean sea: a life cycle assessment  
*Gaia Brussa, Mario Grosso, Lucia Rigamonti*

Technologies, energy consumptions, costs and environmental impacts in the excavation, processing and transportation of limestone and olivine  
*Serena De Marco, Stefano Caserini*

Climate endgame: exploring catastrophic climate change scenarios  
*Luke Kemp, Chi Xu, Joanna Depledge, Kristie L. Ebi, Goodwin Gibbins, Timothy A. Kohler, Johan Rockström, Marten Scheffer, Hans Joachim Schellnhuberj, Will Steffen, and Timothy M. Lenton*

## Technical-scientific communications

Science and politics for the safeguarding of Venice  
*Paolo Cescon, Andrea Gambaro, Davide Zanchettin*

Immagine  
in copertina  
di Eco-Techno

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2022 è sostenuta da:

**auma**<sup>®</sup>  
Solutions for a world in motion

**CID**  
Ing. VENTURA srl

**eco**  
TECHNO  
VACUUM EVAPORATION SYSTEMS

**Interreg**   
fondi europei di sviluppo regionale  
ITALIA SVIZZERA - ITALIE SUISSE - ITALIEN SCHWEIZ  
Ge.T.R.I.

**SIAD**

  
SOLVAY

**suez**

**VEOLIA**  
Veolia Water Technologies Italia S.p.A.