



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



N. 1/2020



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

**Ingegneria dell'Ambiente (IDA)** è una rivista scientifica ad accesso aperto (open access) nata nel 2014 da un'iniziativa della Sezione Ambientale del *Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale del Politecnico di Milano*.

La rivista è gratuita per autori e lettori (open access) ed è dotata di un sistema di revisione paritaria (peer-review).

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

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

I temi di interesse della rivista sono:

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

Contributi su altri temi possono essere proposti indicando i legami con l'Ingegneria Sanitaria Ambientale, e saranno valutati dalla Direzione Scientifica della rivista. Devono essere originali nell'ambito delle pubblicazioni in lingua italiana, ossia non devono essere stati pubblicati nella stessa forma in atti di convegni o su altre riviste in lingua italiana.

**Ingegneria dell'Ambiente** pubblica:

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

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

**Ingegneria dell'Ambiente** ha il patrocinio di:

- **GITISA** (Gruppo Italiano di Ingegneria Sanitaria, [www.gitisa.it](http://www.gitisa.it))
- **AIAT** (Associazione Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio, [www.ingegneriambientali.it](http://www.ingegneriambientali.it)).



**Ingegneria dell'Ambiente** è riconosciuta da:

**ANVUR**

(Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca) come rivista scientifica dell'Area 08.



**Ingegneria dell'Ambiente** è indicizzata in **Google Scholar**.

La pubblicazione su **Ingegneria dell'Ambiente** è riconosciuta ai fini dell'ottenimento di **5 crediti** per la formazione informale prevista degli Ordini Professionali

La rivista è disponibile on-line all'indirizzo: [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

## INDICE



VOL. 7  
NUM. 1  
2020

Ingegneria  
dell'Ambiente  
per il 2020 è  
sostenuta da:



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



better together

**SIAD**



Vacuum Evaporation Systems

**SOLVAir**<sup>®</sup>

### EDITORIALI

- La pandemia di COVID-19 in Italia e nel mondo e la protezione dell'ambiente ..... 1  
*Marino Gatto*
- Riflessioni sugli obiettivi di neutralità climatica in Europa durante l'epidemia di COVID-19 ..... 4  
*Hans Bruyninckx*

### ARTICOLI

- Analisi del ciclo di vita di un processo per rimuovere la CO<sub>2</sub> atmosferica e contrastare l'acidificazione del mare ..... 7  
*Francesco Campo, Stefano Caserini, Dario Pagano, Giovanni Dolci, Mario Grosso*
- Scenari di gestione sostenibile e riutilizzo in sito dei detriti da terremoto ..... 23  
*Antonio Basti*

### COMUNICAZIONI TECNICO-SCIENTIFICHE

- La produzione di biometano da FORSU nel contesto di promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili ..... 33  
*Micol Centorrino, Paolo Neri, Marco Cervino, Anna Maria Ferrari*
- Sintesi degli interventi al Convegno "La rimozione di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e il progetto Desarc-Maresanus" ..... 42  
*Antonella Abbà, Dario Pagano, Momme Butenschön, Giovanni Cappello, Massimiliano Cremonesi, Caterina Lanfredi, Martina Fantini*
- Resoconto della visita tecnica alla miniera di Olivina di Vidracco (TO) ..... 51  
*Mark Matalog, Matteo Ferrero, Stefano Caserini*

### RUBRICHE

- Informazioni dalle Aziende ..... 55
- Recensioni volumi ..... 60

**EN** ECO  
LOGICA  
NAVIGLIO

**suez**

**CIQ**  
Ing. VENTURA srl

**xylem**  
Let's Solve Water

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

**SESEAM**  
engineering  
l'acqua e l'ambiente

**ECO**  
GENERAZIONE  
Tecnologie Energetiche e Ambientali

**KSB**

**comieco**

**STADLER**<sup>®</sup>  
STADLER ITALIA S.r.l.

**VOMM**

**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 Folidori* (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)*Cinzia Pastorello* (European Environment Agency, Copenhagen, Danimarca)*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***INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE****N. 1/2020****COPYRIGHT**

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

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

Chiunque è libero di:

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

alle seguenti condizioni:

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

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

**EDITORE**

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

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

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

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

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

Publicato on-line il 18 aprile 2020.

Finito di stampare in aprile 2020, presso Colorshade di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI).

# LA PANDEMIA DI COVID-19 IN ITALIA E NEL MONDO E LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

Marino Gatto

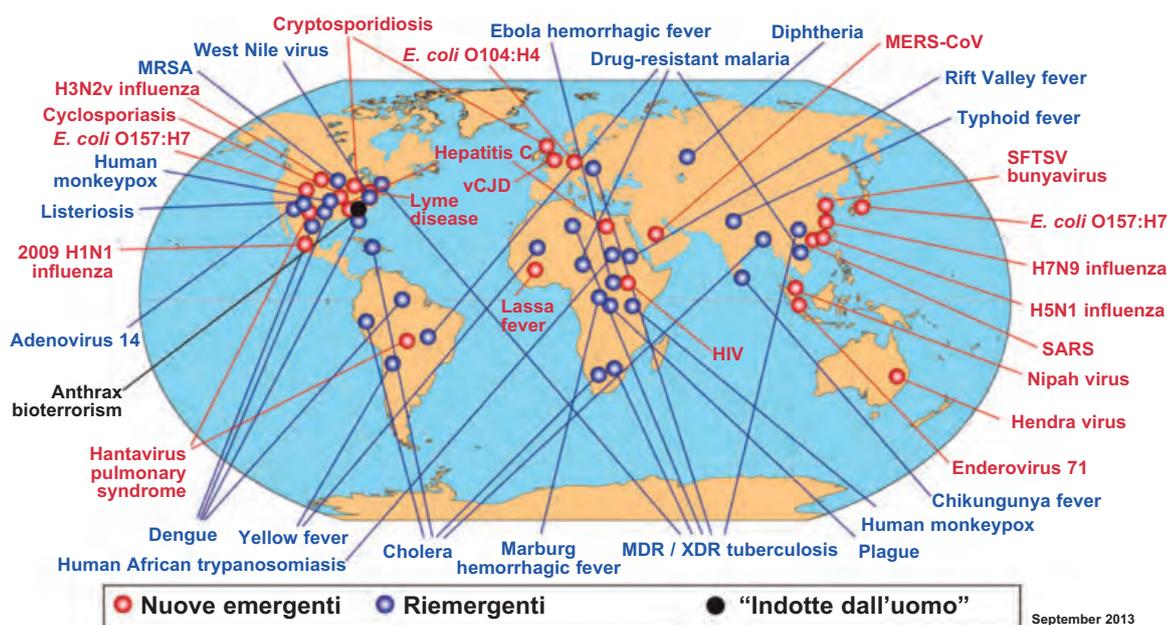
Docente di Ecologia, Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano

L'Italia e il mondo stanno fronteggiando l'emergenza provocata dalla diffusione globale del virus SARS-CoV-2, il patogeno responsabile dell'epidemia di COVID-19 (CoronaVirusDisease-19). Si tratta di un virus ad RNA della stessa famiglia del virus già responsabile dell'epidemia di SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) che colpì il sud della Cina nel novembre del 2002 e costò la vita a più di 8000 persone in 29 Paesi. Mediante un'efficace opera di isolamento e quarantena degli infetti, la SARS non divenne una pandemia, come purtroppo si è invece verificato per COVID-19. Al 12 aprile 2020 i casi confermati sono quasi 1,9 milioni, i decessi quasi 115.000 e praticamente nessun Paese del mondo sembra essere immune dal contagio. La malattia ha un elevato tasso di letalità che colpisce soprattutto le persone più anziane, mentre i casi dichiarati guariti al 12 aprile sono più di 430.000. L'Italia è uno dei paesi più colpiti, per lungo tempo essendo rimasto il primo Paese al mondo sia per numero di casi confermati, sia per numero di decessi.

È importante mettere l'epidemia di COVID-19 nella giusta prospettiva, anche in rapporto al problema della protezione globale dell'ambiente, che è

uno dei temi portanti delle odierne politiche volte alla soluzione delle sfide che l'umanità si trova a fronteggiare, dal cambiamento climatico globale alla denutrizione che affligge ancora una buona parte della popolazione mondiale.

Per lungo tempo il rischio di pericolose pandemie, che gli epidemiologi non hanno mancato di mettere in evidenza, è stato minimizzato e considerato una profezia di sventura da guardarsi con sospetto. È utile perciò dare un'idea relativa alle malattie emergenti (e riemergenti), che si sono verificate negli ultimi decenni. Secondo Jones et al. (2008), che hanno analizzato i dati a partire dalla fine della seconda guerra mondiale, la maggior parte degli eventi legati a nuove malattie infettive (il 60,3%) sono causate da patogeni zoonotici, cioè sono malattie che possono essere trasmesse all'uomo da altri animali. Inoltre, il 71,8% di queste zoonosi sono causate da patogeni che hanno origine negli animali selvatici. Dati simili sono riportati da Smith et al. (2014), che hanno esaminato la situazione tra il 1980 e il 2013, registrando 215 malattie infettive per un totale di più di 12.000 epidemie. Il 65% delle malattie e il 56% delle epidemie sono zoonosi. Nella seguente Figura è mostrata la mappa delle



Mapa delle malattie emergenti e riemergenti, aggiornata a settembre 2013 (fonte: Fauci, 2016)

malattie emergenti e riemergenti. È interessante notare che questa mappa fu presentata ad un simposio nel 2016 da Anthony Fauci, famoso immunologo statunitense, recentemente messo a capo della task force nominata dal presidente Trump.

Giustamente Di Marco et al. (2020) sostengono che il rischio di pandemie dovrebbe essere incluso nell'agenda dei Sustainable Development Goals dell'ONU. Anch'essi fanno notare come circa il 70% delle EID (Emerging Infectious Diseases) sono zoonosi e come praticamente lo sono tutte le recenti pandemie. SARS, Ebola, MERS, COVID-19 sono tutte legate a patogeni che originano in animali selvatici (spesso pipistrelli di diverse specie, anche se non sempre è facile risalire all'ospite o agli ospiti originari). Daszak, Cunningham e Hyatt (2000) già mettevano in evidenza il continuum ecologico che caratterizza le EID. Ospiti (uomini o altri animali selvatici o domestici) e parassiti (dai macroparassiti ai protozoi ai batteri ai virus) convivono in relazioni complesse con elevate sovrapposizioni che sono favorite da vari fattori: la globalizzazione dei trasporti, l'intensificazione dell'agricoltura e dell'urbanizzazione, l'introduzione di specie aliene, i cambiamenti climatici. Tutto questo favorisce il più facile contatto dell'uomo con patogeni a cui la nostra specie (e anche molte altre specie domestiche e selvatiche) non si sono adattate nel corso del processo evolutivo. I sistemi immunitari non sono quindi in grado di reagire prontamente a questi patogeni del tutto nuovi.

COVID-19 si è diffusa a partire dalla zona di Wuhan in Cina e sicuramente è una zoonosi, il cui serbatoio viene probabilmente identificato con pipistrelli della specie *Rhinolophus affinis* che hanno ospitato virus molto affini al SARS-CoV-2, mentre ospiti secondari (Lam et al., 2020) potrebbero essere i pangolini (*Manis javanica*). Una volta trasmesso all'uomo, il virus è passato da ospite umano a ospite umano per contatto diretto e poi l'epidemia si è diffusa in Cina e successivamente in tutto il mondo attraverso le reti di mobilità nazionali cinesi e internazionali (Chinazzi et al., 2020). Pulano et al. (2020) alla fine di gennaio 2020 avevano calcolato il rischio di importazione del virus in Europa. L'Italia risultava essere il quarto paese a rischio dopo Gran Bretagna, Germania e Francia. Queste ultime avevano registrato rispettivamente un caso il 27 gennaio e tre casi il 24 gennaio. In Italia il primo caso si è verificato a Codogno il 18 febbraio e la positività del paziente al test sulla presenza del virus è stata confermata il 21 febbraio

dall'ospedale Sacco di Milano. Ma il virus era presente in Italia e in Europa sicuramente da molto tempo prima come anche confermato dalle analisi filogenetiche di Lai et al. (2020). Non si può parlare di un unico focolaio di infezione per l'Italia, anche se molto probabilmente la zona intorno a Codogno è stata uno dei principali focolai da cui poi l'epidemia si è diffusa nel resto del paese attraverso la rete di mobilità che collega le varie comunità italiane.

Gatto et al. (2020) hanno realizzato il primo modello spazialmente esplicito di contagio del tipo SEIR (Suscettibile-Esposto-Infetto-Ristabilito) per l'Italia. Esso tiene conto sia dell'evoluzione temporale dell'infezione nelle popolazioni locali che della loro distribuzione geografica, integrando gli spostamenti degli individui per raggiungere il luogo di lavoro, con una risoluzione a livello provinciale. Si sono serviti di censimenti Istat per stimare la mobilità prima dell'epidemia e di uno studio indipendente che ha sfruttato la geolocalizzazione dei cellulari per capire di quanto si è ridotta la mobilità con le restrizioni imposte. La mappa dei contagi risultante è stata poi confrontata con l'andamento reale dell'epidemia, riscontrando un'elevata accuratezza del modello matematico.

Varie misure di contenimento sono state decise dal governo italiano in diverse fasi fino al blocco totale della mobilità con il decreto dell'11 marzo 2020. Secondo le stime di Gatto et al. (2020), queste misure hanno evitato un ulteriore sovraccarico sulle strutture ospedaliere valutabile in circa 200.000 persone al 25 marzo. Lo studio ha anche stimato in circa 700.000 persone i contagiati al 25 marzo, cioè circa dieci volte di più dei contagiati rilevati mediante l'esecuzione dei test coi tamponi. La cifra è comunque inferiore al numero di circa 6 milioni di contagiati a fine marzo 2020 stimato da un rapporto dell'Imperial College (Flaxman et al., 2020). Il tasso netto di riproduzione generalizzato (cioè calcolato in base alla matrice di connessione spaziale) dell'epidemia nella sua fase iniziale risulta essere di 3,6. In altre parole, ogni infezione primaria ha generato in media 3,6 infezioni secondarie prima che il portatore primario risultasse non più infettivo. Le misure di contenimento attuate hanno permesso di ridurre del 45% il tasso di trasmissione dell'infezione al 25 marzo. I dati successivi dimostrano un'ulteriore diminuzione di tale tasso dovuto al completo dispiegarsi dell'efficacia delle misure di contenimento. Non è possibile fare predizioni, come

spesso erroneamente viene riportato da molti media, ma solo scenari che permettano di dire che cosa probabilmente potrebbe succedere in futuro se si attenuassero le misure già in atto oppure se le si mantenessero oppure se le si cambiassero in un senso o in un altro, anche differenziando territorialmente le misure di contenimento dell'infezione.

Dovrebbe comunque essere ben chiaro che l'epidemia non si estinguerà "naturalmente" per immunità di gregge, perché, con un tasso netto di riproduzione  $R_0$  pari a 3,6 in assenza di qualsiasi restrizione, bisognerebbe che si contagiassero circa il 75% della popolazione, evento che sarebbe assolutamente catastrofico. Va detto inoltre che è ancora sconosciuta la durata dell'immunità che il contagio garantirebbe.

Per concludere, la pandemia di COVID-19 mette in evidenza la fragilità del nostro sistema globalizzato e purtroppo l'insufficiente attenzione politica a tutti quei fenomeni di eccessivo e irrazionale sfruttamento dell'ambiente che mettono in pericolo l'umanità. L'adozione di misure di contenimento dell'epidemia nell'attesa che vengano trovati efficaci strumenti medici, quali vaccinazioni e antivirali specifici, pone poi tutta una serie di problemi economico-sociali e tecnici, anche in relazione alle tutele di altri settori dell'ambiente, dallo smaltimento dei rifiuti al controllo della qualità dell'acqua e dell'aria, che sono trattati in altri articoli di questo numero della rivista.

## BIBLIOGRAFIA

- Chinazzi M. et al. (2020) The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak, *Science*, eaba9757.
- Daszak P., Cunningham A.A., Hyatt A.D. (2000) Emerging Infectious Diseases of Wildlife – Threats to Biodiversity and Human Health. *Science*, 5452: 443-449.
- Di Marco M. et al. (2020) Sustainable development must account for pandemic risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 117 (8): 3888-3892.
- Fauci A. (2016) NEIDL Symposium: Talking about Infectious Diseases. [www.bu.edu/articles/2016/neidl-symposium-infectious-diseases/](http://www.bu.edu/articles/2016/neidl-symposium-infectious-diseases/)
- Flaxman S., et al. (2020) Report 13: Estimating the number of infections and the impact of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in 11 European countries, Technical report. <https://doi.org/10.25561/77731>.
- Gatto M. et al. (2020) Spread and dynamics of the COVID-19 epidemic in Italy: effects of emergency containment measures, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, in press.
- Jones K.E. et al. (2008) Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451(7181):990-3.
- Lai A., Bergna A., Acciarri C., Galli M., Zehender G. (2020) Early phylogenetic estimate of the effective reproduction number of SARS-CoV-2. *J. Med. Virol.* <https://doi.org/10.1002/jmv.25723>
- Lam, T. T. et al. (2020) Identifying SARS-CoV-2 related coronaviruses in Malayan pangolins. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2169-0>
- Pullano G. et al. (2020) Novel coronavirus (2019-nCoV) early-stage importation risk to Europe. *Euro Surveill.* 25(4):pii=2000057.
- Smith K. F. et al. (2014) Global rise in human infectious disease outbreaks. *J. R. Soc. Interface*, 11 (101): 20140950.

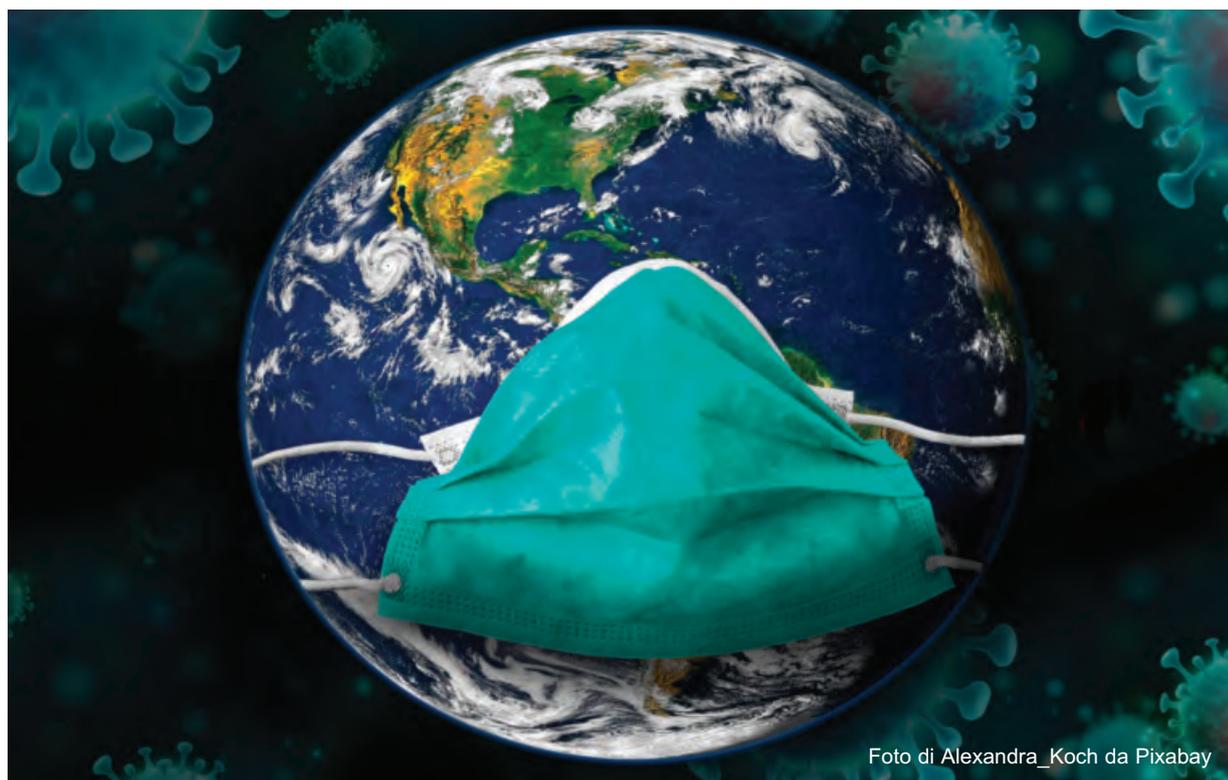


Foto di Alexandra\_Koch da Pixabay

## RIFLESSIONI SUGLI OBIETTIVI DI NEUTRALITÀ CLIMATICA IN EUROPA DURANTE L'EPIDEMIA DI COVID-19\*

Hans Bruyninckx

Direttore esecutivo dell'Agenzia Europea per l'Ambiente

I paesi europei stanno adottando misure drastiche per limitare l'impatto della COVID-19 sulla salute dei cittadini europei e sull'economia. Le crisi di questa portata tendono ad avere ripercussioni immediate e gravi su intere popolazioni e sull'economia. Considerando il suo potenziale in termini di effetti sui settori economici chiave, è atteso che la crisi da coronavirus riduca alcuni degli impatti delle attività economiche sull'ambiente e sul clima. Tuttavia, non è assolutamente grazie a crisi profonde e improvvise, con un costo estremamente elevato per la società, che l'Unione europea si è impegnata a trasformare la propria economia e a conseguire la neutralità climatica entro il 2050. Il Green Deal europeo e la recente proposta di una legge europea sul clima invocano invece una riduzione irreversibile e progressiva delle emissioni, garantendo al tempo stesso una transizione equa che sia di sostegno agli interessati.

### **Riduzione al minimo delle conseguenze dell'attuale crisi sanitaria**

L'Europa, come il resto del mondo, si trova ad affrontare una crisi sanitaria senza precedenti, che si diffonde rapidamente in tutto il continente. I canali di informazione diffondono sistematicamente aggiornamenti sul numero di persone colpite e decedute. Le autorità europee e nazionali hanno attuato misure drastiche per limitare e rallentare la diffusione del COVID-19. Le limitazioni ai viaggi, agli spostamenti per lavoro e agli assembramenti si ripercuotono gravemente su diversi settori economici chiave; molti voli sono stati annullati, scuole, ristoranti e frontiere stanno chiudendo. Il termine «blocco» rispecchia la nuova realtà in molti paesi europei. E purtroppo, osserviamo già un numero molto elevato di vittime.

La priorità assoluta è ridurre al minimo gli effetti sulla salute dei cittadini europei e garantire alle persone colpite la migliore erogazione possibile dei servizi sanitari, seguita dall'esigenza di salvaguar-

dare il benessere della popolazione, compresi i posti di lavoro e i mezzi di sussistenza.

### **Riduzioni delle emissioni e crisi improvvise come da COVID-19**

In questo difficile periodo, l'Agenzia Europea per l'Ambiente (AEA) è stata più volte interpellata sull'impatto delle misure contro la COVID-19 sulle emissioni di gas a effetto serra dell'UE. Uno dei risultati involontari di tali improvvise crisi socio-economiche può essere un'ulteriore riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Altri effetti, come la diminuzione temporanea dell'inquinamento atmosferico, sono stati osservati anche in alcune parti della Cina e dell'Europa (ad esempio durante il periodo di «blocco» nel Nord Italia).

È noto che l'esposizione prolungata all'inquinamento atmosferico è concausa di affezioni polmonari e cardiache croniche. Nonostante i potenziali miglioramenti a breve termine della qualità dell'aria in alcune zone, dovuti alle misure correlate al coronavirus, durante tale periodo le persone con le suddette pregresse affezioni che abbiano subito un'esposizione a lungo termine all'inquinamento atmosferico possono diventare ancora più vulnerabili.

In molti dei nostri rapporti abbiamo sottolineato il collegamento tra il risultato economico di alcuni settori e l'impatto ambientale. Si prevede che l'attuale crisi incida pesantemente sui modelli di produzione e di consumo, portando per esempio a una riduzione della domanda di mobilità, compreso il trasporto aereo internazionale e gli spostamenti di lavoro quotidiani in automobile. Tuttavia, per avere una comprensione più chiara della portata, della durata e di alcuni effetti, attesi e non, della crisi occorrerà, al termine della stessa, analizzare i dati relativi a diversi settori. L'AEA intende valutare questi collegamenti e, a tempo debito, comunicare i risultati di tale analisi.

Tuttavia, senza una trasformazione radicale dei nostri sistemi di produzione e di consumo, è altamente probabile che qualsiasi riduzione delle emissioni innescata da tali crisi economiche sia

\* Il testo è stato pubblicato nel numero di marzo 2020 della Newsletter AEA 01/2020.



Immagine di Nathan Dumlao, su Unsplash

di breve durata e comportamenti costi estremamente elevati per la società. L'Europa mira a conseguire la neutralità climatica attraverso una riduzione graduale e irreversibile delle emissioni e il raggiungimento di obiettivi a lungo termine che permettano di dare vita a un'economia e a una società resilienti, e non mediante crisi destabilizzanti. La crisi attuale evidenzia inoltre per quale motivo abbiamo bisogno di una transizione giusta, che offra nuove opportunità e sostegno alle persone più colpite.

### **Neutralità climatica: un obiettivo vincolante in base al diritto dell'UE**

All'inizio di questo mese, la Commissione europea ha proposto la legge europea sul clima, che mira a istituire un quadro a lungo termine, a integrazione della legislazione esistente, per conseguire la neutralità climatica nell'Unione europea entro il 2050. L'Unione europea ha già raggiunto uno degli obiettivi più ambiziosi in termini di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, con il sostegno di un pacchetto legislativo globale. Ciò che rende tale proposta unica nel suo genere consiste nel fare della neutralità climatica entro il 2050 un obiettivo giuridicamente vincolante. Una volta adottata, l'Unione europea e i suoi Stati membri saranno tenuti per legge a conformarsi e ad adottare le misure necessarie per conseguire tale neutralità climatica.

Da trent'anni l'Unione europea riduce le emissioni di gas a effetto serra. In base all'ultima valuta-

zione dell'AEA, nel 2018 tali emissioni nell'UE erano inferiori del 23,2% rispetto ai livelli del 1990, ma sono necessari ulteriori sforzi e misure supplementari per raggiungere l'attuale obiettivo per il 2030, fissato come una «riduzione di almeno il 40% rispetto ai livelli del 1990».

### **L'esigenza di accelerare e ampliare la portata del cambiamento**

Nonostante tali riduzioni, il rapporto «Europe's Environment – state and outlook 2020» (L'ambiente in Europa: stato e prospettive nel 2020, SOER 2020) constata che i progressi stanno rallentando in settori quali la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e industriali, la produzione di rifiuti, il miglioramento dell'efficienza energetica e la quota di energie rinnovabili nell'offerta energetica complessiva. Il rapporto SOER 2020 conclude inoltre che per affrontare il degrado ambientale e i cambiamenti climatici dobbiamo trasformare radicalmente il modo in cui produciamo e consumiamo prodotti e servizi. Queste conclusioni confermano l'urgente necessità di accelerare e ampliare la portata della transizione nei principali sistemi, tra cui quelli dell'energia, dei prodotti alimentari e della mobilità.

È in questo contesto che viene avanzata la proposta di legge europea sul clima, che è una delle componenti fondamentali del Green Deal europeo e rende gli obiettivi dell'UE ancora più ambiziosi. La proposta prevede che la Commissione europea riveda l'attuale obiettivo per il 2030 e «va-

luti le opzioni per un nuovo traguardo per il 2030 di una riduzione del 50-55% delle emissioni rispetto ai livelli del 1990». Illustra inoltre in che modo saranno valutati periodicamente i progressi verso la neutralità climatica, sulla base, tra l'altro, dei rapporti dell'AEA. Oltre agli sforzi di mitigazione, la proposta prevede valutazioni periodiche delle misure di adattamento ai cambiamenti climatici.

In qualità di fonte indipendente di conoscenze, l'AEA sosterrà pienamente questi processi redigendo sistematicamente delle valutazioni dei progressi compiuti in Europa verso la neutralità climatica.

I suddetti obiettivi climatici non possono essere conseguiti senza affrontare la sfida globale in materia di sostenibilità. Mentre la Commissione europea propone altre iniziative nell'ambito del Green Deal europeo, anche per quanto riguarda l'economia circolare, la biodiversità e la finanza sostenibile, il lavoro dell'AEA si concentra su una serie di aspetti a sostegno della transizione verso la sostenibilità.

### ***Perseguimento di obiettivi ambiziosi in tempi di crisi***

Anche se conduce a significative riduzioni temporanee delle emissioni, quella dovuta alla COVID-19

è e rimarrà una grave crisi sanitaria, i cui molteplici effetti sulla nostra società non possono in alcun modo essere percepiti come forieri di esiti positivi. Nemmeno coloro tra noi che, sulla base delle proprie competenze e conoscenze, si sono fatti sentire invocando apertamente cambiamenti importanti nei nostri sistemi di produzione e di consumo dovrebbero vedere il blocco generalizzato della società come una soluzione accettabile alle sfide urgenti e sistemiche in materia di sostenibilità.

La domanda rimane: possiamo realizzare i nostri ambiziosi obiettivi negli anni a venire, quando affronteremo le conseguenze di questa grave crisi? Penso di sì.

A mio avviso, una transizione socialmente equa, pianificata e attuata sul lungo periodo, è l'unica via da seguire per dare vita a una società resiliente con un'economia forte e sostenibile. Inoltre, gli investimenti che faremo per attenuare le conseguenze economiche della crisi dovrebbero e possono essere pienamente in linea con i nostri obiettivi di sostenibilità a lungo termine. Anche durante questo periodo difficile, le istituzioni europee hanno confermato il loro forte impegno verso il conseguimento degli obiettivi a lungo termine del Green Deal europeo. Tale impegno dovrà fare affidamento su partner solidi, che è esattamente ciò che l'AEA intende essere.



Foto di Foto-Rabe da Pixabay

# ANALISI DEL CICLO DI VITA DI UN PROCESSO PER RIMUOVERE LA CO<sub>2</sub> ATMOSFERICA E CONTRASTARE L'ACIDIFICAZIONE DEL MARE

Francesco Campo\*, Stefano Caserini, Dario Pagano, Giovanni Dolci, Mario Grosso

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

**Sommario** – Per limitare il riscaldamento globale “ben al di sotto dei 2°C”, come deciso nell’ambito dell’Accordo di Parigi, è necessaria una riduzione drastica delle emissioni di gas climalteranti, nonché la rimozione di CO<sub>2</sub> dall’atmosfera in quantità tanto più ingenti quanto più si ritarda nella riduzione delle emissioni. Per questo motivo sono state proposte numerose tecnologie di rimozione (ovvero di generazione di emissioni negative), ed è in forte sviluppo la ricerca tecnico-scientifica per valutare potenzialità, costi, benefici e punti critici ambientali delle diverse opzioni. L’articolo presenta un nuovo processo che combina tecnologie industriali correntemente utilizzate e tecnologie in fase di ricerca e sviluppo o non ancora disponibili a livello commerciale, al fine di rimuovere CO<sub>2</sub> dall’atmosfera e allo stesso tempo contrastare l’acidificazione del mare. Il processo mira a ridurre le criticità legate allo sviluppo di altre tecnologie di emissioni negative, quali gli elevati costi, la grande richiesta di energia, o la potenziale competizione nell’uso delle risorse idriche e nell’utilizzo del suolo. Il processo è basato sulle seguenti fasi: (a) gassificazione di un combustibile solido (es. biomassa), con produzione di syngas; (b) conversione, in un *reformer* termico a vapore ad alta temperatura, degli idrocarburi e oli catramosi del syngas in idrogeno e monossido di carbonio; (c) produzione di Ca(OH)<sub>2</sub> (calce idrata) dal calcare, utilizzando l’entalpia del syngas caldo; (d) spargimento in mare, mediante navi, della calce idrata per aumentare l’alcalinizzazione del mare; (e) invio del syngas ad un reattore water-shift con la produzione di CO<sub>2</sub> e idrogeno, che vengono quindi separati; (f) stoccaggio finale di tutta la CO<sub>2</sub> prodotta nel processo; (g) utilizzo dell’idrogeno prodotto a fini energetici. I bilanci di massa e di energia mostrano che la quantità di CO<sub>2</sub> totale rimossa dal processo è pari a 3 tonnellate per tonnellata di biomassa utilizzata. Considerando le emissioni evitate grazie alla produzione di energia elettrica tramite idrogeno, in sostituzione di combustibili fossili, il beneficio complessivo del processo in termini di CO<sub>2</sub> sale a 3,4 tonnellate per tonnellata di biomassa. Per valutare l’impatto ambientale del processo è stata effettuata una Analisi del ciclo di vita (LCA), in cui sono state considerate diciassette categorie di impatto. Per la categoria “cambiamenti climatici”, i processi più impattanti sono il processo di calcinazione, l’approvvigionamento della biomassa e lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>. Con l’approccio “dalla culla alla tomba” della metodologia LCA, il beneficio in termini di rimozione di CO<sub>2</sub> è ridotto di circa il 2%. Grazie alla rimozione di CO<sub>2</sub> determinata dall’alcalinizzazione del mare e dallo stoccaggio finale, nonché alle emissioni evitate grazie alla generazione di idrogeno, il

processo permette di conseguire una maggiore entità di emissioni negative rispetto alla tecnologia convenzionale di uso di biomasse con cattura e stoccaggio del carbonio (BECCS). La disponibilità di biomassa rimane comunque un limite allo sviluppo su grande scala del processo.

**Parole chiave:** emissioni negative, alcalinizzazioni oceani, stoccaggio di carbonio, gassificazione, CO<sub>2</sub>, idrogeno.

## LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A PROCESS TO REMOVE ATMOSPHERIC CO<sub>2</sub> AND CONTRAST OCEAN ACIDIFICATION

**Abstract** – In order to limit global warming “well below 2°C”, as agreed in the Paris Agreement, a drastic reduction of the greenhouse gases emissions is urged, as well as removing CO<sub>2</sub> from the atmosphere in larger quantities, the more the reduction of emissions is delayed. For this reason, many technologies have been proposed to remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere (so-called Negative Emission Technologies), and scientific-technical research is fast developing to assess the environmental potential, costs, benefits and critical points of the different options. The article presents a new process that combines commercial industrial technologies with technologies still at the research and development stage or not yet commercially available, in order to remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere and at the same time to address the acidification of the sea. The process aims to overcome the limitations of other negative emission technologies, such as high costs, high energy demand, or potential competition in water use and land use. The process is based on the following steps: (a) gasification of a solid fuel (e.g. biomass) with consequent production of a syngas; (b) conversion of syngas hydrocarbons and tar oils into hydrogen (H<sub>2</sub>) and carbon monoxide (CO) in a high-temperature thermal steam reformer; (c) production of Ca(OH)<sub>2</sub> (slaked lime) from limestone, using the enthalpy of the hot syngas; (d) spreading in the seawater, by means of ships, slaked lime to contrast the acidification of the sea; (e) sending the syngas to a water-gas-shift reactor with the production of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>, which are then separated; (f) final storage of all the CO<sub>2</sub> produced in the process; (g) use of H<sub>2</sub> for decarbonized energy production. The mass and energy balances show that the total amount of CO<sub>2</sub> removed from the process is 3 tonnes per tonne of biomass used. Considering the emissions avoided by using the hydrogen produced by the process, which displace the use of fossil fuels, the overall benefit of the process increases to 3.4 tonnes of removed CO<sub>2</sub> per tonne of biomass. To evaluate the environmental impact of the process, a Life Cycle Assessment has been carried out, in which seventeen impact categories have been considered. For “climate

\* Per contatti: Via Golgi, 39. 20133, Milano, 20133 Tel. 02.23994216. francescopietro.campo@mail.polimi.it

change”, the most impacting processes are calcination, feedstock supply and CO<sub>2</sub> storage. Considering a cradle-to-grave approach with the LCA methodology, the benefit in terms of CO<sub>2</sub> removal is reduced by about 2% (compared to the carbon balance). Thanks to the removal of CO<sub>2</sub> determined by the alkalization of the sea, and to the CO<sub>2</sub> stored, as well as the CO<sub>2</sub> avoided, the process therefore allows to achieve a higher amount of negative CO<sub>2</sub> emissions, compared to the traditional technology of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). The availability of biomass is a limiting factor to the large-scale development of the process.

**Keywords:** ocean liming, Negative Emission Technology, carbon storage, gasification, CO<sub>2</sub>, Hydrogen.

Ricevuto il 6-9-2019. Modifiche sostanziali richieste il 15-10-2019. Modifiche sostanziali richieste il 31-1-2020. Correzioni richieste il 13-4-2020. Accettazione il 15-4-2020

## 1. INTRODUZIONE

Per limitare il riscaldamento globale “ben al di sotto dei 2°C”, come concordato nell’accordo di Parigi, una drastica riduzione delle emissioni di gas serra è fondamentale, ma è necessario altresì rimuovere CO<sub>2</sub> dall’atmosfera, in quantità tanto più significative quanto più tardi avverrà la riduzione delle emissioni.

L’attività di ricerca del progetto Desarc-Maresanus ([www.desarc-maresanus.net](http://www.desarc-maresanus.net)) ha studiato più in dettaglio la fattibilità tecnica ed economica di un processo per la produzione di calce idrata (idrossido di calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>) e gli aspetti tecnici e ambientali della alcalinizzazione artificiale degli oceani, con particolare attenzione al Mar Mediterraneo. Lo scarico di calce idrata nel mare, chiamata alcalinizzazione artificiale degli oceani (ocean liming), è discusso nella letteratura scientifica (es. Renforth

et al., 2013; Lenton et al., 2018) al fine di rimuovere la CO<sub>2</sub> atmosferica e allo stesso tempo di contrastare l’acidificazione degli oceani.

Il presente articolo espone i risultati delle valutazioni ambientali ed economiche su un processo per la rimozione di CO<sub>2</sub> dall’atmosfera, già presentato e oggetto di alcune prime valutazioni in Caserini et al. (2019). Si tratta di un processo che combina alcune tecnologie industriali già disponibili con l’alcalinizzazione degli oceani e lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>, con l’obiettivo di superare i principali fattori limitanti delle NET, quali gli elevati fabbisogni energetici (ad es. per la cattura diretta dall’aria), la difficoltà di spargere grandi quantità di materiali su vaste aree (per l’*enhanced weathering*) o la competizione nell’uso del suolo con la produzione agricola (per rimboschimento e BECCS). Inoltre, il sistema consente di contrastare l’acidificazione degli oceani.

Sono quindi presentate le valutazioni sul bilancio di massa, di energia e di CO<sub>2</sub> del processo, nonché una valutazione completa con la metodologia del ciclo di vita (*life cycle assessment – LCA*), che permette di stimare diversi tipi di impatti diretti e indiretti del processo durante il suo ciclo di vita, perfezionando la stima del *carbon benefit* ottenuta tramite il bilancio della CO<sub>2</sub>.

Sono inoltre discusse le principali potenziali problematiche ambientali legate alla sua implementazione.

## 2. DESCRIZIONE DEL PROCESSO

Il sistema oggetto di analisi è schematizzato in Figura 1 e descritto nei paragrafi successivi; ulteriori dettagli sono riportati in Figura 2.

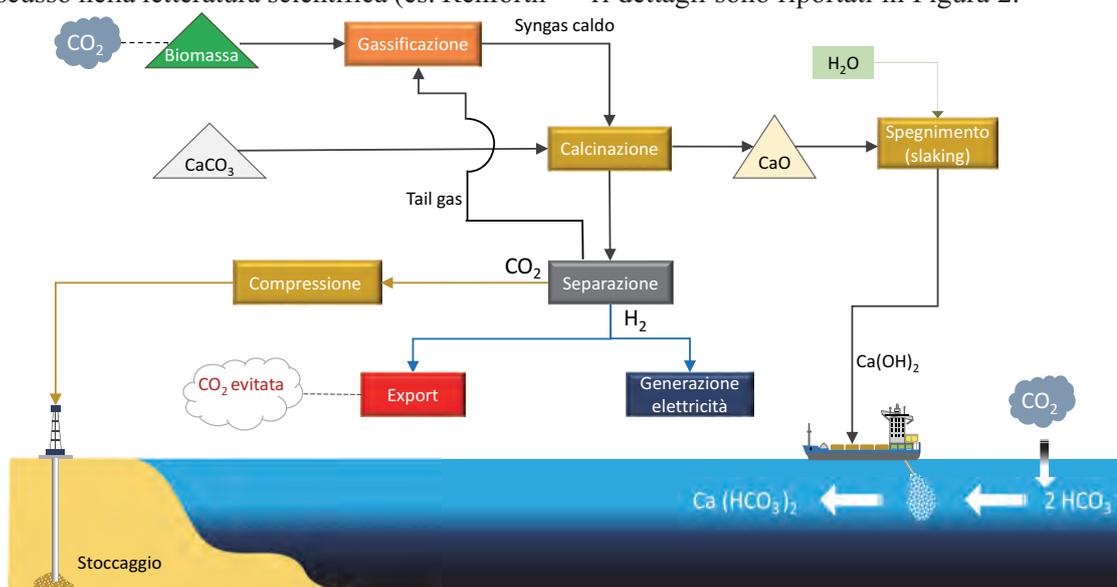


Figura 1 – Schema semplificato del processo



alto rapporto  $H_2O/C$  e la presenza di un efficiente recuperatore dell'entalpia del gas ad alta temperatura che, nel caso in esame, avviene nel processo di calcinazione.

Le valutazioni condotte nei capitoli successive fanno riferimento ad 1 tonnellata di biomassa (al 2% di umidità dopo opportuna essiccazione). La taglia dell'impianto reale è comunque di maggiori dimensioni, al fine di permettere le necessarie economie di scala; in Caserini et al. (2019) le valutazioni economiche sono state riferite ad un complesso industriale (produzione di calce idrata, idrogeno e stoccaggio di  $CO_2$ ) in grado di processare 1 Mt/anno di biomassa, formato da circa 30 unità di gassificazione di una potenza pari a circa  $20MW_t$  ciascuna, per permetterne una facile industrializzazione.

## 2.2. *Calcinazione e produzione di calce spenta*

Il calore sensibile del syngas ad alta temperatura che lascia l'unità di cracking termico a circa  $1150^\circ C$  è utilizzato per fornire l'energia per il processo di calcinazione (CO2APPS, 2017). Il syngas viene mandato ad un forno di calcinazione (calcinatore) dove il calcare viene alimentato controcorrente.

La reazione di calcinazione del calcare è altamente endotermica, e la velocità alla quale avviene dipende dalla temperatura e dalla pressione parziale della  $CO_2$  nel syngas (Stanmore e Gilot, 2005). La  $CO_2$  prodotta durante la calcinazione del calcare incrementa la quantità di  $CO_2$  del syngas.

La temperatura del syngas che lascia la sommità del calcinatore è di circa  $680^\circ C$ ; il calcinatore permette anche la rimozione di tutte le componenti acide del syngas (Hu et al., 2006).

La calce prodotta dal processo di calcinazione è ulteriormente processata in un tamburo rotante refrattariato in cui l'ossido di calcio è investito in controcorrente da un flusso di vapore che lo raffredda e da uno "slaker" dove si trasforma in calce idrata. Lo slaker è alimentato da acqua preriscaldata a  $95^\circ C$  usando 0,49 GJ del calore derivante dal raffreddamento del syngas nello scambiatore HX1 (Figura 2). Il raffreddamento e lo spegnimento dell'ossido di calcio permette la generazione di vapore surriscaldato a pressione atmosferica, convenientemente riutilizzato nel processo come agente di gassificazione.

## 2.3. *Alcalinizzazione del mare*

La calce spenta è sparsa nell'acqua del mare per tramite di navi, secondo un processo chiamato di

alcalinizzazione (*ocean liming*), che aumenta l'alcalinità all'acqua con la formazione di bicarbonati, secondo la seguente reazione:



L'aggiunta di calce idrata ha un duplice beneficio: permette un maggiore assorbimento di carbonio atmosferico da parte del mare, che viene immagazzinato nell'acqua sotto forma di bicarbonati, e allo stesso tempo contribuisce a contrastare l'acidificazione del mare causata dal naturale assorbimento di carbonio atmosferico (circa il 25% delle emissioni annuali di  $CO_2$  sono assorbite dal mare; Le Quéré et al., 2018). Pur se la riduzione dell'acidità del mare ha degli indubbi benefici per limitare gli impatti dell'acidificazione già in corso, è necessario valutare i potenziali effetti collaterali dello spargimento dell'idrossido di calcio sulla superficie del mare, legati alle interferenze con i cicli ecologici e biogeochimici dell'oceano, discussi al paragrafo 5.1.

L'interesse scientifico per l'alcalinizzazione del mare come tecnica per sequestrare il carbonio atmosferico e limitare la riduzione del pH del mare è cresciuto notevolmente negli ultimi anni. Molti autori (Kheshgi, 1995; Köhler et al., 2013; González e Ilyina, 2016; Renforth e Henderson, 2017; Lenton et al., 2018) indicano un grande potenziale di carbonio rimuovibile per mezzo dell'alcalinizzazione dei mari, così come le sfide tecnologiche da affrontare in fase di produzione, trasporto e scarico dei materiali alcalini (Renforth et al., 2013). La calce spenta può essere scaricata nella scia di una nave (Keller et al., 2014; Renforth et al., 2013), in quantità tali da non provocare un eccessivo aumento localizzato del pH. Un'alternativa più complessa, ma potenzialmente più efficace, è basata sull'iniezione nelle grandi correnti di acque profonde e fredde, generalmente insature in aragonite (Franco et al., 2018; Lachkar, 2014; Hauri et al., 2016; Capone e Hutchins, 2013) che risalgono in superficie in alcune zone dette di *upwelling* (García-Reyes et al., 2015). In questo modo, il pennacchio ricco di carbonati che si forma all'interno della corrente nel punto di iniezione raggiungerà la zona eufotica a distanza dal punto di iniezione, con una perturbazione minima del pH della superficie oceanica.

Lo spargimento della calce idrata in mare è stato assunto mediante cargo (*bulk carrier*) con tonnellaggio di portata lorda (*deadweight tonnage* – DWT) pari a 50.000 t. La quantità da scaricare è

stata assunta pari al 60% del tonnellaggio di portata lorda, cioè 30.000 t. Dato che il carico viene scaricato durante il viaggio, la quantità mediamente trasportata è pari a 15.000 t, ossia il valore medio tra l'inizio e la fine del viaggio. La distanza percorsa per scaricare 30.000 t di calce spenta è 1.667 km, calcolata assumendo una velocità pari a 20 km/h e un rateo di scarico pari a 100 kg di calce spenta al secondo, cautelativamente 10 volte inferiore a quanto assunto da Renforth *et al.* (2013).

#### 2.4. Separazione di CO<sub>2</sub> e ricircolo del tail gas

Il syngas con la CO<sub>2</sub> aggiuntiva prodotta dalla reazione di calcinazione del calcare è raffreddato a temperatura ambiente ed è mandato ad una unità di separazione della CO<sub>2</sub> basata su membrane (MTR, 2017). In alternativa possono essere utilizzati l'assorbimento con soluzione acquosa di ammine (Voldsund *et al.*, 2016) o l'adsorbimento per oscillazione di pressione (PSA – *pressure swing adsorption*; Chou *et al.*, 2013).

La composizione del gas dopo la separazione di CO<sub>2</sub> è costituita principalmente di H<sub>2</sub> (87,8% mol), con una minore quantità di CH<sub>4</sub> (6,1% mol), CO<sub>2</sub> (1,1% mol), CO (5,5% mol); tale flusso è convogliato ad un separatore di idrogeno di tipo PSA da cui si ricava un flusso di idrogeno puro al 99,99% e un flusso gas costituito principalmente da CH<sub>4</sub> e CO, chiamato *tail gas*. Il *tail gas* viene ossidato in due bruciatori posti a monte dell'unità di cracking termico e dello scambiatore HX1: il gas ad alta temperatura risultante dall'ossidazione del *tail gas* viene miscelato con il syngas per aumentarne la temperatura. Questa tecnologia permette di evitare l'installazione di un reattore di *water gas shift* (WGS) in quanto la CO ed il CH<sub>4</sub> vengono trasformati all'interno dell'impianto in CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O permettendo al processo di produrre solo CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>. Tutte le superfici interne dei bruciatori (così come del reattore di gassificazione, del cracker, del calcinatore e dei condotti ad alta temperatura) sono previste in apposito materiale refrattario, adeguato alle alte temperature della combustione del *tail gas*. È comunque possibile miscelare e diluire il *tail gas* con vapore acqueo per raggiungere le temperature inferiori, con incidenza poco significativa sul bilancio energetico complessivo del processo.

#### 2.5. Stoccaggio di CO<sub>2</sub>

La CO<sub>2</sub> rimossa viene compressa e condizionata per il suo ulteriore smaltimento in uno stoccaggio

permanente, che potrebbe essere geologico in una formazione salina o in un giacimento esaurito di petrolio o gas (Aminu *et al.*, 2017), o altre opzioni proposte come lo stoccaggio confinato in capsule di vetro sul fondale marino, una tecnologia già oggetto di valutazioni economiche e ambientali in Caserini *et al.* (2017).

Lo stoccaggio geologico (SG) della CO<sub>2</sub> è allo stato attuale ancora in una fase dimostrativa, con circa 30 progetti operativi o in avviamento in tutto il mondo (GCCSI, 2017). Sebbene teoricamente esista un grande potenziale globale di stoccaggio geologico permanente di CO<sub>2</sub> (Fuss. *et al.*, 2018), identificare una formazione salina adatta per lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> richiede valutazioni complesse e dispendiose in termini sia economici (per gli ingenti investimenti iniziali necessari per garantire la capacità di stoccaggio sicuro) che di tempo (IEA, 2014). Inoltre, il potenziale di stoccaggio presenta grandi variazioni regionali, con molte aree dotate di una limitata capacità reale di stoccaggio (verificata sul campo), nettamente inferiore alla capacità pratica (che considera i limiti tecnici, giuridici, normativi e infrastrutturali) e alla capacità di stoccaggio effettiva, che considera anche i vincoli ingegneristici specifici del sito (Dooley, 2013; Anderson, 2016).

I depositi dove si effettua il recupero avanzato del petrolio (*Enhanced Oil Recovery* – EOR) e del gas (EGR) sono quelli attualmente più promettenti per lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> e sono un fattore chiave per lo sviluppo del CCS (GCCSI 2017). Un'altra tecnica per lo stoccaggio permanente di CO<sub>2</sub>, proposta e valutata in Caserini *et al.* (2017) e Barreto *et al.* (2018), è basata sulla compressione ad alta pressione della CO<sub>2</sub> in forma liquida all'interno di capsule di vetro, depositate in fondali marini profondi. Anche se questa opzione, chiamata stoccaggio confinato sottomarino del carbonio (*confined submarine carbon storage* – CSCS), è ancora in fase di ricerca e sviluppo, potrebbe rappresentare un'alternativa alle tecnologie di stoccaggio convenzionali per le emissioni situate in zone costiere in cui l'iniezione di CO<sub>2</sub> in formazioni geologiche non è un'opzione disponibile.

#### 2.6. Utilizzo dell'idrogeno

Una quota dell'idrogeno separato dal tail gas è alimentata direttamente ad un ciclo combinato con turbina a gas (CCGT) per la produzione di energia elettrica sufficiente a coprire gli autoconsumi dell'intero processo. La restante parte in eccedenza è

invece esportata al di fuori del sistema, sostituendo la produzione di una quantità equivalente da fonti convenzionali. Alternativamente, idrogeno e azoto potrebbero essere trasformati in ammoniaca anidra ( $\text{NH}_3$ ) attraverso un reattore Haber Bosch, generando un carburante che può essere di grande interesse in particolare per il trasporto marittimo (Zamfirescu e Dincer, 2009; Barret, 2015; LRGL e UMAS, 2017). La produzione di ammoniaca, facilmente trasportabile e immagazzinabile, potrebbe essere la migliore soluzione per gli impianti situati sui litorali remoti e lontani da grandi consumatori di idrogeno o elettricità.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Bilanci di massa ed energia

I flussi di energia e materiali dell'intero processo sono stati riferiti a 1 tonnellata di biomassa (contenuto di carbonio 49,6% su sostanza secca, umidità 2%, potere calorifico inferiore – PCI 18,5 GJ/t) processata nel gassificatore utilizzato dopo una fase di essiccazione. La quantità di energia necessaria per la pre-essiccazione della biomassa di partenza, grazie a parte del calore residuo del processo, è stata considerata nel bilancio di energia.

Per la stima delle quantità e dell'energia generata durante le diverse fasi sono stati utilizzati dati medi di impianti esistenti (Stork et al., 2014); per la turbina è stata assunta un'efficienza di conversione energetica pari al 58,7%, valore garantito da una turbina a gas (ad esempio GE Power 7HA.01/.02). La quantità teorica di  $\text{CO}_2$  rimossa dall'atmosfera in seguito allo scarico di idrossido di calcio nel mare è circa 2 moli per 1 mole di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aggiunto (si veda la reazione 1), ovvero 2 moli di alcalinità neutralizzano 2 moli di acido carbonico, con 2 moli di  $\text{CO}_2$  atmosferica che si dissolvono nel mare per ristabilire l'equilibrio. Nella realtà, a causa della reazione tra una piccola parte degli ioni ossidrilici e bicarbonati per formare carbonato e acqua, soltanto tra 1,6 e 1,8 moli di  $\text{CO}_2$  sono realmente assorbite (Renforth et al., 2013). Inoltre, l'efficienza del processo di alcalinizzazione del mare è anche limitata dallo scambio gassoso tra aria e acqua (guidato dalla velocità del vento e dalla differenza di pressione parziale tra il mare e l'atmosfera) e dalla disponibilità dell'acqua alcalina sulla superficie del mare. È stato quindi assunto un valore cautelativo di 1,4 moli di  $\text{CO}_2$  assorbite per ogni mole di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aggiunta (Keller et al., 2014).

L'emissione di  $\text{CO}_2$  evitata, grazie all'idrogeno prodotto in eccedenza, è stata valutata considerando il fattore di emissione di  $\text{CO}_2$  per ottenere idrogeno da gas naturale attraverso il processo *Natural Gas Steam Reforming (NGSR)*, il principale metodo oggi utilizzato per produrre idrogeno (48% dell'idrogeno prodotto a livello globale; Voldsund et al., 2012). Il fattore di emissione assunto per il bilancio del carbonio è pari a 9,4 kg  $\text{CO}_2$ /kg di idrogeno (Cetinkaya et al., 2012). Questo valore include le emissioni di  $\text{CO}_2$  dell'intero processo NGSR, cioè le fasi di costruzione e smantellamento dell'impianto, produzione e trasporto del gas naturale, generazione energia elettrica e funzionamento (Cetinkaya et al., 2012).

#### 3.2. Analisi LCA

##### 3.2.1. Scopo e campo di applicazione

La metodologia LCA è stata applicata, in accordo con le norme ISO 14040 (ISO, 2006) e ISO 14044 (ISO, 2018) con l'obiettivo di valutare i potenziali impatti ambientali dell'intero processo. L'analisi è stata svolta considerando come unità funzionale (UF) del sistema 1 kg di cippato di biomassa (umidità 2%) che entra nel gassificatore. È stato assunto che l'impianto tratti 1 Mt di biomassa per 25 anni di vita dell'impianto.

Il confine del sistema analizzato include i processi rappresentati in Figura 3. La valutazione degli impatti potenziali è stata applicata al caso con stoccaggio di  $\text{CO}_2$  geologico. Dato che per ogni kg di cippato di biomassa sono richieste 1,9 kg di carbonato di calcio, è stata condotta un'analisi di sensitività (paragrafo 4.3.1) per valutare qualora il carbonato di calcio venisse trasportato via mare oltre che per 100 km su gomma come varierebbero gli impatti all'aumentare della distanza per trasportarlo. Le distanze considerate sono: 1.000 km, 5.000 km, 10.000 km.

È stato assunto che l'idrogeno prodotto sia utilizzato in un impianto a ciclo combinato per la produzione di energia elettrica che soddisfa completamente la richiesta energetica del sistema. La restante parte di idrogeno viene esportato (si veda il paragrafo 2.6).

L'analisi ha previsto innanzitutto la valutazione della categoria di impatto *Cambiamenti climatici*; sono state inoltre considerate le seguenti 15 categorie di impatto: *Assottigliamento della fascia di ozono*; *Radiazione ionizzante, effetti sulla salute umana*; *Formazione di ozono fotochimico*; *Assunzione di materiale particolato*; *Tossicità umana, non cancerogena*; *Tossicità umana, cancerogena*; *Acidifica-*



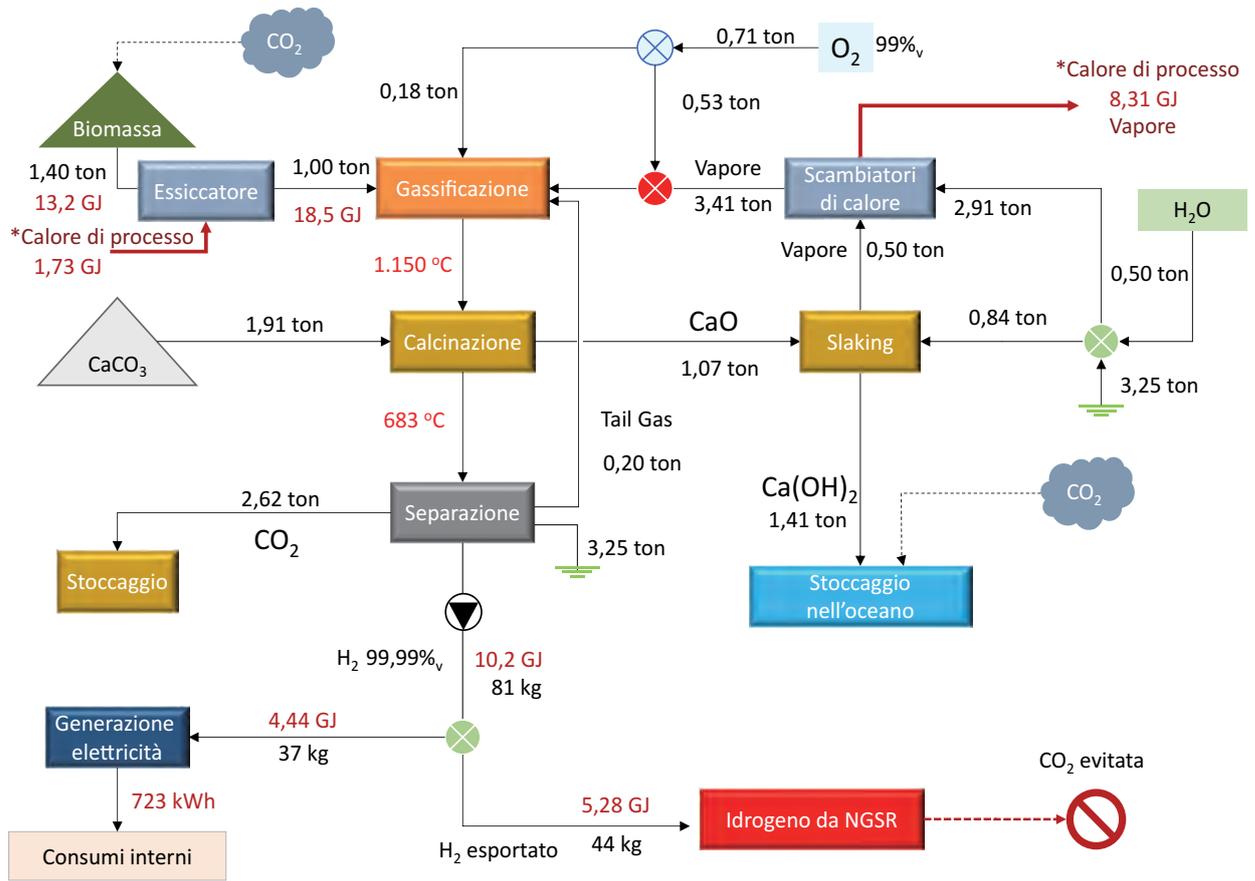


Figura 4 – Quadro dei flussi di materia ed energia del sistema

Tabella 1 – Composizione dei gas e altri parametri di processo nelle diverse fasi (per il significato dei termini A-H si veda la Figura 2)

		A	B	C	D	E	F	G	H
Composizione	CH <sub>4</sub>	2,6%	2,5%	2,3%	5,4%		11,8%	67,9%	
	CO	1,2%	1,1%	1,1%	2,5%		5,6%	32,1%	
	CO <sub>2</sub>	12,5%	13,5%	19,4%	50,2%	99,5%			0,03%
	H <sub>2</sub>	17,9%	17,2%	16,0%	37,5%		82,6%		99,97%
	H <sub>2</sub> O	65,8%	65,7%	61,2%	4,4%	0,5%			
	Totale	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Massa	kg/t bio.	4.385	4.880	5.723	2.898	2.621	277	196	81
Portata massica	kg/s	145	161	189	96	87	9	6	3
Volume	m <sup>3</sup> /t bio.	14.892	18.327	8.515	2.821	1.480	1.341	344	996
Portata volumetrica	m <sup>3</sup> /s	492	606	281	93	49	44	11	33
Temperatura	oC	856	1.150	689	30	30	30	30	30
Energia	MJ/t bio.	16.782	16.782	16.782	16.782	0	16.782	7.061	9.720
Potenza	MW	555	555	555	555	0	555	233	321
Calore specifico	kJ/kg-oC	2,12	2,16	1,83	1,30	0,84	1,42	1,42	14,32
Pressione	bar	1	1	1	10	100	10	1	1

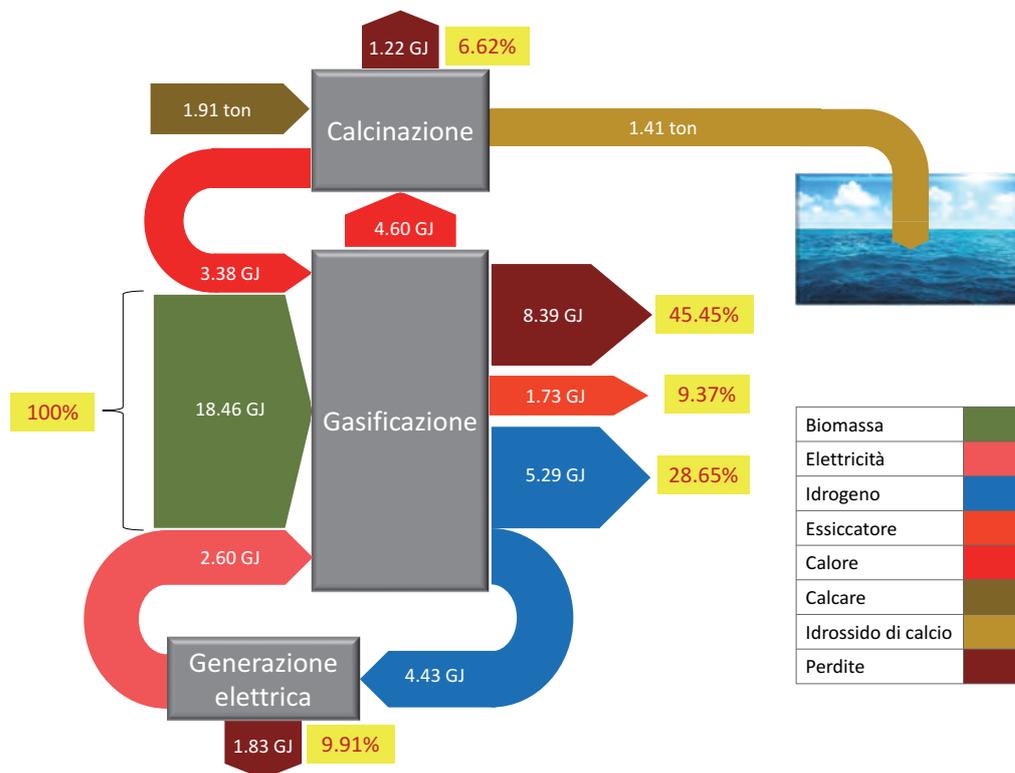


Figura 5 – Bilancio di energia del processo, riferito all'utilizzo di 1 t di biomassa

mentre la portata volumetrica è espressa in Nm<sup>3</sup>/h. Inoltre, nella tabella sono indicate le pressioni a cui opera il sistema. Le perdite di carico dei principali componenti sono state assunte trascurabili rispetto al consumo energetico del compressore del syngas. Informazioni riguardanti le differenze di temperature in ingresso e uscita dagli scambiatori di calore sono riportati in Tabella SM3.

#### 4.2. Bilancio di CO<sub>2</sub>

Il bilancio del carbonio del processo è descritto in Figura 6 e in Tabella 2.

Utilizzando di 1 t di biomassa immessa nel gassificatore (umidità 2%) si generano 1,41 t di Ca(OH)<sub>2</sub>, che permettono di assorbire 1,17 t di CO<sub>2</sub> ( $1,17 = 1,41 \cdot 1,4 \cdot 44 / 74$ , dove 44 e 74 sono rispettivamente i pesi molecolari di CO<sub>2</sub> e Ca(OH)<sub>2</sub> rispettivamente, in g/mole), corrispondenti a 0,32 t di carbonio. Il carbonio inviato allo stoccaggio finale, 0,72 tonnellate (C<sub>5</sub>), è la somma del carbonio assorbito da parte della biomassa dall'atmosfera (C<sub>1</sub>) e del carbonio contenuto nel calcare (0,23 tonnellate, C<sub>2</sub>). La quantità totale di carbonio rimosso direttamente dall'atmosfera (C<sub>6</sub>), 0,81 tonnellate di C (2,96 tonnellate di CO<sub>2</sub>), è calcolata sommando il carbonio prelevato dall'atmosfera dalla biomassa (C<sub>1</sub>) e dal mare (C<sub>3</sub>). C<sub>1</sub> è considerato nella valutazione della

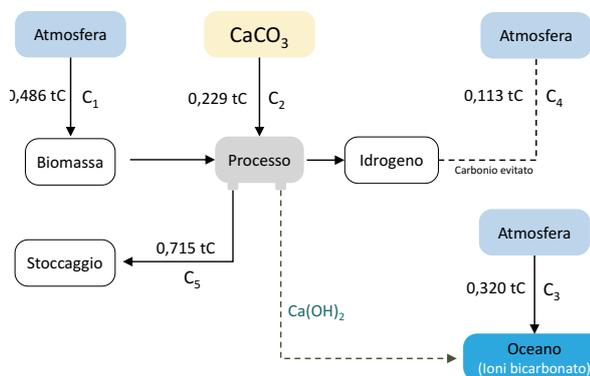


Figura 6 – Bilancio di carbonio del processo nel caso di utilizzo di 1 tonnellata biomassa (flussi di carbonio in tonnellate C)

rimozione diretta del carbonio in analogia a quanto fatto in molti bilanci di carbonio di BECCS (Fajardy e Mac Dowell, 2017; Laude et al., 2011; Tokimatsu et al., 2017), il carbonio prelevato dall'atmosfera e stoccato nella biomassa è ciò che permette alla tecnologia BECCS di produrre emissioni negative di CO<sub>2</sub>. Il carbonio evitato dal surplus di H<sub>2</sub> non utilizzato per autoconsumo (0,113 tonnellate, C<sub>4</sub>) può essere stimato considerando che la stessa quantità di idrogeno in eccedenza sia prodotta tramite il metodo NGSR, con un fattore di emissione pari a 9,36 kg CO<sub>2</sub>/kg di idrogeno (Cetinkaya et al., 2012;

**Tabella 2 – Bilancio del carbonio del processo e valutazione della rimozione del carbonio e dell’emissione totale negativa, per tonnellata di biomassa utilizzata**

		tC	tCO <sub>2</sub>	% della rimozione totale di carbonio
Carbonio nel combustibile (rimosso dall’atmosfera)	C1	0,486	1,78	60%
Carbonio nel calcare	C2	0,229	0,841	28%
Carbonio assorbito dall’oceano rimosso dall’atmosfera	C3	0,320	1,17	40%
Carbonio evitato dalla produzione di H <sub>2</sub> tramite NGSR	C4	0,113	0,414	14%
Carbonio inviato allo stoccaggio permanente	C5=C1+C2	0,715	2,62	89%
Rimozione diretta di carbonio dall’atmosfera generata dal processo	C6=C1+C3	0,806	2,96	100%
Beneficio totale di carbonio generato dal processo	C7=C6+C4	0,919	3,37	

vedi sezione 3.1). Aggiunto alla rimozione diretta del carbonio, il beneficio di carbonio del processo aumenta a 0,92 tonnellate di C, cioè 3,37 tonnellate di CO<sub>2</sub> per tonnellata di biomassa utilizzata.

Si considera trascurabile la quantità di carbonio emessa dall’impianto di generazione di elettricità in quanto l’idrogeno prodotto ha un elevato grado di purezza (99,99% v/v).

Si noti come la rimozione di CO<sub>2</sub> stimata per tonnellata di biomassa processata sia lievemente superiore a quella stimata in Caserini et al. (2019), sia in quanto alcune modifiche al processo inizialmente delineato (es. eliminazione del water shift reactor, pre-essiccazione della biomassa con calore precedentemente non utilizzato) hanno permesso un maggiore efficienza di rimozione di CO<sub>2</sub>, sia in quanto la tonnellata di riferimento considerata ha ora un minore contenuto di umidità (2% contro il 10%).

### 4.3. Analisi del ciclo di vita

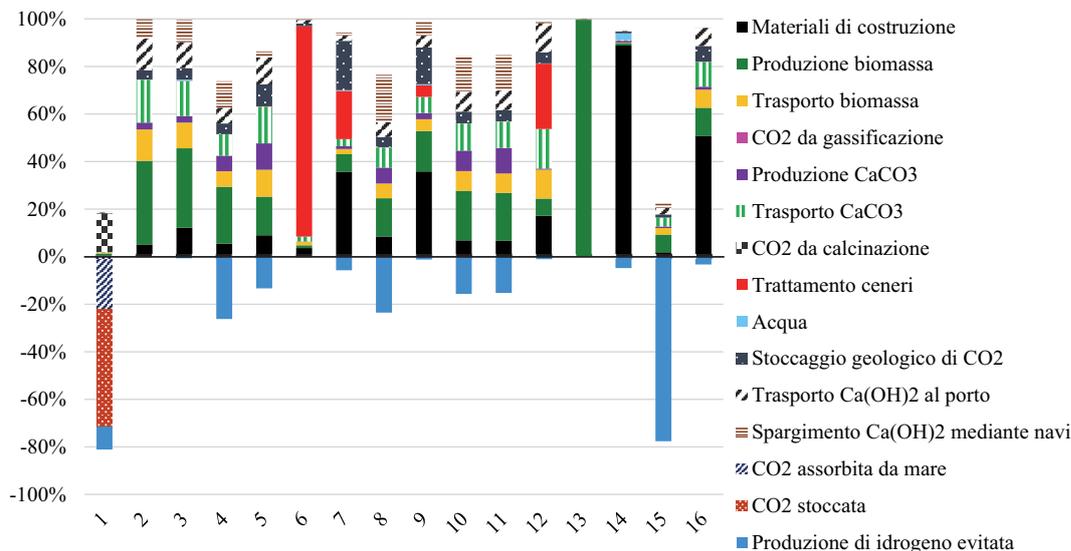
I risultati dell’analisi del ciclo di vita, riassunti in Tabella 3, mostrano che il sistema ha un impatto totale negativo nella categoria dei *Cambiamenti climatici*, ovvero dà un beneficio all’ambiente rimuovendo rispettivamente 3,30 kgCO<sub>2</sub>eq/UF.

In Figura 7 sono rappresentati i contributi dei diversi processi agli impatti considerati. Si può osservare il rilevante beneficio della produzione di idrogeno evitata nella categoria *15-Usa di risorse, vettori energetici* in cui l’impatto totale è negativo, cioè dove il sistema permette un beneficio per l’ambiente.

In questa categoria è valutato il consumo di risorse destinate alla produzione di energia, esclusa la biomassa. Nella categoria *13-Usa del suolo* si osserva invece l’importante contributo positivo (im-

**Tabella 3 – Potenziali impatti totali per le 16 categorie di impatto esaminate**

Categoria di impatto		Impatto totale
1	Cambiamenti climatici (kg CO <sub>2</sub> eq/UF)	-3,30
2	Assottigliamento della fascia di ozono (kg CFC-11 eq/UF)	3,24E-8
3	Radiazione ionizzante, effetti sulla salute umana (kBq U <sub>235</sub> eq/UF)	1,26E-2
4	Formazione di ozono fotochimico (kg COVNM eq/UF)	8,44E-4
5	Assunzione di materiale particolato (incidenza di malattia/UF)	1,08E-8
6	Tossicità umana, non cancerogena (CTUh/UF)	2,02E-7
7	Tossicità umana, cancerogena (CTUh/UF)	5,66E-9
8	Acidificazione (moli H <sup>+</sup> eq/UF)	9,03E-4
9	Eutrofizzazione delle acque dolci (kg P eq/UF)	3,03E-5
10	Eutrofizzazione marina (kg N eq/UF)	3,08E-4
11	Eutrofizzazione terrestre (moli N eq/UF)	3,51E-3
12	Ecotossicità per gli ecosistemi di acqua dolce (CTUe/UF)	4,01E-1
13	Uso del suolo (Punti/UF)	424
14	Uso delle risorse idriche (m <sup>3</sup> acqua eq/UF)	0,704
15	Uso di risorse, vettori energetici (MJ/UF)	-5,8
16	Uso di risorse minerali e metalli (kg Sb eq/UF)	6,37E-7



**Figura 7 – Analisi dei contributi per le 16 categorie di impatto esaminate (per la legenda delle categorie d’impatto si veda la Tabella 3)**

patto sull’ambiente) della fase di approvvigionamento della biomassa.

Per quanto riguarda la categoria *1-Cambiamenti climatici*, il sistema dà un beneficio anche senza considerare il contributo degli impatti evitati grazie alla produzione di idrogeno evitata.

Si può notare che il beneficio fornito dal processo per la categoria *Cambiamenti climatici*, calcolato con metodologia LCA, confrontato con il beneficio

stimato con il bilancio del carbonio (C7, si vedano il paragrafo 4.2 e la Tabella 2) è inferiore. La differenza tra i benefici calcolati con questi due approcci è pari a 0,07 kgCO<sub>2</sub>eq/kg di biomassa, ovvero circa il 2% del beneficio calcolato con approccio LCA.

*4.3.1. Analisi di sensitività*

I risultati dell’analisi di sensitività sono mostrati nella Tabella 4, dove gli impatti totali nel caso di

**Tabella 4 – Potenziali impatti totali per le 16 categorie di impatto esaminate nei differenti scenari di trasporto via mare del carbonato di calcio. Gli impatti totali nel caso di trasporto marittimo (per le differenti distanze: 1.000km, 5.000km e 10.000km) sono espressi come percentuale degli impatti totali nel caso di solo trasporto su gomma (Base)**

Categoria di impatto		Impatto totale			
		Base	1000 km	5000 km	10.000 km
1	Cambiamenti climatici (kg CO <sub>2</sub> eq/UF)	-3,30	99%	97%	93%
2	Assottigliamento della fascia di ozono (kg CFC-11 eq/UF)	3,24E-08	113%	166%	232%
3	Radiazione ionizzante, effetti sulla salute umana (kBq U <sub>235</sub> eq/UF)	1,26E-02	115%	177%	253%
4	Formazione di ozono fotochimico (kg COVNM eq/UF)	8,44E-04	138%	290%	480%
5	Assunzione di materiale particolato (incidenza di malattia/UF)	1,08E-08	106%	130%	161%
6	Tossicità umana, non cancerogena (CTUh/UF)	2,02E-07	100%	102%	104%
7	Tossicità umana, cancerogena (CTUh/UF)	5,66E-09	102%	111%	123%
8	Acidificazione (moli H <sup>+</sup> eq/UF)	9,03E-04	161%	405%	710%
9	Eutrofizzazione delle acque dolci (kg P eq/UF)	3,03E-05	110%	148%	197%
10	Eutrofizzazione marina (kg N eq/UF)	3,08E-04	135%	277%	453%
11	Eutrofizzazione terrestre (moli N eq/UF)	3,51E-03	135%	274%	447%
12	Ecotossicità per gli ecosistemi di acqua dolce (CTUe/UF)	4,01E-01	101%	106%	112%
13	Uso del suolo (Punti/UF)	424	100%	100%	100%
14	Uso delle risorse idriche (m <sup>3</sup> acqua eq/UF)	0,704	100%	101%	103%
15	Uso di risorse, vettori energetici (MJ/UF)	-5,8	95%	73%	46%
16	Uso di risorse minerali e metalli (kg Sb eq/UF)	6,37E-07	101%	104%	108%

trasporto marittimo del carbonato di calcio per le differenti distanze (1.000 km, 5.000 km e 10.000 km) sono espressi come percentuale degli impatti totali nel caso di solo trasporto su gomma (caso "Base"). All'aumentare della distanza per trasportare via mare il carbonato di calcio, i benefici per la categoria di impatto *Cambiamenti climatici* si riducono da 1% fino al 7%, cioè di 0,02 e 0,22 kgCO<sub>2</sub>eq/UF rispettivamente. Si può notare un generale peggioramento dei potenziali impatti, all'aumentare della distanza, anche nelle altre categorie. Nello scenario con 10.000 km di trasporto, gli impatti sono più che raddoppiati rispetto allo scenario "Base" in 6 categorie: *Assottigliamento della fascia di ozono*, *Radiazione ionizzante*, *Formazione ozono fotochimico*, *Acidificazione*, *Eutrofizzazione marina* e *Eutrofizzazione terrestre*.

## 5. DISCUSSIONE

Come mostrato al paragrafo 4.1, il processo permette di rimuovere dall'atmosfera 2,96 tonnellate di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera per ogni tonnellata di biomassa utilizzata. Questa quantità è superiore del 66% rispetto alla rimozione ottenuta con la tecnologia BECCS tradizionale, in cui il carbonio è rimosso dall'atmosfera solo durante la crescita della biomassa vegetale (1,78 tonnellate di CO<sub>2</sub> per la stessa quantità biomassa considerata nel processo, si veda la Tabella 2). Se l'intera quantità di idrogeno prodotto fosse direttamente destinata alla generazione di energia elettrica, la produzione di 1,13 MWh per tonnellata di biomassa umida al 30% (Figura 4: 9,72 GJ di idrogeno, rendimento 58,7%), sarebbe soltanto del 18% inferiore a quella prodotta in un tradizionale impianto BECCS di taglia simile (1,38 MWh/t; Fajardy e Mac Dowell, 2017). La migliore prestazione del processo proposto deriva dall'utilizzo del calore sensibile del syngas per la produzione della calce idrata e dal suo conseguente utilizzo per l'alcalinizzazione del mare. Un primo fattore è che la maggiore concentrazione di CO<sub>2</sub> nel gas di scarico in uscita dalla calcinazione riduce l'energia specifica per la sua cattura. Inoltre, l'alcalinizzazione degli oceani è un metodo efficiente per stoccare in essi carbonio sotto forma di bicarbonati. La maggiore efficienza nella rimozione del carbonio ottenuta combinando calcinazione e gassificazione della biomassa permette quindi di ridurre la quantità di biomassa necessaria per la rimozione di 1 tonnellata di

CO<sub>2</sub>, attenuando così uno dei principali limiti del BECCS, la disponibilità della materia prima biogenica.

L'utilizzo di carbone, come il calcare più abbondante e disponibile in tutto il mondo, permetterebbe di ampliare le potenziali applicazioni rispetto all'uso di biomassa. Pur se l'utilizzo della biomassa accentua il ruolo del processo come tecnologia ad emissione negativa, la sua effettiva disponibilità è un fattore limitante al suo sviluppo su grande scala, a causa della limitazione delle aree boschive, dei limiti specifici all'approvvigionamento in molte zone, degli impatti sulle risorse idriche e della competizione con altri usi del suolo come la produzione alimentare (Kato e Yamagata, 2014; Smith et al., 2016; Muratori et al., 2016; Muri, 2018). Diversi studi in letteratura hanno indicato la disponibilità di terreni per la produzione di biomassa come il fattore limitante del BECCS, considerando altresì che in futuro la disponibilità di biomassa sarà ulteriormente limitata a causa della maggior produzione di cibo necessaria per far fronte all'aumento della popolazione mondiale (Creutzig, 2016; Fuss et al., 2018; Honegger e Reiner, 2018).

Sebbene lo stoccaggio del carbonio e la calcinazione degli oceani debbano ancora affrontare molte sfide tecnologiche, il nucleo tecnologico del processo si basa su tecnologie disponibili a livello commerciale, quindi potenzialmente utilizzabili su grande scala.

Vale la pena notare che mentre dal bilancio del carbonio risulta una rimozione di 3,37 tCO<sub>2</sub>/t di biomassa, il risparmio netto stimato con l'analisi ciclo di vita, tenendo quindi conto della quantità di energia e materiali necessari per la crescita, la raccolta e il trasporto della biomassa, per la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture e per l'estrazione e la lavorazione delle materie prime impiegate, è solo lievemente inferiore, in quanto la penalità legata all'analisi del ciclo di vita è di circa il 2% (sale al 8,6% nel caso di trasporto di calcare da grandi distanze).

Confrontando la rimozione diretta di carbonio generata dal processo (2,96 kgCO<sub>2</sub>/t di biomassa, vedi sezione 4.2) con il beneficio della categoria dei *Cambiamenti climatici* nell'approccio LCA senza considerare il contributo della produzione di idrogeno evitato (-2,79 kgCO<sub>2</sub>eq/t di biomassa), la penalità generata dal considerare l'approccio LCA è di circa il 6%, che sale al 13% nello scenario con 10.000 km di distanza per l'approvvigionamento

del calcare. In altre parole, utilizzare un approccio LCA per stimare il beneficio del processo comporta una penalità per la categoria “cambiamenti climatici” che è superiore al caso in cui si tenga conto anche degli impatti evitati dalla generazione di idrogeno.

Sebbene molti autori abbiano sottolineato che per stimare il potenziale reale di mitigazione delle tecnologie bioenergetiche debbano essere considerati i cambiamenti indiretti di utilizzo del suolo con studi specifici basati sulla specifica materia prima considerata (es. Giuntoli et al., 2016), questo problema è legato a qualsiasi tipo di processo di rimozione del carbonio basato sulla biomassa.

### **5.1. Potenziali implicazioni ambientali nello spargimento nel mare di calce idrata**

La maggior parte della letteratura sulla risposta biologica ai cambiamenti nella chimica dei carbonati nelle acque marine si è concentrata sulle condizioni di acidificazione, che costituisce una minaccia già attuale per il biota marino (Haigh et al., 2015; IPCC, 2018). L'assorbimento di livelli crescenti di CO<sub>2</sub> atmosferica da parte del mare ne modifica la chimica (Doney et al., 2012), alterando le reti ecologiche e le loro funzioni (Nagelkerken e Connell, 2015). Al contrario, le implicazioni ecologiche riguardanti la direzione e l'entità delle risposte del biota marino all'alcalinizzazione artificiale degli oceani non sono ancora note (González e Ilyina, 2016). Studi sperimentali rivelano che l'aumento dell'alcalinità potrebbe perturbare l'equilibrio acido-base degli organismi marini (Cripps et al., 2013). Il biota marino, infatti, si basa sul pH per regolare il trasporto degli ioni; l'energia che investe per mantenere il pH intra ed extracellulare dipende dal pH ambientale. Di conseguenza, il potenziale impatto ecologico dell'aumento dell'alcalinità degli oceani dipende dall'entità della variazione del livello di pH prodotta durante il processo di alcalinizzazione del mare.

La variazione dell'alcalinità degli oceani influenza anche lo stato di saturazione dei carbonati, essenziali per gli organismi marini produttori di carbonato, come le specie che popolano gli ecosistemi tropicali (ad esempio scogliere popolate da specie bentoniche come coralli e macroalghe verdi) e gli ecosistemi pelagici (ad esempio componenti dell'ecosistema planctonico come i coccofori, foraminifera e pteropodi/eteropodi). Sono

stati condotti studi sperimentali sulla capacità di alcune specie marine di produrre (Langer et al., 2006) e di dissolvere carbonato (Schneider et al., 2011) a livelli elevati di alcalinità. Tuttavia, sono necessarie ulteriori ricerche per studiare la risposta positiva o negativa degli organismi e degli ecosistemi marini all'alcalinizzazione artificiale del mare.

## **6. CONCLUSIONI**

Al fine di generare emissioni negative di carbonio nella quantità necessaria per poter raggiungere ambiziosi obiettivi di contenimento delle temperature globali, è necessario sviluppare tecnologie che possano essere applicate in tutto il mondo utilizzando materie prime e fonti energetiche disponibili a basso costo e con costi di investimento e di esercizio sostenibili; inoltre la scelta fra le diverse opzioni di emissioni negative dipenderà anche dalla capacità delle stesse di minimizzare gli impatti ambientali e al contrario generare co-benefici. Il processo valutato nel presente articolo, che mira anche a ridurre l'acidificazione oceanica in corso per mezzo della dissoluzione controllata di idrossido di calcio nell'acqua di mare, genera quindi un co-beneficio di grande rilevanza. Sebbene esistano alternative industriali per l'uso della calce spenta (ad esempio per la cattura di CO<sub>2</sub> da un gas di scarico industriale), per le massicce quantità di emissioni negative richieste nei prossimi decenni è di grande interesse il suo utilizzo per sfruttare il grande potere tampone del mare, accelerando un processo che porterebbe altrimenti alla rimozione di CO<sub>2</sub> atmosferica in molti millenni (Archer e Brovkin, 2008).

Un ulteriore vantaggio del processo proposto è la produzione di idrogeno, un vettore energetico che sarà di grande importanza nei futuri sistemi energetici decarbonizzati (Davis et al., 2019) e che permette di compensare parzialmente il costo della generazione delle emissioni negative. Da non trascurare la possibilità di funzionamento di questo processo anche a partire da carbone, che permetterebbe un campo di applicazione più ampio rispetto alla tecnologia BECCS, riducendo il suo principale limite, la disponibilità di biomassa.

Un passo importante per valutare le possibilità di applicazione concreta di questo processo sarà la valutazione di dettaglio dei benefici per la biogeochimica del mare, tramite studi con modelli dedicati. Queste attività di ricerca sono state avviate nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus

([www.desarc-maresanus.net](http://www.desarc-maresanus.net)) che sta analizzando scenari di alcalinizzazione del Mar Mediterraneo.

Un aspetto importante da considerare è che l'alcalinizzazione degli oceani e lo stoccaggio del carbonio in capsule di vetro sottomarine richiedono un quadro normativo e autorizzativo adeguato. Una parte della complessità dipende dal fatto che gli interventi sulle acque costiere ricadrebbero sotto la responsabilità di ciascuna amministrazione nazionale, mentre lo scarico in mare aperto è sotto la supervisione internazionale (Renforth e Henderson, 2017). La Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (UNCLOS), firmata nel 1982, è il quadro giuridico per la maggior parte delle questioni relative ai mari e agli oceani. Altre norme, come il protocollo di Londra del 1996 e la Convenzione per la prevenzione dell'inquinamento marino dovuto allo scarico dei rifiuti, sono importanti per l'autorizzazione, il monitoraggio e la responsabilità a lungo termine dello stoccaggio negli oceani.

Sebbene siano quindi necessarie ulteriori ricerche ed approfondimenti per valutare la fattibilità di questa tecnologia come opzione di emissione negativa su larga scala, nonché i relativi aspetti politici, sociali e ambientali, i risultati sono promettenti e costituiscono un'utile base di lavoro nel percorso verso quell'aumento di scala senza precedenti nella rimozione di carbonio dall'atmosfera che è necessario per evitare effetti irreversibili sul clima che potranno riguardare i prossimi secoli e millenni (Clark et al., 2016; Nemet et al., 2018).

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aminu M.D., Nabavi S. A., Rochelle C.A., Manovic V. (2017) A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied energy*, 208, 1389-1419.
- Anderson T. (2016) Cost implications of uncertainty in CO<sub>2</sub> storage resource estimates: a review. *Natural resources research*, 26, 2, 137-159.
- Archer e Brovkin (2008) The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Climatic Change*, 90, 283-297.
- Baláš M., Lisý M., Moskalik J., Skála Z. (2015) Steam influence on biomass gasification process. *The Holistic Approach to Environment*, 6, 127-132.
- Barret M. (2015) Renewable synthetic fuels for transport, is ammonia also a friend? UCL Energy Institute, London.
- Barreto B., Caserini S., Dolci G., Grosso M. (2018) CO<sub>2</sub> submarine storage in glass containers: life cycle assessment and cost analysis of four case studies in the cement sector. *International Conference on Negative CO<sub>2</sub> Emissions*, May 22-24, 2018, Göteborg, Sweden.
- B&W Vølund (2020) Gasification of wood chips. [www.volund.dk/Biomass\\_energy/Technologies/Gasification\\_of\\_biomass](http://www.volund.dk/Biomass_energy/Technologies/Gasification_of_biomass). Accesso 1/2/2020.
- Capone D.G., Hutchins D.A. (2013) Microbial biogeochemistry of coastal upwelling regimes in a changing ocean. *Nature Geoscience*, 6, 711-717.
- Caserini S., Dolci G., Azzellino A., Lanfredi C., Rigamonti L., Barreto B., Grosso M. (2017) Evaluation of a new technology for carbon dioxide submarine storage in glass capsules. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 60, 140-155.
- Caserini S., Barreto B., Lanfredi C., Cappello G., Ross Morrey D., Grosso M. (2019) Affordable CO<sub>2</sub> negative emission through hydrogen from biomass, ocean liming, and CO<sub>2</sub> storage. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(7), 1231-1248.
- Cetinkaya E., Dincer I., Naterer G.F. (2012) Life cycle assessment of various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 2071-2080.
- Chou C., Chen F., Huang Y., Yang H. (2013) Carbon dioxide capture and hydrogen purification from synthesis gas by Pressure Swing Adsorption. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1855-1860.
- Clark P.U., Shakun J.D., Marcott S.A., Mix A.C., Eby M., Scott K. et al. (2016) Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Climate Change*, 6, 360-369.
- Clarke L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K. et al. (2014) Assessing Transformation Pathways. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, NY, USA.
- CO2APPS (2017) Patent PCT/IB2018/050336 19/1/2018 patent n° 102017000006623.
- Couto N., Rouboa A., Silva V., Monteiro E., Bouziane K. (2013) Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas. *Energy Procedia*, 36, 596-606.
- Creutzig F. (2016) Economic and ecological views on climate change mitigation with bioenergy and ne-

- gative emissions. *GC Bioenergy*, Volume 8, Issue 1, 4-10.
- Cripps G., Widdicombe S., Spicer J.I., Findlay H.S. (2013) Biological impacts of enhanced alkalinity in *Carcinus maenas*, *Mar. Pollut. Bull.*, 71, 190-198.
- Davis S.J., Lewis N.S., Shaner M., Aggarwal S., Arent D., Azevedo I.L. et al. (2018) Net-zero emission energy system. *Science*, 360, 6396, 1-9.
- Doney S.C., Ruckelshaus M., Duffy J. E., Barry J.P., Chan F., English C. et al. (2012) Climate change impacts on marine ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4, 11-37.
- Dooley J. (2013) Estimating the supply and demand for deep geologic CO<sub>2</sub> storage capacity over the course of the 21st Century: A meta-analysis of the literature. *Energy Procedia*, 37, 5141-50.
- Ecoinvent centre (2018) Ecoinvent Version 3.4 database. <http://www.ecoinvent.org/>
- Fajardy M. and Mac Dowell N. (2017) Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy Environ. Sci.*, 10, 1389-1426.
- Fjellerup J., Ahrenfeldt J., Henriksen U., Gøbel B. (2005) Formation, Decomposition and Cracking of Biomass Tars in Gasification. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3220398/pyrotar2.pdf>
- Franco A.C., Gruber N., Frölicher T.L., Kropuenske Artman L. (2018) Contrasting impact of future CO<sub>2</sub> emissions scenarios on the extent of CaCO<sub>3</sub> mineral undersaturation in the Humboldt current system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1002/2018JC013857>.
- Fuss S., Lamb W.F., Callaghan M.W., Hilaire J., Creutzig F., Amann T. et al. (2018) Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13, 063002.
- García-Labiano F., Abad A., de Diego L.F., Gayán P., Adánez J. (2002) Calcination of calcium-based sorbents at pressure in a broad range of CO<sub>2</sub> concentrations. *Chemical Engineering Science*, 57, 2381-2393.
- García-Reyes M., Sydeman W.J., Schoeman D.S., Rykaczewski R.R., Black B.A., Smit A.J., Bograd S.J. (2015) Under Pressure: Climate Change, Upwelling, and Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 2, 1-10.
- GCCSI (2017) The Global Status of CCS: 2017. Global Status of CCS. Global Carbon Capture and Storage Institute.
- Giuntoli J., Agostini A., Caserini S., Lugato E., Baxter D., Marelli L. (2016) Climate change impacts of power generation from residual biomass. *Biomass & Bioenergy*, 89, 146-158.
- González M.F., Ilyina T. (2016) Impacts of artificial ocean alkalization on the carbon cycle and climate in Earth systems simulations. *Geophysical Research Letters*, 43, 6493-6502.
- Haigh R., Ianson D., Holt C.A., Neate H.E., Edwards A.M. (2015) Effects of Ocean Acidification on Temperate Coastal Marine Ecosystems and Fisheries in the Northeast Pacific. *PLoS ONE* 10(2): e0117533.
- Hauri C., Friedrich T., Timmermann A. (2016) Abrupt onset and prolongation of aragonite undersaturation events in the Southern Ocean. *Nature Climate Change*, 6, 172-176.
- Honegger M., Reiner D. (2018) The political economy of negative emissions technologies: consequences for international policy design. 18:3, 306-321.
- Hu Y., Watanabe M., Aida C., Horio M. (2006) Capture of H<sub>2</sub>S by limestone under calcination conditions in a high-pressure fluidized-bed reactor. *Chemical Engineering Science* 61 (6), 1854-1863.
- IEA (2014) CCS 2014 What lies in store for the CCS? International Energy Agency.
- IPCC (2018) Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO (2006). ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.
- ISO (2018). ISO 14044: Environmental Management-Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.
- Kato E., Yamagata Y. (2014). BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions. *Earth's Future*, 2, 421-439.
- Keller D.P., Feng, E.Y., Oschlies A., (2014) Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario. *Nature Communications*, 5, 3304.
- Kheshgi H.S. (1995) Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity. *Energy*, 20, 915-922.
- Köhler P., Abrams J.F., Völker C., Hauck J., Wolf-Gladrow D.A. (2013) Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO<sub>2</sub>, surface ocean pH and marine biology. *Environmental Research Letters*, 8, 014009.
- Lachkar Z. (2014). Effects of upwelling increase on ocean acidification in the California and Canary Current systems: Acidification in upwelling systems. *Geophysical Research Letters*, 41, 90-95.

- Langer G., Baumann K., Kläs J., Riesbesell U., Thoms S., Young J. (2006) Species-specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q09006.
- Laude A., Ricci O., Royer-Adnot J., Fabbri A. (2011) CO<sub>2</sub> capture and storage from a bioethanol plant: Carbon and energy footprint and economic assessment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 1220-1231.
- Le Quéré et al. (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141-2194.
- Lenton A. et al. (2018) Assessing carbon dioxide removal through global and regional ocean alkalization under high and low emission pathways. *Earth Syst. Dynam.*, 9, 339-357, 2018
- LRGL and UMAS (2017) Zero-emission vessels 2030. How do we get there? Lloyd's Register Group Limited and University Maritime Advisory Services.  
<https://www.lr.org/en/insights/articles/zev-report-article/>
- Milne T.A., Evans R.J., Abatzoglou N. (1998) Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado.  
[www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf)
- MTR (2017) CO<sub>2</sub> Removal from Syngas. Membrane Technology & Research.  
[www.mtrinc.com/co2\\_removal\\_from\\_syngas.html](http://www.mtrinc.com/co2_removal_from_syngas.html)
- Muratori M., Calvin K., Wise M., Kyle P., Edmonds J. (2016). Global economic consequences of deploying bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). *Environmental Research Letters*, 11, 95004.
- Muri H. (2018) The role of large-scale BECCS in the pursuit of 1.5°C target: An Earth system model perspective. *Environmental Research Letters*, 13, 044010.
- Nagelkerken I., Connell S.D. (2015) Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO<sub>2</sub> emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 13272-13277.
- Nemet G.F., Callaghan M.W., Creutzig F., Fuss S., Hartmann J., Jérôme H. et al. (2018) Negative emissions-Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters* 13, 063002.
- Nexterra (2020) Nexterra's Gasification Technology.  
[www.nexterra.ca/files/gasification-technology.php](http://www.nexterra.ca/files/gasification-technology.php). Accesso 1/2/2020.
- Pröll T., Zerobin F. (2019) Biomass-based negative emission technology options with combined heat and power generation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 1307-1324.
- Renforth P., Jenkins, B. G., Kruger, T. (2013) Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 60, 442-452.
- Renforth, P., Henderson G. (2017) Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Rev. Geophys* 55:636-674.
- Schneider K., Silverman J., Woolsey E., Eriksson H., Byrne M., Caldeira K. (2011) Potential influence of sea cucumbers on coral reef CaCO<sub>3</sub> budget: A case study at One Tree Reef, *J. Geophys. Res.*, 116, G04032.
- Sikarwar V.S., Zhao M., Fennell P. S., Shah N., Anthony E.J. (2017) Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 189-248.
- Smith P., Davis S. J., Creutzig F., Fuss S., Minx J., Gabrielle B. et al. (2016) Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42-50.
- Stanmore B.R., Gilot P. (2005) Review-calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO<sub>2</sub> sequestration. *Fuel Processing Technology*, 86, 1707-1743.
- Stork M., Meinderstma W., Overgaag M., Neelis M. (2014) A Competitive and efficient lime industry. Technical Report Ecofys.  
[www.eula.eu/documents/competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-sustainable-europe-lime-road-map-1](http://www.eula.eu/documents/competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-sustainable-europe-lime-road-map-1)
- Tokimatsu K., Yasuoka R., Nishio M. (2017) Global zero emissions scenarios: The role of biomass energy with carbon capture and storage by forested land use. *Applied Energy*, 185, 1899-1906.
- Voldsund M., Jordal K., Anantharaman R., (2016) Hydrogen production with CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Hydrogen energy* 41 4969-4992.
- Zamfirescu C., Dincer I. (2009) Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. *Fuel Processing Technology*, 90, 729-737.

## RINGRAZIAMENTI

La ricerca esposta nel presente articolo si è svolta nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, ([www.desarc-maresanus.net](http://www.desarc-maresanus.net)), che ha ricevuto il supporto finanziario di Amundi SGR SpA. Si ringraziano Giovanni Cappello e Dennis Ross Morrey di CO2APPS per il loro supporto nella simulazione del processo e nelle scelte tecnologiche.

## MATERIALE SUPPLEMENTARE

Il materiale supplementare è disponibile su <https://www.ingegneriadellambiente.net/>

# SCENARI DI GESTIONE SOSTENIBILE E RIUTILIZZO IN SITO DEI DETRITI DA TERREMOTO

Antonio Basti

DdA, Dipartimento di Architettura, Università “G. d’Annunzio” di Chieti-Pescara

**Sommario** – Il testo affronta la tematica della gestione e riutilizzo dei residui inerti derivanti da crolli e demolizioni conseguenti ad eventi sismici, con particolare attenzione alla definizione di scenari progettuali ed organizzativi basati sull’integrazione dei criteri dell’economia circolare, ai fini della riqualificazione e rifunzionalizzazione degli spazi urbani dei centri storici colpiti da sisma. Sulla scorta delle ricerche condotte dall’autore ai fini della redazione dei “Criteri e per la gestione sostenibile delle macerie e il riciclo dei residui inerti”, sviluppati in occasione del terremoto dell’Aquila dell’aprile 2009, l’esperienza che si intende presentare assume come riferimento il Comune di Poggio Picanze (AQ) rispetto al quale ipotizza uno scenario di raccolta, trattamento e riutilizzo in sito delle macerie al fine addivenire alla ricostruzione della piazza principale. La nuova sistemazione proposta enfatizza nelle pavimentazioni e negli elementi d’arredo l’uso dei materiali recuperati, affidandogli il ruolo di elementi della memoria. Al contempo tende a minimizzare il trasporto ed il conferimento a discarica delle macerie e l’approvvigionamento di nuovi materiali, in modo da contribuire all’evoluzione verso un modello circolare dei processi di ricostruzione.

**Parole chiave:** economia circolare, residui da costruzione e demolizione, innovazione tecnologica, riutilizzo, materie prime secondarie.

## SCENARIOS OF SUSTAINABLE MANAGEMENT AND ON-SITE REUSE OF EARTHQUAKE DEBRIS

**Abstract** – The text addresses the issue of sustainable management and the reuse of inert debris resulting from collapses and demolitions following seismic events. Therefore, it pays attention to the definition of organizational and design scenarios based on the integration of circular economy criteria in the project decisions. The study is based on the previous research works conducted by the author, with reference to his collaboration with the scientific team of the University of Chieti-Pescara that supported some local municipalities of the homogeneous area after the L’Aquila earthquake of April 2009. These studies were focused on the environmental sustainability of the management rules and strategies adopted by Italian central government for the removing, collecting and disposal of rubble derived by the collapsed and demolished buildings. The results of these research works were the development of “Criteria for the sustainable management of rubble and the recycling of inert waste” adopted by the Municipalities as part of their Reconstruction Plans, and a comparative life cycle assessment of var-

ious scenarios for manipulation and treatment (centralized rather than localized), analyzed from an environmental and technical point of view, in order to identify potentials and limits of the various intervention choices. Based on this knowledge, the experience reported begins with the evaluation of the phenomenon of rubble and its management implications in the area of the earthquake and finally takes as reference the historic center of Poggio Picanze (AQ), respect to which hypothesize the reconstruction of the main square made with the inert debris recovered on site. The new solution proposed emphasizes the use of recovered materials (secondary raw resources) in the external flooring and furnishing, with the aim of entrusting on it the role of memorial elements of the destructive event. At the same time tends to minimize the transport and landfilling of inert debris, as well as the consumption of new materials, to contribute to the evolution towards a circular model of the reconstruction processes.

**Keywords:** circular economy, demolition and reconstruction debris, technological innovation, reuse, secondary raw materials.

Ricevuto il 4-3-2020; Correzioni richieste il 27-3-2020; Accettazione finale il 7-4-2020.

## 1. INTRODUZIONE

La transizione verso un modello organizzativo di tipo circolare del proprio sistema di produzione e consumo rappresenta oggi uno degli obiettivi prioritari assunti dall’Unione Europea nel processo di trasformazione verso un’economia sostenibile e rigenerativa, a basso contenuto di carbonio ed alta efficienza nell’uso delle risorse.

A tal fine nel redigere il Piano d’azione per l’Economia Circolare (Unione Europea, 2015), la Commissione Europea individua nella gestione dell’intero ciclo di vita di prodotti e materiali l’azione principale da intraprendere, attribuendo valore strategico alle attività di eco-design, life cycle design e prolungamento della vita utile, preparazione al riciclaggio, riduzione dei rifiuti e produzione di Materie Prime Secondarie (MPS). Individua inoltre 5 settori prioritari d’intervento, tra cui quello dei rifiuti da Costruzione e Demolizione (C&DW) provenienti dal settore edilizio ed infrastrutturale. Un settore che secondo gli studi riportati nella Comunicazione sul miglioramento dell’efficienza delle risorse in edilizia (Unione Europea, 2014), con-

\* Per info: Prof. Antonio Basti, viale Pindaro 42, 65127 Pescara, Italia. antonio.basti@unich.it

suma circa la metà delle materie prime e un terzo delle risorse idriche, genera circa un terzo di tutti i rifiuti prodotti, e rappresenta uno dei flussi di rifiuti più pesanti e voluminosi dell'UE.

Al riguardo la Comunicazione individua il riciclaggio e il riutilizzo dei materiali a fine vita come uno dei mezzi più idonei a migliorare l'uso efficiente delle risorse naturali ed evitare gli impatti negativi associati all'estrazione di nuovi materiali vergini. Evidenzia inoltre come la concreta attuazione di dette azioni dipenda in larga misura dall'esistenza di un sistema di riciclaggio efficiente a livello locale, regionale o nazionale, e che l'interesse verso il riutilizzo/riciclo appare influenzato dalla distanza di trasporto ai siti di riciclaggio e dalla possibilità di realizzare il livello di purezza dei materiali riciclati richiesto dal mercato.

Diversi autori hanno sviluppato ricerche sulle tematiche riguardanti il riutilizzo dei C&DW, studiandone sia gli aspetti connessi alle differenti modalità applicative come MPS (Medina et al., 2017) sia quelli relativi alle prestazioni ottenibili dai manufatti edilizi realizzati con aggregati riciclati (Ossa et al., 2016; Puthussery et al., 2017). Gli studi confermano da un lato la utilità di attingere a questa risorsa ai fini di una evoluzione in senso sostenibile del settore delle costruzioni (Del Rio Merino et al., 2010; Ma, 2011) ed evidenziano dall'altro l'esistenza di fattori normativi, tecnico-organizzativi e di mercato che ne limitano la diffusione (Adams et al., 2017).

Sul piano normativo vanno ricordati diversi strumenti di livello italiano ed europeo, quali il Decreto Ministeriale per l'uso del 30% di materiali riciclati negli appalti pubblici (Ministero dell'Ambiente, 2003), la Direttiva Europea sui rifiuti (Unione Europea, 2008) che fissa al 70% l'obiettivo di recupero/riciclo dei C&DW entro il 2020 ed il Decreto Legislativo di recepimento (Governo italiano, 2010), il decreto sulla introduzione dei Criteri Ambientali Minimi negli appalti pubblici (Ministero dell'Ambiente, 2015).

Sul piano tecnico-organizzativo e di mercato permangono invece delle difficoltà legate alla messa a punto delle procedure di trasformazione e certificazione dei C&DW in MPS o Aggregati riciclati, e alla qualificazione della filiera di produzione e costruzione, anche ai fini della verifica di affidabilità dei prodotti da parte di professionisti e imprese di costruzione (Legambiente, 2017). Mancano inoltre sufficienti progetti dimostrativi ed esperienze applicative capaci di rendere evidenti e divulgabili i processi organizzativi, gli attori, le procedure e le tecniche esecutive, i controlli utili alla qualificazione

nel tempo delle opere edilizie ed infrastrutturali realizzati con dette MPS (Debacker et al., 2017).

In questo scenario la tematica della gestione e riutilizzo dei C&DW derivanti da crolli e demolizioni conseguenti ad eventi sismici, può rappresentare l'occasione per verificare l'immediata attuabilità degli obiettivi normativi sopra ricordati, e per sperimentare le modalità e le tecniche applicative suggerite dalle più recenti esperienze di ricerca. D'altro canto, l'entità del fenomeno e la necessità di provvedere nel più breve tempo possibile alla rimozione dei C&DW ai fini del ripristino degli edifici ed infrastrutture danneggiate, suggeriscono l'adozione di soluzioni progettuali e tecnico-organizzative basate su requisiti di efficienza ed appropriatezza rispetto alle caratteristiche fisiche, morfologiche ed infrastrutturali dei singoli territori.

Anche in questo ambito risultano disponibili studi e ricerche sulle modalità di gestione delle macerie derivanti da eventi sismici, che focalizzano la loro attenzione sull'analisi di esperienze precedenti (Faleschini et al., 2017; Askarizadeh et al., 2017; Gabrielli et al., 2018) così come sulle migliori pratiche organizzative (Lauritzen, 1998) e di raccolta, separazione e riciclo in sito o in centri dedicati. Con riferimento a quest'ultimo aspetto gli autori evidenziano alcuni fattori di criticità legati all'entità delle macerie, alla disponibilità di aree di stoccaggio temporaneo, alla dotazione di uno specifico quadro normativo ed all'esistenza di un chiaro programma di reinserimento nel mercato dei materiali da riciclo delle MPS da queste recuperate (Brown e Milke, 2016; Boonmee et al., 2018). Dai diversi studi citati appare infine come, anche ai fini della sostenibilità economica, ambientale e sociale delle scelte organizzative, una delle scelte maggiormente efficienti possa essere rappresentata dal riutilizzo diretto dei materiali recuperati/riciclati nell'ambito degli stessi cantieri della ricostruzione.

Sulla base di detto quadro conoscitivo lo studio di seguito riportato si sofferma sulla valutazione comparativa di due scenari progettuali di trattamento e riutilizzo delle macerie, rispetto ai quali approfondisce gli aspetti legati ai tempi di gestione, alle interferenze con le attività edilizie post-sisma ed alle possibili ricadute sul sistema infrastrutturale ed occupazionale locale.

## 2. MATERIALI E METODI

Oggetto di studio è Comune di Poggio Picenze interessato dal terremoto del 6 aprile 2009, e situato a soli 16 km dall'epicentro. A seguito del sisma il



Figura 1 – Poggio Pienze: vedute aeree del centro storico prima e dopo l'evento sismico (fonte: Spacone, 2011)

centro storico, costituito da due nuclei edificati distinti, ha subito numerosi crolli e danni rilevanti, anche ad alcuni edifici strategici come la scuola elementare e l'annessa scuola dell'infanzia (Spacone, 2011) (Figura 1).

Da una prima stima le macerie da crollo e demolizione da rimuovere ammontavano a circa 30.000 mc, oltre quelle successivamente generate dalle attività di ricostruzione. Da questo punto di vista l'Amministrazione Comunale nel redigere il Piano di Ricostruzione (PdR), ha a suo tempo recepito le specifiche direttive emanate dal Primo Ministro (Ordinanze 3923/2011, 3942/2011, 3945/2011) e dal Commissario straordinario alla ricostruzione (Decreti 18/2010, 49/2011, 51/2011), relativamente alle modalità di gestione dei C&DW. Il sistema prevedeva la demolizione selettiva e separazione in cantiere sulla base dei Codici Europei Rifiuti (CER) ed il loro conferimento in apposite aree di stoccaggio temporaneo individuate dal Comune, dalle quali sarebbero stati prelevati e trasportati dalle forze dell'ordine (nel caso specifico i Vigili del Fuoco) presso appositi siti di trattamento e riciclo (Unione Europea, 2000; Governo Italiano, 2006). La dimensione minima di dette aree appare configurabile in circa 240 mq (compresi gli spazi di manovra), per una capacità di stoccaggio di circa 60 t di inerti (3 cassoni), 20 t di sovvalli (1 cassone) e 20 t di metallo, legno, plastica e vetro (1 cassone). Il PdR di Poggio Pienze individuava a tal fine 2 aree della superficie di circa 700 mq cadauna, ubicate pressoché al centro dei due principali nuclei edificati. Dette aree consentivano una capacità di stoccaggio di circa 180 t di inerti, 60 t di metallo, legno, plastica e vetro e 60 t di sovvalli cadauna. Individuava inoltre 5 Ambiti di intervento, di cui solo 3 presentavano macerie da crollo e demolizione (Figura 2 a pagina seguente).

Alla luce delle considerazioni precedenti, è stato possibile effettuare una prima stima dei giorni ne-

cessari per lo smaltimento dei C&DW seguendo la procedura fissata dalla normativa e dal PdR.

I tempi, valutati per il solo Ambito 1 in funzione delle macerie presenti, della capacità di stoccaggio dell'Area 1 e della ipotesi che i cantieri operassero tutti a pieno regime, appaiono stimabili in circa 89 giorni lavorativi. Vale la pena di sottolineare che il dato è influenzato in modo prevalente dagli inerti, che secondo studi recenti tendono a rappresentare circa il 98% in peso di tutti i rifiuti presenti nelle macerie (Gabrielli et al., 2018; Angelucci et al., 2018).

Sulla base di quanto premesso, obiettivo principale dello studio è stato quello di individuare e simulare un sistema di gestione delle macerie alternativo, capace di ridurre i tempi di realizzazione degli interventi di demolizione e sostanzialmente basato sulla trasformazione e riciclo in sito dei C&DW, in modo da ottenere delle MPS a km 0 direttamente riutilizzabili. Obiettivo secondario è stato quello di sviluppare una ipotesi progettuale di un'opera pubblica nella quale il riutilizzo dei materiali inerti provenienti dalle demolizioni potesse essere sottolineato ed evidenziato attraverso la configurazione degli elementi architettonici. Riutilizzo auspicato con specifica Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri "... nella realizzazione di opere e interventi da parte delle pubbliche amministrazioni nel territorio della regione Abruzzo vengano impiegati i rifiuti inerti da costruzione e demolizione ... le amministrazioni pubbliche appaltanti lavori e opere nella regione Abruzzo che richiedono la realizzazione di ripristini ambientali, argini, rilevati e riempimenti sono obbligate a richiedere al Provveditore il quantitativo occorrente di tali materiali ..." (OPCM 3923, 2011), e richiesto anche dall'art. 43 delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del PdR "... la quantità minima di materiali inerti riciclati da utilizzarsi nella realizzazione di interventi pubbli-



Figura 2 – Piano di Ricostruzione di Poggio Pienze con l'individuazione delle aree di stoccaggio temporaneo dei C&DW. In basso l'analisi delle macerie suddivisa per Ambiti di intervento (Fonte: Agnello, 2013)

ci e privati ... non deve essere inferiore al 30% della quantità complessiva di inerti utilizzati nelle opere di che trattasi ...”.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Come appena accennato, le simulazioni progettuali sono state condotte secondo due filoni distinti. Il primo ambito di studio ha riguardato l'individuazione ed applicazione al caso studio di un sistema di gestione e trasformazione delle macerie che ne prevedesse il trattamento in loco. A tal fine si è provveduto ad effettuare uno studio pre-

liminare sui processi di trattamento e riciclo dei rifiuti inerti, oltre che sui sistemi e macchinari disponibili. Grazie alla collaborazione con la Società RECinert è stato possibile individuare una soluzione basata sull'installazione temporanea di un Centro di Raccolta e Recupero di rifiuti inerti per la produzione di aggregati riciclati certificati, basato sull'uso di attrezzature mobili. Dall'analisi dei dati tecnici sono emersi una capacità di trattamento pari a circa 90 t/ora ed un ingombro minimo dell'area di lavorazione, comprendente gli spazi di manovra e deposito, pari a circa 1.100 mq (Figure 3 e 4).

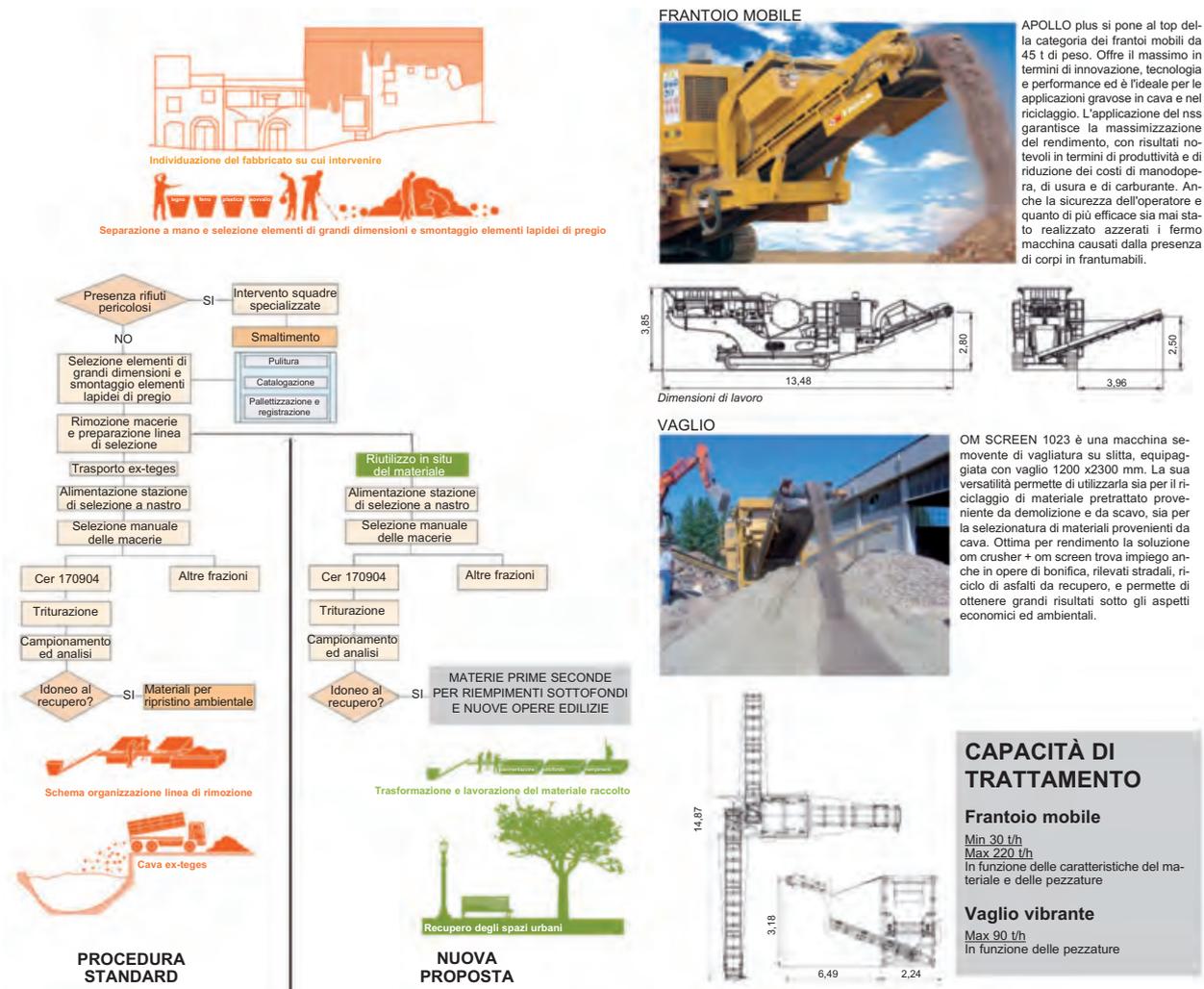


Figura 3 – Schemi del Sistema di Gestione e riciclo delle macerie previsto dal Commissario delegato alla ricostruzione e modifiche allo stesso apportate dallo studio (a sinistra). A destra, caratteristiche tecniche dei macchinari di riferimento utilizzati per lo studio (Fonte: Agnello, 2013)

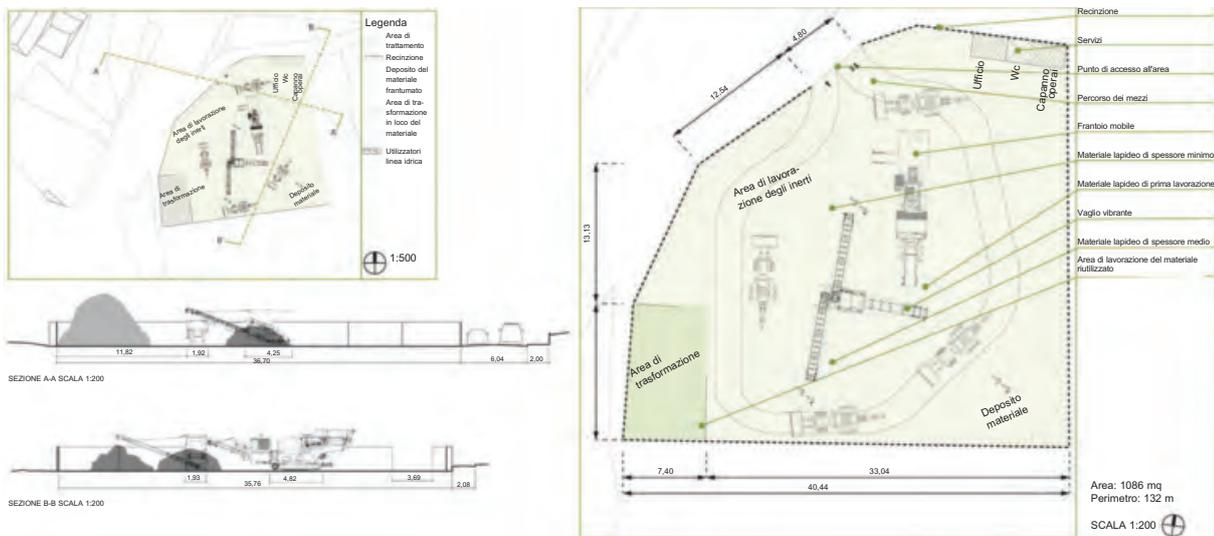


Figura 4 – Schema del layout organizzativo del Centro di Raccolta e Recupero di rifiuti inerti per la produzione in sito di aggregati riciclati ipotizzato nello studio (Fonte: Agnello, 2013)

Tabella 1 – *Quantificazione comparativa dei tempi stimati per il trattamento dei C&DW nei due differenti scenari analizzati dallo studio*

AREA 1	Inerti	Capacità di trattamento	Tempi previsti	Materiale residuale
	ton	ton/giorno	giorni	
Scenario 1	15974	180	89	Residuo inerte indifferenziato da inviare a trattamento e riciclo
Scenario 2	15974	720	22	Aggregato inerte riciclato certificato, immediatamente riutilizzabile

Sulla scorta dei dati è stato possibile effettuare una prima, sebbene non esaustiva, valutazione comparativa dei tempi di smaltimento, ed in questo secondo caso, anche di trattamento dei C&DW. Sempre con riferimento all'Ambito 1, a fronte di una quantità di C&DW pari a circa 16.300 t, di cui la frazione inerte rappresenta circa il 98% ossia 15.974 t, e nell'ipotesi che la selezione e separazione avvenissero in cantiere, i tempi avrebbero potuto aggirarsi attorno ai 22 giorni lavorativi (vedi Tabella 1).

Sempre con riferimento all'ottimizzazione del sistema di smaltimento delle macerie, l'ipotesi progettuale propone una differente ubicazione delle aree

comunali per lo stoccaggio temporaneo, finalizzata ad eliminare il transito dei mezzi pesanti (20 t) nel Centro Storico, previsto invece dal PdR. Prevede inoltre una ubicazione del Centro di Raccolta e Recupero dei rifiuti inerti in posizione baricentrica rispetto agli ambiti con maggior numero di macerie (Ambito 1 e 2) ed in adiacenza con le strade di maggiore sezione (Via Piedi le Vigne, Via Matteotti, Viale della Repubblica) e con maggiore facilità di collegamento con la viabilità extraurbana (SS 16). In quest'ottica anche le aree comunali per lo stoccaggio temporaneo appaiono verosimilmente riconducibili ad una, rispetto alla quale lo studio avanza anche un'ipotesi organizzativa (Figure 5 e 6).

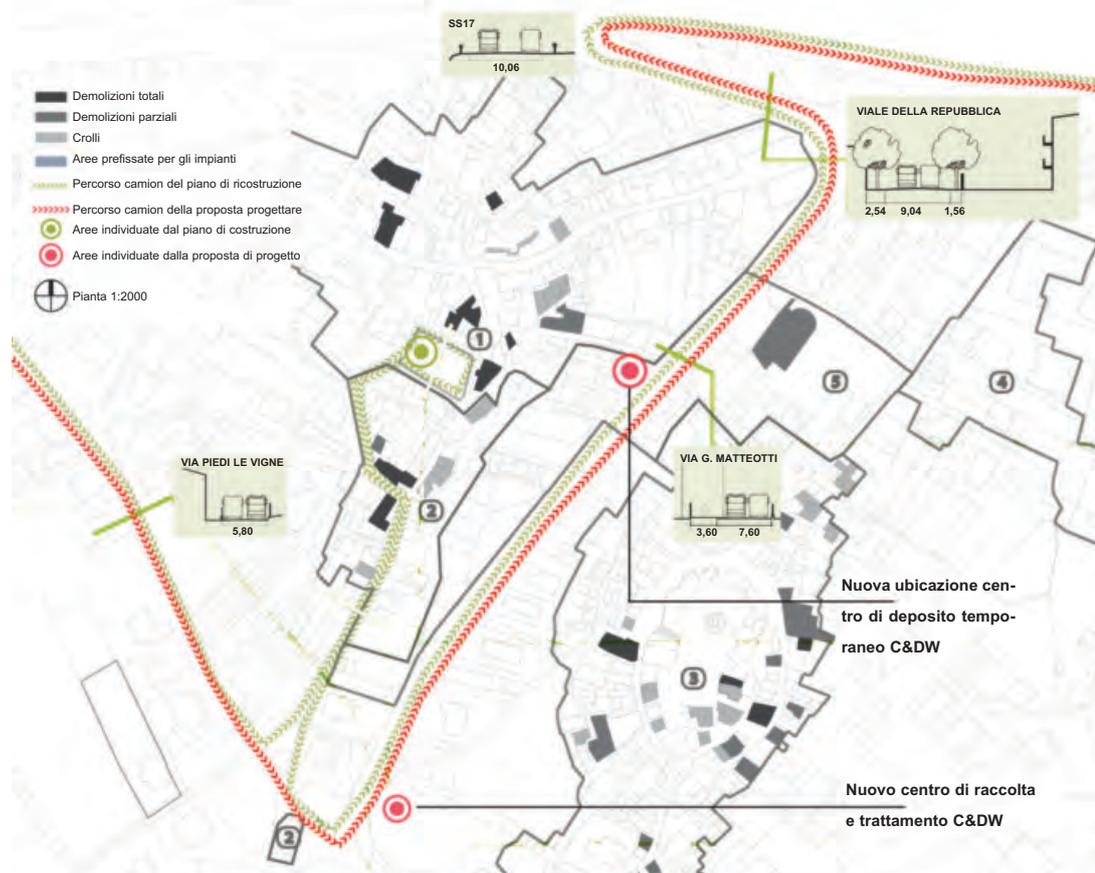


Figura 5 – *Schema comparativo della distribuzione del transito veicolare (mezzi pesanti) riferito ai due scenari analizzati dallo studio, con individuazione della nuova ubicazione ipotizzata per il centro comunale di deposito temporaneo dei C&DW e del Centro di raccolta e trattamento dei rifiuti inerti previsto dalla proposta progettuale (fonte: Agnello, 2013)*



Figura 6 – Schema del layout organizzativo del Centro comunale di deposito temporaneo dei C&DW ipotizzata nello studio (fonte: Agnello, 2013)

Punti di forza di questa seconda ipotesi risulterebbero essere:

- **Benefici diretti**
  - riduzione dei tempi di smaltimento dei C&DW pari a circa  $\frac{3}{4}$  (da 89 a 22 giorni lavorativi);
  - immediata disponibilità in loco di aggregati riciclati certificati, direttamente riutilizzabili già dal secondo giorno di lavorazione;
  - riduzione, se non totale eliminazione, delle aree comunali per lo stoccaggio temporaneo, in funzione della quantità di C&DW provenienti dai cantieri in maniera distinta o indistinta.
- **Benefici indiretti**
  - sensibile riduzione del carico veicolare relativo al transito dei mezzi pesanti da e verso i siti di trattamento e riciclo individuati dal Commissario delegato alla ricostruzione, con conseguente riduzione dei potenziali danni alle infrastrutture viarie spesso inadeguate, strette e tortuose;
  - sensibile riduzione delle emissioni climalterranti prodotte dai mezzi di trasporto e direttamente proporzionali alla tipologia, peso e distanza percorsa da e per i siti di trattamento e riciclo (Basti, 2018);
  - sensibile riduzione dei carichi ambientali correlati all’approvvigionamento di nuove materie prime necessarie ai ripristini delle infrastrutture viarie danneggiate così come alla realizzazione dei nuovi interventi edilizi ed urbani (riempimenti, drenaggi, sottoservizi, strade e piazze, massetti ed elementi non strutturali).

Il secondo ambito di studio ha riguardato l’individuazione di un’area di intervento e lo sviluppo di un’ipotesi progettuale incentrata sulla riqualificazione dello spazio pubblico comunale attraverso il riuso dei materiali inerti recuperati dalle macerie. La scelta dell’area di intervento è caduta su Largo dei Fiori, un’area pubblica già utilizzata come mercato settimanale e coincidente con l’Area 1 individuata dal PdR come sito di stoccaggio temporaneo. L’area, situata alla confluenza delle vie Palomba-

ia e Largo dei Fiori, è contraddistinta da una superficie di circa 800 mq leggermente declive verso sud-est, e si trova in posizione rilevata rispetto alla parte più antica del paese, verso cui affaccia con un belvedere parzialmente alberato sui lati sud e ovest. La proposta progettuale (Agnello, 2013) fa propria la conformazione orografica esistente per proporre un’organizzazione planimetrica “permeabile” articolata lungo le principali direttrici viarie che, attraversando lo spazio pubblico, risolvono in modo graduale il dislivello esistente fra i due margini spaziali, favorendo così il collegamento pedonale e la percezione visiva delle due parti del centro urbano. Ipotizza inoltre un’organizzazione funzionale flessibile, che tenendo conto delle precedenti destinazioni d’uso, renda la piazza utilizzabile sia per le attività commerciali diurne (mercato), sia per l’organizzazione dei concerti serali estivi correlati alla manifestazione ormai quindicennale “Poggio Picenze in blues” (Figura 7 a pagina seguente).

Dal punto di vista architettonico, riferimenti principali del progetto sono stati il CRETTO, opera di land art realizzata da A. Burri a Gibellina (TP) tra il 1985 e il 1989 a commemorazione delle vittime del terremoto del Belice del 1968 (Maderna, 2015) ed il progetto di riconversione a parco pubblico dell’ex campo di aviazione militare Maurice Army Air Field Rose a Francoforte sul Meno (DE) sviluppato dagli architetti M. Gnuechtel, R. Nagies, K. W. Rose nel 2006 (Bravo Dordas, 2018). Entrambe le realizzazioni fondano il loro intervento sul riutilizzo dei residui inerti provenienti dai crolli e/o demolizioni di edifici ed infrastrutture, per proporre soluzioni di suolo capaci di conferire una nuova vita a questi elementi, sia sotto forma di memoria fisica (Gibellina) sia sotto forma di spazi funzionali alternativi (Francoforte sul Meno). Entrambe le soluzioni forniscono inoltre una risposta alla gestione sostenibile dei C&DW attraverso il loro recupero e riutilizzo in sito (Figura 8).

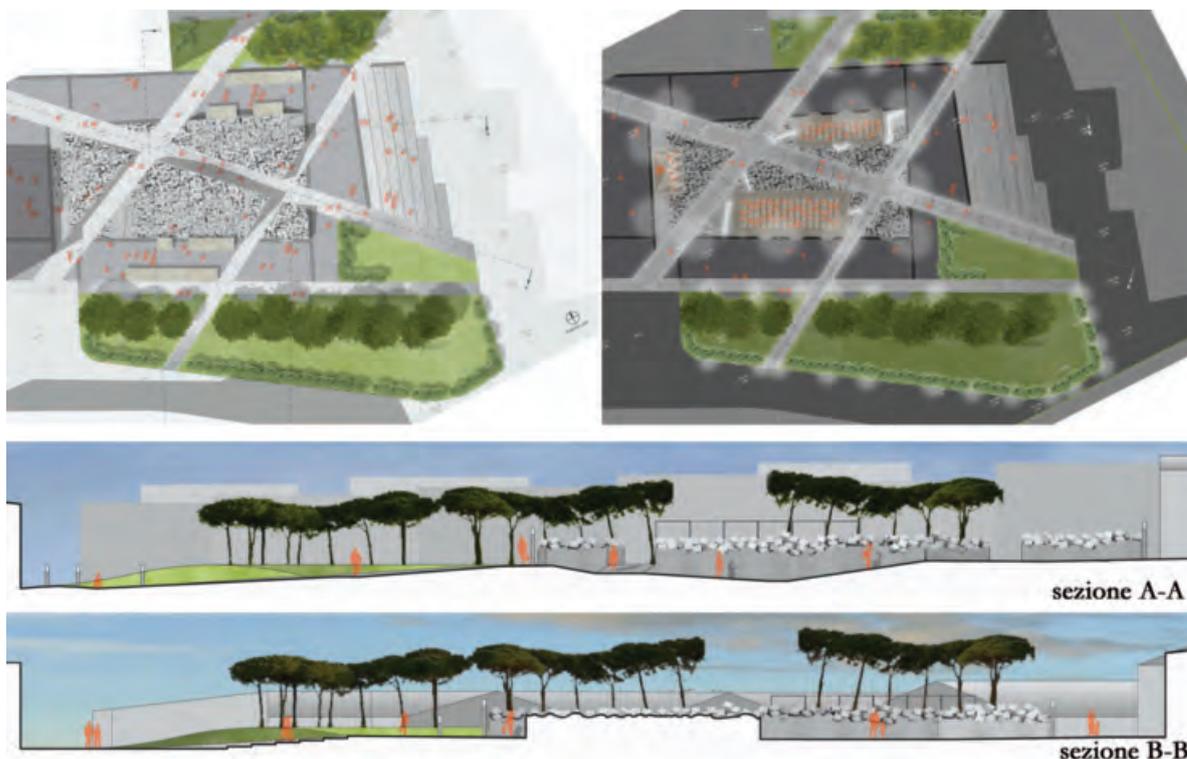


Figura 7 – Viste plano-altimetriche della proposta progettuale con l'ipotesi dei due allestimenti: mercato diurno (a sinistra) e per concerti serali estivi (a destra). Sul lato sud-est (a sinistra), il dislivello è risolto con una cordonata per facilitare la percezione visiva del nuovo spazio urbano (Fonte: Agnello, 2013)



Figura 8 – Alcune viste delle opere ed interventi presi a riferimento: il Cretto di Burri (in alto) ed il parco pubblico dell'ex campo di aviazione militare Maurice Army Air Field Rose (in basso) (fonti: Maderna, 2015; Bravo Dordas, 2018)

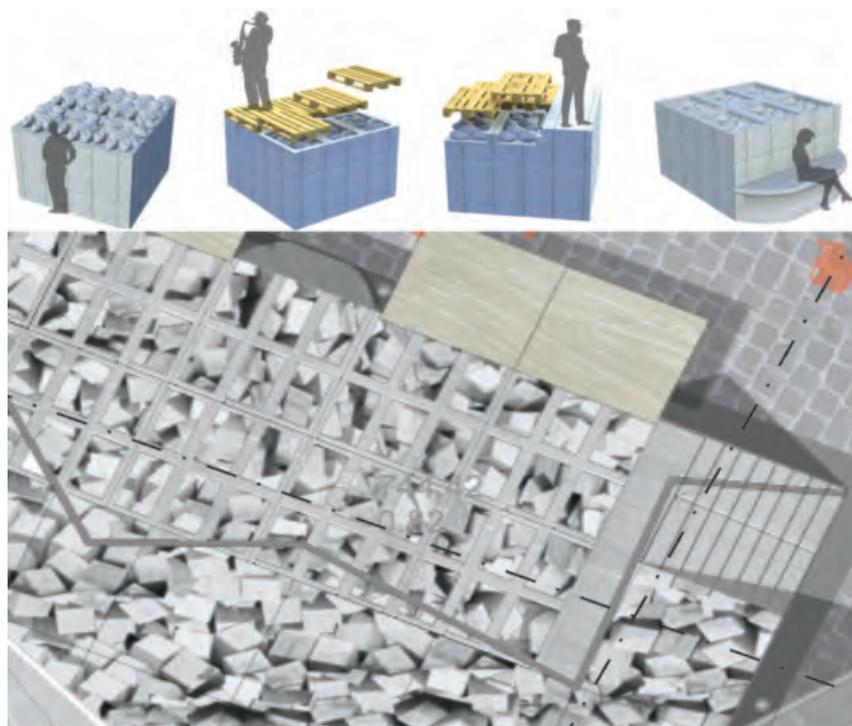


Figura 9 – Studio delle modalità di aggregazione, delle tipologie e delle possibili modalità di allestimento degli elementi-contenitore in funzione delle differenti attività (fonte: Agnello, 2013)

Dal punto di vista tecnologico, il sistema di arredo della piazza è concepito sulla base di elementi-contenitore modulari in cls da riciclo delle dimensioni di 2,40 x 2,40 ml, accostati tra loro e rialzati dalla quota di calpestio. L'insieme di questi elementi costituisce un piano sul quale all'occorrenza è possibile installare pedane e sedute per gli eventi serali (Figura 9).

### 3. CONCLUSIONI

L'esperienza condotta ha permesso di sperimentare quali possano essere i risultati conseguibili, sia in termini quantitativi che qualitativi, dalla pratica applicazione dei criteri di riduzione e riciclo dei C&DW, anche nel caso di una realtà complessa come quella della loro gestione in condizioni di post emergenza sismica. L'occasione fornita dalle più recenti opportunità tecnologiche, sia in termini di modelli di gestione sia in termini di attrezzature per il trattamento, ha consentito di ipotizzare una revisione dello stesso sistema organizzativo codificato, in favore di una maggiore efficacia dei processi e di una migliore efficienza ambientale nell'uso delle risorse naturali.

Con particolare riferimento al caso esaminato, è emersa la possibilità di ottimizzare il riutilizzo dei residui inerti passando dal semplice ripristino paesaggistico-ambientale di cave dismesse, come in-

dicato dal Commissario delegato, ad un concreto reinserimento degli aggregati riciclati all'interno dei nuovi processi di ricostruzione. Un passaggio evolutivo, che potrebbe tendere a facilitare l'auspicata trasformazione in senso circolare dell'economia legata alle attività edilizie, in favore della riduzione del consumo di materie prime non rinnovabili e della produzione di rifiuti.

Inoltre, lo sviluppo della proposta progettuale ha consentito di prefigurare, al di là degli esiti architettonici, uno scenario in cui il riutilizzo possa avvenire nell'ambito dello stesso contesto territoriale in cui detti residui si sono generati, offrendo così un utile spunto di riflessione ai decisori pubblici ed ai singoli progettisti. L'auspicio è che ne derivi uno stimolo al dibattito ed alla sperimentazione applicativa, attraverso la promozione di cantieri pilota con funzioni dimostrative e divulgative sui risultati conseguibili sia in termini prestazionali sia estetici.

### 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adams K.T., Osmani M., Thorpe T., Thornback J. (2017) Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers. *Waste and Resource Management* 170, 1, 15-24.

Agnello C. (2013) Progetto e gestione sostenibile delle macerie: proposte per il piano di ricostruzione di Poggio Picenze (AQ), Tesi di laurea non pubblicata, Università di Chieti-Pescara.

- Angelucci F., Cellucci C., Di Sivo M., Ladiana D. (2018) Per un archivio dei materiali da demolizione nei territori della ricostruzione. *TECHNE*, 16, 60-67.
- Askarizadeh L., Karbassi A.R., Ghalibaf M.B., Nouri J. (2017) Debris management after earthquake incidence in ancient City of Ray. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3, 4, 447-456.
- Basti A. (2018) Sustainable management of debris from the l'Aquila earthquake: environmental strategies and impact assessment. *Detritus*, 2, 112-119.
- Boonmee C., Arimura M., Asada T. (2018) Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 902-917.
- Bravo Dordas D. (2018) Umnutzung Alter Flugplatz Maurice Rose Airfield, Frankfurt am Main (Germany), Partial dismantling of the old Bonames military aerodrome. disponibile su: <https://www.publicspace.org/works/-/project/d079-umnutzung-alter-flugplatz-maurice-rose-airfield>.
- Brown C., Milke M. (2016) Recycling disaster waste: Feasibility, method and effectiveness. *Resources, Conservation and Recycling*, 106, 21-32.
- Debacker W., Manshoven S., Peters M., Ribeiro A., Weerdt Y. D. (2017) Circular economy and design for change within the built environment: preparing the transition. In Di Maio F., Lotfi S., Bakker M.C.M., Hu M., Vahidi A. (eds) *HISER International Conference: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*. Delft, Delft University of Technology.
- Del Rio Merino M., Gracia P.I., Azevedo I.S.W. (2010) Sustainable construction: CDW reconsidered. *Waste Management and Research*, 28, 2, 118-129.
- Faleschini F., Zanini M.A., Hofer L., Zampieri P., & Pellegrino C. (2017) Sustainable management of demolition waste in post-quake recovery processes: The Italian experience. *International journal of disaster risk reduction*, 24, 172-182.
- Gabrielli F., Amato A., Balducci S., Magi Galluzzi L., Beolchini F. (2018) Disaster waste management in Italy: Analysis of recent case studies. *Waste Management*, 71, 542-555.
- Gabrielli F., Galluzzi L.M., Amato A., Balducci S., Beolchini F. (2018) Gestione dei rifiuti in emergenza: analisi di casi di studio italiani. *Ingegneria dell'Ambiente* 5, 1, 45-54.
- Governo Italiano (2006) Decreto Legislativo 152/2006. Norme in materia ambientale. Roma, Gazzetta Ufficiale.
- Governo Italiano (2010) Decreto Legislativo 205/2010. Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo relativa ai rifiuti. Roma, Gazzetta Ufficiale.
- Lauritzen E.K. (1998) Emergency construction waste management. *Safety Science*, 30, 1-2, 45-53.
- Legambiente (2017) L'Economia circolare nel settore delle costruzioni. Disponibile su: [https://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/rapporto\\_recycle\\_2017.pdf](https://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/rapporto_recycle_2017.pdf).
- Ma U. (2011) *No Waste, Managing sustainability in Construction*. Farnham (UK), Gower Publishing Limited.
- Maderna A. (2015) A Gibellina il Cretto di Burri è finito. Disponibile su: <http://www.abitare.it/it/habitat/landscape-design/2015/11/06/gibellina-cretto-burri-finito-dopo-30-anni/>.
- Medina C., Sáez del Bosque I.F., Matías A., Cantero B., Plaza P., Velardo P., Asensio E., Frías, M., Sánchez de Rojas M.I. (2017) Recycled aggregate in civil works and building construction. In Di Maio F., Lotfi S., Bakker M.C.M., Hu M., Vahidi A. (eds) *HISER International Conference: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*. Delft, Delft University of Technology.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2003) Decreto 203/2003. Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo. Roma, Gazzetta Ufficiale.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2015) Decreto 24 dicembre 2015. Adozione dei criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione. Roma, Gazzetta Ufficiale.
- Ossa A., García J.L. e Botero E. (2016) Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: a sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 135, 379-386.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri (2011) Ordinanza 3923, Ulteriori interventi urgenti volti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella Regione Abruzzo il giorno 6 Aprile 2009. Roma, Gazzetta Ufficiale.
- Puthussery J.V., Kumar R. e Garg A. (2017) Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. *Waste Management*, 60, 270-276.
- Spacone E. (2011) Poggio Pienze. in Clementi A., Fusero P. (eds) *Progettare dopo il terremoto. Esperienze per l'Abruzzo*. Barcelona, LIST LAB Internazionale Editoriale, 158-169.
- Unione europea (2000) Decisione 2000/532/EC. Hierarchical list of waste description. Bruxelles, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- Unione europea (2008) Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa ai rifiuti. Bruxelles, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- Unione europea (2014) COM (2014) 445 final, Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Opportunità per migliorare l'efficienza delle risorse nell'edilizia. Bruxelles, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- Unione europea (2015) COM/2015/0614 final, Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. L'anello mancante – Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare. Bruxelles, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

## RINGRAZIAMENTI

Si intende ringraziare l'Arch. Camilla Agnello per il lavoro profuso nelle elaborazioni progettuali sviluppate sulla base delle indicazioni dell'autore e relatore della Tesi di Laurea, e l'ing. Francesco Montefinese della Società RECinert per il supporto tecnico e la collaborazione nella individuazione delle soluzioni tecniche e procedurali.

# LA PRODUZIONE DI BIOMETANO DA FORSU NEL CONTESTO DI PROMOZIONE DELL'USO DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI

Micol Centorrino<sup>1,\*</sup>, Paolo Neri<sup>1</sup>, Marco Cervino<sup>1,2</sup>, Anna Maria Ferrari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria.

<sup>2</sup> CNR-ISAC – Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima di Bologna.

**Sommario** – La presente comunicazione tecnica tratta della produzione di biometano da biogas ottenuto dalla digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) nello scenario nazionale dei criteri di valutazione e incentivazione della filiera dei biocarburanti, che si basa principalmente su direttive di scala europea ed è definito sino a scala regionale. Il lavoro parte dall'analisi dell'elaborato quadro normativo vigente sulla produzione di biometano da FORSU, che fornisce definizioni, metodi di valutazione e regole di incentivazione economica; successivamente, descrive un caso di applicazione del metodo della Life Cycle Assessment (LCA) al calcolo delle emissioni di gas climalteranti (Greenhouse gases, GHG) della filiera del biometano; infine, propone una valutazione dell'efficacia dei risultati nel caso di sostituzione fisica (comprovata e promossa da meccanismi economici come gli incentivi) dei combustibili fossili con fonti rinnovabili per l'autotrasporto. L'analisi LCA, realizzata su un impianto italiano e fondata sui parametri di valutazione necessari ad ottenere la certificazione, ha fornito, nell'ottica del life cycle thinking, un'esperienza utile, al fine di individuare i punti di forza e alcune ipotesi di miglioramento dell'attuale metodologia di calcolo dell'efficacia di mitigazione del biocarburante in esame e della effettiva sostenibilità dello stesso. Le considerazioni finali, da un lato, individuano proposte concrete di modifica ai metodi di valutazione ed alle regole di incentivazione: confini dello studio LCA, revisione dei coefficienti di emissione dei GHG nella formula di calcolo indicata dalla normativa vigente, comparatori di emissioni dei combustibili fossili da adottare per la valutazione di risparmio di emissioni con il combustibile rinnovabile; d'altro lato suggeriscono, per una corretta valutazione del danno, di considerare diverse categorie di impatto, e non soltanto il cambiamento climatico.

**Parole chiave:** biocarburanti, rinnovabili, LCA, cambiamento climatico, incentivi.

## BIOMETHANE PRODUCTION FROM BIOWASTE IN THE FRAME OF PROMOTING THE USE OF ENERGY FROM RENEWABLE SOURCES

**Abstract** – This technical communication deals with the biomethane production from biogas obtained from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste (FORSU) in the national scenario of the evaluation and incentive criteria of the bio-

fuel chain, which is mainly based on European directives and defined till a regional scale. The work starts from the analysis of the elaborate regulatory framework in force on the production of biomethane from FORSU, which provides definitions, evaluation methods and economic incentive rules; then, a case of application of the Life Cycle Assessment (LCA) method to the calculation of greenhouse gases (GHG) emissions of the biomethane chain is presented; finally, an assessment of the effectiveness of the results in the case of physical replacement (proven and encouraged by economic mechanisms such as incentives) of fossil fuels with renewable sources for road transport is proposed. The LCA study, carried out on an Italian plant and based on the assessment parameters necessary to obtain certification, provided useful experience, in order to identify the strengths and some hypotheses for improving the current methodology for calculating the effectiveness of the analyzed biofuel in mitigating emissions as well as its actual sustainability, in the perspective of the life cycle thinking. The conclusive observations, on the one hand identify concrete proposals for modifying the evaluation methods and the incentive rules: boundaries of the LCA study, revision of the GHG emission coefficients in the calculation formula indicated by current legislation, fossil fuel emissions comparators to be adopted for the assessment of emissions savings with renewable fuel; on the other hand, for a correct assessment of the damage, they suggest considering different impact categories, not just climate change.

**Keywords:** biofuels, renewables, LCA, climate change, incentives

Ricevuto il 12-3-2020; Correzioni richieste il 17-3-2020; Accettazione finale il 26-3-2020.

## 1. INTRODUZIONE

Il biometano, quale fonte di energia rinnovabile che si può ricavare da biomasse di varia natura (colture dedicate e scarti di filiera), suscita molto interesse a livello socio-economico, soprattutto in ambito nazionale, in cui tale settore costituisce (PNIEC, 2019) il principale contributo al conseguimento degli obiettivi europei in materia di sviluppo sostenibile, soprattutto per quanto riguarda il processo di decarbonizzazione in atto nel settore dei trasporti.

La produzione di biometano risponderebbe, infatti, alla duplice necessità di trovare fonti di energia

\* Piazzale Europa 1, Reggio Emilia, 42124, micol.centorrino@unimore.it.

alternative, che possano mitigare le emissioni climateranti legate all'uso dei combustibili fossili soprattutto nel settore dei trasporti, e a quella di smaltire e riusare materiali di scarto, nell'ottica dell'economia circolare quale nuovo modello di sviluppo.

Il Governo italiano ha stabilito di incentivare questa filiera, attraverso contributi economici agli operatori del settore, e ha messo a punto un sistema di norme e metodi di calcolo, per verificare l'effettiva efficienza degli interventi, alla luce degli obiettivi generali.

Il recupero di energia da FORSU (Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano) attraverso la produzione di biometano per autotrasporto fa parte, infatti, delle strategie adottate dall'Italia per garantire il raggiungimento dei nuovi obiettivi comunitari al 2030 (Accordo di Parigi, ratificato dall'Italia l'11/11/2016), in cui la quota di energia da fonti di energia rinnovabile (FER) nei consumi lordi di energia è fissata al 30% (PNIEC, 2019, pag. 11; in particolare, il 22% riguarda specificatamente i consumi finali lordi nei trasporti).

Al livello nazionale già il decreto legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, che attua la direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, prevede la semplificazione dell'iter autorizzativo per la costruzione e la gestione di impianti energetici alimentati da fonti rinnovabili e introduce un regime di sostegno anche per l'utilizzo dei biocarburanti nel settore dei trasporti, in particolare per quanto riguarda (capo IV, art. 33) quelli prodotti a partire da rifiuti e sottoprodotti (definiti e tracciati dal D.Lgs n. 152/2006).

Su indirizzo comunitario, in breve tempo, una parte degli impianti a biogas (che nell'anno 2016 in Europa erano circa 18.000) ha convertito la propria produzione a biometano, a partire da Germania, Svezia e Francia, raggiungendo il numero di 610 nel 2018 (EBA, 2019).

Nel nostro Paese negli ultimi due anni abbiamo assistito ad una rapida diffusione di impianti di produzione di biometano da FORSU, che, se nel 2017 erano solo sette (Labartino e Piccinini, 2017), grazie a concreti meccanismi d'incentivazione attivati nel 2018, stanno rapidamente proliferando, soprattutto al Nord.

La FORSU costituisce in Italia la componente principale fra le categorie merceologiche della raccolta differenziata: ad esempio, nella regione Emilia-Romagna si tratta del 21% del totale di rifiuti urbani raccolti in modo differenziato (ARPAE, 2018).

Per questo motivo la gestione del "rifiuto organico", che la normativa italiana riconosce con il D.Lgs 152/06 (art. 183, comma 1, d), diventa di fondamentale importanza nella strategia di valorizzazione del contenuto energetico della biomassa di seconda generazione, alla luce di un modello di sviluppo sostenibile (ormai non solo auspicabile, ma necessario) e di un'economia circolare (minimizzare lo smaltimento in discarica e favorire il riuso, il riciclo ed il recupero), applicabili anche alla gestione dei rifiuti secondo i principi della normativa comunitaria 2008/98/CE, recepita in Italia con il D.Lgs n. 205 del 3/12/2010.

In riferimento agli indirizzi della Regione Emilia-Romagna, di cui ci siamo specificatamente occupati, la L.R. n. 16 del 2015<sup>1</sup> prescrive che, "in attuazione del principio dell'economia circolare, le frazioni raccolte in maniera differenziata devono essere conferite ad impianti che ne favoriscano la massima valorizzazione in termini economici ed ambientali in coerenza con il principio di prossimità privilegiando il recupero di materia a quello di energia" (art. 3, comma 8).

Ci preme sottolineare che, a monte di qualsiasi trattamento virtuoso della FORSU (per recuperare materia attraverso la digestione aerobica e poi, in scala gerarchica, energia da quella anaerobica), è auspicabile una politica di riduzione del rifiuto sia in ambito domestico (riduzione degli sprechi), che in ambito industriale (ottimizzando i processi produttivi delle aziende agroalimentari e riutilizzando internamente quando possibile gli scarti di lavorazione).

### **1.1. Meccanismi d'incentivazione della filiera di biometano in Italia**

Il decreto del Ministero dello sviluppo economico del 2 marzo 2018 promuove in Italia l'uso del biometano e del biometano avanzato<sup>2</sup> nel settore dei trasporti nel nostro Paese, al fine del raggiungimento degli obiettivi nazionali in materia di energia rinnovabile e mette a disposizione 4,7 miliardi di risorse (spendibili tra il 2018 e il 2022) a sostegno della produzione e della distribuzione di biocarbu-

<sup>1</sup> "Disposizioni a sostegno dell'economia circolare, della riduzione della produzione dei rifiuti urbani, del riuso dei beni a fine vita, della raccolta differenziata e modifiche alla Legge Regionale 19 agosto 1996 n. 31 (Disciplina del tributo speciale per il deposito in discarica dei rifiuti solidi)", testo coordinato con modifiche apportate dalla L.R. 18/07/2017.

<sup>2</sup> Per "biocarburante avanzato" si intende quello prodotto a partire da materie prime quali rifiuti e sottoprodotti (DM 10.10.2014, allegato 3, parte A), che limiti l'uso diretto ed indiretto del suolo agricolo a fini energetici.

ranti. Gli obiettivi iniziali per il 2020<sup>3</sup> (quota di energia da FER nei consumi lordi di energia al 17% e quota nei consumi finali lordi nei trasporti al 10%) sono stati revisionati al rialzo dal PNIEC del 2019 con nuovi obiettivi al 2030 (quota di energia da FER nei consumi lordi di energia al 30% e quota nei consumi finali lordi nei trasporti al 22%). In particolare, al fine del raggiungimento degli obiettivi in materia di penetrazione delle rinnovabili nel settore dei trasporti, è stata adottata la misura dell'obbligo di immissione in consumo basato su un sistema di quote, che premia i "biocarburanti avanzati".

Ogni fornitore di carburante per i trasporti, immesso tramite impianti di distribuzione stradali, autostradali o privati, dovrà assolvere l'obbligo di riduzione delle emissioni GHG (Greenhouse Gas) attraverso un sistema di ritiro del biometano prodotto, con il rilascio dei Certificati di Immissione in Consumo (CIC), calcolati secondo le procedure del Gestore dei Servizi Energetici (GSE; viene rilasciato un CIC ogni 10 Gcal di biocarburante immesso), per la durata di 10 anni. Inoltre, è prevista una maggiorazione "per materie prime", nel caso di utilizzo delle materie elencate nella parte A e B dell'allegato 3 del DM del 10.10.2014 e s.m.i e nel caso di impianti funzionanti con le citate materie in codigestione con materie di origine biologica non rientranti nel suddetto elenco, fino ad un massimo del 30% in peso. Infine, è prevista una maggiorazione dell'incentivo per "impianti pertinenti", cioè quelli di distribuzione o di liquefazione, al fine di tener conto dei costi aggiuntivi sostenuti, valida anche per il biometano avanzato.

Per i produttori di "biometano avanzato" è previsto, inoltre:

- a) il riconoscimento di un valore pari a 375€ per ogni CIC riconosciuto, considerando anche le eventuali maggiorazioni previste nella quantificazione dei titoli spettanti (viene rilasciato un CIC ogni 5 Gcal di biocarburante avanzato immesso): tale incentivazione ha durata massima di 10 anni; successivamente si ha diritto al solo rilascio dei CIC (che possono essere venduti ad altri operatori);
- b) il ritiro, da parte del GSE, anche per un quantitativo parziale, del biometano avanzato ad un prezzo pari al 95% del prezzo medio mensile registrato sul Mercato a Pronti del gas naturale o, in alternativa, la vendita effettuata autonomamente. Lo strumento di incentivazione dei CIC non incide in alcun modo, a differenza di altri, sulle bollette

dei cittadini, poiché viene finanziato solamente dai "soggetti obbligati" (operatori economici, che vendono benzina e gasolio).

In particolare, il Decreto ministeriale del 23/01/2012 (come modificato dal DM del 14/11/2019 per adeguarlo al D.Lgs n. 51 del 21/03/2017) prescrive che un ente esterno accreditato certifichi che la produzione di biometano sia conforme ai requisiti fissati dalla Norma UNI 11567, secondo i parametri e i calcoli riportati nel report del JRC della Comunità Europea (Giuntoli et al. 2017: "Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions").

Si prevede che tale sistema di incentivazione arrivi a coprire con biometano la domanda prevista di metano nei trasporti stradali, pari a c.ca 1,1 mld di m<sup>3</sup>/anno (PNIEC 2019).

A breve si auspica l'emanazione di un Decreto Legislativo che recepisca la direttiva UE 2018/2001 (RED II), con conseguenti decreti ministeriali di settore, che incrementino le quote obbligatorie di immissione al consumo al 2030 dei biocarburanti avanzati e che penalizzino ulteriormente quelli normali, poiché i primi presentano un GHG Saving fino al 100% e quasi zero impatto per quanto riguarda il cambio di destinazione d'uso dei suoli (Direttiva UE ILUC 2015/1513 del 09/09/2015).

## 2. APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA DI PRODUZIONE DEL BIOMETANO

La metodologia Life Cycle Assessment (LCA) è definita dalle norme internazionali UNI EN ISO 14040 (2006, "Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento") e UNI EN ISO 14044 (2018, "Valutazione del ciclo di vita, Requisiti e Linee Guida").

La valutazione comprende tutte le seguenti fasi del ciclo di vita di un processo/attività:

- l'estrazione e il trattamento delle materie prime;
- la fabbricazione;
- il trasporto;
- la distribuzione;
- l'uso;
- il riuso e il riciclo o lo smaltimento finale.

La struttura di un LCA si articola nelle seguenti fasi: 1) *Definizione degli obiettivi e campo di applicazione dello studio (Goal and scope Definition)*, in cui si definiscono: l'obiettivo dello studio, il campo di applicazione, le funzioni del sistema, l'unità funzionale, i confini del sistema e, infine, la qualità dei dati utilizzati;

<sup>3</sup> Art. 3, comma 1 e 2 del D.Lgs n. 28 del 03/03/2011, che recepisce la direttiva comunitaria 2009/28/CE (RED I).

- 2) *Analisi di inventario (Life Cycle Inventory)*: consiste nella raccolta dei dati e nelle procedure di calcolo volte a quantificare i flussi in entrata ed in uscita nel sistema studiato;
- 3) *Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment)*: si utilizzano i risultati dell'analisi di inventario del ciclo di vita per valutare i potenziali impatti sull'ambiente. Il metodo può essere *midpoint* (l'analisi si limita alla caratterizzazione del danno espressa in termini di sostanze equivalenti) o *endpoint* (l'analisi giunge sino al *damage assessment*, che valuta il danno in termini di effetti sulle categorie di danno). A titolo di esempio nella tabella 1 si riportano le categorie di impatto e quelle di danno (salute umana, qualità dell'ecosistema, esaurimento delle risorse, cambiamenti climatici) del metodo IMPACT 2002+.

La valutazione si articola in fasi standardizzate dalla normativa:

- la scelta e la definizione delle categorie di impatto;
- la *classificazione* dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie di impatto;
- la *caratterizzazione* delle sostanze emesse (che consiste nella moltiplicazione del quantitativo di ogni sostanza per il relativo *fattore di caratterizzazione* proprio della sostanza stessa);
- la caratterizzazione delle categorie di impatto in categorie di danno (*damage assessment*), che consiste nella moltiplicazione dei valori della caratterizzazione delle sostanze per i relativi *fattori peso* propri di ogni categoria di impatto (Tab. 1);

- la *normalizzazione*, in cui i valori ottenuti dalla caratterizzazione sono divisi per un "valore di riferimento" riconosciuto su scala temporale e spaziale;
  - la *pesatura*, in cui i valori ottenuti dalla normalizzazione sono moltiplicati per i fattori peso.
- 4) *Analisi dei risultati (Life Cycle Interpretation) e valutazione dei miglioramenti*: dopo aver individuato gli aspetti più critici del progetto/prodotto/attività in termini di impatto, si selezionano e si valutano i possibili miglioramenti per ridurre il carico ambientale.

### 2.1. Il caso studio

*LCA Working Group*, gruppo di ricerca dell'Università di Modena e Reggio Emilia, ha svolto l'analisi LCA per certificare la sostenibilità ambientale della produzione di biometano avviata da un'azienda italiana nell'anno 2018.

Il software usato è SimaPro 8.5. e il metodo per il calcolo del danno relativo alle emissioni di gas climalteranti (espresse in termini di CO<sub>2</sub> equivalente utilizzando un fattore di conversione specifico per ciascun gas) è IPCC (International Panel for Climate Change) GWP100a (emissioni di gas ad effetto serra nell'arco di 100 anni).

### 2.2. Qualità dei dati

I dati usati sono per la maggior parte primari, tratti dal progetto esecutivo dell'impianto fornito dall'azienda e raccolti sia attraverso un questionario

**Tabella 1 – Categorie di impatto e di danno considerate nel metodo IMPACT 2002+**

Categorie di impatto	Categorie di danno
Tossicità sull'uomo (kg <sub>eq</sub> di cloroetilene)	SALUTE UMANA (DALY, Disability-Adjusted Life Years) (anni di vita adattati alla disabilità)
Sostanze organiche alle vie respiratorie (kg <sub>eq</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	
Sostanze inorganiche alle vie respiratorie (kg <sub>eq</sub> PM 2.5)	
Radiazioni ionizzanti (kg <sub>eq</sub> di carbonio-14)	
Assottigliamento dello strato di ozono (kg <sub>eq</sub> CFC-11)	
Ecotossicità acquatica (kg <sub>eq</sub> di trietilene)	QUALITÀ DELL'ECOSISTEMA (PDF·m <sup>2</sup> ·y, Potentially Disappeared Fraction) (percentuale di specie potenzialmente scomparse)
Ecotossicità terrestre (kg <sub>eq</sub> di trietilene)	
Acidificazione/nitrificazione terrestre (kg <sub>eq</sub> SO <sub>2</sub> )	
Acidificazione delle acque (kg <sub>eq</sub> SO <sub>2</sub> )	
Eutrofizzazione delle acque (kg <sub>eq</sub> PO <sub>4</sub> )	
Occupazione del suolo (mq <sub>eq</sub> di terreni coltivabili organici*y)	CAMBIAMENTO CLIMATICO (kg <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> )
Riscaldamento globale (kg <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> )	
Energia non rinnovabile (MJ di primaria non rinnovabile)	RISORSE (MJ)
Estrazione dei minerali (MJ di surplus di energia per estrazione)	

consegnato in sede di sopralluogo, che attraverso ulteriori incontri di lavoro e contatti telefonici.

Per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq sono state usate rese predittive, in quanto: “Ai fini del bilancio di massa, considerata la complessità dei processi, che rendono difficile la definizione delle rese reali, tranne che in casi rari, è ammesso il ricorso a rese predittive basate su analisi della materia in ingresso e sulle specificità impiantistiche.

L’utilizzo di rese predittive può essere particolarmente utile nel caso di avvio del processo di qualificazione di terza parte, quando l’operatore pur avendo già attivato il sistema interno di tracciabilità e bilancio di massa non possiede dati storici” (par. 5.2, UNI/TS 11567).

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, dei materiali da costruzione e i trasporti sono usati i processi di Ecoinvent 3.1.

Sulla base delle suddette informazioni è stato elaborato l’inventario necessario per il calcolo delle emissioni.

### 2.3. Descrizione del sistema

Il sistema studiato comprende le seguenti fasi di processo:

- trasporto dei rifiuti dal punto di raccolta all’impianto di trattamento;
- conferimento rifiuti all’impianto di trattamento;
- pesatura e controllo del rifiuto in ingresso (con catalogazione in appositi registri per lotti di fornitura);
- pretrattamento del rifiuto organico e degli scarti lignocellulosici (frantumazione, deferrizzazione a magneti, vagliatura a dischi rotanti esagonali);
- pre-stoccaggio (max 44 ore) in bunker di 180 mc a pianali mobili con doghe scorrevoli;

- trattamento anaerobico in regime mesofilo (40°C) con produzione di biogas dei rifiuti introdotti nel digestore in cemento armato;
- purificazione del biogas, upgrading e produzione di biometano.

I rifiuti trattati durante tutte le fasi del processo sono:

- la FORSU (CER200108);
- i rifiuti da mercato (CER200302);
- gli scarti agroalimentari (CER 020304);
- i rifiuti biodegradabili di giardini e parchi (CER 200201).

I rifiuti in ingresso, stoccati in un capannone, dopo il pretrattamento (che avviene nello stesso locale), vengono trasportati mediante pala gommata, insieme al materiale strutturante, in un bunker di stoccaggio con pianale mobile a doghe scorrevoli, che facilita la traslazione della biomassa verso la bocca di uscita, determinando lo scarico per caduta sul sottostante nastro in gomma, posto all’altra estremità del bunker, che alimenta direttamente il digestore (la carica avviene 24 ore su 24). Non vi sono impatti dovuti ad emissioni, perché il bunker in acciaio e cemento armato in cui avviene lo stoccaggio per un massimo di 44 ore, è chiuso. Sono state considerate soltanto delle emissioni di metano nella fase di pretrattamento (convogliate da un sistema di aspirazione nel capannone di compostaggio adiacente), calcolate come quota parte (1/20) di quelle provenienti dai biofiltri dei capannoni di compostaggio e delle fuggitive (cioè quelle che si disperdono in atmosfera durante l’apertura delle porte del capannone), fornite dall’azienda. Dai dati di progetto esecutivo forniti dall’azienda (Fig. 1 e Tab. 2) si ricava che in un’ora entrano nel digestore (con caricamento 24/24 h) 5,54 t di rifiuti organici e si producono 786 Nm<sup>3</sup> di biogas all’ora. La massa di materiale strutturante (0,80 t h<sup>-1</sup>) non ha potenziale metanigeno, quindi non viene consi-

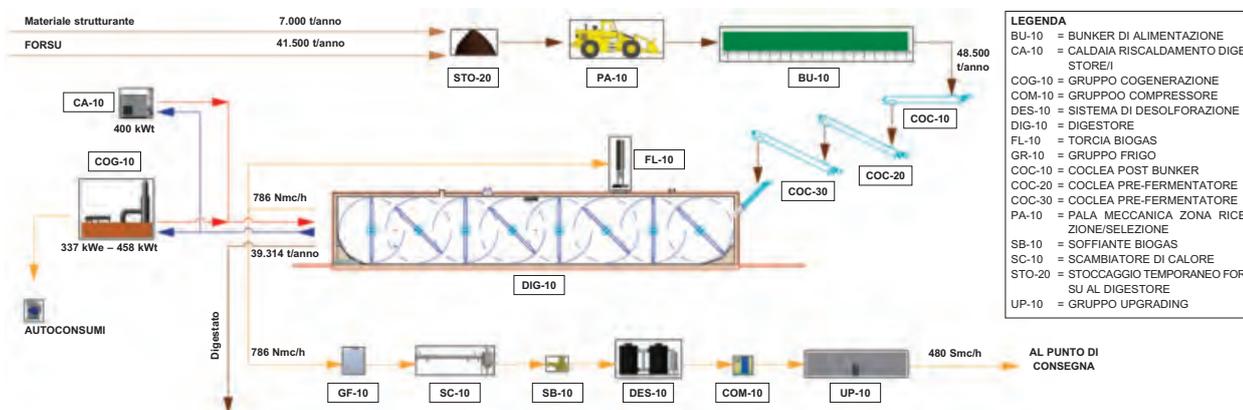


Figura 1 – Schema meccanico semplificato della produzione di biometano da rifiuti organici

**Tabella 2 – Dati in ingresso. I dati primari sono in corsivo**

Materiale strutturante	<i>7000 t y<sup>-1</sup></i>	0,80 t h <sup>-1</sup>
Rifiuto organico (FORSU, rifiuti da mercato, scarti agroalimentari, rifiuti biodegradabili di giardini e parchi)	<i>41500 t y<sup>-1</sup></i>	4,74 t h <sup>-1</sup>
TOTALE in ingresso nel digestore	<i>48500 t y<sup>-1</sup></i>	5,54 t h <sup>-1</sup>
Biogas in uscita dal digestore	6,89 MNm <sup>3</sup> y <sup>-1</sup>	<i>786 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup></i>
Biometano immesso in rete	4,20 MSm <sup>3</sup> y <sup>-1</sup>	<i>480 Sm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup></i>

**Tabella 3 – Caratterizzazione del processo "1 m<sup>3</sup> Produzione di biometano da rifiuto organico" e contributo percentuale dei sotto-processi all'impatto in CO<sub>2</sub>eq con il metodo IPCC 2013 GWP 100a (SimaPro 8.5.2.2)**

Categorie di impatto	Unità di misura	Totale	Produzione di biometano da rifiuto organico	Biogas da rifiuti organici	Elettricità a bassa tensione
IPCC GWP 100a	kg CO <sub>2</sub> eq	<b>1,18</b>	0,62	0,37	0,19
	%	<b>100</b>	52,4	31,4	16,2

derata nel rapporto biogas/rifiuto, ma solo come materia in ingresso nel digestore.

Il biometano prodotto in un'ora è 480 Sm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

I confini del sistema vanno dal trasporto del rifiuto all'impianto (si assume una distanza convenzionale di 20 km e come mezzo un camion con un carico utile di 27 t; Giuntoli et al., 2017, pag.30) al conferimento del rifiuto organico all'impianto, alla produzione di biogas, alla produzione del biometano. Nel caso del biometano non si considera l'uso, in quanto comune alla filiera del combustibile fossile di riferimento (Appendice C, par.2, UNI/TS11567). Vengono trascurate la produzione e la realizzazione degli impianti, secondo precise direttive del Comitato Tecnico Italiano.

Viene trascurato il fine vita del digestato prodotto (compostaggio). Vengono considerate le emissioni di metano nella fase di pretrattamento (convogliate da un sistema di aspirazione nel capannone di compostaggio adiacente), calcolate come quota parte (1/20) di quelle provenienti dai biofiltri dei capannoni di compostaggio e delle fuggitive (ad esempio, quelle che fuoriescono dai capannoni all'apertura delle porte), fornite dall'azienda.

### 3. RISULTATI

Il valore delle emissioni di GHG (CO<sub>2</sub>eq<sub>bio</sub>), calcolato per l'unità funzionale 1Sm<sup>3</sup> di biometano, secondo la metodologia fornita dalla norma UNI/TS 11567, Appendice C<sup>4</sup> e attraverso LCA è pari a 1,18 kg m<sup>-3</sup>. Per quanto riguarda i risultati, poiché nel metodo IPCC GWP 100a mancano le fasi di normalizzazione e valutazione, il danno si ottiene moltiplicando la quantità di ogni sostanza

emessa per il fattore di caratterizzazione di riscaldamento globale diretto proprio della sostanza stessa. Tale danno, come riportato nella Tab. 3, è dovuto per il 52,4% alla produzione di biometano da rifiuto organico (per emissione di metano biologico attribuita al processo stesso), per il 31,4% alla produzione di biogas da rifiuto organico (per emissione di anidride carbonica fossile dovuta all'uso di energia elettrica da rete utilizzata per muovere gli agitatori a pale del digestore ed all'energia termica utilizzata per scaldare il digestore) e per il 16,2% all'energia elettrica da rete per alimentare gli impianti durante le varie fasi del processo di produzione del biocarburante (dal pretrattamento del rifiuto al consumo della cabina per immissione e contabilizzazione del biometano prodotto).

Il valore calcolato CO<sub>2</sub>eq<sub>bio</sub> viene riportato alle unità previste dalle normative vigenti, come segue:

$$CO_{2eqbio} (gCO_{2eq} MJ^{-1}) = CO_{2eqbio} (gCO_{2eq} m^{-3}) * PCI_{biom} = 34 g MJ^{-1} \quad (1)$$

ove

$$PCI_{biom} = 0,97 * PCI_{CH4} = 34,2 MJ m^{-3} \quad (2)$$

<sup>4</sup> CO<sub>2eqbio</sub>(gCO<sub>2eq</sub>/MJ)= e<sub>p</sub>+e<sub>td</sub>  
 e<sub>p</sub> sono le emissioni derivanti dalla lavorazione;  
 e<sub>td</sub> sono le emissioni derivanti dal trasporto del rifiuto dal punto di raccolta all'impianto (non vengono considerate le emissioni della raccolta porta a porta, in quanto queste ultime avvengono indipendentemente dalla scelta di produrre biogas) e dal trasporto del prodotto intermedio sino all'impianto successivo (trasporti interni); non vengono valutati i trasporti del biocarburante al fornitore/utilizzatore o all'impianto di distribuzione (poiché il metano viene immesso direttamente nella rete locale di distribuzione, senza stoccaggio).

e  $PCI_{CH_4} = 35,25 \text{ MJ m}^{-3}$  è il valore del potere calorifico inferiore del metano.

Le emissioni così calcolate consentono la valutazione dell'indicatore, che rappresenta la frazione degli impatti climalteranti che viene "risparmiata" quando il biometano prodotto sostituisce l'uso di uno o più carburanti fossili. La direttiva RED I e le normative nazionali di recepimento<sup>5</sup> definiscono l'indicatore come segue:

$$\text{rispCO}_{2\text{eq}} = (\text{CO}_{2\text{eqfoss}} - \text{CO}_{2\text{eqbio}}) / \text{CO}_{2\text{eqfoss}} \quad (3)$$

ove  $\text{CO}_{2\text{eqfoss}}$  (denominato anche FFC, *Fossil Fuel Comparator*; Giuntoli et al., 2017) assume un valore differente in funzione della natura e dell'impiego del biocombustibile; nel caso del biometano la normativa vigente distingue tre diversi valori, per tre principali settori di impiego: produzione elettrica ( $183 \text{ gCO}_{2\text{eq}} \text{ MJ}^{-1}_{\text{el}}$ ), fornitura di calore ( $80 \text{ gCO}_{2\text{eq}} \text{ MJ}^{-1}_{\text{heat}}$ ), carburante per trasporti ( $94 \text{ gCO}_{2\text{eq}} \text{ MJ}^{-1}_{\text{fuel}}$ ).

Se, come nello studio realizzato, il biometano prodotto è destinato al settore dei trasporti l'indicatore assume il valore:

$$\text{RispcO}_{2\text{eq}} = (94 \text{ g MJ}^{-1} - 34 \text{ g MJ}^{-1}) / 94 \text{ gMJ}^{-1} = 0,64 \quad (4)$$

Uno dei requisiti di sostenibilità per poter beneficiare degli incentivi fiscali è che il valore dell'indicatore superi 0,60<sup>6</sup>.

#### 4. QUESTIONI APERTE E PROPOSTE

##### 4.1. Considerazioni sui risultati ottenuti

A conclusione dell'analisi e dell'applicazione dei metodi di certificazione introdotti dalla normativa italiana per i biocarburanti ed alla luce dell'esperienza del gruppo di lavoro su analisi ambientali secondo LCA, è utile sottolineare che:

- 1) la valutazione della sostenibilità ambientale dei biocarburanti non può limitarsi alle emissioni climalteranti in atmosfera, ma andrebbe estesa a tutti le categorie di danno e di impatto:
  - soprattutto andrebbero pesati i cambiamenti diretti e indiretti eventualmente apportati alla destinazione d'uso dei terreni e le emissioni di carbonio associate ad esse: è indispensabile ostacolare le colture dedicate per la produzione di biocarburanti, al fine di scongiurare

- l'occupazione dei terreni agricoli migliori che andrebbero destinati ad usi alimentari, l'elevato consumo di acqua, di diserbanti e di antiparassitari, la perdita della biodiversità;
  - anche i consumi idrici di ogni processo andrebbero assolutamente computati, visto che l'acqua è una risorsa fondamentale per la sopravvivenza di tutto l'ecosistema;
- 2) il bilancio di massa, per essere completo, dovrebbe includere tutti gli impianti asserviti alla produzione del biometano e la realizzazione dei locali di trattamento, che richiede pure un notevole impiego di materiali ed energia;
- 3) oltre ai trasporti interni ed a quelli del prodotto finito per la distribuzione, andrebbero computati in maniera analitica e attribuiti alla filiera del biometano (anche se non a carico di chi produce il biocarburante, come detta la norma) tutti i trasporti legati all'approvvigionamento del rifiuto, che incidono in maniera non trascurabile sul bilancio GHG dell'intero processo:
  - a tal proposito è necessario favorire lo sviluppo diffuso sul territorio nazionale di impianti di piccola taglia (produzione distribuita), piuttosto che pochi grandi impianti, per ridurre l'impatto dei trasporti del rifiuto in ingresso dal luogo di approvvigionamento a quello di trattamento;
- 4) il trattamento ed il fine vita del digestato non possono essere trascurati, anche alla luce degli impatti legati al suo uso in agricoltura (D.M. del 25/02/2016 e regolamento RER, 2017):
  - infatti, è assolutamente da scongiurare lo spargimento del digestato stesso sui terreni, senza un ulteriore processo di compostaggio aerobico: il compost, se risponde a determinati requisiti di qualità riconosciuti da certificazioni di prodotto, può arricchire il terreno agricolo di sostanza organica (in particolare azoto ammoniacale, fosforo e potassio) per poter competere con i fertilizzanti chimici di sintesi e offrire, sostituendoli, un reale vantaggio ambientale;
  - inoltre, è di fondamentale importanza che lo stoccaggio del digestato prima del post-trattamento avvenga al chiuso, per evitare pericolose emissioni di metano in atmosfera, gas potenzialmente più dannoso della  $\text{CO}_2$  per l'effetto serra;
- 5) l'energia termica per scaldare il digestore e quella elettrica per ogni altro processo nell'ambito della filiera di produzione di biocarburanti, do-

<sup>5</sup> Norma UNI/TS 11567, Appendice C.2.

<sup>6</sup> Direttiva 2009/28/CE (RED I) art. 17, comma 2 e D.Lgs 21 marzo 2005 n.66, art. 7 ter, comma 2, lett. a.

vrebbero provenire anch'esse obbligatoriamente da fonte rinnovabile;

- 6) bisognerebbe incentivare anche l'utilizzo della CO<sub>2</sub> biogenica emessa in atmosfera durante l'*upgrading*, per ottenere un ulteriore vantaggio ambientale legato al risparmio di combustibili fossili utilizzati dalle industrie chimiche per produrre CO<sub>2</sub> da destinare al comparto alimentare (bibite gasate), ma anche ad altri usi (sostanze chimiche, plastiche, addirittura cibo per pesci).

#### 4.2. Calcolo dell'indicatore *RispCO<sub>2</sub>eq*.

Vorremmo riservare un'attenzione particolare al calcolo dell'indicatore *RispCO<sub>2</sub>eq*.

Consideriamo che un biocarburante, per definirsi migliorativo per quanto riguarda almeno le emissioni climalteranti, deve essere confrontato con lo scenario di consumi (e relative emissioni) che con ottima probabilità o in modo comprovato riesca a sostituire: a tal fine la normativa definisce un valore FFC di confronto, e le politiche di incentivazione fissano una soglia minima di *RispCO<sub>2</sub>eq*. Si noti che la recente Direttiva RED II (UE 2018/2001) ha differenziato il valore di FFC, in base allo specifico campo di applicazione: per i combustibili utilizzati nella produzione di calore utile a scopo di riscaldamento e/o raffrescamento, il valore FFC di riferimento è ancora 80 gCO<sub>2</sub>eq MJ<sup>-1</sup>, mentre, laddove può essere comprovata una sostituzione fisica diretta del carbone, il valore diventa 124 gCO<sub>2</sub>eq MJ<sup>-1</sup>: quando lo scenario di consumo è più impattante, l'indicatore di risparmio è più alto. Con questi criteri in mente, abbiamo svolto alcune stime relative a differenti scenari di impiego del biometano.

La performance del biometano, nel caso in esame e con il FFC previsto nella normativa corrente, ha prodotto *RispCO<sub>2</sub>eq* = 0,64.

Abbiamo ricalcolato *RispCO<sub>2</sub>eq*, a partire dai dati sul trasporto via auto in Italia per l'anno 2015, riferiti a cinque tipologie di veicoli: auto a benzina, a diesel, a GPL, a metano e auto elettriche. Sono stati considerati solo i contributi dei combustibili fossili per ciascuna tipologia di vettura. Il consumo di energia per ogni tipologia di mezzo, espresso in MJ, è stato invece ricavato dal prodotto del numero di auto per il consumo specifico al km, per i chilometri percorsi e per il potere calorifico di ogni carburante.

Il valore finale ottenuto (87,6 gCO<sub>2</sub>eq MJ<sup>-1</sup>) non differisce molto da quello del documento di riferimento. Se questo biocombustibile alimentasse in

quantità ponderata il mix di automobili circolanti nel 2015, si otterrebbe un risparmio in termini di emissioni, che vale:

$$\text{RispCO}_2\text{eq}_{\text{mix}} = (87,6 \text{ g MJ}^{-1} - 34 \text{ g MJ}^{-1}) / 87,6 \text{ g MJ}^{-1} = 0,61 \quad (5)$$

Questo scenario comporterebbe, però, la conversione benzina/metano, o la sostituzione da auto a gasolio ad auto a metano, di un certo numero di vetture: attività necessaria, che dovrebbe essere contemplata nel calcolo di CO<sub>2</sub>eq<sub>bio</sub>.

Più credibilmente e in linea con gli obiettivi di Governo, le quantità di biometano tenderebbero a sostituire il gas naturale fossile nella rete di distribuzione del metano già esistente, realizzando ricariche su vetture già alimentate a metano. In questo scenario, l'indicatore andrebbe ricalcolato, ad esempio per confronto con l'emissione specifica delle auto alimentate a metano utilizzato come FFC, che vale:

$$\text{CO}_2\text{eq}_{\text{metano}} = \text{CO}_{2\text{gaskmsolcomb}} / (\text{cons}_{\text{gaskm}} \cdot \text{Potcal}_{\text{gas}} \cdot 3,6) = 187 / (0,0767 \cdot 14,13 \cdot 3,6) = 47,9 \text{ g MJ}^{-1} \quad (6)$$

In cui:

- CO<sub>2</sub>gaskmsolcomb (g km<sup>-1</sup>) sono le emissioni in grammi di CO<sub>2</sub>eq per km per il gas naturale;
- cons<sub>gaskm</sub> (kg km<sup>-1</sup>) è il consumo specifico di metano a km;
- Potcal<sub>gas</sub> (kWh kg<sup>-1</sup>) è il potere calorifico inferiore del metano.

$$\text{RispCO}_2\text{eq}_{\text{metano}} = (47,9 \text{ g MJ}^{-1} - 34 \text{ g MJ}^{-1}) / 47,9 \text{ g MJ}^{-1} = 0,29 \quad (7)$$

## 5. CONCLUSIONI

Il metodo LCA permette di valutare le emissioni, gli impatti e i danni generati dalla produzione dei biocarburanti. Nel caso in esame (produzione di biometano da FORSU) sono state calcolate le emissioni di GHG specifiche per unità di energia del biocarburante (MJ), attenendosi alla normativa vigente che regola gli incentivi economici e utilizzando il metodo IPCC GWP100a: il fattore CO<sub>2</sub>eq<sub>bio</sub> ottenuto è pari a 34 g MJ<sup>-1</sup>.

Alla luce dei risultati raggiunti e dell'esperienza maturata nell'applicazione dell'analisi LCA, suggeriamo alcune modifiche alle direttive di calcolo. Innanzitutto, bisognerebbe includere nella valutazione anche processi attualmente trascurati (i consumi idrici, la costruzione degli impianti, il trasporto della biomassa al luogo di trattamento, i locali di stoccaggio e trattamento della biomas-

sa, l'occupazione di suolo, il fine vita del digestato e l'anidride carbonica emessa in atmosfera durante l'*upgrading*). Inoltre, per quanto riguarda l'indicatore *RispCO<sub>2</sub>eq*, che descrive la riduzione delle emissioni di GHG nel caso in cui il biocombustibile sostituisca una fonte fossile, evidenziamo come esso subisca una sensibile variazione (si dimezza) qualora si effettui una diversa valutazione del fattore FFC, generata da uno specifico scenario di utilizzo del biocarburante, ovvero l'impiego dello stesso per alimentare veicoli a metano fossile. Di tale sensibilità dovrebbe tenere conto la normativa di riferimento, ipotizzando diversi valori di FFC relativi a differenti scenari di utilizzo, piuttosto che ricorrere ad un unico valore di FFC per tutto il settore dei trasporti.

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ARPAE (2018) La gestione dei rifiuti in Emilia-Romagna. Reperibile in:  
[https://www.arpae.it/cms3/documenti/\\_cerca\\_doc/rifiuti/ReportRifiuti2018.pdf](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/rifiuti/ReportRifiuti2018.pdf)
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23/04/2009 (RED I) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
- Direttiva UE 2015/1513 del 09/09/2015 (ILUC) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili che modifica la direttiva 98/70/CE, relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel, e la direttiva 2009/28/CE, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
- Direttiva UE 2018/2001 del Parlamento Europeo e del Consiglio (RED II) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione).
- Direttiva UE 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19/11/2008 relativa ai rifiuti.
- D.Lgs n. 152 del 03/04/2006, Norme in materia ambientale.
- D.Lgs n. 205 del 03/12/2010, attuazione della direttiva 2009/98/CE relativa ai rifiuti.
- D.Lgs n. 28 del 03/03/2011, attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
- D.Lgs n. 51 del 21/03/2017, Attuazione della direttiva (UE) 2015/652 che stabilisce i metodi di calcolo e gli obblighi di comunicazione ai sensi della direttiva 98/70/CE relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel e della direttiva (UE) 2015/1513 che modifica la direttiva 98/70/CE, relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel, e la direttiva 2009/28/CE, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
- DM 23/01/2012: Sistema nazionale di certificazione per biocarburanti e bioliquidi.
- DM 10/10/2014, Aggiornamento delle condizioni, dei criteri e delle modalità di attuazione dell'obbligo di immissione in consumo di biocarburanti compresi quelli avanzati.
- DM 25/02/2016, Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue, nonché per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato.
- DM 02/03/2018, Promozione dell'uso del biometano e degli altri biocarburanti avanzati nel settore dei trasporti.
- DM 14/11/2019: Istituzione del Sistema nazionale di certificazione della sostenibilità dei biocarburanti e dei bioliquidi.
- EBA European Biogas Association (2019) Statistical Report., <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2019/>
- Giuntoli J, Agostini A, Edwards R, Marelli L, (2017) Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. Calculated according to the methodology set in COM(2016) 767, EUR 27215 EN, doi:10.2790/27486.
- Labartino N., Piccinini S. (2017) Biomethane from landfill & wastewater biogas, presentazione a Ecomondo, Rimini 07/11/2017.  
<https://drive.google.com/file/d/1z7RovV4BGqvS6BcGcga-KluuTboMHnOUP/view>
- Legge n. 204 del 04/11/2016, ratifica accordo di Parigi sul clima.
- L.R. n. 16 del 05/10/2015, Disposizioni a sostegno dell'economia circolare, della riduzione della produzione di rifiuti urbani, del riuso dei beni a fine vita, della raccolta differenziata. Testo coordinato con le modifiche apportate da: L.R. 18 luglio 2017, n. 16.
- PNIEC (2019) Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), Dicembre, 2019 [www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC\\_finale\\_17012020.pdf](http://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf)
- RER (2017) Regione Emilia Romagna, Regolamento regionale n. 3 del 15/12/2017, in materia di utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento, del digestato e delle acque reflue.
- UNI EN ISO 14040 (2006) "Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento".
- UNI/TS 11567 (2014) Linee guida per la qualificazione degli operatori economici (organizzazioni) della filiera di produzione del biometano ai fini della tracciabilità e del bilancio di massa.
- UNI EN ISO 14044 (2018), "Valutazione del ciclo di vita, Requisiti e Linee Guida".



## SINTESI DEGLI INTERVENTI AL CONVEGNO “LA RIMOZIONE DI CO<sub>2</sub> DALL’ATMOSFERA E IL PROGETTO DESARC-MARESANUS”

È in seguito pubblicata una sintesi di alcuni degli interventi del convegno “La rimozione di CO<sub>2</sub> dall’atmosfera e il progetto Desarc-Maresanus”, che si è svolto presso il Politecnico di Milano il 4 e 5 febbraio 2020. Il progetto “Desarc-Maresanus” ha studiato un processo di alcalinizzazione dei mari per contrastare allo stesso tempo due problemi ambientali di grandissima rilevanza: l’aumento delle concentrazioni di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) in atmosfera e la conseguente acidificazione degli oceani. Il processo consiste nello spargimento di idrossido di calcio sulla superficie del mare che, combinandosi in un processo spontaneo con acqua e CO<sub>2</sub> rimossa dall’atmosfera, aumenta la capacità tampone delle acque marine verso l’acidità e permette di contrastare la diminuzione del pH. In particolare, sono stati analizzati in dettaglio la fattibilità tecnica ed economica di questo processo, il suo bilancio ambientale, nonché i benefici per il comparto marino, con un focus sul Mediterraneo. Le presentazioni degli interventi sono disponibili al sito [www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/](http://www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/).

**Parole chiave:** CO<sub>2</sub>, rimozione, clima, conferenza.

### SUMMARY OF THE SPEECHES GIVEN AT THE CONFERENCE “THE REMOVAL OF CO<sub>2</sub> FROM THE ATMOSPHERE AND THE DESARC-MARESANUS PROJECT”

A summary of some of the interventions of the conference “The removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere and the Desarc-Maresanus project”, which took place at Politecnico di Milano on 4 and 5 February 2020, is reported in the following pages. The “Desarc-Maresanus” project studied an alkalization process to simultaneously address two environmental problems of enormous concern: the increase of the concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere and the resulting acidification of the oceans. The process involves spreading calcium hydroxide on the surface of the sea, which would increase the seawater’s capacity to provide a buffer to the acidity, halting the dangerous decrease of pH. This, in turn, can foster an additional removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere, generating negative emissions. A detailed analysis was carried out of the technical and economic feasibility of the process, its environmental balance, and the benefits for the marine sector, focussing on the Mediterranean basin. The presentations of the speeches are available at: [www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/](http://www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/)

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, removal, climate, conference.

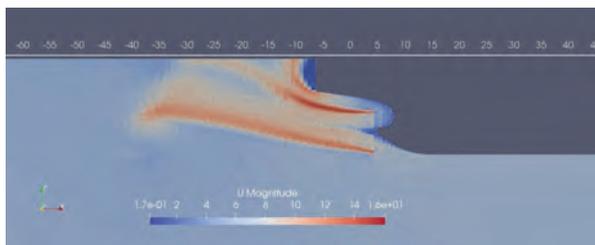
## MODELLIZZAZIONE FLUIDODINAMICA DELLO SPARGIMENTO DI Ca(OH)<sub>2</sub> NELLA SCIA DI UNA NAVE

Antonella Abbà, Maria Ludovica Dall’Aglia

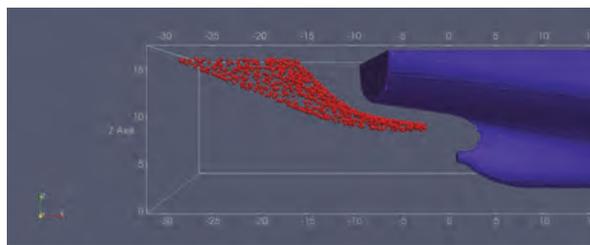
Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali (abbaantonella222@gmail.com)

Nell’ambito del progetto Desarc-Maresanus è stato compiuto uno studio fluidodinamico finalizzato ad una migliore comprensione del processo di alcalinizzazione dell’acqua marina mediante lime. In particolare, è stato studiato il problema della dispersione di lime nella scia delle navi nella prospettiva futura di utilizzare a tal fine non solo navi dedicate allo scopo ma anche navi commerciali già operanti. L’obiettivo dello studio è da un lato di stimare quali debbano essere le quantità di carbonato di calcio da disperdere in mare affinché il processo sia efficace dal punto di vista della regolarizzazione dell’acidità dell’acqua e dell’assorbimento di biossido di carbonio dall’atmosfera, e dall’altro che le concentrazioni di lime e le variazioni di acidità siano localmente contenute al fine di non danneggiare l’ambiente marino e le sue specie viventi. Lo studio è stato affrontato utilizzando gli strumenti del calcolo numerico applicato alla fluidodinamica.

È stata infatti simulata la corrente attorno ad una nave rappresentativa della categoria cargo utilizzando un codice di calcolo ai volumi finiti basato sulla libreria open-source OpenFOAM (disponibile da <https://doi.org/10.1007/BF02391175>). Grazie alla disponibilità di piattaforme di supercalcolo ad alte prestazioni è stato possibile svolgere simulazioni della corrente marina attorno all’intera chiglia. L’attenzione è stata focalizzata in particolare sullo studio della scia nella regione vicina alla poppa della nave dove la corrente è fortemente dipendente dalla geometria dello scafo e dalla presenza dell’elica e per la quale non è possibile quindi disporre di informazioni derivanti da studi teorici e analitici. In questa prima fase il lime disperso è trattato come uno scalare trasportato e diffuso dalla corrente. Le simulazioni preliminari sono state fondamentali nel determinare la zona in prossimità dell’elica come migliore punto di immissione di lime in acqua.



*Visualizzazione della corrente a valle dell'elica*

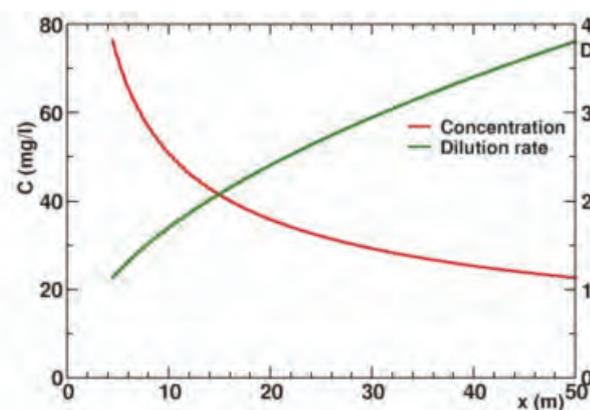


*Dispersione di particelle nella scia della nave*

Come si può vedere anche nelle figure seguenti, le particelle rappresentanti il carbonato di calcio immesse nella corrente appena a valle dell'elica vengono trasportate dalla corrente media.

Nell'ultima figura è rappresentata la stima della concentrazione di lime e del relativo tasso di diluizione in funzione della distanza dal punto di immissione. In base a tale stima risulta che ad una distanza pari a 15 metri la concentrazione risulta dimezzata rispetto alla concentrazione iniziale di 86.5 mg/l.

Ulteriori simulazioni numeriche in diverse condizioni e configurazioni saranno necessarie per verificare ulteriormente la generalità e i limiti di validità dei risultati ottenuti.



*Concentrazione e rateo di diluizione di lime in funzione della distanza dal punto di immissione*

## OCEAN LIMING IN PRATICA: SCENARI DI SPARGIMENTO DI $\text{Ca}(\text{OH})_2$ DALLE NAVI

**Dario Pagano, Stefano Caserini, Francesco Campo, Giovanni Cappello, Mario Grosso**

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (dario.pagano@polimi.it)

Molte ricerche indicano un grande potenziale di rimozione di  $\text{CO}_2$  tramite alcalinizzazione artificiale degli oceani, ma nessuna di queste ha valutato gli aspetti pratici dello scarico di grandi quantità di calce idrata dalle navi. La presentazione ha illustrato diversi scenari, studiati nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, con cui può essere effettuato lo scarico di calce idrata tramite navi esistenti o navi dedicate, sia nel Mar Mediterraneo che a livello globale.

Lo spargimento di calce spenta (nome comune con cui si indica l'idrossido di calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) è ipotizzato in forma di dispersione (slurry), che può essere prodotta sulle navi aggiungendo acqua dolce alla calce polverizzata, caricata nella stiva delle navi. Si è ipotizzata una concentrazione di calce spenta nell'effluente scaricato pari a  $79\text{kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ , più di 50 volte superiore il limite di solubilità ( $1,59\text{kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ ). Questa scelta permette di massimizzare lo scarico in mare minimizzando i volumi d'acqua utilizzati.

Per quanto riguarda il Mar Mediterraneo, sono stati elaborati i dati della densità di traffico nava-

le relativi all'anno 2017, provenienti dal database di EMODnet (European Marine Observation and Data Network) limitatamente alle categorie "Cargo", "Passenger" e "Tanker". Altre categorie di imbarcazioni (es. pescherecci) sono state escluse per via del loro numero limitato o perché ritenute inadeguate, ad esempio perché di dimensioni limitate e con percorsi troppo vicini alla costa. I dati EMODnet sono stati elaborati al fine di eliminare i dati relativi al tempo trascorso dalle navi in rada, o nelle vicinanze della costa ( $< 5\text{km}$ ), stimando quindi per ogni tipologia il numero di ore di navigazione delle navi in circolazione nel Mar Mediterraneo effettivamente sfruttabili per lo spargimento di calce idrata, pari a 9 milioni di ore/anno. I dati relativi alle ore di navigazione delle categorie "Tanker" e "Cargo" sono stati utilizzati per le simulazioni modellistiche sull'efficacia dell'alcalinizzazione.

Per quanto concerne il traffico navale su scala globale, sono stati analizzati i dati relativi alle rotte delle navi portacontainer e delle portarinfuse (bulk

carriers), considerando l'intera flotta mondiale attualmente esistente.

Nel convegno sono stati illustrati i risultati del calcolo della potenzialità di spargimento di idrossido di calcio a scala globale mediante due scenari: utilizzando nuove navi dedicate (scenario 1) e utilizzando parte della capacità di carico delle navi esistenti (scenario 2). È stato valutato anche l'utilizzo dell'acqua di ballast delle navi esistenti come mezzo per trasportare e scaricare la calce spenta, ma accantonato a causa di difficoltà tecniche (pericoli di sedimentazione durante il trasporto) che non sembrano al momento superabili.

Nello scenario 1, sono state prese in considerazione 1000 nuove navi dedicate costruite ad hoc o acquistate con il solo scopo di scaricare la calce spenta in acqua di mare, con una stazza media di 75.000 dwt (navi Panamax). Assumendo un rateo di scarico di 100 kg/s, un decimo del rateo di scarico assunto in altri articoli scientifici riguardanti l'alcalinizzazione artificiale del mare, si stima uno spargimento di circa 2.5 Gt/anno a livello globale. In questo scenario la selezione delle rotte potrebbe essere effettuata in modo da massimizzare l'efficienza della rimozione di CO<sub>2</sub> e il contrasto all'acidificazione dell'oceano, considerando altresì la logistica della disponibilità della produzione dell'idrossido di calcio. Nello scenario 2 si ipotizza che parte (15%) della capacità di carico di due tipi di navi commerciali esistenti, portarinfuse e navi portacontainer, sia utilizzata per il trasporto di calce spenta. Questa scelta è il risultato di una valutazione di esperti che suggeriscono che il 10-20% della capacità di carico netto delle navi potrebbe essere destinato al trasporto della calce spenta senza interferire con le normali operazioni logistiche delle navi. Per lo scarico della cal-

ce possono essere utilizzate le pompe già esistenti nelle navi. Sono stati valutati due sotto-scenari: il primo (scenario 2A) considera il caricamento della calce spenta soltanto nel porto di partenza e scaricamento lungo l'intera rotta verso il porto di arrivo; il secondo (2B) prevede il caricamento anche durante le fermate intermedie, che vengono realmente effettuate dalle navi portacontainer, in particolar modo nelle rotte transcontinentali; per le portarinfuse, che effettuano lunghissimi viaggi senza soste (ad es. dall'Australia al Nord Europa), il numero di scali intermedi è stato ipotizzato sulla base della lunghezza delle tratte, considerando i porti disponibili lungo le rotte. Con tale scelta operativa non sono necessarie rilevanti modifiche strutturali delle navi; è necessaria tuttavia l'implementazione di impianti dedicati per il caricamento della calce spenta nei porti. Ipotizzando lo scarico durante l'intera rotta, il rateo di scarico della calce idrata dipende dalla stazza delle navi e dalla lunghezza della tratta e risulta essere, per entrambi i sottoscenari, inferiore ai 25 kg/s.

Si osserva inoltre che nonostante le navi portarinfuse e portacontainer siano il 17% della flotta commerciale globale, esse costituiscono il 56% del tonnellaggio totale. Lo spargimento di calce idrata ipotizzato nello scenario 2A è di circa 2.4 Gt/anno, che sale a 5,8 nello scenario 2B, considerando la disponibilità della calce spenta da caricare in tutti nei luoghi di fermata delle imbarcazioni.

Pur essendo necessari ulteriori approfondimenti sulla logistica dei porti e la gestione dei materiali, questa prima analisi mostra come l'utilizzo di quote rilevanti del traffico navale esistente possa fornire un contributo molto rilevante per lo spargimento di idrossido di calcio, con ratei di scarico per singola nave relativamente limitati.



Esempio di rotta transcontinentale con fermate intermedie (fonte: searoutes.com)

## SIMULAZIONE DI SCENARI DI ALCALINIZZAZIONE DEL MEDITERRANEO

Momme Butenschön, Tomas Lovato, Simona Masina

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici (momme.butenschon@cmcc.it)

La valutazione del potenziale contributo della tecnica di alcalinizzazione nella riduzione del trend di acidificazione, rimuovendo nel contempo CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, è stata condotta tramite l'impiego di modelli numerici per descrivere le dinamiche fisiche e biogeochimiche nel Mar Mediterraneo. Tale potenziale è messo in relazione al cambiamento indotto dal processo sulla chimica dei carbonati in mare, con particolare attenzione alla variazione spaziotemporale dell'acidità (espressa tramite il pH) e alla capacità di assorbimento di CO<sub>2</sub> del sistema.

Il modello numerico sviluppato dal CMCC nell'ambito del progetto è in grado di risolvere la circolazione generale e l'evoluzione dei cicli biogeochimici dei livelli trofici primari dell'ecosistema. L'implementazione di questo sistema per il Mar Mediterraneo consiste nell'accoppiamento tra il modello oceanografico NEMO ([www.nemo-ocean.eu](http://www.nemo-ocean.eu)) con una risoluzione orizzontale regolare di 6.5 km ed il modello biogeochimico BFM ([www.bfm-community.eu](http://www.bfm-community.eu)) per descrivere l'interazione tra macro nutrienti e specie planctoniche marine.

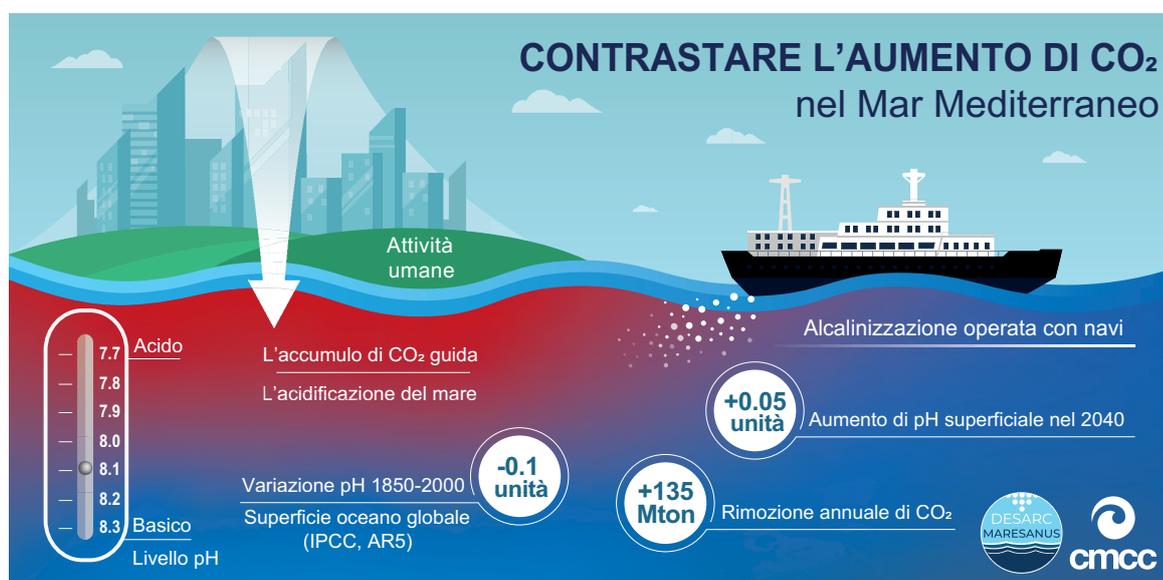
Le simulazioni numeriche del Mar Mediterraneo sono guidate dai dati climatici prodotti dal modello globale CMCC-CM ([www.cmcc.it/models/cmcc-cm](http://www.cmcc.it/models/cmcc-cm), Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A., Sanna A., Fogli P.G., et al., 2011: Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Cou-

pled General Circulation Model. *J. Climate* 24, 4368-4384) a partire dal 2000 e seguono uno scenario futuro in cui la mitigazione è moderata, identificato come RCP4.5 nel quinto rapporto dell'IPCC.

Ai fini del progetto è stata effettuata una prima simulazione del sistema senza alcun tipo di intervento, che ha permesso di determinare l'attuale trend di acidificazione alla superficie del Mar Mediterraneo, pari a -0,01 unità di pH ogni 10 anni. Questo valore risulta in linea con le stime per l'oceano globale indicate nell'ultimo rapporto IPCC.

La tecnica di alcalinizzazione è stata utilizzata in una seconda simulazione assumendo che lo spargimento di calce in mare avvenga tramite l'attuale flotta di navi da trasporto (cargo e tanker) che insiste sul Mar Mediterraneo. In particolare, a partire dall'anno 2020 è stato applicato uno scarico complessivo di 200 Mton all'anno di calce, secondo le stime prodotte dalla Linea 2 del progetto.

Il confronto con lo scenario di riferimento ha permesso di quantificare il potenziale di rimozione della CO<sub>2</sub> atmosferica in ~135 Mton all'anno e di contrastare l'attuale tendenza dell'acidificazione dovuta all'aumento della CO<sub>2</sub> in atmosfera. Gli esperimenti numerici condotti indicherebbero la possibilità di riportare in tempi contenuti il valor medio del pH alla superficie del mare al livello degli anni 2000, mantenendo un incremento di 0,05 unità fino al 2040.



### Quadro sintetico dei risultati

## TECNOLOGIE ALTERNATIVE DI STOCCAGGIO CO<sub>2</sub>

Giovanni Cappello

CO2APPS srl (gcappello@co2apps.com)

Secondo l'IPCC, per mantenere la temperatura al di sotto dei 2°C per fine secolo sarà necessario rimuovere dall'atmosfera svariati miliardi di tonnellate all'anno di CO<sub>2</sub>, generando le cosiddette "emissioni negative di CO<sub>2</sub>".

Il principale ostacolo per la generazione di emissioni negative mediante le tecnologie potenzialmente sviluppabili su scala globale come BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage), DACCS (Direct Air Capture and Storage) e quella studiata nel processo Desarc-Maresanus (Decreasing Seawater Acidification Removing Carbon) è la disponibilità di uno stoccaggio permanente per la CO<sub>2</sub>.

La tecnologia più promettente per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> che è stata proposta è stata quella dello stoccaggio geologico: l'iniezione della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche in formazioni geologiche profonde. Potenzialmente questo tipo di stoccaggio potrebbe risolvere il problema dello stoccaggio di CO<sub>2</sub> a livello mondiale, ma sono emersi nel tempo diverse problematiche che ne hanno impedito lo sviluppo:

- distribuzione geografica non omogenea delle formazioni geologiche potenzialmente adatte;
- lunghi e costosi studi geologici per verificare l'idoneità della formazione geologica;
- disponibilità dello stoccaggio geologico nelle vicinanze dei punti di emissione;
- necessità di grandi progetti per abbattere i costi, con evidenti problemi finanziari;
- opposizione della popolazione per siti di stoccaggio sulla terraferma.

Pur essendoci situazioni particolarmente favorevoli per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>, come per esempio il Mare del Nord, è necessario studiare tecnologie alternative allo stoccaggio geologico, applicabili in forma diffusa, modulari, facilmente industrializzabili e che non richiedano lunghi tempi di studio per essere implementate.

Alcune di queste tecnologie sono state studiate nel progetto Desarc-Maresanus:

- stoccaggio sottomarino in capsule vetroceramiche (SCS, Submarine Carbon Storage);
- stoccaggio della CO<sub>2</sub> in acquiferi salini profondi mediante iniezione di acqua carbonata (CWI, Carbonated Water Injection);

- stoccaggio sottomarino di acqua ricca in bicarbonati di calcio (BIPR, Bicarbonate Increasing Pressure Reactor).

### SCS – Submarine Carbon Storage

Questa originale tecnologia nasce dall'idea di "imbottigliare" fisicamente la CO<sub>2</sub> in capsule di vetro ed immagazzinarle sul fondale marino tra 1500 e 3000 m di profondità.

Le considerazioni alla base di questa tecnologia sono:

- la fabbricazione delle capsule di vetro è una tecnologia matura;
- i materiali necessari per la costruzione del vetro sono disponibili ovunque;
- il vetro è un materiale atossico ed inerte per l'ambiente, nonché impermeabile alla CO<sub>2</sub>;
- il vetro è un materiale che nel mare ha durata geologica, molte migliaia di anni;
- non c'è contatto tra CO<sub>2</sub> ed acqua del mare;
- è una tecnologia industrializzabile e modulare;
- la vicinanza a mare con profondità adeguate è comune a molti paesi del mondo.

Gli studi preliminari realizzati, presentati in Caserini et al., 2017 (Evaluation of a new technology for carbon dioxide submarine storage in glass capsules. International Journal of Greenhouse Gas Control, 60, 140–155), e proseguiti nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, dimostrano la validità generale dell'idea e la reale possibilità di stoccare la CO<sub>2</sub> a costi comparabili rispetto allo stoccaggio geologico. Esistono tuttavia ancora problematiche tecniche da studiare, come il sistema di riempimento in pressione delle capsule, il sistema di lancio sequenziale, il rilascio delle capsule sul fondo marino. La tecnologia è un'opzione disponibile e non sono stati identificati problemi tecnici irrisolvibili, pur richiedendo a monte la struttura industriale di una vetreria.

### CWI – Carbonated Water Injection

È una tecnologia di stoccaggio proposta da vari autori e già conosciuta nel settore Oil&Gas, consistente nell'iniettare in un acquifero salino profondo una miscela di acqua e CO<sub>2</sub>, nelle proporzioni di circa 25:1 (in peso). In questo modo non è più necessario disporre, come nello stoccaggio geolo-

gico tradizionale, di uno strato di roccia integro ed impermeabile che isola la zona di iniezione della CO<sub>2</sub> dagli strati superiori impedendo di fatto la fuoriuscita della CO<sub>2</sub> in superficie. L'iniezione di acqua carbonata nell'acquifero salino profondo elimina inoltre il rischio della possibile fuoriuscita incontrollata della CO<sub>2</sub> dal deposito, elimina il rischio di sismologia indotta, semplifica gli studi geologici necessari sull'acquifero e amplia notevolmente l'area geografica dove si può immagazzinare CO<sub>2</sub>. Questa tecnologia è particolarmente interessante soprattutto per l'Italia del Nord, dove sembrerebbe esserci un diffuso acquifero salino profondo e non esiste altra opzione di stoccaggio CO<sub>2</sub> disponibile.

### **BIPR – Bicarbonate Increasing Pressure Reactor**

Questa proposta tecnologica, sviluppata nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, nasce come ottimizzazione della tecnologia proposta da G. Rau e K. Caldeira negli anni 1999-2000 (Enhanced carbonate dissolution: a means of sequestering waste CO<sub>2</sub> as ocean bicarbonate. Energy Convers. Manag. 1999, 40, 1803-1813), e consiste nell'accelerare la naturale reazione di dilavamento delle rocce carbonatiche da parte delle precipitazioni: il

contatto delle rocce calcaree con l'acqua in presenza di CO<sub>2</sub> porta ad una soluzione di acqua e bicarbonati, che sono convogliati dai fiumi nel mare. La tecnologia proposta da Rau e Caldeira propone di accelerare in un reattore dette reazioni, e di disporre nel mare profondo la soluzione di acqua e bicarbonati. La disposizione della soluzione di bicarbonati di calcio in mare rappresenta uno stoccaggio a lungo termine della CO<sub>2</sub>, ed ha inoltre effetti benefici sull'alcalinità dell'oceano contrastandone l'acidificazione. La tecnologia BIPR, valorizzando i concetti di fondo della tecnologia proposta da Rau e Caldeira, ne ottimizza il consumo di acqua con un reattore di concezione differente che sfrutta la pressione del mare profondo per accelerare le reazioni tra il carbonato, la CO<sub>2</sub> e l'acqua per la formazione di bicarbonati.

Tale tecnologia ha il pregio di essere modulare, di poter essere applicata in molti paesi del mondo che hanno la disponibilità di un mare profondo più di 2000 m ad una distanza di 10 km – 150 km dalla costa, e soprattutto di utilizzare come “ingredienti” solo acqua di mare e roccia carbonatica, quest'ultima una delle rocce più disponibili e economiche sulla crosta terrestre.

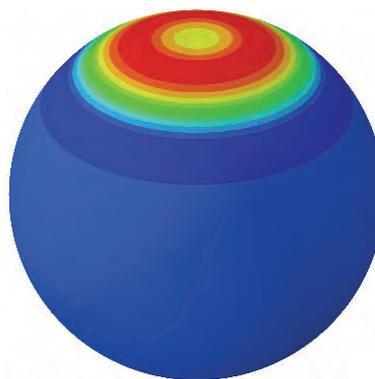
Tale tecnologia sarà ulteriormente studiata nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus.

## **ANALISI STRUTTURALE DI CAPSULE IN VETRO PER LO STOCCAGGIO SOTTOMARINO DI CO<sub>2</sub>**

**Massimiliano Cremonesi, Cheng Fu, Nicola Cefis, Martina Colombo, Alberto Corigliano, Umberto Perego**  
Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (massimiliano.cremonesi@polimi.it)

Lo stoccaggio sottomarino di CO<sub>2</sub> in capsule di vetro è una tecnologia innovativa studiata per permettere lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> laddove altre tipologie di stoccaggio non sono disponibili. La CO<sub>2</sub> catturata da sorgenti industriali è iniettata in forma liquida in capsule di vetro, che vengono poi depositate sul fondo del mare, ad una profondità variabile tra i 1000 e i 2000 metri.

Nel nostro lavoro ci siamo occupati della fattibilità di questo tipo di processo dal punto di vista della resistenza strutturale delle capsule. In particolare, ci siamo occupati dello studio della miglior forma possibile delle capsule e del loro spessore ottimale per evitare la rottura e la conseguente fuoriuscita di CO<sub>2</sub>, minimizzando al contempo il consumo di vetro. Dalle nostre analisi abbiamo determinato che la forma ottimale per la capsula è quella sferica, con uno spessore variabile che va dai 10mm nella zona del tappo ai 2mm



*Esempio di distribuzione di sforzi sulla capsula sferica*

nel resto della sfera. La configurazione così ottenuta è stata testata nelle situazioni considerate più critiche: la fase di riempimento e la fase di deposizione sul fondo del mare. In entrambi i casi, le sollecitazioni calcolate hanno rispettato i criteri

di resistenza del materiale utilizzato, confermando quindi l'adeguatezza strutturale della soluzione proposta.

Successivamente ci siamo occupati della fase di caduta delle capsule dal tubo di lancio fino al fondo del mare. Sono stati considerati quattro scenari: (i)

caduta su suolo roccioso; (ii) caduta su suolo sabbioso; (iii) caduta su di un'altra sfera; (iv) caduta su un gruppo di sfere. In tutti i casi considerati, i calcoli svolti hanno mostrato che il picco di sforzo dovuto all'impatto non compromette la sicurezza strutturale delle capsule.

## BENEFICI E IMPATTI PER L'AMBIENTE MARINO DALLA VARIAZIONE DEL pH

Caterina Lanfredi, Valentina De Santis, Arianna Azzellino

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (caterina.lanfredi@polimi.it)

Fino ad oggi, i potenziali effetti dell'alcalinizzazione dell'oceano sull'ambiente marino, sono stati poco studiati, principalmente attraverso esercizi teorici e di modellizzazione, e sono stati testati solo in pochi casi, in laboratorio o in-situ, assumendo tempi di esposizione differenti. Bach e colleghi (2019) hanno recentemente pubblicato una esaustiva panoramica sui potenziali impatti dell'alcalinizzazione dell'oceano sull'ecosistema marino. Gli autori hanno ipotizzato che gli organismi marini calcificatori, come i coralli (Albright et al., 2016), i crostacei e le alghe (Gore et al., 2019), che dipendono fortemente dalle variazioni di carbonio e derivati, potrebbero avere alcuni benefici (ad es. l'aumento dei tassi di calcificazione) dall'alcalinità indotta. Tuttavia, la variabilità della risposta a questi effetti è specie-specifica (Langer et al., 2006) e differisce tra le diverse fasi della vita. Quindi, questi "benefici" potrebbero anche portare a dei cambiamenti nella composizione delle specie (ad es. nella struttura della comunità del plancton), a favore di alcune specie e a scapito di altre (Hansen, 2002; Hinga 2002; Langer et al., 2006; 2009). Gli effetti dell'alcalinizzazione sulla catena alimentare sono complessi e difficili da prevedere. La biomassa e struttura dimensionale degli organismi zooplanctonici (es. copepodi) potrebbero esserne influenzate negativamente (Cripps et al., 2014; Taucher et al., 2017); essendo questi organismi probabilmente quelli più fortemente impattati dallo sversamento in mare di calce idrata. Tuttavia, ad oggi le conoscenze sugli specifici impatti che le variazioni di pH possono causare alle comunità planctoniche sono scarse. Alcuni autori (es. Langer et al., 2006) hanno riportato alternazioni nel tasso di crescita di alcune specie fitoplanktoniche dovute a variazioni della concentrazione di ioni carbonato. Più noti sono gli effetti fisiologici su specie bentoniche. D'altro canto, l'aumento dell'alcalinità potrebbe portare benefici contribuendo a ripristinare le strutture degli ecosistemi che hanno subito cambiamenti a causa della continua

acidificazione dell'ambiente marino (es. coralligeno), andando a compensare l'acidificazione che il Mediterraneo potrebbe continuare a subire nei prossimi decenni. Rispetto quindi al potenziale effetto sull'ambiente marino dovuto all'introduzione di calce idrata in mare, è necessario considerare sia gli impatti sul breve che sul lungo periodo. Nel breve periodo l'effetto tossico e potenzialmente letale (Gim 2018, Byeong-Mo et al., 2018) sulle specie planctoniche esposte dipenderà fortemente dalla vulnerabilità delle specie presenti, dalla concentrazione di picco di calce idrata sversata nonché dalla durata dell'esposizione (cinetica di dissoluzione della calce idrata nell'area di scarico). La mancanza di conoscenze scientifiche sugli impatti o benefici ambientali dell'alcalinizzazione degli oceani rimane un gap conoscitivo che sarà necessario colmare attraverso ulteriori studi e sperimentazioni in-situ.

### Riferimenti

- Albright Rebecca, Lilian Caldeira, Jessica Hosfelt, Lester Kwiatkowski, Jana K. Maclaren, Benjamin M. Mason, Yana Nebuchina, et al. (2016). "Reversal of Ocean Acidification Enhances Net Coral Reef Calcification." *Nature* 531 (7594): 362-65.
- Cripps Gemma, Penelope Lindeque, and Kevin J. Flynn. (2014). "Have We Been Underestimating the Effects of Ocean Acidification in Zooplankton?" *Global Change Biology* 20 (11): 3377-85.
- Cripps Gemma, Stephen Widdicombe, John I. Spicer, and Helen S. Findlay (2013). "Biological Impacts of Enhanced Alkalinity in *Carcinus Maenas*." Supplement to: Cripps, G et al. (2013): Biological Impacts of Enhanced Alkalinity in *Carcinus Maenas*. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1-2), 190-198, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.015> <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.829880>.
- Gim B.M., Hong S., Lee J.S. Kim, N.H., Kwon E.M., Gil J.W., ... & Khim J.S. (2018). Potential ecotoxicological effects of elevated bicarbonate ion concentrations on marine organisms. *Environmental Pollution*, 241, 194-199.
- Gore S., Renforth P., & Perkins R. (2019). The potential environmental response to increasing ocean alkalinity for negative emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(7), 1191-1211.

- Hansen P.J. (2002). Effect of high pH on the growth and survival of marine phytoplankton: implications for species succession. *Aquatic microbial ecology*, 28(3), 279-288.
- Hinga K.R. (2002). Effects of pH on coastal marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 238, 281-300.
- Langer G., Markus Geisen, Karl-Heinz Baumann, Jessica Kläs, Ulf Riebesell, Silke Thoms, and Jeremy R. Young. 2006. "Species-Specific Responses of Calcifying Algae to Changing Seawater Carbonate Chemistry." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7 (9). <https://doi.org/10.1029/2005GC001227>.
- Langer G., G. Nehrke, I. Probert, J. Ly, and P. Ziveri. 2009. "Strain-Specific Responses of *Emiliania Huxleyi* to Changing Seawater Carbonate Chemistry." *Biogeosciences* 6 (11): 2637-46. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2637-2009>.
- Taucher Jan, Mathias Haunost, Tim Boxhammer, Lennart T. Bach, María Algueró-Muñiz, and Ulf Riebesell. 2017. "Influence of Ocean Acidification on Plankton Community Structure during a Winter-to-Summer Succession: An Imaging Approach Indicates That Copepods Can Benefit from Elevated CO<sub>2</sub> via Indirect Food Web Effects." *PLOS ONE* 12 (2): e0169737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169737>.

## IL PROGETTO "CLEANKER": CATTURA CO<sub>2</sub> NELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

Martina Fantini

Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza (LEAP s.c.a r.l.) ([martina.fantini@polimi.it](mailto:martina.fantini@polimi.it))

Il progetto di ricerca europeo per la cattura della CO<sub>2</sub> (CCS/U – Carbon Capture and Storage/Utilization), finanziato nell'ambito del programma quadro Horizon 2020, vede il LEAP come coordinatore ed è stato ufficialmente avviato il 1° ottobre 2017 presso la sede piacentina del Politecnico di Milano e durerà quattro anni.

Si tratta del progetto CLEANKER (Clean clinker production by calcium looping process – Produzione di clinker con cattura della CO<sub>2</sub> attraverso la tecnologia del calcium looping), una iniziativa ambiziosa e affascinante che, se le aspettative saranno confermate, potrebbe rappresentare un'importante innovazione per il settore del cemento verso una ancora maggiore sostenibilità ambientale del processo produttivo. Obiettivo della ricerca è verificare la possibilità di "catturare" l'anidride carbonica generata durante il ciclo produttivo del cemento evitandone il rilascio in atmosfera, perseguendo dunque il fine ultimo di contribuire a contenere l'effetto serra.

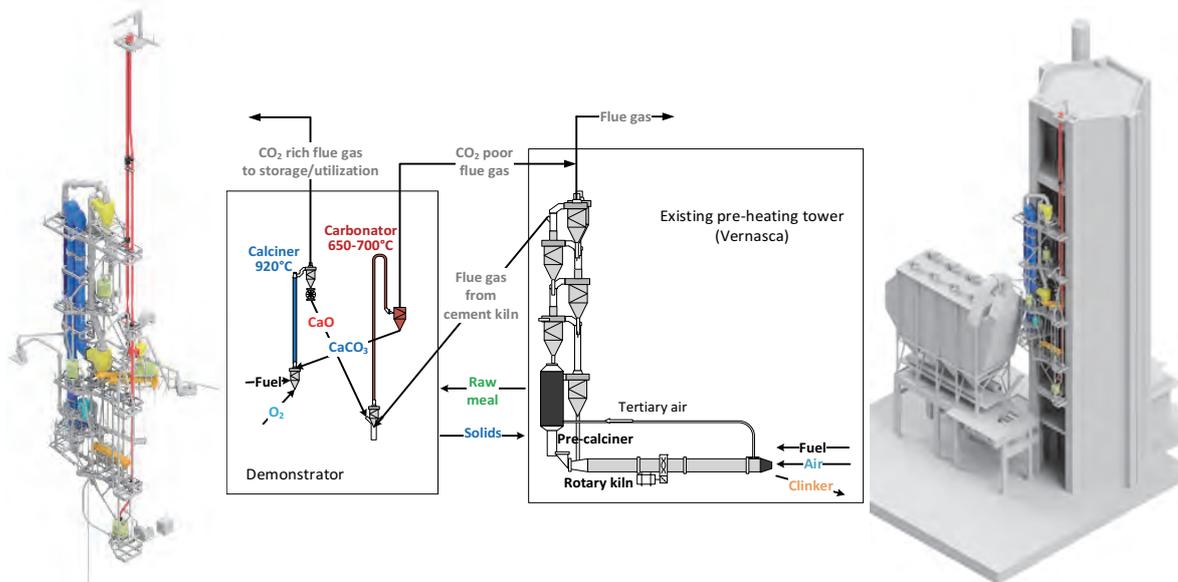
La cattura della CO<sub>2</sub>, associata alla successiva fase di stoccaggio, è un processo chiave per le strategie dell'Unione Europea in tema di contenimento delle emissioni di gas serra. Una volta catturata infatti, ovvero opportunamente isolata come flusso a sé stante a valle del processo produttivo, l'anidride carbonica può essere stoccata in opportuni siti geologici o utilizzata come "materia prima" per la sintesi di prodotti chimici di base o di combustibili.

La tecnologia studiata nell'ambito del progetto CLEANKER, volta a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra in ambito industriale cementiero, utilizzerà il principio del "Calcium looping", ad oggi una delle soluzioni più promettenti per questo settore. Questa tecnologia, fino ad ora sperimentata solo in laboratorio, per la prima volta al mondo viene integrata su scala pilota in un impianto produttivo industriale messo a disposizione dal Gruppo

Buzzi Unicem (stabilimento di Vernasca), partner del progetto.

La ricerca è finanziata all'interno di Horizon 2020 (H2020), il Programma Quadro settennale (2014-2020) con cui la Commissione Europea finanzia le più promettenti attività di ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico in Europa. La decarbonizzazione dell'industria del cemento è prioritaria per l'Unione Europea in quanto gran parte dell'anidride carbonica presente nella corrente gassosa in uscita dal processo di produzione del cemento è ascrivibile alla materia prima utilizzata, il calcare, e non può essere evitata se non evitandone la produzione, soluzione evidentemente impraticabile. Il cemento è prodotto a partire dal cosiddetto "clinker", materiale ottenuto per cottura ad elevata temperatura di una miscela di materie prime costituite principalmente da calcare (carbonato di calcio), che scaldato ad elevate temperature, si scinde naturalmente in ossido di calcio e anidride carbonica (decarbonatazione). Con la tecnologia del Calcium Looping è in teoria possibile produrre cemento catturando oltre il 90% dell'anidride carbonica prodotta: grazie al progetto CLEANKER si potrà giungere ad una stima delle modifiche e degli investimenti necessari per i cementifici esistenti e dei costi operativi, per arrivare a valutare la sostenibilità economica della tecnologia di cattura della CO<sub>2</sub>.

La durata prevista delle attività è di quattro anni. Il primo anno e mezzo è stato dedicato all'ingegneria dell'impianto pilota, il secondo ha visto l'inizio della sua costruzione che verrà ultimata in primavera 2020 e l'ultimo anno e mezzo sarà dedicato alle campagne sperimentali e all'analisi dei risultati. Nei prossimi mesi, si ultimeranno le fasi di installazione degli impianti, di durata complessiva di più di un semestre, che prevedono lavori in quota sulla torre dello stabilimento, necessari per i montag-



Rendering del dimostratore e schema d'impianto semplificato

gi dei componenti principali dell'impianto pilota, nonché delle macchine accessorie e degli allacciamenti elettrici. L'attuale flow sheet dell'impianto, inizialmente abbastanza semplice, è il frutto di oltre 693 disegni e numerose revisioni. La configurazione attuale, mostrata nel rendering di Figura 1, vede oltre 35 tubazioni principali, oltre 75 giunti di espansione per le compensazioni termiche e quasi 190 dispositivi di misura.

Il 15 e il 16 Maggio 2020 si terrà, presso lo stabilimento di Vernasca, l'inaugurazione del dimostratore che coinvolgerà sia gli stakeholder, a livello europeo, legati al mondo del cemento, che le comunità locali.

**Progetto CLEANKER in numeri:** data di avvio: 1 ottobre 2017; durata totale progetto: 48 mesi; budget totale: € 9.237.851,25; Contributo EU: € 8.972.201,25; 13 partner: LEAP (coordinatore), Buzzi Unicem, CSIC (Spagna), Italcementi, IKN (Germania), Università di Lappeenranta (Finlandia), Politecnico di Milano, Quantis (Svizzera), Università di Tallin (Estonia), Università di Tsinghua (Cina), Università di Stoccarda (Germania), ECRA – European Cement Research Academy/VDZ (Germania), Associazione Amici della Terra; per altre informazioni: [www.cleanker.eu](http://www.cleanker.eu).

**Contenuto innovativo del progetto:** dimostrare la fattibilità del processo integrato Calcium looping (CaL) ad un grado di maturità tecnologica avanzata (TRL 7: prototipo dimostrativo inserito in ambiente operativo) nei cementifici. Il dimostratore sarà realizzato presso il cementificio di Vernasca (Piacenza), gestito da BUZZI UNICEM.

**Contenuto strategico del progetto:** l'industria del cemento pesa per il 27% sulle emissioni globali di CO<sub>2</sub> nel settore industriale. Secondo la IEA (International Energy Agency) il settore del cemento, per contenere il riscaldamento globale entro i 2°C (IEA 2DS scenario), nel medio periodo dovrà garantire in Europa il maggior contributo in ambito industriale alla riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso tecnologie di cattura e stoccaggio (CCS). La dimostrazione su larga scala, inoltre, è indicata dalla Energy Roadmap 2050 della UE come un fattore chiave per il futuro delle tecnologie CCS.

**Obiettivi tecnico-economici dell'impianto dimostrativo:** fra i principali obiettivi dell'impianto dimostrativo CLEANKER vi è il raggiungimento di un'efficienza di cattura della CO<sub>2</sub> superiore al 90%, contenendo entro il 20% l'incremento dei consumi elettrici rispetto ad un impianto di riferimento senza cattura ed entro il valore di 25 €/t l'aumento del costo del cemento prodotto.

**LEAP:** LEAP – Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza – è una società consortile partecipata dal Politecnico di Milano, dall'Università Cattolica del Sacro Cuore, da enti territoriali piacentini e da imprese. LEAP svolge attività di ricerca, consulenza e servizi nel settore dell'Energia e dell'Ambiente. LEAP è parte della Rete Alta Tecnologia dell'Emilia-Romagna e del Tecnopolo di Piacenza.

Altre informazioni sono reperibili al sito web: [www.leap.polimi.it](http://www.leap.polimi.it).

# RESOCONTO DELLA VISITA TECNICA ALLA MINIERA DI OLIVINA DI VIDRACCO (TO)

Mark Matalog<sup>1</sup>, Matteo Ferrero<sup>2</sup>, Stefano Caserini<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Nuova Cives srl, Vidracco (TO).

**Sommario** – L’articolo riporta un resoconto della visita tecnica alla miniera di olivina di Vidracco, effettuata per conoscere le modalità di estrazione, lavorazione e i campi di applicazione dell’olivina, fra cui quello di particolare interesse nell’ambito della mitigazione del cambiamento climatico, la rimozione accelerata di CO<sub>2</sub> tramite il processo di “enhanced weathering”. La trattazione comprende la descrizione dell’attività della miniera dal punto di vista tecnico e di processo, le tecnologie utilizzate, e il contesto internazionale di produzione di olivina, ed alcune considerazioni ambientali ed economiche.

**Parole chiave:** olivina, miniera, CO<sub>2</sub>, mitigazione, estrazione.

## REPORT OF TECHNICAL VISIT AT VIDRACCO (TO) OLIVINE MINE

**Abstract** – The paper reports a summary of the technical visit to the Vidracco olivine mine, carried out to gain knowledge about the methods of extraction, processing and fields of application of olivine, including the one of particular interest for climate change mitigation, the accelerated removal of CO<sub>2</sub> through “enhanced weathering”. The discussion includes a description of the mine’s activity from a technical and process point of view, the technologies used, and the international context of olivine production, as well as some environmental and economic considerations.

**Keywords:** olivine, mine, CO<sub>2</sub>, mitigation, extraction.

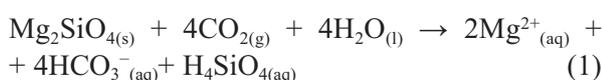
### 1. INTRODUZIONE

Il 25 novembre 2019 si è svolta la visita tecnica di 30 studenti del corso di “Mitigazione dei cambiamenti climatici” del Politecnico di Milano alla miniera di olivina di Nuova Cives srl in località Crose a Vidracco (To).

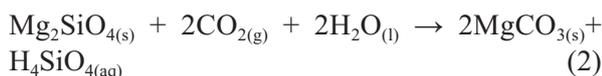
Il motivo di interesse per la miniera è legato al fatto che l’olivina, un silicato di ferro e magnesio (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, è proposta a livello internazionale come materiale per rimuovere biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) in atmosfera tramite un processo di “enhanced weathering” (Hangx et al., 2009; Hartmann et al., 2013; Meysman, Montserrat et al 2017; Stre-

fler et al., 2018). Si tratta dell’accelerazione del naturale sequestro di CO<sub>2</sub> da reazioni con le rocce minerali; può essere ottenuto spargendo grandi quantità di materiale polverizzato (come l’olivina) in aree calde e umide.

L’olivina (il materiale più considerato perché ampiamente disponibile) reagisce con H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> formando bicarbonati solubili:



Un’altra reazione prevede la precipitazione di carbonato di magnesio:



Mentre nel caso (1) una mole di olivina reagisce con 4 moli di CO<sub>2</sub> (quindi 1 t di olivina reagisce con 1,25 t di CO<sub>2</sub>) nel secondo caso l’efficienza è minore.

L’olivina ben polverizzata esposta agli agenti atmosferici umidi e caldi si dissolve completamente in pochi anni, ed è proposta come una strategia per la rimozione di CO<sub>2</sub> dall’atmosfera.

La velocità di reazione dipende dalla granulometria (superficie esposta), dalla temperatura, dalla disponibilità di acqua. Il caso più favorevole di applicazione è quello di sabbia di battigia di spiagge tropicali.

### 2. LA MINIERA DI VIDRACCO

La miniera di Vidracco (che si estende anche su due comuni limitrofi) è una miniera a cielo aperto di peridotite lherzolitica, un tipo di olivina (Figura 1). L’olivina estratta è un silicato di magnesio, con una durezza fra 6 e 7 nella scala di Mohs, assenza di silice libera cristallina, asbesto e componenti considerati tossici e nocivi. Ciò determina importanti applicazioni del prodotto finale in differenti campi industriali da un lato, dall’altro anche importanti analisi circa il consumo di energia elettrica per la sua frantumazione.

L’attività della miniera è suddivisa in più fasi: abbattimento del minerale con uso di esplosivo, estra-

\* Per contatti: Via Golgi 39, 20133 Milano. mark.matalog@gmail.com



*Figura 1 – Una porzione della miniera di olivina di Vidracco*

zione del materiale (smarino), frantumazione con frantoio a mascelle e macinazione finale con mulini a cono e centrifughi ad asse verticale su vari livelli, vagliatura con separazione delle frazioni sterili (ricche in minerali alterati di Olivina) e successiva classificazione con separatori a vento (microclassificatori) con lavaggio ad aria delle sabbie ed abbattimento delle polveri con filtri a maniche per ottenere differenti granulometrie in base alla destinazione d'uso.

La capacità produttiva dell'impianto primario è pari a 300-350 t/h, mentre la capacità produttiva dell'impianto di selezione e macinazione finale è di 100-150 t/h.

### **2.1. Attività di estrazione**

L'attività di estrazione si basa sull'utilizzo di appositi macchinari funzionanti a gasolio (quindi con emissioni di CO<sub>2</sub>) e con particolari sistemi di abbattimento con utilizzo di esplosivo. Le volate di mina vengono fatte esplodere con utilizzo di detonatori microritardati fra un foro e l'altro al fine di ridurre l'impatto ambientale dovuto a vibrazioni e rumore nei confronti dei recettori sensibili delle aree limitrofe all'area di concessione mineraria, gli abitanti di Vidracco e Baldissero.

Le concessioni per l'attività di scavo sono date dalla regione (su delega dello Stato) e l'intera attività di estrazione e lavorazione è sottoposta a Valutazione di Impatto Ambientale sulla base di progetti di durata massima normalmente quindicinale con scadenze intermedie quinquennali. Il prossimo rinnovo è per il periodo 2021-2026. L'attuale produzione dell'impianto è circa il 50-60 % della capacità produttiva.

La distanza del giacimento e dell'impianto dai porti d'imbarco rendono l'olivina italiana spesso

non competitiva rispetto all'olivina prodotta in Norvegia, in Turchia e/o alla dunita spagnola i cui siti estrattivi sono limitrofi al mare e consentono la spedizione di grossi quantitativi alla rinfusa via nave.

### **2.2. Il giacimento**

Il giacimento: la concessione mineraria copre un'area di 125 ha. Il giacimento minerario consta di una volumetria di olivina a vista di oltre 100 milioni di metri cubi. L'attività è iniziata negli anni '60 del secolo scorso, e da allora sono stati estratti circa 5 milioni di metri cubi. Analisi effettuate sul suolo prevedono che sotto la volumetria sopracitata sono presenti cunei sotterranei di dimensioni che possono essere anche superiori.

La parte limitrofa dell'affioramento roccioso, a nord est del giacimento, presenta una parziale alterazione del minerale con aumento dell'acqua di cristallizzazione e parziale e/o totale trasformazione a serpentino per cui tale area, pur essendo ricompresa nel perimetro della Concessione Mineraria, non è oggetto di attività estrattiva.

La presenza di alcune famiglie di discontinuità nell'ammasso roccioso richiede una particolare accuratezza nell'attività di abbattimento ed estrazione e lo studio di nuove strategie di scavo per evitarle. Questo determina passaggi a volte stretti per la mobilità dei diversi tipi di macchinari.

L'attuale autorizzazione prevede una massima capacità di estrazione annuale del giacimento pari a circa 100.000 m<sup>3</sup> di olivina. Attualmente l'estrazione annuale ammonta ad una quantità di circa 50.000 m<sup>3</sup>.

### **2.3. L'impianto**

L'impianto di lavorazione del minerale si compone di una tramoggia in cui i dumper scaricano il tout venant con i blocchi di roccia di olivina - di dimensione massima di 1 metro cubo. Un alimentatore primario a canali vibranti fa passare il minerale dapprima su uno sgrossatore ed un vaglio vibrante al fine di separare le parti sterili dovute a pietrisco e terriccio e, successivamente, alimentano un frantoio primario con movimento a doppia ginocchiera che frantuma le frazioni più grosse fino ad una granulometria di 0-30 cm (Figura 2).

Il prodotto frantumato, tramite dei nastri trasportatori coperti (per evitare che, nei giorni di pioggia, i frammenti di olivina vengano bagnati ed evitare poi di doverli asciugare sprestando altra energia e



Figura 2 – Accumulo di prodotto frantumato

quindi aumentando i costi; e per contenere eventuali rilasci di polveri in atmosfera) viene sottoposto ad una successiva vagliatura per eliminare ulteriori impurezze e stoccato in un silo polmone per alimentare il secondo gruppo di frantumazione che, tramite un granulatore a cono, riduce la pezzatura ad una frazione 0-80 mm. Un particolare vaglio orizzontale seleziona il minerale frantumato separando la frazione di riciclo superiore a 80 mm, un prodotto finito ed un semilavorato. Il prodotto semilavorato frantumato viene convogliato in uno stoccaggio polmone coperto sotto di cui passa un tunnel dotato di canali estrattori vibranti che tramite un nastro trasportatore inviano il semilavorato verso l'impianto di macinazione finale, classifica, separazione e stoccaggio prodotti finiti. L'impianto di macinazione finale prevede tre successivi passaggi in mulini a cono e mulini centrifughi ad asse verticale, la successiva vagliatura e classifica con speciali vagli a nutazione ellittica in successione per ottenere diverse frazioni tra 0,1 mm e 6 mm.

Tutto il prodotto, sia durante la macinazione che la classifica, è sottoposto a lavaggio forzato ad aria. Le polveri aspirate vengono successivamente classificate con una batteria di separatori a vento (micro-classificatori) e cicloni. Infine, le frazioni micronizzate vengono abbattute con l'utilizzo di filtri a tessuto.

I prodotti ottenuti (granelle, sabbie, sabbie fini, ventilati e micronizzati) vengono stoccati in silo metallici per la vendita diretta alla rinfusa o la successiva preparazione in sacchi e sacconi (big bag) e pallettizzazione.

Il prodotto finale è sempre sottoposto più volte all'anno ad analisi spettroscopiche per garantire al-

l'utenza la qualità e la sicurezza del prodotto (ovvero massima impurezza pari all'0.1%). Si garantisce inoltre il rispetto e la tutela per l'ambiente e per i lavoratori garantendo l'assenza di asbesto e silice libera cristallina.

#### 2.4. Utilizzi

Principalmente l'olivina prodotta è venduta per uso in metallurgia e siderurgia.

Nelle acciaierie a ciclo integrale (ad esempio l'Ilva di Taranto) l'olivina viene impiegata quale scorificante fluidificante e correttore dell'indice di basicità. Nelle acciaierie elettriche l'olivina viene utilizzata per la chiusura del foro di colata dei forni elettrici dotati di sistema EBT (Eccentric Bottom Tapping) e nelle colonne di colata. Nelle fonderie l'olivina ha il doppio vantaggio di non contenere silice libera cristallina e, grazie alla sua bassa dilatazione termica lineare e alle caratteristiche basiche, di evitare la formazione di difetti nelle fusioni di acciaio al manganese.

L'olivina viene inoltre utilizzata quale abrasivo per la sabbatura a getto libero, il taglio a getto d'acqua, le pavimentazioni industriali, la produzione di vernici, nei refrattari, nella produzione di guaine impermeabilizzanti per la sua duplice capacità di essere radiopaca ai raggi ultravioletti e di trattenerne la CO<sub>2</sub>.

Recentemente l'olivina è stata impiegata per la produzione di lana di roccia minerale al posto del minerale basaltico per la resistenza alle alte temperature; per la formazione del letto di sabbia dei forni a letto fluido (sia circolanti che bollenti) per la sua alta capacità termica e la resilienza meccanica. Non ultima quale pietrisco ferroviario "ballast" per le nuove linee ferroviarie ad alta velocità. Le frazioni considerate "sterili" più povere in olivina sono poi utilizzate per la realizzazione di sotto manti stradali.

Uno dei punti focali dell'olivina prodotta nei giacimenti italiani è la competitività internazionale. In Europa i tre più grandi giacimenti di estrazione di olivina sono localizzati in Norvegia, Spagna (a La Coruña – a circa 10 km dal porto) ed in Turchia (a circa 20 km dal porto di Iskenderun) ove vengono estratte quantità elevatissime di olivina pari a 6-8 milioni di tonnellate/anno. L'estrazione in Norvegia, oltre a riguardare un minerale di altissima purezza, è situata direttamente nei fiordi, quindi con facile accesso al trasporto marittimo, con evidenti vantaggi sui costi di trasporto. La miniera di Vidracco dista invece circa 200 km circa dal porto di



Figura 3 – Prodotto frantumato di granulometria sub-micronica

Genova/Savona, e quindi ha costi di logistica certamente maggiori (in aggiunta a quelli ambientali che potrebbero essere stimati in termini di CO<sub>2</sub> equivalente con una analisi LCA “from cradle to grave”, ovvero dall'estrazione fino allo smaltimento finale del materiale esaurito; oppure con un approccio più semplificato “from cradle to gate”, nel caso in cui si consideri un'analisi LCA a partire dalla fase di estrazione a quella di distribuzione, qualora non sia facilmente attribuibile l'emissione di CO<sub>2</sub> equivalente in funzione delle diverse attività metallurgiche e siderurgiche). Da queste considerazioni ne consegue che i norvegesi e gli spagnoli e i turchi possono vendere l'olivina, franco porto di destinazione, in grosse quantità ad un prezzo potenzialmente più competitivo rispetto all'olivina della miniera di Vidracco.

Il prezzo di produzione dell'olivina cresce con la riduzione della granulometria, perché i costi di produzione richiedono grandi quantità di energia per la frantumazione e macinazione. L'impianto di Vidracco è in grado di raggiungere dimensioni minime pari a 20 micron; le granulometrie massime commercializzate sono le frazioni 30-60 mm per pietrisco ferroviario.

### 3 ALCUNE CONSIDERAZIONI AMBIENTALI ED ECONOMICHE

Una valutazione dell'effettiva riduzione di CO<sub>2</sub> derivante dell'utilizzo dell'olivina, o di altri benefici o impatti ambientali, non può che basarsi sull'analisi del ciclo di vita (LCA).

Pur se 1 tonnellata di olivina è sufficiente per rimuovere 1,25 tonnellate di CO<sub>2</sub> atmosferica, la reale rimozione di CO<sub>2</sub> sarà inferiore, in quanto si deve considerare l'utilizzo di gasolio per i macchinari, di mine esplosive e dei trasporti a lunga distanza necessari. Sebbene l'utilizzo di olivina frantumata per rimuovere CO<sub>2</sub> atmosferica possa sembrare una tecnologia poco efficace, a causa di tutti i processi che ne riducono il potenziale di rimozione poiché essi stessi producono CO<sub>2</sub>, si può pensare, in prospettiva, di accoppiarla con un sistema integrato sostenibile che produce un surplus di energia inutilizzata, riducendo così le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alla fase energivora di frantumazione.

L'insieme dei macchinari per l'estrazione e i camion per la distribuzione funziona a gasolio. In totale in stabilimento sono installati motori elettrici per circa 2000 kW. Il consumo totale annuale di energia elettrica è pari a circa 850-1000 MWh/anno, con un consumo complessivo pari a circa 5-6 kW/t prodotto.

L'incidenza di costo dell'energia elettrica è di circa 0,75 €/t, a cui si aggiunge un costo di perforazione e sparo, pari a circa 2 €/t, costi produttivi (frantumazione, vagliatura, ecc) di 10-12 €/t (a seconda della granulometria), per un costo totale produttivo di 13-15 €/t di olivina.

### 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Hangx S.J.T., Spiers C.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.
- Hartmann J., West A.J., Renforth P., Kohler P., De La Rocha C.L., Wolf-Gladrow D.A., Durr H.H. and Scheffran J. (2013) Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification *Rev. Geophys.* 51 113-49.
- Meysman F.J.R., Montserrat F. (2017) Negative CO<sub>2</sub> emissions via enhanced silicate weathering in coastal environments. *Biol. Lett.* 13: 20160905.
- Strefler J., Amann T., Bauer N., Kriegler E. and Hartmann J. (2018) Potential and costs of carbon dioxide removal by Enhanced weathering of rocks. *Environ. Res. Lett.*, 13, 034010.

# INFORMAZIONI DALLE AZIENDE

## LA STORIA DI UNA DISCARICA CONTESTATA E DI UNA PICCOLA VITTORIA

**Marcopolo e il viaggio nel ciclo produttivo costituendo economie circolari in ambito della decarbonizzazione: l'impianto di distruzione del biogas nocivo di discarica producendo energia verde a borgo San Dalmazzo (CN)**

Nel 1999, il Consiglio di Amministrazione della discarica di San Nicolao di Borgo San Dalmazzo, presieduto dall'allora neo-amministratore Livio Lanzavecchia, aveva come scopo principale l'ampliamento "della raccolta differenziata, per consentire la completa bonifica della zona, un monitoraggio continuo all'interno della discarica, ma soprattutto l'utilizzo di una possibile fonte di inquinamento come risorsa energetica, con beneficio dal punto di vista ambientale".

Nello stesso anno, a seguito di gara, l'Azienda Cuneese Smaltimento Rifiuti (ACSR), ha assegnato il diritto di bonifica con recupero energetico del biogas nocivo alla società Marco-

polo Engineering S.p.A. di Borgo San Dalmazzo (CN).

Antonio Bertolotto, amministratore unico dell'azienda, aveva sottolineato: "Lo scopo che ci impegniamo a conseguire, è di favorire la bonifica del sito discarica dal biogas nocivo in un periodo relativamente breve, di consentire qualità dell'area stessa eliminando l'inquinamento atmosferico e il danno all'ozono causato dalla componente metano, senza fastidiosi odori e garantendo così una sicurezza ambientale totale." In quanto, come ormai scientificamente dimostrato, le torce, oltre a bruciare un "FATTORE ECONOMICO" non garantiscono la distruzione totale del biogas nocivo. Attuando questa bonifica del biogas nocivo, oltre ai sostanziosi investimenti e costi gestionali, la Marcopolo ha pagato in media circa 200.000 euro/anno come royalties all'ACSR per un totale di circa 3 milioni di euro, contribuendo anche al mantenimento dei costi generali dell'ACSR, ottenendo naturalmente il giusto utile aziendale, al quale si è aggiunto un altro grande utile come il contributo al contenimento della tariffa rifiuti dei Comuni associati.

L'impianto di distruzione del biogas nocivo con recupero energetico, aveva un motore funzionante a biogas accoppiato ad un alternatore per la produzione di energia elettrica con una potenza iniziale di 470 kWh che è aumentata a 600 kWh nel giro di un mese. Marcopolo, infatti, produce energia alternativa a valle di un processo di bonifica del biogas nocivo (una cinquantina di discariche bonificate ad oggi sia in Italia che all'estero e in buona parte ancora in piena bonifica) con un processo controllato e virtuoso di controllo delle aree a rischio ambientale (attività presente negli obiettivi di "Kyoto": "non solo energie rinnovabili, ma effetti più ampi poiché si bonifica e si produce energia").

Una piccola vittoria, un compromesso con l'indispensabile industrializzazione e consumismo che purtroppo hanno usato e continuano a utilizzare senza cura le risorse del nostro Pianeta, dimenticando che tutto ciò si ripercuoterà su di noi e sulla nostra progenie.

**Marcopolo Engineering S.P.A.**

Sistemi Ecologici  
www.marcopolo-e.com  
info@marcopolo-e.com



## PRESENZA DEI RIFIUTI CELLULOSICI ALL'INTERNO DELLA FILIERA DEL RECUPERO ORGANICO ANALISI 2019

La raccolta differenziata dello scarto di cucina è caratterizzata dalla presenza di materiali a matrice cellulosa che sono riciclabili negli impianti industriali di compostaggio o integrati di Digestione Anaerobica & Compostaggio. Tradizionalmente infatti una parte ridotta del rifiuto celluloso viene conferita insieme alla frazione umida del rifiuto organico, soprattutto laddove la frazione cellulosa risulta aggregata in maniera eccessiva agli scarti alimentari oppure eccessivamente bagnata. Per definire qualità e quantità dei rifiuti cellulosi conferiti con l'umido a partire dal 2013 è stato siglato un Protocollo di Intesa tra CIC - Consorzio Italiano Compostatori e COMIECO -



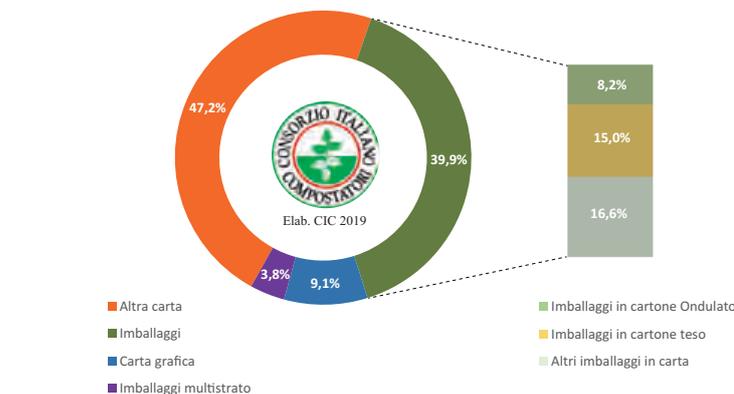
Impianto di distruzione del biogas da discarica con il suo utilizzo per produrre energia elettrica verde sito in Borgo San Dalmazzo CN

Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica, con lo scopo di inquadrare e caratterizzare la presenza delle diverse tipologie di scarti cellulósici all'interno della filiera del recupero dello scarto umido. Questo accordo ribadisce l'impegno dei consorzi nella gestione efficace dei rifiuti, le cui filiere sono quelle maggiormente rappresentate nella raccolta differenziata di rifiuti urbani in Italia: l'umido rappresenta il 27% del totale in peso dei rifiuti raccolti in modo differenziato, carta e cartone il 19,5% (Fonte ISPRA, Rapporto Rifiuti 2019). L'indagine quali-quantitativa stima per il 2019 un quantitativo di frazioni cellulósiche conferite all'interno della raccolta differenziata della frazione umida di circa 80.000 tonnellate con un'umidità di circa il 30% dovuta alla contaminazione dell'umido. Tale valore, riportato ad un'umidità del 10% (comparabile con l'impresso al consumo), porta la stima al riciclo in compost di circa 66.000 tonnellate di rifiuti cellulósici. Di questa frazione sono circa 26.000 tonnellate gli imballaggi in cartone ondulato, cartone teso e altri imballaggi in carta, una quantità minima comparata a quanto annualmente viene riciclato nelle cartiere, quasi 4 milioni di tonnellate di imballaggi usati.

Si conferma pertanto che lo sviluppo e l'immissione sul mercato di materiali di imballaggio e di specifici imballaggi che abbiano caratteristiche di compostabilità (secondo la norma tecnica europea UNI EN 13432:2002) possa favorire l'effettivo riciclo organico di quei manufatti cellulósici che, non potendo essere conferiti nella raccolta della carta perché contaminati da scarti alimentari, vengono conferiti nella filiera dell'umido e possa favorire l'efficienza di processo degli impianti di compostaggio che scongiurano la presenza di materiali non compostabili che andrebbero ad aumentare gli scarti.

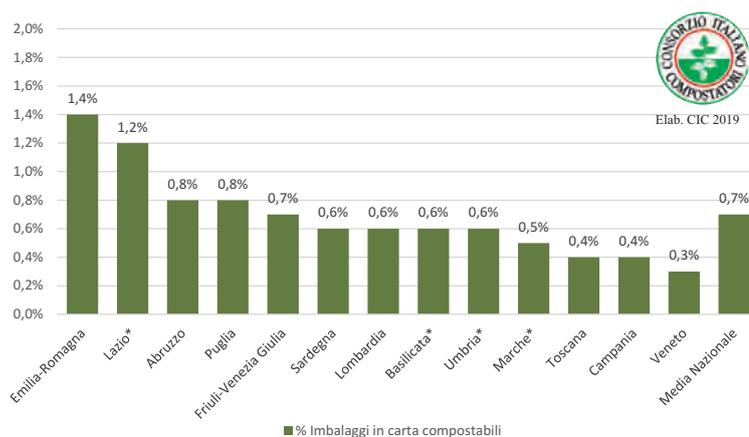
### Dettaglio delle analisi effettuate

Nell'ambito dell'Accordo programmatico CIC-Comieco è stato previsto per ogni annualità un calendario di indagini merceologiche secondo la metodica descritta nell'Allegato B della DGRV n. 568/05 della Regione Veneto sulla frazione umida da raccolta differenziata



**Figura 1**

Tipologie di materiali in cellulosa all'interno della frazione umida del rifiuto organico (dato in % p:p dell'umido) – anno 2019. CIC/Comieco



**Figura 2**

Valore medio percentuale per regione degli imballaggi cellulósici (cartone teso, cartone ondulato e altri imballaggi in carta) nella frazione umida del rifiuto organico (dato in % p:p dell'umido) – anno 2019. CIC/Comieco

dei rifiuti urbani. Per l'effettuazione delle analisi merceologiche i manufatti cellulósici sono stati classificati in imballaggi in cartone ondulato, imballaggi in cartone teso, altri imballaggi, carta grafica, altra carta (tissue, ovvero tovaglioli, fazzoletti, carta cucina).

Nel 2019 sono state effettuate 323 indagini sulla frazione organica proveniente da 13 regioni italiane (in particolare da 32 differenti province) e conferite in 22 tra impianti di trattamento biologico e piattaforme di trasferimento distribuiti sul territorio nazionale. Gli impianti oggetto delle analisi merceologiche sono collocati in 8 regioni italiane: Lombardia, Emilia-Romagna, Friuli-Venezia Giulia, Puglia, Toscana, Veneto e nel 2019 sono stati presi in considerazione anche impianti in Umbria e Sardegna. Presso gli impianti di trattamento del rifiuto oggetto delle indagini possono essere recuperate quasi 1,7M t/a di rifiuti organici (fonte ISPRA, Rapporto Rifiuti 2019), un dato pari al 23% della capacità di tratta-

mento delle regioni di afferenza. Tre degli impianti considerati hanno una capacità di trattamento pari ad almeno il 30% della capacità complessiva di tutti gli impianti di trattamento biologico della regione di ubicazione.

L'evoluzione delle raccolte differenziate del rifiuto organico continua ad essere strettamente correlata allo sviluppo dell'impiantistica di recupero. Negli impianti di compostaggio sono trattate 4 milioni di tonnellate, circa 3,8 milioni di tonnellate sono trattate in impianti di trattamento integrato anaerobico/aerobico (fonte elaborazione CIC su dati ISPRA – Rapporto Rifiuti 2019).

La progressione dei quantitativi di rifiuti urbani raccolti in maniera differenziata ha determinato, negli anni, una crescente richiesta di impianti di trattamento, soprattutto relativamente alla gestione della frazione organica. Sulla base delle indagini risulta che nel 2019 le frazioni cellulósiche rappresentano complessivamente l'1,67% (percentuale in peso, valore medio)

dell'umido raccolto, +18% rispetto alle rilevazioni del 2018. La quota dei soli imballaggi è invece pari allo 0,67% della frazione umida, con un aumento rilevato del 19% rispetto al 2018.

La composizione dei materiali celluloseici rilevati nella frazione umida del rifiuto organico evidenzia una predominanza della frazione costituita da tovaglioli e altri tessuti celluloseici ("Altra Carta" 47,2%). Complessivamente gli imballaggi rappresentano circa il 40% delle frazioni celluloseiche monitorate, di cui la maggior parte è classificata come "altri imballaggi in carta" (16,6%); gli imballaggi in cartone ondulato ed in cartone teso rappresentano rispettivamente il 15% e l'8,2% delle frazioni celluloseiche nell'umido.

Le tre frazioni di imballaggio celluloseico monitorate (imballaggio in cartone teso, imballaggio in cartone ondulato e altri imballaggi in carta) registrano una media nazionale pari a 0,7%, con differenze a livello regionale, portando sopra l'1% l'Emilia-Romagna (1,4% della FORSU) e il Lazio (1,2% della FORSU). In 9 delle 13 regioni monitorate la percentuale di imballaggi in carta e cartone è compresa tra lo 0,5% e l'1%. In Toscana, Campania e Veneto, invece, la percentuale di imballaggi in carta e cartone è inferiore allo 0,5%. In termini assoluti e stimando un quantitativo di raccolta differenziata della frazione umida pari a 5 milioni tonnellate per il 2019 (in base ai dati di evoluzione dei quantitativi di RD della frazione organica degli ultimi anni) la filiera dell'umido intercetta circa 84.000 tonnellate di materiali a base celluloseica.

Questo valore risulta sovra-stimato per effetto dell'assorbimento di liquido conferito insieme alla frazione organica, pertanto è stato rielaborato a valle della campagna di analisi condotta per la determinazione dell'umidità delle principali categorie merceologiche in esame (il tasso di umidità medio per il cartoncino teso è pari a 29%, per il cartone ondulato 27%, e per gli altri imballaggi in carta 30%) e considerando il valore dell'umidità intrinseca dei manufatti immessi al consumo (pari al 10%).

Ne risulta un peso pari a circa 66.000 tonnellate di materiali celluloseici nella

FORSU per il 2019 di cui circa 26.000 t sono imballaggi. Il valore, pur essendo limitato, è in costante crescita, come in crescita è il quantitativo di frazione umida trattata: nel 2013 sono state trattate 3,1 milioni di tonnellate, nel 2019 si stima che si superino i 5 milioni di tonnellate.

Per informazioni: **Comieco**, Cons. Naz. Recupero e Riciclo degli imballaggi a base Celluloseica  
[www.comieco.org](http://www.comieco.org)



## ESSICCATORE PER FANGHI NEW-ECO-TEC

La NEW-ECO-TEC di Mühldorf (Baviera) è uno dei maggiori e più moderni costruttori di essiccatori a doppio nastro per fanghi civili ed industriali caratterizzati dal fatto di essere costruiti in container componibili ed adatti ad essere montati al aperto senza bisogno di apposti locali o di coperture. Questo sistema modulare garantisce una facilità di montaggio e la possibilità di ampliare in seguito l'impianto se dovesse aumentare la quantità di prodotto da trattare in modo semplice ed economico aggiungendo semplicemente altri moduli sempre in container.

La sua tecnologia è brevettata col nome di NEWtainer®; calore di recupero da generatori di corrente (BHKW) ed altri processi termici vengono utilizzati per l'essiccamento.

NEWtainer® sono impianti di essiccamento molto flessibili per essiccare biomasse, fanghi e materiali agricoli o industriali in modo modulare integrati in container marini commerciali. Il NEWtainer® essicca con la sua speciale costruzione e la sua flessibile alimentazione dell'aria i prodotti più diversi in molti campi o branche come per esempio agricoltura, biogas, legno, fanghi, valorizzazione o riciclo, alimentari e prodotti chimici così come compost.

Il NEWtainer® è sviluppato e costruito per impieghi industriali con lunga durata ed alte sollecitazioni. Vengono forniti container standardizzati di diverse dimensioni che fungono da alloggiamento trasportabile resistente agli agenti atmosferici.

I Vantaggi del sistema NEWtainer®:

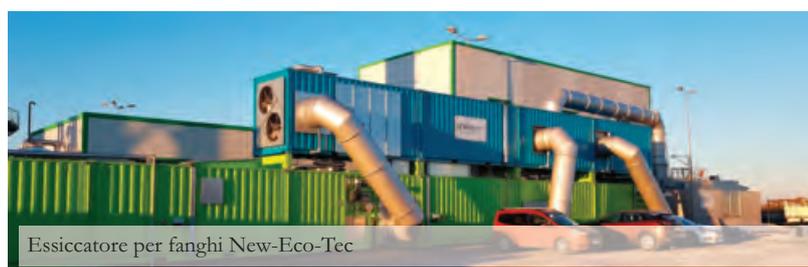
- In container modulari spostabili ed ampliabili in ogni momento.
- Rivestimento interno resistente alla corrosione.
- Isolamento integrato.
- Alimentazione dell'aria dall'alto in basso e possibilità di ricircolo integrale dell'aria.
- Nastri in poliestere speciale resistente alle alte temperature.
- Costruzione compatta.
- Minimo tempo di montaggio.
- Resistente alle intemperie per sistemazione all'aperto senza ulteriori costruzioni.
- Costruito in Germania in uno stabilimento modernissimo con componenti di primari produttori.

NEW-ECO-TEC nel suo stabilimento ha montato un essiccatore a disposizione dei clienti per prove o per essiccare i loro fanghi.

In Italia, l'Azienda è rappresentata dalla Moreschini Rappresentanze, che da 40 anni propone macchinari di primari costruttori per depuratori civili ed industriali, potabilizzatori ed energie rinnovabili.

*Moreschini Rappresentanze è pioniera in Italia nel trattamento dei fanghi e propone la più vasta gamma di macchinari per l'ispessimento, la disidratazione e l'essiccamento, di qualsiasi tipo di fango civile o industriale.*

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



Essiccatore per fanghi New-Eco-Tec

## AIR LIQUIDE IN CAMPO PER FRONTEGGIARE L'EMERGENZA COVID IN ITALIA

Nel contesto dell'epidemia di Covid-19, Air Liquide è impegnata a rispondere alla crescente necessità di gas medicinali. Il consumo di ossigeno negli ospedali è aumentato in modo significativo, fino a 6 volte nelle regioni più colpite dall'emergenza, poiché la maggior parte dei pazienti con complicanze è trattata con ossigenoterapia. Anche il personale specializzato nelle cure a domicilio è completamente mobilitato, assistendo circa 800 pazienti Covid positivi nelle fasi iniziali o post-acute della malattia.

Air Liquide Sanità Service ha messo in campo l'organizzazione necessaria per soddisfare l'accresciuta domanda, aumentando la fornitura di ossigeno alle strutture sanitarie. Nell'arco di un mese, i team hanno incrementato la capacità di 47 installazioni di ossigeno liquido al servizio delle strutture ospedaliere, tra potenziamento degli impianti esistenti e nuove installazioni. Air Liquide ha anche realizzato ed esteso le tubazioni per la distribuzione dei gas medicali per servire circa 2000 nuovi posti letto. Tra gli interventi più significativi, l'installazione del sistema di tubazioni per la distribuzione dei gas medicali nella nuova unità di terapia intensiva dell'ospedale San Raffaele di Milano, e l'impianto di erogazione dell'ossigeno dell'Ospedale da Campo a Bergamo. L'aumento dei volumi di ossigeno è stato reso possibile anche grazie all'accresciuta capacità produttiva garantita dal personale presente nei siti di produzione, dove i team sono completamente mobilitati per continuare a garantire l'operatività. Anche qualora la domanda dovesse crescere ulteriormente, l'azienda non prevede difficoltà nella produzione e nelle forniture – che avvengono a livello locale – poiché l'ossigeno viene prodotto e fornito a partire dalle 9 grandi unità di separazione dell'aria presenti a livello nazionale.

Air Liquide ha inoltre immesso nel circuito 8.000 nuove bombole per far fronte all'aumento della domanda. Le bombole vengono utilizzate negli ospedali, per le ambulanze, ma anche al domicilio dei pazienti.

VitalAire e Medicasa, le società del Gruppo Air Liquide specializzate nell'assistenza sanitaria a domicilio, stanno mettendo in atto tutti gli sforzi necessari per rispondere a queste richieste attraverso i propri tecnici e professionisti sanitari (Infermieri, Fisioterapisti, Specialisti, Medici, Operatori della sanità sociale). Dall'inizio della crisi, sono stati assistiti a domicilio circa 800 i pazienti Covid-19 con una situazione clinica stabile, dimessi da strutture

ospedaliere o nelle prime fasi della malattia.

Cyrille Ferrachat, Direttore Generale di VitalAire e Medicasa Italia, ha affermato: "Il nostro personale specializzato sta affrontando questa emergenza con estrema professionalità e impegno, avendo dato fin da subito la propria disponibilità ad agire in prima linea assistendo a domicilio i pazienti affetti da Covid e giocando un ruolo importantissimo nell'alleggerire la pressione sulle strutture ospedaliere. Il supporto fornito dai nostri professionisti sanitari, che prestano le cure domiciliari con grande dedizione, è inoltre cruciale per i pazienti fragili che spesso si trovano soli in questo momento di fronte alla

### Air Liquide riconosciuta dal CDP come una tra le aziende più performanti nella lotta ai cambiamenti climatici

Quest'anno Air Liquide ha ottenuto una classificazione di tipo "A", il punteggio più alto assegnato dal CDP. Questo rating riconosce il Gruppo come una delle società più impegnate nella lotta al cambiamento climatico. Nel novembre 2018, il Gruppo ha annunciato i più ambiziosi Obiettivi climatici del settore, tra cui l'impegno a ridurre l'intensità di carbonio del 30% entro il 2025. Il suo approccio globale combina un'azione sui propri asset, al fianco dei suoi clienti e per lo sviluppo di ecosistemi a basse emissioni di carbonio.

Con questa assegnazione, il CDP riconosce una strategia consolidata in favore di una crescita sostenibile. Ne sono esempi lo sviluppo dell'energia a idrogeno e del biometano, e la partecipazione del Gruppo a numerosi progetti innovativi a fianco dei suoi clienti nell'industria metallurgica e petrolchimica.

Ogni anno il Gruppo dedica circa 100 milioni di euro all'innovazione per ridurre la sua impronta di carbonio e quella dei suoi clienti. Più del 40% delle sue decisioni di investimento sono destinate ad affrontare le sfide ambientali e climatiche. Le numerose azioni del Gruppo per promuovere la crescita sostenibile sono regolarmente riconosciute dalle diverse agenzie di rating non finanziarie (MSCI, Sustainalytics, ISS ESG, Ecovadis, ecc.). Il Gruppo è inoltre presente nei principali indici di CSR (Euronext Vigeo Eiris, FTSE4Good, ecc.).

Questo processo annuale di rating non finanziario e di divulgazione dei dati attraverso il CDP è riconosciuto come un riferimento in termini di trasparenza ambientale delle imprese. Nel 2019 oltre 8.400 aziende hanno messo a disposizione del CDP i dati relativi al loro impatto climatico per una valutazione indipendente. Di queste società partecipanti, solo 179, pari a circa il 2%, hanno ricevuto un rating A. Le risposte di Air Liquide al questionario CDP 2019 sono disponibili gratuitamente sul sito web del CDP.



malattia e alla quarantena che ora viene loro richiesto di rispettare”. Brice Fontana, Direttore Generale di Air Liquide Sanità Service, ha affermato: “Di fronte allo scoppio internazionale dell’epidemia di Covid-19, la priorità di Air Liquide rimane la salute e la sicurezza dei suoi collaboratori e dei suoi pazienti. Avendo previsto un accresciuto utilizzo dell’ossigeno, i nostri team hanno aumentato conseguentemente la produzione, le consegne di bombole, le installazioni di ossigeno liquido, nonché i sistemi di tubazioni laddove necessario. Continueremo a monitorare attentamente la situazione man mano che si evolve e ad adattare le misure di conseguenza. I team Air Liquide sono completamente uniti e mobilitati per fronteggiare questa emergenza.”

*L’attività Healthcare di Air Liquide fornisce gas medicali, servizi sanitari a domicilio, prodotti per l’igiene, attrezzature medicali, eccipienti e principi attivi. Nel 2019 ha servito oltre 15.000 ospedali e cliniche e più di 1,7 milioni di pazienti a domicilio in tutto il mondo. L’attività Healthcare del Gruppo ha raggiunto un fatturato di 3,694 miliardi di Euro nel 2019, grazie al supporto dei suoi 16.500 collaboratori. L’attività Home Healthcare di Air Liquide Air Liquide, leader in Europa nel settore delle cure domiciliari, prende in carico, su prescrizione medica, pazienti che soffrono di malattie croniche come la Broncopneumopatia Cronica Ostruttiva (BPCO), l’Apnea del sonno e il Diabete. Questa attività si sviluppa, a complemento delle cure ospedaliere, presso il domicilio del paziente consentendo una migliore qualità di vita ed una riduzione dei costi dei trattamenti. L’attività Home Healthcare rappresenta il 49% dei ricavi dell’attività Healthcare di Air Liquide nel 2019.*

**Air Liquide Italia**

Sabine Robert, Tel. 02.4026362  
Francesca Ficca, Tel. 02.4026513



**Figura 1**  
AUMA Service\_LIVE VIDEO

**AUMA SERVICE LANCIA UN NUOVO SUPPORTO LIVE VIDEO**

*AUMA amplia la propria offerta di servizi lanciando sul mercato AUMA Service Live Video, il nuovo supporto telematico per supervisionare la funzionalità degli attuatori e garantire il funzionamento degli impianti anche da remoto.*

L’attuale situazione di emergenza sanitaria continua a richiedere un importante sforzo alle aziende, in termini di offerta e di gestione delle criticità, per continuare ad offrire servizi utili e immediati ai propri clienti e fornitori in ottemperanza alle normative vigenti.

AUMA Service infatti, grazie ad un sistema di connessione diretto su notebook, smartphone o tablet, consente ad un esperto AUMA di verificare concretamente la problematica riscontrata nell’impianto, intraprendere tutte le azioni necessarie, tra cui un eventuale ordine dei pezzi di ricambio e assistere il cliente nella completa risoluzione del problema. In questo modo le criticità possono essere affrontate da remoto, evitando che il tecnico debba essere fisicamente presente sull’impianto.

Inoltre, grazie al network di assistenza AUMA, è possibile richiedere supporto in ogni parte del mondo, contattan-

do l’assistenza clienti locale o tramite AUMA Assistant App:

(<https://www.auma.com/it/assistenza-supporto/servizi-digitali/auma-assistant-app/>)

e AUMA Cloud:

(<https://www.auma.com/it/assistenza-supporto/servizi-digitali/auma-cloud/>), la piattaforma interattiva che raccoglie e analizza i dati di tutti gli attuatori presenti in un impianto. La disponibilità di questi dati, integrata con una breve descrizione del problema rilevato nell’impianto, consente di ottimizzare i tempi dell’intervento, riducendo così l’inattività degli impianti.

“In questo particolare momento, il nostro obiettivo è quello di continuare ad affiancare i nostri clienti anche nella risoluzione di eventuali problematiche riscontrate in impianto. È fondamentale – continua Andrea Villa, Managing Director di AUMA Italiana – salvaguardare la salute e la sicurezza di tutti, ed è per questo che l’AUMA Service Live Video, si sta rivelando uno strumento valido, innovativo ed efficace.” Un approfondimento sul nuovo supporto AUMA è disponibile online, consultando questo video:

(<https://www.youtube.com/watch?v=kzyUikKBoU8>).

**AUMA Italiana S.r.l. a socio unico**

Tel. 0331.51351

E-mail: [info@uma.it](mailto:info@uma.it)





## L'ULTIMA AUTO A BENZINA

La mobilità sostenibile per il XXI secolo

**Mario Grosso**

Collana Chiavi di lettura, Zanichelli, 2018  
 Pagine: 112, 11,40 €; ISBN: 9788808320902

Viaggeremo su auto e biciclette elettriche, alimentate con l'energia del Sole, che condivideremo con altre persone.

Torniamo a casa la sera con la nostra auto elettrica. La batteria è carica, perché durante il giorno ha immagazzinato l'energia solare dall'impianto fotovoltaico installato sui tetti dell'ufficio. Con il vehicle to home alimentiamo le utenze di casa prelevando energia dalla batteria: televisore, frigorifero e computer funzionano così a energia solare. La mattina dopo andiamo al lavoro con la bicicletta del bike sharing.

Con la app geolocalizziamo quella più vicina. La sblocciamo con lo smartphone e arriviamo a destinazione con poca fatica grazie alla pedalata assistita. Ancora una volta ci muoviamo con l'energia del Sole, che ha alimentato la batteria della bicicletta.

Nel prossimo futuro la nostra vita potrà cambiare in meglio, perché riusciremo a sfruttare in modo più efficiente l'energia rinnovabile. Tante nuove opportunità, con un minore impatto sull'ambiente.



**AIAT** nasce nel 1999 come associazione di laureati e studenti del corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio del Politecnico di Milano. Divenuta in breve tempo uno dei punti di riferimento per le professionalità ambientali in Italia, nel 2008 modifica il proprio Statuto per dare risposta alle molte richieste di adesione ricevute da parte di ingegneri ambientali laureati in altri Atenei e da ingegneri con curriculum accademico e professionale equiparabile a quello dell'Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio. Ad oggi riunisce quindi numerose centinaia di iscritti individuali provenienti da tutto

il territorio nazionale, nonché numerosi soci sostenitori aziendali.

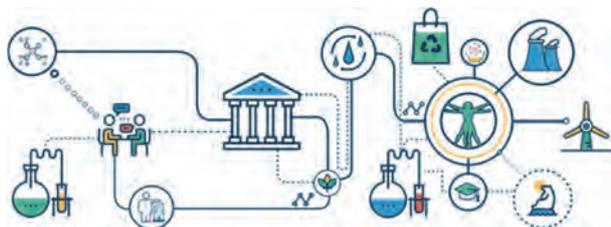
Lo spirito è quello del networking e della condivisione di informazioni professionali, di opportunità lavorative e di formazione. Oltre a veicolare numerose proposte di lavoro per Ingegneri Ambientali, **AIAT** si occupa infatti di definire accordi per l'accesso ad iniziative formative a condizioni agevolate per i propri iscritti. Inoltre molto spesso vengono concertate possibilità di accesso gratuito a corsi o convegni per neolaureati in cerca di occupazione.

In aggiunta alle iniziative di carattere nazionale, molte attività sono portate avanti a livello locale da parte delle Sezioni Territoriali Regionali, che coprono ormai buona parte del territorio italiano.

Oltre ad organizzare convegni dedicati alla figura professionale dell'Ingegnere Ambientale, **AIAT** ne monitora periodicamente la condizione occupazionale mediante un'indagine conoscitiva triennale.

**AIAT** dispone di un Comitato Scientifico, istituito allo scopo di fornire un adeguato supporto tecnico-scientifico al Consiglio Direttivo su questioni di interesse dell'Associazione (richieste di patrocinii, stesura di position papers, ecc.). Dal 2002 **AIAT** è presente anche in Europa tramite l'adesione ad ENEP, il Network Europeo dei Professionisti Ambientali, una realtà che riunisce ormai più di 40.000 professionisti europei dell'ambiente.

*Maggiori informazioni sulle attività dell'Associazione sono disponibili sul sito [www.ingegneriambientali.it](http://www.ingegneriambientali.it)*



Formazione tecnica e scientifica per lo sviluppo sostenibile e l'economia circolare

## IN STREAMING

### PROGRAMMA PRELIMINARE 2020

**In ottemperanza ai decreti del Governo e della Regione Lombardia per il contenimento e la gestione dell'emergenza sanitaria da Covid-19, la Fast rimane chiusa per tutelare la salute dei dipendenti e degli utenti esterni che ogni giorno visitano la nostra sede.**

**5 maggio 2020**

**TERRE E ROCCE DA SCAVO**

Seminario

*Sconto del 10% sulla quota riportata sul programma (cumulabile con gli altri sconti per le iscrizioni multiple)*

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**7 e 14 maggio 2020**

**CONTROLLO E RIDUZIONE DELLE EMISSIONI IN ATMOSFERA DELLE ATTIVITÀ PRODUTTIVE DALLE PMI AI GRANDI IMPIANTI DI COMBUSTIONE**

Corso di aggiornamento normativo, modellistica, tecniche di abbattimento e monitoraggio

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**18 e 25 maggio 2020**

**AIA – AUA DELLE ATTIVITÀ PRODUTTIVE**

Aspetti normativi, tecnici e di controllo anche in considerazione dell'emergenza sanitaria in corso – Analisi di casi pratici.  
Corso

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**IMPIANTI BIOLOGICI DI DEPURAZIONE**

Modulo 3 – Corso avanzato di processo

**11 – 12 maggio 2020**

Modulo 4 – Trattamento e smaltimento fanghi. Nuove disposizioni COVID-19

**27 – 28 maggio 2020**

*Sconto del 10% sulla quota riportata sul programma (cumulabile con gli altri sconti per le iscrizioni multiple)*

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**8 e 15 giugno 2020**

**AMIANTO NEL CANTIERE**

Aspetti gestionali, di bonifica e di smaltimento  
Corso

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**9 – 10 giugno 2020**

**PROGETTAZIONE DI OPERE PER L'INVARIANZA IDRAULICA E IDROLOGICA**

Corso

*Sconto del 10% sulla quota riportata sul programma (cumulabile con gli altri sconti per le iscrizioni multiple)*

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**16 – 17 giugno 2020**

**ACQUE POTABILI – Progettazione e gestione ottimale delle reti di distribuzione**

Corso

*Sconto del 10% sulla quota riportata sul programma (cumulabile con gli altri sconti per le iscrizioni multiple)*

[Programma – Scheda di iscrizione](#)

**18 giugno 2020**

**RIFIUTI PERICOLOSI – Norme, classificazione e gestione anche in riferimento all'emergenza sanitaria COVID-19**

Corso

[Programma in corso di definizione](#)

[Scheda di iscrizione](#)

**23 – 24 giugno 2020**

**PROGETTAZIONE E GESTIONE SISTEMI DI FOGNATURA**

Corso

[Programma in corso di definizione](#)

[Scheda di iscrizione](#)

**8 settembre 2020**

Sala Aries – dalle 14.00 alle 17.45

La progettazione degli impianti idrici di riscaldamento, climatizzazione e idrosanitari negli edifici

Seminario

**11 settembre 2020**

Sala Aries – dalle ore 9.45 alle 13.00

Analisi delle alimentazioni idriche antincendio – Aspetti tecnici relativi ai gruppi di pressurizzazione e ai locali dedicati al loro alloggiamento

Seminario

Fast Ambiente Academy partecipa a **MCE 2020**

<https://youtu.be/WQl1ctQEwm4>

# SUM 2020

5° SIMPOSIO SULL' URBAN MINING E LA CIRCULAR ECONOMY / 18-20 NOVEMBRE 2020 / VENEZIA / **NUOVE DATE!**

## SIMPOSIO

Il SUM è stato riprogrammato a causa dell'emergenza COVID-19. L'evento si svolgerà dal **16 al 20 Novembre** in concomitanza con il Venice 2020 8° Simposio Internazionale sull'Energia da Biomasse e Rifiuti, già in programma dal 16 al 19 Novembre 2020 a **Venezia**, presso la Scuola Grande di San Giovanni Evangelista.

## TEMI

Educazione, partecipazione pubblica aspetti sociali / Trattamenti di valorizzazione di materiali e risorse / Tecnologie per il recupero di materiali / Aspetti economici finanziari / Aspetti normativi e legali / Mezzi e strumenti per il recupero di materiali e risorse / Aspetti critici emergenti...

**Lista completa: [www.urbanmining.it](http://www.urbanmining.it)**



## SUM + VENICE 2020

L'unione dei due simposi offrirà l'occasione per organizzare un evento di riferimento internazionale nel campo dell'economia circolare e del recupero delle risorse dai rifiuti, sia in termini di materiali che di energia.

Nuovi temi di interesse comune! Visita il sito per **conoscere tutte le call**

## INVIO LAVORI

Lo spostamento del Simposio ci consente di riaprire il **call for paper fino al 31 Maggio!** Gli articoli dovranno essere inviati utilizzando il form online disponibile al link:

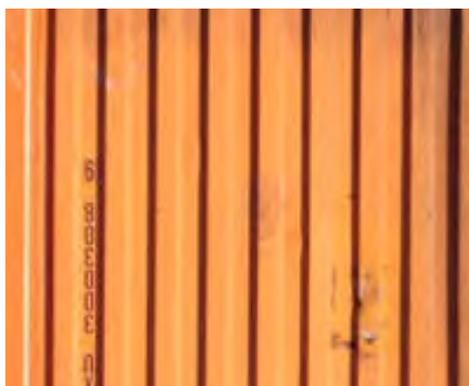
**[www.urbanmining.it/it/call-for-paper](http://www.urbanmining.it/it/call-for-paper)**

Si accettano anche contributi in forma di short paper (3-4 pagine). Lingue ufficiali: italiano e in inglese

## REGISTRAZIONE

La quota di partecipazione comprende: Partecipazione alle sessioni del Simposio / Atti SUM20 / Materiale congressuale / Accesso Wi-Fi / Coffee break / Visita tecnica guidata (trasporto incluso) / Cena di gala

**Quote scontate per iscrizione anticipata e registrazione ai 2 simposi!**



**organizzato da:** IWWG - International Waste Working Group • Università di Padova (IT) • Università di Bologna (IT) / **segreteria organizzativa e informazioni:** EUROWASTE SRL / Via Beato Pellegrino 23 / 35137 Padova / tel: +39 049 8726986 / [info@urbanmining.it](mailto:info@urbanmining.it) / **website:** [WWW.URBANMINING.IT](http://WWW.URBANMINING.IT)

# INVIA IL TUO LAVORO ENTRO IL 31 MAGGIO 2020!





## 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*

CONTATTI: EUROWASTE srl  
via Beato Pellegrino, 23  
35137 Padova (IT) / t +39.049.8726986  
info@venicesymposium.it  
SITO UFFICIALE: [www.venicesymposium.it](http://www.venicesymposium.it)



# VENICE 2020

ORGANIZZATO DA:  
IWWG / INTERNATIONAL WASTE  
WORKING GROUP

SEDE:  
SCUOLA GRANDE SAN GIOVANNI EVANGELISTA  
VENEZIA / 16-19 NOVEMBRE 2020

8° SIMPOSIO INTERNAZIONALE  
SULL'ENERGIA DA BIOMASSE E RIFIUTI

## LE RAGIONI PER CUI NON PUOI MANCARE!

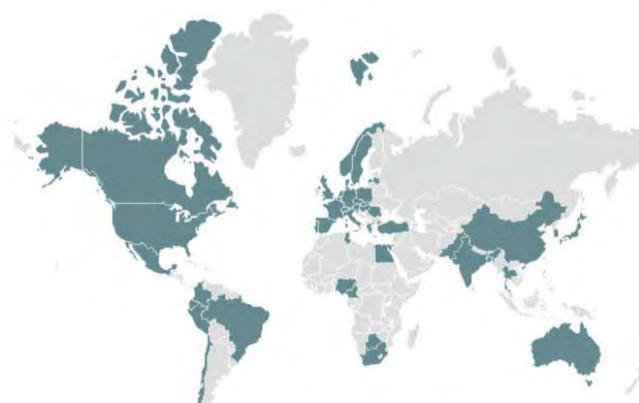
Giunto alla sua ottava edizione, il Venice è diventato uno dei più importanti simposi al mondo nel campo dell'energia da biomasse e da rifiuti che vede ad ogni edizione la partecipazione di oltre 400 delegati operanti nel settore. Ecco perchè:

Stimolante programma scientifico di altissimo livello: tre giorni di presentazioni e workshop organizzati in 6 sessioni parallele, sessioni poster e visite tecniche guidate • Evento internazionale con partecipanti ed espositori provenienti da oltre 40 paesi • Comitato scientifico costituito dai maggiori esperti mondiali del settore • Opportunità di networking • Location congressuale di prestigio • Entusiasmanti eventi sociali serali nella città più bella del mondo!

**INVIA SUBITO IL TUO LAVORO** compilando il form disponibile sul sito: [www.venicesymposium.it/it/abstract-form](http://www.venicesymposium.it/it/abstract-form) oppure **REGISTRATI** alla pagina [www.venicesymposium.it/it/registration-form](http://www.venicesymposium.it/it/registration-form).

## NUMERI DELL'EDIZIONE PRECEDENTE

-  **409**  
Partecipanti
-  **+240**  
Presentazioni
-  **7**  
Workshop
-  **4**  
Visite tecniche



## TOP 10 NAZIONI per numero di partecipanti

Italia	197
Germania	32
UK	22
Cina	13
Brasile	12
Giappone	11
Francia	11
USA	8
Svezia	8
Canada	7



## Il nuovo significato di efficienza energetica.

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

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

Risparmiare migliorando le performance. Oggi si può.

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

**ECO**  
**GENERAZIONE**  
Tecnologie Energetiche e Ambientali





## 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.



## Un fornitore unico: il vostro partner ideale per pompe, valvole e service.

Non offriamo solamente prodotti e servizi di altissima qualità, ma anche un servizio clienti completo. A partire dall'installazione/avviamento del prodotto, durante il suo funzionamento, le riparazioni, fino al suo ripristino e alla messa fuori servizio finale, siamo al vostro fianco con un'eccezionale gamma di servizi e soluzioni, tempi di risposta rapidi e competenze globali. Questo fa di noi il partner ideale per l'intero ciclo di vita dei prodotti. Per maggiori informazioni: [www.ksb.it](http://www.ksb.it)

► La nostra tecnologia. Il vostro successo.

Pompe • Valvole • Service



# ready for the resource revolution



With 90,000 employees across five continents,  
SUEZ is a global leader in smart, sustainable resource management.

[www.suez.com](http://www.suez.com)

Sondiamo la sicurezza e la qualità dell'acqua

SONDA TENSIOATTIVI



SONDA COD OUT



Rilevazione automatica in continuo dei parametri:

- TENSIOATTIVI
- SOLIDI SOSPESI
- BOD
- COD
- TORBIDITÀ

dal 1979

 **CID**  
Ing. VENTURA srl

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

# INDEX



VOL. 7  
NUM. 1  
2020

## EDITORIAL

The COVID-19 pandemia in Italy and in the world and the protection of the environment – *Marino Gatto*

Reflecting on climate-neutrality ambitions in Europe in times of COVID-19 – *Hans Bruyninckx*

## ARTICLES

Life Cycle Assessment of a process to remove atmospheric CO<sub>2</sub> and contrast ocean acidification – *Francesco Campo, Stefano Caserini, Dario Pagano, Giovanni Dolci, Mario Grosso*

Scenarios of sustainable management and on-site reuse of earthquake debris – *Antonio Basti*

## TECHNICAL-SCIENTIFIC COMMUNICATIONS

Biomethane production from biowaste in the frame of promoting the use of energy from renewable sources – *Micol Centorrino, Paolo Neri, Marco Cervino, Anna Maria Ferrari*

Summary of the speeches given at the conference “The removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere and the Desarc-Maresanus project” – *Antonella Abbà, Dario Pagano, Momme Butenschön, Giovanni Cappello, Massimiliano Cremonesi, Caterina Lanfredi, Martina Fantini*

Report of technical visit at Vidracco (TO) Olivine Mine – *Mark Matalog, Matteo Ferrero, Stefano Caserini*

Foto in copertina by  
pixabay.com

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2020 è sostenuta da:



better together



TECHNO  
Vacuum Evaporation Systems

SOLVAIR®



Veolia Water Technologies Italia S.p.A.



Solutions for a world in motion



Let's Solve Water

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



# SOLVAIR<sup>®</sup>

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

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

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

