

COLLANA DI STUDI E RICERCHE

LXIX

ACCADEMIA LIGURE DI SCIENZE E LETTERE

COLLANA DI STUDI E RICERCHE

LXIX

Transizione ecologica

Il sapere e il saper fare

Atti del Seminario permanente
Accademia Ligure di Scienze e Lettere - Palazzo Ducale
Genova, settembre - novembre 2022

a cura di
GIANCARLO ALBERTELLI



GENOVA

2023

La pubblicazione del presente volume è stata resa possibile grazie ai contributi di:
Ministero della Cultura, Fondazione Carige, Fondazione Compagnia di San Paolo.



Accademia Ligure di Scienze e Lettere
Palazzo Ducale, Piazza G. Matteotti 5, 16123 Genova
Tel. 010 565570 – Telefax 010 566080
e-mail: segreteria@accademialigurediscienzelettere.it
www.accademialigurediscienzelettere.it

Comitato scientifico:

Vincenzo Lorenzelli (Presidente), Giancarlo Albertelli, Massimo Bacigalupo, Fernanda Perdelli, Maria Stella Rollandi, Augusta Giolito, Mario Pestarino, Antonio Garzilli.

© 2023 Accademia Ligure di Scienze e Lettere – Genova

Sono rigorosamente vietati la riproduzione, la traduzione, l'adattamento, anche parziale o per estratti, per qualsiasi uso e con qualsiasi mezzo effettuati, compresi la copia fotostatica, il microfilm, la memorizzazione elettronica ecc., senza la preventiva autorizzazione scritta dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere.

ISBN 978-88-86746-46-5

Realizzazione editoriale: Arta, Genova, www.artastudio.it

INDICE

GIANCARLO ALBERTELLI <i>Prefazione</i>	7
---	---

CONFERENZA DI APERTURA DEL SEMINARIO

GIULIO MANUZIO <i>La transizione energetica: la sua necessità, le basi chimico-fisiche, il suo dimensionamento e i suoi principali problemi</i>	11
--	----

IL CLIMA E I CAMBIAMENTI CLIMATICI IN MARI E OCEANI

CLAUDIO EVA <i>Il clima: dove stiamo andando?</i>	35
--	----

ROBERTO DANOVARO <i>Climate Change Impacts on the Mediterranean Sea Ecosystems</i>	69
---	----

MONICA MONTEFALCONE <i>Capacità di ricupero delle scogliere coralline maldiviane agli effetti del cambiamento globale</i>	76
--	----

PAOLA RIVARO <i>L'importanza della biogeochimica per valutare gli effetti del cambiamento climatico sull'ecosistema antartico</i>	88
--	----

L'ECONOMIA CIRCOLARE

ILARIA MARZOLI – MARIA PARODI – CARLO SENESI <i>AMIU e l'economia circolare presso il Polo impiantistico di monte Scarpino</i>	105
---	-----

LUCA BANFI <i>Il ruolo della chimica organica nell'economia circolare</i>	112
--	-----

ADRIANA SACCONI
Le risorse non sono infinite. Elementi chimici in via di esaurimento 128

LA TRANSIZIONE ECOLOGICA: ENERGIA E RISORSE

LUCA BRAGOLI
Energia eolica e fotovoltaica 141

ANDREA BOMBARDI
Idrogeno verde: produzione, storage e utilizzo 150

L'ACCADEMIA INCONTRA LE IMPRESE

MARCO RIPANI
Fisica ed energia nucleare 165

LEONARDO BELLODI
Energia e geopolitica: la diversificazione delle fonti energetiche 178

GIANCARLO ALBERTELLI*

Prefazione

L'Accademia Ligure di Scienze e Lettere, fondata nel 1798 come organo ufficiale della Repubblica Ligure sotto il nome di Istituto Nazionale Ligure, nel corso del primo trimestre 2022 ha deciso di organizzare una serie di incontri sulla Transizione Ecologica per contribuire a fare chiarezza su un tema di estrema attualità e importanza e sul quale spesso si ritrovano argomentazioni fortemente discordanti. In questo modo l'Accademia ha voluto assolvere ad uno dei compiti statutari, che la vedono come centro e organo di formazione pubblica.

Desidero sottolineare come la transizione ecologica e quella energetica siano temi non solo di grandissima rilevanza scientifica, ma anche di fondamentale importanza per la “vita” sul nostro pianeta. Non c'è dubbio che il nostro mondo si trovi di fronte ad una svolta epocale per poter garantire un “futuro” alle prossime generazioni, futuro che potrebbe essere caratterizzato da radicali cambiamenti climatici – con tutto quello che gli stessi comporterebbero – come peraltro già segnalato da eventi estremi che sono sotto gli occhi di tutti. Per questi motivi l'Accademia ha sentito l'esigenza di affrontare il tema della transizione ecologica con una serie di conferenze che trattassero argomenti anche strettamente inerenti alla necessità di attuare una transizione ecologica “ragionata”, cioè inserita in un contesto non solo ambientale, ma anche economico, politico e sociale.

L'Accademia era ed è ben consapevole che questi temi non possono essere chiariti con un solo ciclo di conferenze. Ha quindi pensato di proporre un Seminario Permanente sulla “Transizione Ecologica” che avesse cadenza

* Accademico, Presidente della Classe di Scienze, già professore ordinario di Ecologia, Università di Genova.

annuale e che fosse temporalmente collocato nel secondo semestre di attività, tra fine settembre-inizio ottobre sino a tutto novembre. Non nascondo che lo sforzo sia stato notevole e non saremmo riusciti in questa impresa, realizzata in tempi estremamente ristretti, se non ci fosse stato un impegno corale. Desidero qui ringraziare il Presidente Prof. Vincenzo Lorenzelli, il Segretario Generale Prof. Mario Pestarino, l'Amministratore Dott. Antonio Garzilli e gli Accademici Prof. Aristide Fausto Massardo, Prof. Giulio Manuzio, Prof. Claudio Eva, Prof.ssa Adriana Saccone, Prof. Luca Banfi, oltre a tutto lo staff tecnico dell'Accademia, che si è prodigato per la riuscita dell'evento. Sempre in tema di ringraziamenti mi è gradito ricordare il patrocinio di Regione Liguria, Comune di Genova e Università degli Studi di Genova, nonché il fattivo sostegno del Ministero della Cultura, della Fondazione Carige, della Fondazione Compagnia di San Paolo e della Camera di Commercio, Industria e Artigianato di Genova.

L'organizzazione della prima edizione del Seminario permanente presenta un sottotitolo: il sapere e il saper fare. Tale sottotitolo vuole sottolineare la partecipazione non solo di docenti universitari di spicco, ma anche la presenza di imprese principalmente legate al territorio ligure. Queste realtà imprenditoriali hanno risposto al nostro invito in maniera entusiastica, non limitandosi a presentare i risultati relativi alle loro attività contestualizzate nella transizione ecologica, ma anche consentendo la partecipazione dei vertici aziendali alla tavola rotonda "Transizione ecologica ed energetica e l'attuazione del PNRR", tenutasi presso la prestigiosa sede della Sala del Consiglio nel Palazzo della Camera di Commercio di Genova. Alla stessa tavola rotonda hanno partecipato anche il Presidente della Camera di Commercio, Industria e Artigianato di Genova e il Presidente di Confindustria di Genova.

Il Programma della prima edizione del Seminario permanente si è articolato in una serie di conferenze mirate su "il clima e i cambiamenti in mari e oceani", "l'economia circolare", "l'Accademia incontra le imprese" e "la transizione ecologica: energia e risorse". Il programma si è concluso con la tavola rotonda sopra citata.

Oggi, mentre scrivo questa prefazione, è con una nota di orgoglio che posso annunciare il secondo ciclo del Seminario permanente, che avrà luogo dal 3 ottobre al 6 dicembre 2023, a sottolineare la vivace attività che caratterizza l'Accademia e la volontà della stessa di continuare a sostenere questo nostro importante progetto.

CONFERENZA DI APERTURA DEL SEMINARIO

GIULIO MANUZIO*

*La transizione energetica: la sua necessità, le basi
chimico-fisiche, il suo dimensionamento
e i suoi principali problemi*

Abstract: The need to discontinue the use of fossil sources of energy is demonstrated. Possible alternatives are discussed. Attention is given to fundamental aspects, such as molecular energy, hydrogen production, earth temperature formation, the development of vegetation necessary to the production of large quantities of green energy. Relevant orders of magnitude are indicated.

1. *Introduzione*

Da quando alcuni cianobatteri hanno imparato a sfruttare l'energia che ci arriva dal sole, la stragrande maggioranza degli esseri viventi sopravvive, cresce e si riproduce unicamente a spese della luce solare (di solito non direttamente e magari dopo molti passaggi di una lunga catena alimentare). È così da circa 3 miliardi (3.000.000.000) di anni!

Da circa trecento (300) anni, quella particolare specie di animale che si è autodenominato *Homo sapiens* ha inventato un metodo per sopravvivere, crescere e riprodursi che (almeno per molti) è più comodo, meno faticoso e consente di usufruire di mezzi e possibilità mai viste prima. La base della novità è la scoperta della capacità di ricavare energia, oltreché dal sole, anche dai cosiddetti combustibili fossili (carbone, petrolio e metano). Attorno a tale scoperta si è rapidamente coagulato un nuovo modo di organizzare la società e la vita privata. E, anzi, oggi il consumo di energia da fonti fossili è circa il doppio del naturale consumo di energia (8 terawatt) tratto dalla biomassa (di cui peraltro noi da soli consumiamo più del 5%).

* Accademico, già professore ordinario di Fisica medica, Università di Genova.

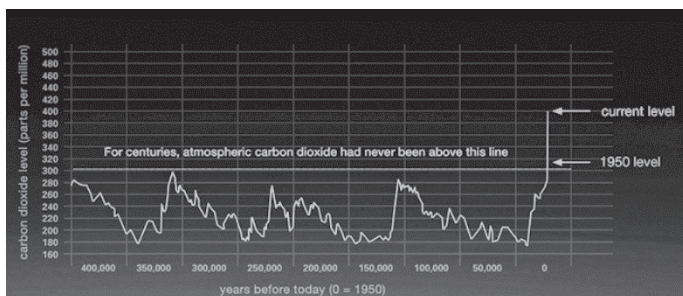


Figura 1. *Contenuto (ppm) di anidride carbonica dell'atmosfera terrestre negli ultimi 400.000 anni (fonte: NASA). Il picco finale è nato nel Settecento, ma la crescita è avvenuta in larga parte nell'ultimo secolo (cfr. figura 2).*

Da alcune decine di anni ci si sta però rendendo conto che lo sfruttamento dei combustibili fossili sta aumentando il livello di anidride carbonica (il principale sottoprodotto dell'uso di tali combustibili) nell'atmosfera e nel mare. In particolare, come indicato dal grafico in figura 1, l'attuale livello di anidride carbonica presente nell'atmosfera terrestre è del 30% superiore ai massimi livelli di anidride carbonica presenti in atmosfera negli ultimi 400.000 anni.

Ci sono ottimi e ben poco discutibili motivi per affermare che tale aumento sia dovuto al nostro consumo di combustibili fossili e altrettanto buoni motivi per credere che esso sia responsabile del riscaldamento (oggi vicino ai livelli massimi registrati dalla fine dell'ultima glaciazione, diecimila anni fa) cui il nostro pianeta è andato incontro negli ultimi decenni. Ed è altamente probabile che l'effetto sia di lunga durata (molti secoli).

Esiste oggi, almeno in linea di principio, la possibilità di pensare di dismettere l'uso di combustibili fossili e però di continuare a vivere più comodamente di quanto non avvenisse prima della rivoluzione industriale, sostituendo l'energia che ora ricaviamo dai combustibili fossili con energia appositamente ricavata dalla luce solare.

È la cosiddetta *transizione energetica*, che costituisce una parte importante della cosiddetta *transizione ecologica* che, oltre a sostituire l'uso dei combustibili fossili, dovrebbe occuparsi di una saggia e oculata gestione delle risorse del nostro pianeta.

La necessità di avviare la transizione ecologica, anche se in molte altre parti del mondo è molto poco sentita, almeno in Europa è perce-

pita come difficilmente evitabile e quindi è psicologicamente accettata. Come spesso accade in simili situazioni, una volta chiarita la necessità di una scelta, avvengono due fatti altamente significativi. Il primo è che per l'opinione pubblica media ormai è tutto deciso e dunque l'azione deve passare nelle mani dei tecnici che è bene si sbrighino, non facciano troppe difficoltà, comunichino rapidamente quanto tempo occorre loro e magari facciano in modo di finire prima e a costo minore. La seconda conseguenza, sempre per l'opinione pubblica media, è che nel futuro ci dovrà essere qualche cambiamento e qualche adattamento, ma che per la maggior parte delle persone si possa, ora e in futuro, tornare a preoccuparsi solo dei più o meno importanti dilette e problemi personali. Conseguenza di questo approccio psicologico è non avere alcuna voglia di capire le nozioni e le implicazioni che stanno alla base della transizione. Al più ci si limita a qualche vaghezza parlando di idrogeno, di auto elettriche e celle solari.

Sembra perciò doveroso che l'Accademia Ligure di Scienze e Lettere metta a disposizione dei volenterosi che lo desiderano una serie di contributi che illustrino in modo corretto le problematiche di tale transizione.

Il primo di tali contributi è il presente documento, che illustra le basi della transizione energetica. I principali valori numerici che condizionano ciò che si può fare e ciò che non si può fare sono indicati.

2. *Una "noia" necessaria*

Se si vuole seriamente parlare di transizione ecologica è necessario avere a disposizione un certo numero di concetti e di informazioni che arrivano dalle scienze di base. Ovviamente il primo e basilare concetto è quello di *energia*.

La definizione usuale è: *l'energia misura la capacità di un sistema di fare lavoro*. Ma, per i non addetti, ciò è oscuro anche perché rimanda ad un altro concetto, il lavoro, di solito poco chiaro.

I fisici misurano il lavoro collegandolo agli spostamenti che avvengono quando delle forze modificano la struttura di un sistema e questo può far capire, anche ai non addetti, che *l'energia interviene quando ci sono delle trasformazioni all'interno di un sistema e/o quando ci sono trasformazioni nell'ambiente esterno al sistema da esso provocate*.

Sia per gli addetti ai lavori che per i non addetti, un buon modo di pensare all'energia è considerare *l'energia come il costo (o il ricavo) di una trasformazione*.

Infatti, se si può pensare all'energia come una sorta di denaro posseduto da un qualsiasi sistema:

- 1) l'energia, come il denaro, può essere posseduta in misure molto diverse;
- 2) quando un sistema rimane immutato nel tempo l'energia posseduta rimane invariata, così come qualsiasi capitale quando non si fanno spese;
- 3) quando il sistema cambia, la sua energia può diminuire o aumentare, così come avviene in tutte le transazioni economiche;
- 4) quando l'energia di un sistema è la minima possibile, il sistema è indefinitamente stabile. Può cambiare solo se, dall'esterno, gli viene ceduta energia. Il parallelo è ovvio: se la disponibilità di spesa è nulla, non si può comprare nulla né realizzare nulla se non arriva denaro fresco;
- 5) come per i capitali (costituiti da denaro contante, azioni, terreni...), l'energia può essere posseduta da un sistema fisico sotto varie forme. Le due forme che qui ci interessano sono:
 - l'*energia cinetica*, che è posseduta da tutti i corpi in movimento;
 - una particolare forma di *energia potenziale*.

Come dice la parola stessa, l'energia potenziale è una capacità di fare lavoro che un sistema potenzialmente possiede e che rimane nel sistema fino a quando questo non si modifica. I fisici introducono varie forme di energia potenziale (elastica, gravitazionale ecc.), ma, nelle situazioni che ci interessano, l'unica forma di energia potenziale pertinente è la capacità di fare (o di assorbire) lavoro che le molecole possiedono quando la struttura della molecola si modifica.

Resta l'ulteriore incombenza di ricordare che, tra le moltissime unità di misura dell'energia, qui verrà usato solo il joule (J) e il suo multiplo Gigajoule (GJ = un miliardo di J). Per avere una idea di che cosa sia un joule, si ricordi che con 10 joule si solleva di 1 metro il peso di 1 kg.

In tantissime situazioni, non è importante parlare di energia, bensì di quanta energia venga prodotta o spesa ogni secondo. L'unità di misura in questo caso è il ben noto watt (W), insieme al suo multiplo GW.

3. *La necessità di smettere l'uso dei combustibili fossili e le sue alternative*

La figura 1 mostra come nei precedenti 400.000 anni il livello di CO_2 in aria sia sempre rimasto al di sotto di 300 ppm mentre dopo la rivoluzione industriale, e con velocità sempre maggiore (figura 2), si è raggiunto il valore di 400 ppm.

La stragrande maggioranza degli scienziati concorda sul fatto che l'aumento della CO_2 in aria sia dovuta alla rivoluzione industriale e cioè all'uso di combustibili fossili quali carbone, petrolio e metano. Anche perché l'aumento della quantità di CO_2 in aria (di cui una larga frazione finisce negli oceani) è del tutto compatibile con la CO_2 prodotta dalla mole di combustibili fossili fin qui utilizzati. Inoltre, è ormai molto chiaro che l'aumento della CO_2 in aria contribuisce ad aumentare l'effetto serra (cfr. Appendice 1), così che la temperatura media della Terra è già oggi aumentata di più di un grado.

Il problema è che non possiamo smettere di colpo di usare i combustibili fossili, e perciò la temperatura della Terra continuerà ad aumentare.

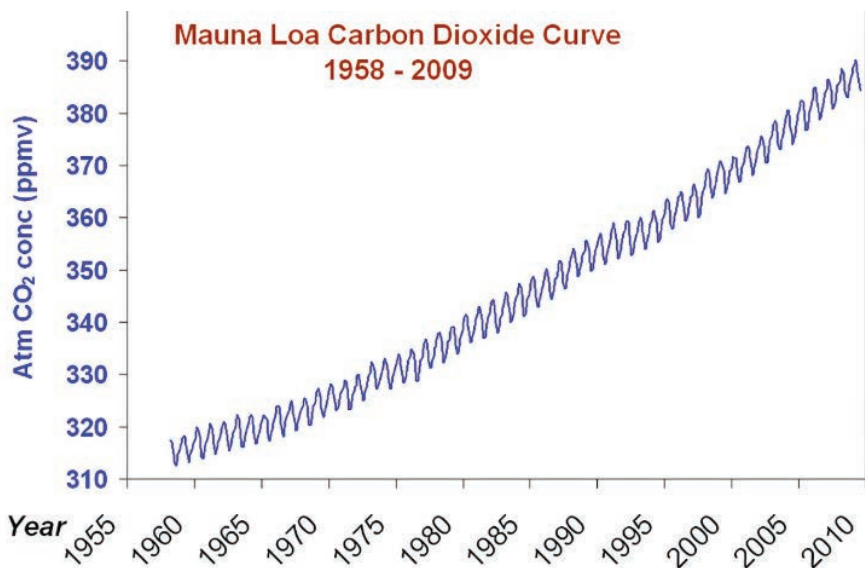


Figura 2. *Curva di Keeling (fonte: Osservatorio Mauna Loa). Andamento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera (ppm) a partire dal 1956.*

Limitare l'aumento a meno di 3 °C sembra sia un obiettivo ragionevole, anche se tale aumento sarebbe tutt'altro che modesto e privo di conseguenze. Per di più, moltissimi modelli prevedono che tale aumento, anche smettendo di immettere CO₂ in aria, sia destinato a perdurare per molti secoli, se non per qualche millennio.

4. *Le possibili fonti alternative di energia*

È dunque urgentissimo individuare soluzioni alternative al nostro modo attuale di procurarci energia. Tra le possibili fonti alternative di energia ve ne sono alcune già in uso di cui si conoscono abbastanza bene i pregi e i limiti e di cui non sembra possibile forzare più di tanto l'uso. Si tratta dell'idroelettrico, del geotermico, del legno e dei biocombustibili e del biometano. Un ruolo a parte, ma ben noto, ha l'energia nucleare, anch'essa con molti pregi e molti difetti. La fusione nucleare suscita tante speranze, ma i tempi di una sua eventuale utilizzazione sono lontani.

Occorre dunque rivolgersi ad altre fonti e queste, al momento, sono principalmente il fotovoltaico e l'eolico, la cui implementazione è perseguita in tutto il mondo e per le quali si è già sviluppata una buona tecnologia a prezzi interessanti.

Si parla anche di energia tratta dalle onde, dalle correnti, dalle maree o da osmosi, ma, per il momento, si tratta di tecniche ad uno stato abbastanza embrionale.

Attualmente dunque occorre concentrare gli sforzi sull'eolico e sul fotovoltaico. Entrambe queste fonti di energia hanno però almeno tre notevoli problemi:

- hanno una notevole variabilità con il tempo e certamente non hanno alcun sincronismo con le nostre necessità di utilizzazione;
- richiedono impianti fissi (solo piccoli impianti fotovoltaici sono mobili) che producono solo energia elettrica e perciò non è possibile fare, ad esempio, quanto facciamo quando mettiamo benzina (energia) nel serbatoio di un'auto per poi portarcela dietro e usarla quando sarà necessario;
- ricavano energia generata dal Sole. Tale energia arriva sulla Terra in grande quantità (più di 100.000 terawatt), ma è molto distribuita e cioè ha una bassa densità per metro quadro (la potenza media nel tempo e nello spazio è pari a 160 Watt/m²).

La soluzione dei primi due problemi non può che consistere nell'accumulare in qualche "serbatoio" l'energia che si ricava dal fotovoltaico e dall'eolico e nel realizzare tale serbatoio in modo che si possa o portarselo appresso (soluzione A), oppure distribuire quanto in esso contenuto attraverso una opportuna rete (soluzione B).

La soluzione A oggi consiste nell'usare le batterie e, in particolare, le batterie al litio.

Non è una soluzione ideale che possa essere pensata come soluzione generale e a lungo termine per almeno quattro buoni motivi. Le batterie sono ingombranti (il rapporto energia/peso è minore di qualche centinaio di Wh/kg). Sono costose (il rapporto energia/costo è dell'ordine di qualche centinaio di Wh/\$). Il consumo di energia e l'inquinamento durante la loro produzione e il loro riciclo (durano una decina di anni) è notevole. E soprattutto richiedono materiali rari esauribili e costosi, non ubiquitariamente distribuiti e quindi al loro uso sono associati notevoli problemi geopolitici.

5. *Impariamo dalle barbabietole*

Come già detto, per smettere di inquinare l'atmosfera in maniera ecologica servirebbe avere un mezzo in cui immagazzinare l'energia solare e avere la possibilità di estrarre l'energia da tale mezzo quando sarà necessario.

Noi oggi e solo da qualche decina o centinaia di anni ci confrontiamo con tale problema, ma la natura lo ha già brillantemente risolto tre miliardi di anni fa!

La soluzione è immagazzinare energia solare dentro le molecole.

Quando usiamo dello zucchero dovremmo ricordare che esso è un portatore di energia solare immagazzinata nelle molecole di glucosio, per effetto della sintesi clorofilliana di sei molecole di anidride carbonica e di sei molecole di acqua, da una modesta pianta di barbabietola!

Nei nostri organismi quando il glucosio si ricombina con l'ossigeno (producendo sei molecole di anidride carbonica e sei molecole di acqua) otteniamo energia per la nostra sopravvivenza.

Come funziona questo meccanismo? Possiamo copiarlo?

6. *Una immagine da criticare, ma da superare per capire*

La figura 3 indica una delle possibili rappresentazioni di una molecola di glucosio.

È un tipo di rappresentazione che indica con chiarezza che le molecole sono strutture complesse, estese volumetricamente nello spazio e in cui gli atomi costituenti sono organizzati secondo uno schema geometrico-strutturale ben preciso. È un tipo di rappresentazione spesso usato in chimica organica, in biochimica e in biologia perché la struttura spaziale delle molecole gioca ruoli determinanti in moltissime situazioni (in particolare anche nelle cellule viventi).

La figura riportata, relativa alla molecola di glucosio, descrive il risultato finale dello strutturarsi di una molecola, ma in parte oscura il motivo per cui esso viene determinato. Per chi guarda la figura, gli atomi sono rappresentati come palline, ben definite nello spazio, chiuse e distanti da tutte le altre palline. Sembra di essere in una sala conferenze dove le persone sono sedute una accanto all'altra senza alcuna interconnessione oltre a quella, molto debole, di essere in quel posto accomunate solo dall'idea di ascoltare un certo oratore. Ma non è assolutamente così. Alcuni elettroni superficiali degli atomi di una qualsiasi molecola vengono slegati dall'atomo cui inizialmente appartenevano e vengono messi in comune all'interno della molecola. Sono loro che, aggirandosi per tutta la molecola e grazie alle forze elettromagnetiche che scambiano tra loro e con la residua parte fissa degli atomi, costruiscono le conformazioni molecolari di cui la figura 3 è un esempio.

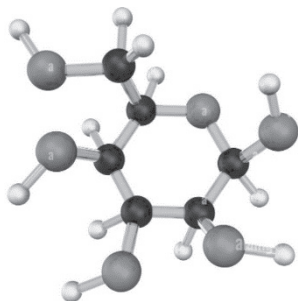


Figura 3. *Un modello di struttura base della molecola di glucosio.*

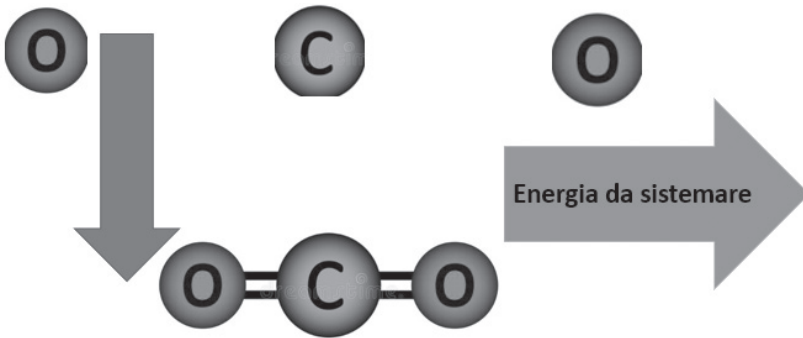


Figura 4. *Quando un atomo di carbonio e due di ossigeno si combinano per formare una molecola di anidride carbonica, il sistema deve liberarsi di una certa quantità di energia.*

La regola con cui le strutture molecolari si autocostruiscono è quella di cercare il massimo di stabilità dell'insieme così che, almeno fino ad un certo livello di sollecitazione esterna, il sistema rimanga integro e intero. Ne consegue che gli atomi di una molecola sono incollati e legati uno all'altro da forze interne al sistema e che, se uno volesse "spiumare" una molecola staccando tutti gli atomi che la compongono, avrebbe bisogno di compiere del lavoro, e cioè di spendere energia. Al contrario, quando una molecola si forma, a partire da atomi liberi, il sistema deve liberarsi di una certa quantità di energia (figura 4). I chimici conoscono perfettamente quanto lavoro bisogna fare per "spiumare" le molecole e infatti hanno sempre ben presente quella tabella, importantissima per loro, che si chiama Tabella delle energie di legame chimico.

Quanto detto è uno dei punti centrali che servono per parlare con competenza della transizione ecologica e può essere riassunto e integrato nel seguente modo:

- 1) quando una molecola si forma, gli elettroni esterni degli atomi che compongono la molecola modificano la loro configurazione iniziale, disponendosi e costringendo gli atomi della molecola a disporsi in una configurazione spaziale finale caratteristica;
- 2) la configurazione finale risulta essere quella di maggiore stabilità;
- 3) perciò l'energia legata alla struttura di una molecola è certamente minore dell'energia degli atomi che la compongono quando sono separati.

A titolo di esempio, e per capire gli ordini di grandezza, si ricordi che l'idrogeno gassoso è formato da molecole costituite da due atomi di idrogeno "incollati" insieme. Per "spiumare" tutte le molecole contenute in 2 grammi di idrogeno (quella quantità che i chimici chiamano mole), e cioè per separare uno dall'altro i due atomi di tutte le molecole che compongono due grammi di idrogeno, occorre spendere un'energia pari a 436.000 Joule.

Stiamo parlando di 2 grammi di idrogeno e di una energia con cui si solleva una tonnellata a 44 metri di altezza!

Gli stessi ordini di grandezza (un milione di Joule per mole) si ritrovano quando si vogliono spiumare le molecole di ossigeno, di acqua o di metano.

7. *Il moto incessante del piccolo mondo*

L'errore più grave dell'uso senza precauzioni del modello di figura 3 è però legato al fatto che chi vede quelle rigide e terribili sbarre che in figura collegano gli atomi tra loro, ne ricava una impressione di rigidità assoluta e dunque l'idea che la molecola sia una struttura rigida.

Bisogna invece tenere presente che, nel mondo microscopico, è onnipresente il fenomeno della *agitazione termica*, che obbliga qualunque piccolo corpo a muoversi perennemente e senza sosta e senza che alcuna forza di attrito (queste forze esistono solo nel mondo macroscopico) intervenga per arrestarlo.

Il fenomeno della agitazione termica può essere riassunto nel modo seguente:

- 1) Tutti i componenti microscopici della materia (atomi e molecole) sono in stato di frenetico moto perenne e permanente.
- 2) L'energia (cinetica) media associata al loro moto è proporzionale alla temperatura assoluta (temperatura centigrada + 273) a cui si trova il corpo a cui essi appartengono.
- 3) Le energie in gioco sono del tutto notevoli: se si potesse utilizzare tutta l'energia cinetica delle molecole contenute in un solo metro cubo d'aria a temperatura ambiente (che si muovono con velocità di molte centinaia di metri al secondo) si potrebbe sollevare una tonnellata ad una altezza di circa 5 metri.

- 4) Ogni molecola, fino a quando non viene distrutta dall'impiego di energia sufficiente, si comporta come una entità singola capace di traslare nello spazio e ruotare su sé stessa, ma, normalmente, non si comporta come una struttura rigorosamente rigida. Al contrario, di solito, gli atomi della molecola oscillano attorno alle loro posizioni medie.

Nota: L'agitazione termica cui si è sopra accennato è la causa principale delle trasformazioni che avvengono nell'universo. L'agitazione termica è un potente mezzo di rimescolamento e dunque di equalizzazione delle diversità. Prendere coscienza di tale fatto significa capire le basi del secondo principio della termodinamica (di cui, per i curiosi della connessione tra secondo principio ed esistenza della vita, si parla nell'Appendice 2).

8. *L'insospettabile, perché invisibile, ma fondamentale: l'energia interna*

Quanto detto nei due paragrafi precedenti dovrebbe aver chiarito che, se si guarda un pezzo di carbone, anche se quello appare inanimato, immobile e privo di qualsiasi potenzialità, esso contiene invece più che considerevoli quantità sia di energia cinetica (dovuta all'agitazione termica) sia di energia potenziale (dovuta ai legami molecolari). Entrambe queste forme di energia sono contenute in qualsiasi corpo in forma non direttamente percepibile e possono essere studiate e misurate solo in maniera indiretta. La scienza che se ne occupa è una scienza bella, facile se la si capisce partendo dalle basi giuste, essenziale per capire il modo in cui funzionano gli organismi viventi e il modo in cui l'intero universo si sta evolvendo: la termodinamica. Purtroppo spesso è spiegata molto male a tutti i livelli di insegnamento, e ne deriva una generale idea che sia difficile e poco comprensibile.

Ovviamente non è questa la sede di approfondire l'argomento (anche se i concetti base sono tutti stati indicati). Voglio solo ricordare che il primo principio della termodinamica afferma che, se nel calcolo delle energie possedute da un sistema includo la cosiddetta *energia interna*, e cioè *la somma delle energie cinetiche e potenziali possedute a livello di atomi e di molecole*, arrivo alla conclusione che l'energia totale posseduta dall'intero universo è una quantità costante!

L'energia è una quantità che non può essere né creata né distrutta. Essa può cambiare forma, trasferirsi da un corpo ad un altro, subire e provocare grandi e piccoli cambiamenti, ma resta sempre una quantità il cui totale è invariabile.

9. *Come ricavare energia utile prelevando energia microscopica: la combustione*

Abbiamo adesso gli elementi per discutere, *anche quantitativamente*, della cosiddetta transizione energetica. La figura 3 schematizza ciò che avviene durante i processi di combustione del metano e dell'idrogeno (cfr. figure 5 e 6).

In entrambi i casi la reazione produce molecole più stabili delle molecole di partenza (reazioni esotermiche) e dunque l'energia potenziale delle molecole finali è minore dell'energia potenziale delle molecole inizialmente presenti. Il primo principio della termodinamica afferma però che l'energia totale deve conservarsi. Dunque l'energia potenziale perduta deve ritrovarsi sotto altra forma. Nel caso di combustione semplice, come nei fornelli casalinghi, la si ritrova come energia cinetica (e cioè come alta temperatura della fiamma) dei prodotti di reazione. Avendo dei gas caldi, gli ingegneri sanno benissimo come utilizzarli o per costruire semplici impianti di riscaldamento o per costruire motori (reattori per aerei, motori a scoppio...) o, ancora, per costruire

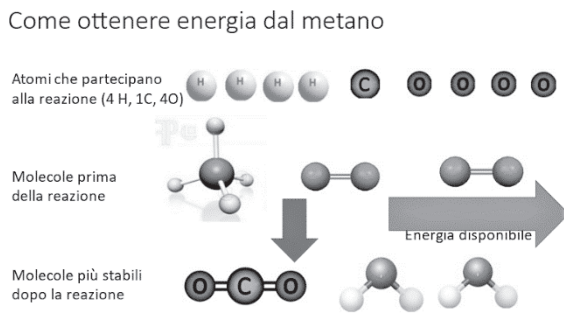


Figura 5. *Una molecola di metano e due di ossigeno (processo di combustione) si combinano per dare una molecola di anidride carbonica e due di acqua. L'energia disponibile ammonta a 890.000 J/mole.*

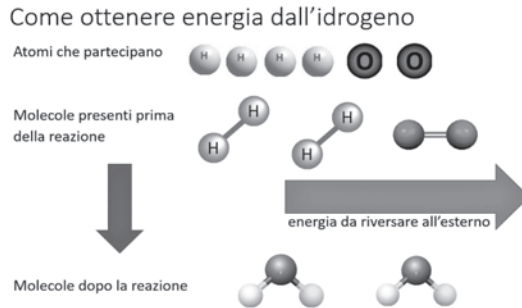


Figura 6. Nel processo di combustione di due molecole di idrogeno e una di ossigeno si formano due molecole di acqua. L'energia disponibile riversata all'esterno vale $286.000 \text{ J/(mole di } H_2)$.

generatori di energia elettrica o di altro tipo. Ma è anche possibile, ad esempio, utilizzare la diminuzione di energia potenziale delle molecole per ottenere energia elettrica in modo diretto nelle celle a combustibile.

10. I presupposti della transizione energetica

Se si osservano le figure 5 e 6 si nota subito una differenza importante fra le due reazioni: la seconda produce solo della comunissima acqua, la prima produce anche anidride carbonica.

Da un punto di vista ideale, tutti i problemi di inquinamento prodotti dal carbone, dal petrolio e dal metano sparirebbero se invece di bruciare quei prodotti bruciassimo solo idrogeno. Raccontata così (e spesso purtroppo viene raccontata solo così) è una bella favola destinata ad un lieto fine a patto di sbrigarci a fare la sostituzione.

I prossimi paragrafi sono destinati a discutere meglio i problemi teorici e pratici del problema della sostituzione.

11. Idrogeno

Il primo problema che si incontra quando ci si occupa della transizione energetica è che sulla Terra non esistono miniere di gas idrogeno.

È un gas molto leggero, che non viene trattenuto dalla gravità terrestre: appena prodotto vola nello spazio sidero.

Lo si può produrre abbastanza facilmente con il processo di elettrolisi dell'acqua (basta far passare corrente fra due elettrodi immersi in acqua), ma ciò richiede energia. La produzione di idrogeno con l'elettrolisi richiede più energia di quanta non se ne ricavi bruciandolo. In condizioni ideali occorrono 420.000 Joule per produrre due grammi di idrogeno e bruciandolo se ne ricavano 286.000.

Per fare una corretta transizione energetico-ecologica, in cui si utilizzi come combustibile dell'idrogeno, il modo più semplice consiste nel produrlo mediante elettrolisi avendo a disposizione dell'energia elettrica prodotta in modo non inquinante. Ma l'unica strada realmente possibile è quella di produrre energia elettrica a spese dell'unica fonte non inquinante che conosciamo, e cioè il Sole. Tecnicamente ciò si può fare utilizzando o delle celle solari o delle pale eoliche (l'energia del vento è comunque dovuta all'energia proveniente dal Sole).

Ad oggi, la struttura più conveniente consiste nell'utilizzare dei generatori di energia elettrica pulita che forniscono energia in modo erratico e incostante (quali le celle solari e le pale eoliche) accoppiati a un convertitore di energia elettrica in gas idrogeno che si possa accumulare in appositi serbatoi, per poi usarlo quando ve ne è bisogno.

Da questo punto di vista è interessante ed emblematico un progetto (figura 7) che viene perseguito in Inghilterra e che prevede, appunto,

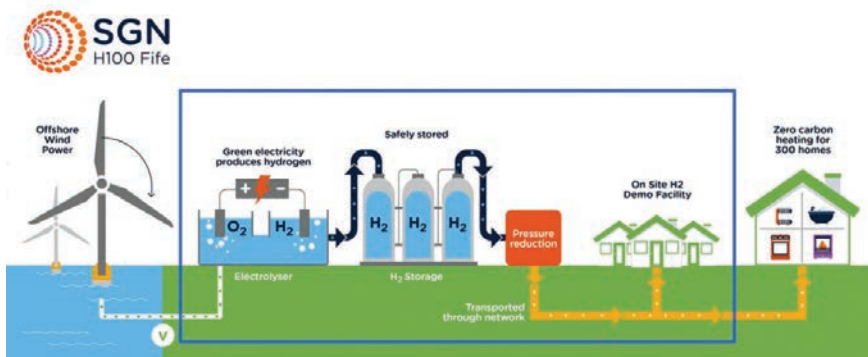


Figura 7. Schema dell'impianto H100 FIFE (Levenmouth, Scozia), che nella fase iniziale dovrebbe servire con idrogeno puro circa 300 abitazioni per il loro uso domestico e per il riscaldamento.

di produrre idrogeno con l'energia ricavata da pale eoliche e di utilizzare l'idrogeno così prodotto e poi immagazzinato per soddisfare i bisogni energetici di un vicino paese.

A questo punto, si capisce bene che il ruolo dell'idrogeno nella transizione energetica, a volte troppo enfatizzato, va invece fortemente ridimensionato. L'idrogeno può essere utilizzato solo come un immagazzinatore temporaneo di energia ricavata da altre fonti oppure come immagazzinatore di energia trasferibile (mediante gasdotti) dal punto di produzione al punto di utilizzazione.

12. *I problemi di una energia distribuita nello spazio e nel tempo*

Un notevole problema della transizione energetica, che comporterà un deciso cambiamento anche di mentalità di tutti coloro che usano energia, è legato al fatto che, fino ad ora, l'energia viene prodotta in piccole aree (centrali termiche, centrali nucleari, dighe per l'idroelettrico ecc.) e poi distribuita su vastissime zone di territorio. In altre parole, grandissime quantità di energia vengono prodotte in spazi di pochi km² per servire aree che misurano molte migliaia di km².

Non è così quando si vuole sfruttare l'unica possibile fonte non inquinante di energia e cioè l'energia solare.

La quantità media di energia che ogni secondo arriva su un metro quadro della superficie terrestre è (cfr. Appendice 1) pari a 161 watt. Ma la potenza media oggi consumata nel mondo, stando, ad esempio, ai dati del World Energy and Climate Statistics del 2021, è pari a circa 15 milioni di milioni di watt. Se si volesse ricavare tutta questa energia solo con celle solari, tenendo conto anche degli spazi morti e delle rese di conversione, sarebbe necessario occupare con celle solari una superficie il cui ordine di grandezza è del milione di km², vale a dire un'area di 1000 x 1000 km. Per soddisfare il bisogno italiano servirebbe un'area di qualche centinaio di km²!

Insomma: l'energia solare è una fonte diffusa di energia e, per ricavarla, occorrono impianti molto estesi, la cui fabbricazione, manutenzione e dismissione richiede costi economici notevoli e, soprattutto, costi ambientali importanti perché le attuali tecnologie di produzione di celle solari ed elettrolitiche sono alquanto inquinanti e non pare

proprio il caso di realizzare una transizione energetica che non sia anche ecologica. Inoltre, la costruzione di celle solari richiede materiali rari, ricavabili in quantità limitata e/o insufficiente dalla crosta terrestre, in parte già accaparrati e comunque posseduti dagli Stati in misura molto diversa così da prospettare, anche in questo caso, problemi geopolitici molto rilevanti. Occorre infine notare che, per realizzare impianti così estesi, è necessario, o sottrarre ai proprietari grandi spazi oggi usati per scopi diversi o contrattare con tali proprietari l'installazione degli impianti.

Si è parlato di celle solari, ma i problemi non sono molto diversi con le pale eoliche. Una pala eolica con un rotore di diametro compreso tra 50 e 100 m può fornire, in buone condizioni di vento, una potenza di qualche milione di watt e ha bisogno di essere collocata abbastanza lontana da altre pale. La resa per m^2 dei sistemi piccoli di pale eoliche può essere confrontabile o non molto minore della resa dei grandi sistemi di celle fotovoltaiche, ma, per grandi impianti di pale eoliche, la resa si avvicina a $1 \text{ watt}/\text{m}^2$. Ad esempio, uno dei parchi eolici marini più grandi al mondo, la Walney Extension in Inghilterra, ha una capacità nominale di 659 MW, occupa una superficie di 73 km^2 , ospita 87 rotori con pale di diametro superiore a 100 m. Una installazione vicina alla Walney Extension, che la ha preceduta e che ha una capacità nominale di 367 MW, ha prodotto ogni anno circa 1300 GWh, cioè circa un centomillesimo dell'energia consumata nel mondo ogni anno.

Se si volesse ottenere tutta la potenza consumata oggi nel mondo usando solo parchi eolici dovremmo occupare una superficie di dieci milioni di km^2 e cioè il 2% dell'intera superficie terrestre!

Come per le celle solari, la fabbricazione di pale eoliche, di per sé notevolmente costose, richiede l'uso di materiali speciali, rari, scarsi e localizzati in pochi punti della crosta terrestre. Si avrebbero anche in questo caso problemi geopolitici. Senza contare ancora che occorrerebbe intervenire con espropriazioni o modifiche sostanziali su problemi legati all'attuale uso del suolo o del mare.

Per concretizzare meglio quanto detto sopra, a titolo di esempio, un calcolo abbastanza semplice mostra che, se si volesse coprire la sola potenza elettrica oggi consumata nella regione Liguria per metà con celle solari (stimando una insolazione media di $200 \text{ W}/\text{m}^2$ e una resa del 20%) e per metà con pale eoliche (stimando una potenza media ottenuta per

pala di 500 kW), bisognerebbe installare in tale regione circa 2000 pale eoliche e ricoprire con celle solari una superficie dell'ordine di 25 km².

13. *Ci sono anche altre problematiche da tenere presenti, ma BISOGNA andare avanti*

Nel progettare un nuovo modo di procurarsi energia, occorre sempre tenere conto non soltanto di tutti costi (energetici, ambientali ecc.) di esercizio degli impianti, ma anche dei relativi costi di produzione e di smaltimento o di riciclo.

Al momento attuale, penso che la strada della transizione energetica sia ancora alquanto problematica per quanto riguarda la scelta del mix di metodologie da usare, la scelta dei materiali (c'è bisogno di molta ricerca), la tempistica e infine il coinvolgimento e la collaborazione della popolazione per la salvaguardia, la manutenzione e la sorveglianza di impianti estesi, delicati e facilmente attaccabili.

La conclusione di questo paragrafo è che la transizione energetica è possibile, ma molto impegnativa.

Tuttavia, l'umanità non ha altra scelta, se vuole evitare di consegnare alle future generazioni un mondo meno vivibile e significativamente diverso da quello in cui si è sviluppata la nostra civiltà.

Appendice 1

Calore dal Sole e temperatura della Terra

Ogni m² della superficie di tutti i corpi celesti irraggia energia (sotto forma di onde elettromagnetiche). La potenza irraggiata è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta T (T = temperatura centigrada + 273,2). Dunque la superficie della Terra dovrebbe irradiare verso lo spazio una potenza pari a $W_c = 4\pi R^2 s T_t^4$ (R = raggio Terra, $4\pi R^2$ = superficie Terra, T_t = temperatura Terra, s = costante di proporzionalità). In conseguenza di tale emissione la Terra tenderebbe a raffreddarsi. Ma, contemporaneamente, la Terra viene riscaldata dal Sole, che fa giungere sopra la Terra un flusso di energia F pari a 1,3 kW/m² e dunque una potenza totale $W_i = F\pi R^2$

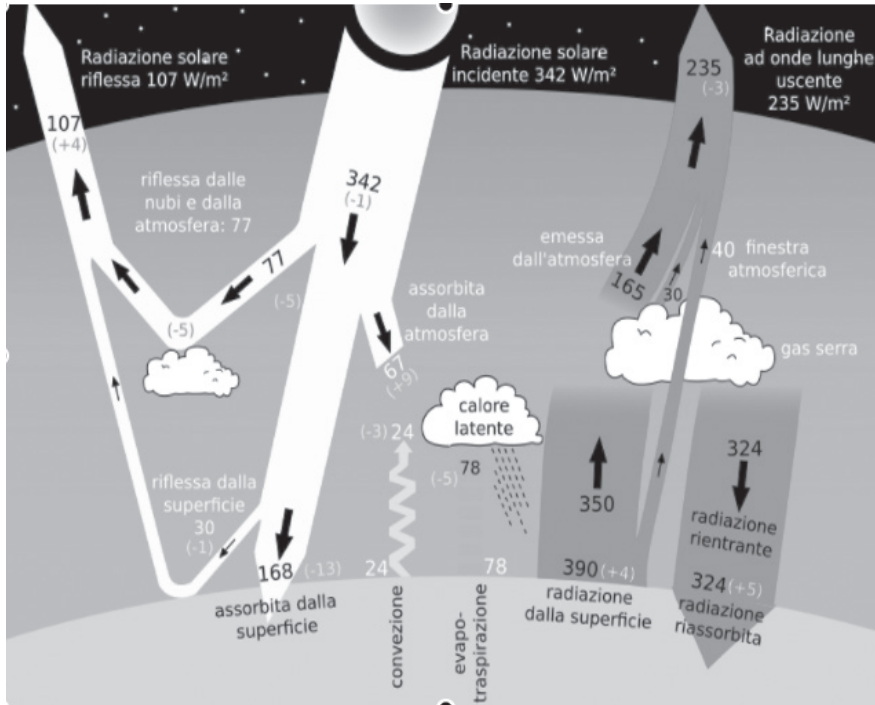


Figura 8. *Bilancio termico completo della Terra. I numeri indicati sono potenze espresse in W/m^2 (fonte: Sankey diagram - Wikipedia).*

(πR^2 = sezione Terra). Se la Terra non avesse atmosfera, uguagliando W_c a W_i si avrebbe una equazione che individua la temperatura di equilibrio termico della Terra (in realtà, bisognerebbe includere anche un contributo di calore endogeno).

La presenza dell'atmosfera complica la situazione: da una parte, essa riflette circa il 50% dell'energia solare in arrivo; d'altra parte essa ostacola (effetto serra!) la fuoriuscita verso lo spazio della radiazione emessa dalla superficie terrestre. Perciò la temperatura della Terra dipende in modo importante dai gas presenti nella sua atmosfera. L'effetto serra è principalmente dovuto al vapor d'acqua e alle nubi, ma ad esso si aggiunge il contributo dei cosiddetti gas serra, che sono soprattutto l'anidride carbonica e il metano (e anche N_2O e SF_6).

La figura 8 indica in modo piuttosto chiaro la struttura dell'intero bilancio energetico. I valori numerici sono indicati in watt e si riferisco-

no a valori medi nel tempo e sull'intera superficie terrestre. Per noi il dato importante è che il valore medio dell'energia solare che arriva per m^2 di superficie terrestre vale 161 joule al secondo (161 watt).

Appendice 2

Entropia e vita

Il moto dei costituenti microscopici di un corpo, noto come agitazione termica dei suoi atomi e delle sue molecole, avviene in modo del tutto caotico.

Da una parte ciò rende impossibile recuperare a livello macroscopico tutta l'energia dei costituenti microscopici della materia (recuperare parte di tale energia è argomento della *scienza delle macchine termiche*) mentre dall'altra parte orienta in modo ben definito (cioè stabilisce una irreversibile *freccia nel tempo*) l'evoluzione con il passare del tempo (senza possibilità di ritorno spontaneo) dei fenomeni naturali. Entrambi questi argomenti portano alla enunciazione del *secondo principio della termodinamica*.

L'enunciazione matematica corretta del secondo principio non è banale, ma il suo significato può essere racchiuso nella seguente frase: *l'evoluzione spontanea dei fenomeni naturali, globalmente, porta sempre a diminuire le differenze, ad amalgamare i sistemi, ad appiattire le diversità, a realizzare configurazioni della materia la cui probabilità di formazione sia la maggiore possibile*. Perciò due corpi a diversa temperatura, messi a contatto, acquistano la stessa temperatura, due gas distinti messi a contatto formano una miscela uniforme, due liquidi di diverso colore, messi in contatto, si mescolano in modo completo ecc.

Nell'Appendice 1 abbiamo chiarito che la temperatura della Terra rimane costante se l'energia ricevuta dal Sole viene riemessa nello spazio in pari quantità. Ma l'arrivo sulla Terra di energia trasportata da raggi solari ben paralleli e costituiti da fotoni emessi da un corpo alla temperatura di 5500 K viene compensata dall'emissione in tutte le direzioni di radiazioni emessa da corpi a circa 300 K. Passare da fasci paralleli a fasci emessi in tutte le direzioni è un primo elemento di disordine. Ancora maggiore elemento di disordine è l'emettere per ogni fotone in arrivo dal sole una ventina di fotoni (5500/300). Dunque, l'interazione della Terra con i raggi solari provoca un aumento di entropia dell'universo.

L'esistenza della vita si colloca nel solco di questo aumento.

L'essere vivente è una macchina ben organizzata che si mantiene a lungo pressoché inalterato e che nella giovinezza migliora le proprie prestazioni e la propria funzionalità. Non vi è traccia di appiattimento o di amalgamazione con l'ambiente. Anzi, è vero il contrario. A prima vista, dunque, l'esistenza di esseri che dopo la fecondazione continuano a crescere e ad organizzarsi e ad organizzare l'ambiente sembra in piena contraddizione con il secondo principio della termodinamica. Per risolvere il problema bisogna ricordare che uno degli enunciati del secondo principio afferma che: "nei processi spontanei l'entropia (lo stato di disordine) dell'universo aumenta sempre". L'apparente contraddizione tra il secondo principio e l'esistenza di esseri ben organizzati si sana facilmente se si tiene conto del riferimento all'entropia dell'universo (come suggerito inizialmente da Erwin Schrödinger). Ciò che bisogna considerare non è un essere vivente in sé, ma tutto ciò che la sua esistenza comporta.

In altre parole, la presenza di esseri vivi e ben organizzati (e quindi apparentemente produttori di entropia negativa) è invece un ottimo mezzo per far crescere l'entropia globale dell'universo.

È un fenomeno che caratterizza non soltanto gli esseri viventi, ma anche situazioni fisicamente e meccanicamente molto più semplici. La macchina di Stirling (figura 9) è, ad esempio, un interessantissimo sistema che si auto organizza per aumentare l'entropia dell'universo. È una macchina termica (usata in pratica solo per alcune applicazioni) la cui versione didattica è semplicissima. Un cilindro verticale cavo C di materiale termicamente isolante è chiuso da due piastre (P_i e P_s) termicamente conduttrici. La piastra inferiore è mantenuta ad una temperatura T_i inferiore alla temperatura T_s dell'altra piastra. All'interno di C si colloca un cilindro D (pieno e fatto di materiale termicamente isolante) appeso ad una molla M. Nel cilindro è contenuta aria. Eventualmente una seconda molla M' è usata per guidare meglio le oscillazioni del cilindro.

Se il cilindro interno D viene bloccato, l'aria nel dispositivo si mette in equilibrio termico con la formazione di un gradiente di temperatura (per cui la temperatura dell'aria cresce linearmente da T_i a T_c mano a mano che ci si sposta da P_i a P_s). Ma, se il cilindro D viene sbloccato, molto rapidamente esso comincia ad oscillare su e giù e, da tale movi-

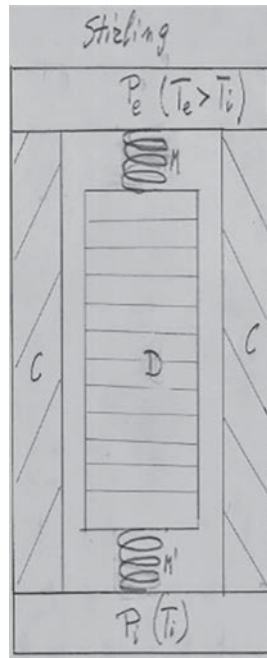


Figura 9. *Schema di principio della macchina di Stirling.*

mento, è possibile ricavare lavoro (si può includere in D un magnete e mettere avvolgimenti all'esterno), realizzando una macchina termica che genera energia elettrica.

Nella macchina di Stirling abbiamo una sorgente calda e una fredda e, per il secondo principio, sono favorite tutte le trasformazioni spontanee che tendono ad equalizzare le due temperature. Se il cilindro è bloccato il passaggio di calore che tende ad equalizzare le due temperature avviene per conduzione, e questo è un processo relativamente molto lento. Se invece il cilindro oscilla, aria fredda dal basso viene meccanicamente e rapidamente spinta a raffreddare la piastra superiore e aria calda va a scaldare la piastra inferiore. Lo scambio di calore adesso avviene per convezione, che è un processo molto più veloce del processo di conduzione.

La natura sceglie ovviamente il più veloce!

IL CLIMA E I CAMBIAMENTI CLIMATICI
IN MARI E OCEANI

CLAUDIO EVA*

Il clima: dove stiamo andando?

Abstract: The high temperatures and drought that have characterized Italy in 2022 can only be understood if viewed within the complex system of phenomena that govern climate change on a global level. Global climatological data indicate that climate systems could reach critical levels that they may go beyond tipping points. Extreme events are occurring around the world with increasing frequency and magnitude. In particular, with regard to extreme rainfall, droughts, tropical cyclones and combined events (including dry and hot periods with fires), there is growing evidence that these are closely related to human activities. CO₂ emissions and related concentrations in the atmosphere have never been higher in the last million years. The concentrations of greenhouse gases, especially at high latitudes, are followed by a sharp increase in temperatures which lead to a progressive melting of the ice. Average ice loss from the Greenland ice sheet was about six times faster in 2010-2019 than it was in 1992-1999. The Antarctic ice sheet lost on average three times more ice mass in the period 2010-2019 than in the same baseline period. The global average temperature of the earth's surface in the decade 2011-2020 was 1.09 °C higher than in the period 1850-1900, with more pronounced warming on land than in the ocean. The last seven years (2016-2022) have been the warmest on record since at least the 1800s, and the maximum perceived temperatures over these seven years have increased year by year. In Italy, the first seven months of 2022 recorded about 1 °C more than the thirty-year average. In 2022 extreme heat waves have affected the entire Mediterranean region. The sea surface temperature in the Mediterranean exceeded 30 °C (like tropical seas) in July and August. All the scientific evidence that ocean warming rates have increased sharply and steadily over the past two decades points to the fact that the ocean will continue to warm up in the future. The increase in sea temperatures is leading to a growth in the incidence of hurricanes and cyclones not only in the equatorial and sub-equatorial regions but also in the Mediterranean. The so-called medicanes (MEDiterranean HurriCANE) have already occurred in the southern Mediterranean for several years, but while in the past they lapped the coasts of Africa and affected

* Accademico, già professore ordinario di Fisica terrestre, Università di Genova.

the southern edge of Sicily and Calabria, they are recently moving north, affecting the lower Tyrrhenian Sea and central-southern Italy. The sea thus becomes a thermal reservoir which cools much more slowly than the continental areas that surround it, resulting in a strong land-sea contrast, the primary cause of the creation of strong storm cells associated with violent downpours. The Italian situation has been aggravated by drought; on average in Italy it rained about 1/3 of what is indicated by the twenty-year averages. Also in this case the cause must be sought in the change in the Arctic cyclone/African anticyclone ratio: the excessive heat near the pole creates a reduction in the thermal contrast between the two. This leads to a decrease in the strength of the Atlantic perturbations which cannot reach the lowest latitudes and skim only the northern Alpine side. Hence the scarcity of rainfall in the whole area south of the Alps.

From the above data one can conclude that in the Earth system all atmospheric phenomena are correlated with each other and follow the laws of thermodynamics. An alteration of a parameter modifies the whole cycle. The continuous emissions of greenhouse gases caused both by human activities and by nature (volcanic emissions, melting of permafrost) are profoundly altering the global balance.

Are we really in conditions of planetary emergency? To try to answer this question, on the basis of the Report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of August 9, 2021, this paper outlines the current state of scientific knowledge.

1. *Introduzione*

Il clima è il risultato dell'interazione complessa di molti fattori atmosferici, oceanici, geografici e biologici che influenzano il nostro pianeta. Nel corso della storia della Terra, il clima è sempre stato soggetto a fluttuazioni e cambiamenti, ma negli ultimi decenni siamo testimoni di variazioni climatiche senza precedenti.

Le variazioni climatiche sono un fenomeno naturale che ha caratterizzato il pianeta per milioni di anni. I cicli orbitali della Terra, le eruzioni vulcaniche, le variazioni dell'attività solare e gli eventi oceanici come El Niño e La Niña sono tutti esempi di cause naturali che possono influenzare il clima.

Negli ultimi due secoli l'influenza dell'attività umana sul clima è diventata sempre più evidente. L'emissione crescente di gas serra, come il biossido di carbonio (CO₂), il metano (CH₄) e l'ossido di azoto (N₂O), causata principalmente dalla combustione di combustibili fossili e dall'agricoltura intensiva, ha portato ad un aumento significativo delle temperature globali. Questo fenomeno è noto come riscalda-

mento globale ed è il principale responsabile dei cambiamenti climatici osservati negli ultimi decenni. La crescita vertiginosa in frequenza e intensità degli eventi climatici estremi, come tempeste, alluvioni, siccità e ondate di calore, corrobora sempre più la convinzione che siamo di fronte ad un cambiamento climatico globale che sta diventando sempre più fuori controllo.

In questa breve nota, prendendo spunto dai documenti scientifici contenuti nel Rapporto del Working Group 1 riportati nel *Sixth Assessment Report* dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) presentato a Parigi il 9 agosto 2021 e dedicato allo stato dell'arte delle ricerche scientifiche sul cambiamento climatico, si vuole sintetizzare e parzialmente volgarizzare le più importanti evidenze che portano a considerare che il clima mondiale sta cambiando ad una velocità che non ha uguali nelle ultime centinaia di migliaia di anni.

2. *Aspetto metodologico*

Prima di parlare di clima ritengo sia necessario darne una definizione che consenta successivamente una più completa interpretazione del significato delle sue variazioni. Per *clima* si intende la descrizione statistica dell'insieme di tutti i processi meteorologici verificatisi in un determinato luogo su un periodo di diversi decenni. Per descriverlo si utilizzano i valori medi, entro intervalli predefiniti, di grandezze come la temperatura, le precipitazioni e il soleggiamento, includendo talora anche informazioni sul regime dei venti. L'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM) ha definito l'osservazione di periodi normali di 30 anni. Tramite il confronto fra questi valori si può valutare il cambiamento climatico e classificare le varie condizioni climatiche regionali sulla Terra. Un cambiamento è quindi determinato dal confronto di un trentennio di dati rispetto al trentennio di riferimento. In estrema sintesi, possiamo dire che il termine "clima" descrive le condizioni meteorologiche medie e la variabilità di grandezze come la temperatura e le precipitazioni in una determinata regione su un periodo di 30 anni.

Va però sottolineato che il sistema climatico della Terra non comprende solo l'atmosfera (l'aria), ma anche l'idrosfera (l'acqua), la criosfera (i ghiacci e i ghiacciai), la litosfera (il suolo), la biosfera (gli esseri

viventi) e ovviamente tutti i processi che portano alla interazione di questi settori.

L'atmosfera terrestre (o meglio, la Troposfera), che è la principale responsabile del clima, deve considerarsi un sistema termodinamico molto complesso il cui equilibrio, qualora fortemente perturbato, richiede tempi molto lunghi per potersi ristabilizzare.

Allorquando parliamo di clima globale e delle sue variazioni, il parametro di riferimento primario è la *temperatura* e le sue variazioni.

3. *Cambiamento del clima*

Una delle affermazioni che vengono riportate in tema di cambiamenti climatici è quella secondo cui il cambiamento climatico degli ultimi decenni fa parte di una fase naturale di variazione del clima terrestre. Studi scientifici paleontologici, geologico-stratigrafici e glaciologici hanno permesso di ricostruire l'evoluzione del clima nel passato anche remoto del nostro pianeta. I dati indicano che il clima della Terra non è stabile. La maggior parte degli studi sul clima nel passato "geologico" riguardano il Quaternario (gli ultimi 2.5 milioni di anni circa) e in particolare gli ultimi 542.000 anni, in cui si sono succedute le epoche glaciali. Le variazioni del clima durante questo ultimo periodo sono avvenute secondo cicli determinati dai moti orbitali (eccentricità, obliquità e precessione della Terra) noti come cicli di Milanković, con periodicità prevalenti di 100.000 e 41.000 anni. Il picco dell'ultima glaciazione si è verificato intorno a 20.000 anni fa. La deglaciazione è stata geologicamente molto rapida, e intorno a 11-12.000 anni fa siamo entrati in una fase interglaciale, che secondo Berger e Loutre (2002) potrebbe durare altri 50.000 anni. In particolare negli ultimi 10.000 anni il clima globale è stato nel complesso stabile e il massimo di riscaldamento su questo intervallo temporale si è registrato in un periodo compreso tra 8.000 e 5.000 anni fa (noto come "Ottimo Climatico dell'Olocene").

Negli ultimi due millenni possiamo ricordare tre particolari variazioni climatiche. Il così detto Optimum climatico romano, un periodo di clima insolitamente caldo in Europa e nell'Atlantico settentrionale che andò all'incirca dal 250 a.C. al 400 d.C.; il Periodo caldo medievale

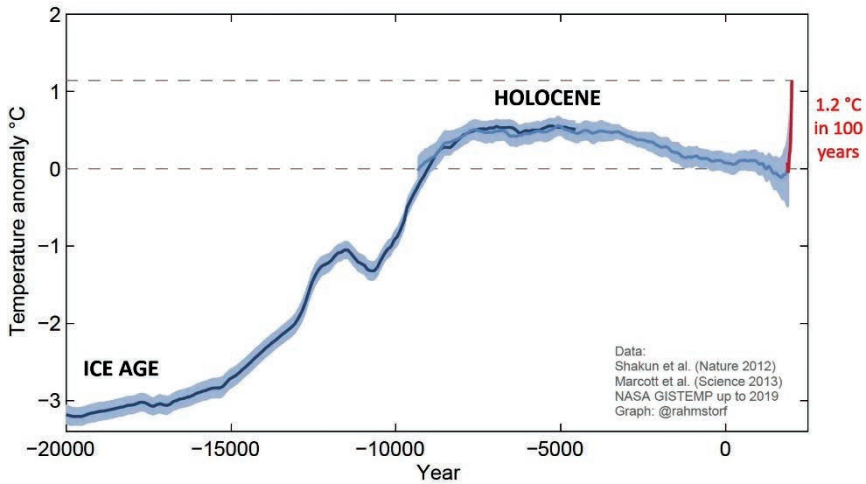


Figura 1. Andamento della temperatura globale negli ultimi 20.000 anni. In rosso la brusca impennata degli ultimi anni (Osman et al. 2021).

(*Medieval Warm Period*, MWP), o Optimum climatico medievale, fu un periodo di inusuale clima relativamente caldo, nella regione del nord Atlantico, durato circa 500 anni, tra l'800 e il 1300. La piccola era glaciale (*Little Ice Age*, LIA) (Lamb 1972) è un periodo della storia climatica dell'emisfero nord della Terra in cui, pur con una non totale convergenza degli studi, si registrò (dal 1600 alla metà del 1800) un brusco abbassamento della temperatura media terrestre, per cause ancora dibattute (eruzioni vulcaniche, diminuzione dell'attività solare o un insieme di queste cause).

Le analisi delle misure di temperatura registrate sistematicamente negli ultimi due secoli mettono in evidenza, come mostrato dal rapporto dell'IPCC presentato a Parigi, che la temperatura globale del pianeta sta evolvendo in un modo estremamente rapido, mai verificatosi nel passato.

Il grafico di figura 2 evidenzia chiaramente che la temperatura globale comincia ad aumentare in modo quasi esponenziale nel periodo di maggiore sviluppo industriale (a partire dagli anni quaranta) e con un incremento massimo dopo il 1960. Il confronto con la figura 1 evidenzia le differenze tra le variazioni climatiche del passato remoto e quelle attuali. I cambiamenti dei climi del passato sono legati a cicli naturali, con scale temporali dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni (cicli

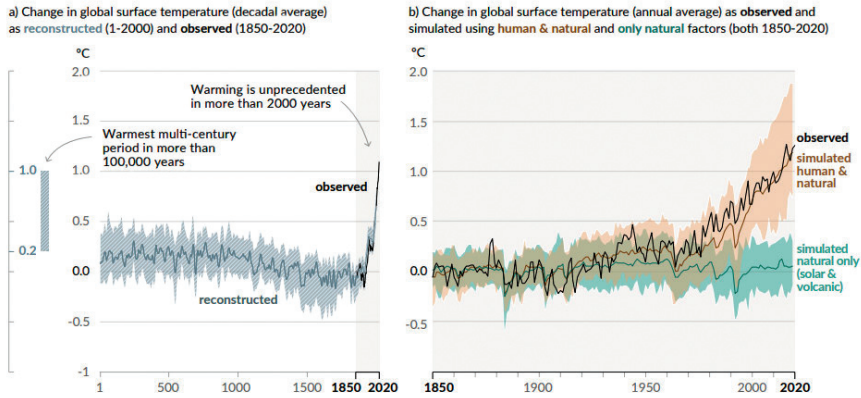


Figura 2. *Andamento della temperatura globale media: a sinistra degli ultimi 2.000 anni, ricostruita e osservata; a destra degli ultimi 170, osservata e con la simulazione dell'assenza di attività umana (Sixth Assessment Report IPCC, Parigi 2021).*

orbitali) o milioni di anni (legati alla dinamica interna della Terra). Viceversa, la variazione climatica attuale fa immediatamente pensare ad un'origine antropica.

4. *Bilancio energetico*

Il sistema Sole-Terra ha un bilancio energetico che è dato dalla quantità di energia che ci arriva dalla nostra stella, dall'energia che la Terra riemette nello Spazio e da quella che invece assorbe e utilizza. L'energia radiativa che arriva dal Sole – che vale, come *media globale*, circa 340 Watt per metro quadrato (W/m^2) – viene in parte riflessa nello Spazio dalla superficie del pianeta ($23 \text{ W}/\text{m}^2$, sempre come *media globale*) e dall'atmosfera ($77 \text{ W}/\text{m}^2$). Il resto viene assorbito, riscalda il pianeta e viene quindi riemesso come energia termica radiativa. Questa energia è irradiata verso lo Spazio, ma parte di essa viene riassorbita dalle nuvole e dai gas serra nell'atmosfera e può essere di nuovo irradiata verso la superficie, contribuendo a un ulteriore riscaldamento (Krauss 2022).

L'aggiunta artificiosa di nuovi fattori, per esempio elementi che assorbono le radiazioni (come i *gas serra*) o la riduzione di altri che la deflettono (come l'aerosol atmosferico) altera il bilancio energetico del

sistema Sole-Terra. Questa, chiamata *forzatura radiativa* (o *forzante radiativo*) è ciò che risulta quando viene alterato il bilancio tra energia in ingresso ed energia in uscita, da un qualunque fattore. Nello specifico, nel caso della Terra, si tratta di una *forzatura radiativa positiva*, a indicare che l'energia in ingresso è superiore a quella in uscita, ossia di quella irradiata verso lo Spazio: in pratica accumuliamo energia sotto forma di calore. Un recente studio (Kramer et al. 2021), basato su misure dirette, ha chiaramente dimostrato che la forzatura radiativa resta fortemente positiva e in costante aumento a causa delle attività umane. In altre parole, vengono alterate le capacità del sistema Terra di disperdere nello Spazio parte dell'energia ricevuta, con un conseguente aumento della temperatura media del pianeta (*Global Warming*).

5. CO_2 nell'atmosfera

Il *biossido di carbonio* (o *anidride carbonica* o CO_2) è un ossido acido formato da un atomo di carbonio legato a due atomi di ossigeno. È una sostanza fondamentale nei processi vitali delle piante (fotosintesi clorofilliana) e degli animali ed è parte integrante per il mantenimento della coperta protettiva che è la nostra atmosfera. È ritenuta uno dei principali gas serra presente nell'atmosfera terrestre. Infatti, nonostante la sua piccola concentrazione, la CO_2 è un componente fondamentale dell'atmosfera terrestre perché – insieme al vapore acqueo e al metano – intrappola la radiazione infrarossa della luce solare riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre (*effetto serra*), impedendo alla Terra di raffreddarsi. Tuttavia forti aumenti o diminuzioni possono influenzare il delicato equilibrio atmosferico e gli aumenti della concentrazione atmosferica di CO_2 possono alterare negativamente il clima globale.

Grazie al biossido di carbonio atmosferico della Terra neonata si sono potute instaurare le condizioni favorevoli allo sviluppo della vita.

La CO_2 è il risultato della combustione di un composto organico in presenza di una quantità di ossigeno sufficiente a completarne l'ossidazione. In natura viene anche prodotta da batteri aerobici durante il processo della fermentazione alcolica ed è il sottoprodotto della respirazione. Esposte alla luce, le piante assorbono biossido di carbonio dall'at-

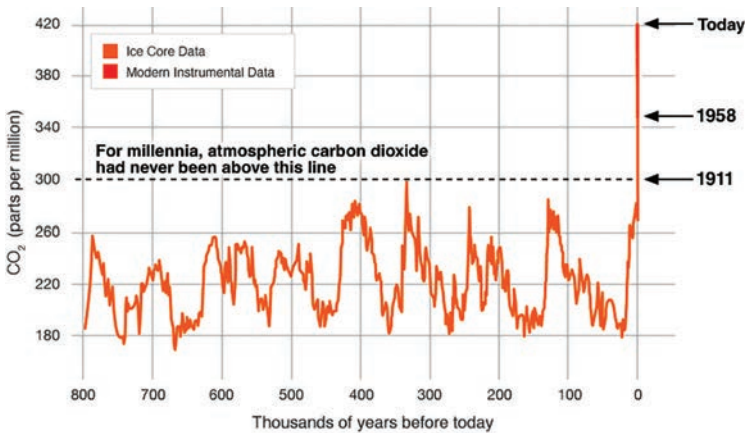


Figura 3. *Andamento del contenuto di CO₂ nell'atmosfera negli ultimi 800.000 anni. Le oscillazioni sono relative alle varie glaciazioni. Fino al 1911 la CO₂ non ha mai superato le 300 ppm (NOAA 2023).*

mosfera attraverso la fotosintesi; in assenza di luce anche le piante emettono biossido di carbonio in conseguenza della respirazione cellulare.

Nella storia della Terra, i livelli di CO₂ nell'atmosfera sono variati considerevolmente a causa di diversi fattori naturali, tra cui le attività vulcaniche, i cambiamenti nell'orbita terrestre e le fluttuazioni climatiche. Durante il periodo del Mesozoico, i livelli di CO₂ sono rimasti relativamente alti. Ciò ha contribuito a mantenere un clima caldo e a sostenere la diversificazione dei dinosauri e di altre forme di vita. Durante il periodo dell'Eocene, circa 50 milioni di anni fa, i livelli di CO₂ erano molto più elevati rispetto a quelli attuali, creando un clima più caldo. Tuttavia, nel corso dei milioni di anni successivi, i livelli di CO₂ sono diminuiti, contribuendo al raffreddamento globale e all'instaurarsi dei cicli glaciali-interglaciali. Nel Quaternario i livelli di CO₂ sono diminuiti gradualmente, raggiungendo il minimo di concentrazione (200 ppm o parti per milione) durante i periodi di glaciazione e i 300 ppm nei periodi interglaciali. Dall'Olocene sino all'era industriale, i livelli di CO₂ nell'atmosfera si sono mantenuti relativamente stabili.

Con l'industrializzazione e l'uso sempre maggiore di combustibili fossili, i livelli di CO₂ hanno iniziato ad aumentare rapidamente, raggiungendo livelli molto superiori a quelli registrati nei millenni pre-

cedenti. Si stima che la concentrazione atmosferica di biossido di carbonio sia aumentata del 35% dai tempi della rivoluzione industriale e del 20% dal 1958. La combustione dei combustibili fossili (carbone, petrolio) è accusata di essere la principale causa di questo aumento; la deforestazione è la seconda.

Nel grafico di figura 4 vengono riportati i valori di CO_2 atmosferici basati su analisi di carote di ghiaccio e sulle osservazioni continue eseguite dall'Osservatorio posto sulle pendici del vulcano Mauna Loa nelle Isole Hawaii. Il grafico mostra che a partire dal 1700 la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera è passata da circa 270 ppm a valori che hanno raggiunto 420 ppm nel 2020. Si evidenziano tre intervalli a gradiente diverso: uno pressoché costante sino al 1850, una graduale moderata crescita sino al 1960 e un'improvvisa impennata a partire da tale data. Il possibile confronto con l'andamento della temperatura media globale di figura 2 mostra un sostanziale parallelismo tra le due curve. Da ciò appare evidente una netta correlazione tra CO_2 e temperatura media.

Oggi la combustione di combustibili fossili e altre attività umane contribuiscono all'emissione nell'atmosfera di circa 39 miliardi di ton-

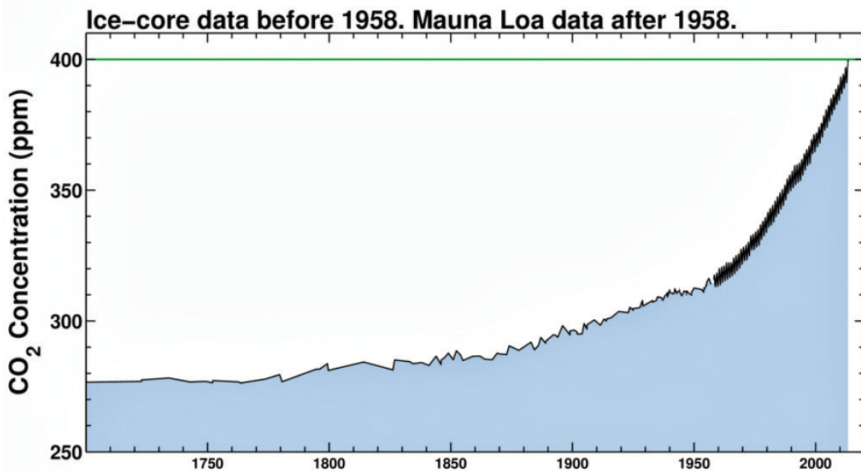


Figura 4. Valori osservati di concentrazione di CO_2 in atmosfera. I dati sino al 1958 sono derivati da misure su carote di ghiaccio. La curva in grassetto è data da misurazioni condotte presso l'Osservatorio del Mauna Loa (rielaborazione da Franks et al. 2014).

nellate o 39 Gigatonnellate (Gt) di CO₂ ogni anno. Dal 2000 ad oggi si stima siano stati emessi complessivamente 420 miliardi di tonnellate di CO₂. Questa è solo una piccola frazione (4%) dei 770 Gt di CO₂ emessi nell'atmosfera ogni anno dai processi naturali nell'oceano e sulla terraferma. Tuttavia, a differenza delle attività umane che emettono solo CO₂ nell'atmosfera, i processi naturali assorbono ed emettono CO₂. Infatti, le misurazioni della CO₂ atmosferica raccolte da una rete globale di stazioni di superficie indicano che questi "depositi" naturali di CO₂ non solo assorbono quasi tutta la CO₂ emessa dai processi naturali, ma assorbono anche quasi la metà della CO₂ emessa dalle attività umane. Se però consideriamo che nel passato la quantità di anidride carbonica (circa 300 ppm) presente nell'atmosfera garantiva un equilibrio nel sistema climatico mondiale, il brusco incremento di circa 100 ppm in 50 anni (2 ppm/anno) nella Troposfera certamente lo ha profondamente destabilizzato.

Attualmente con lo sviluppo delle tecniche di monitoraggio tramite misure satellitari è possibile sia evidenziare che modellare la distribuzione, la diffusione e la concentrazione di CO₂ presente in tutti gli stati della troposfera terrestre. La figura 5, immagine storica del 2009, mostra la prima mappatura della distribuzione ricavata dal satellite *Aqua* della NASA. Le misure satellitari più recenti mostrano l'alta disomogeneità spaziale di CO₂, con variazioni regionali fino al 5%.

La figura 6, realizzata nel novembre 2015 dall'Earth Science Program della NASA, è il risultato di una simulazione per studiare l'impatto che una riduzione della capacità della Terra e degli oceani di assorbire una parte dell'anidride carbonica prodotta dai combustibili fossili avrebbe sul livello di concentrazione atmosferica di questo gas. Le concentrazioni più alte sono localizzate nell'emisfero nord, dove è presente la maggioranza dell'industria mondiale. Sono altresì ben visibili zone di massima concentrazione (aree rosso intenso), dove si osservano variazioni anche di 20 ppm rispetto al valore medio di 410 ppm medi (riscontrato nel 2022). Le zone azzurre sono invece zone a minore concentrazione rispetto alla media. Queste fasce e questi punti di maggiore concentrazione sono comunque soggetti a spostamenti, anche turbolenti, continui in funzione della circolazione atmosferica interna alla troposfera e di quella presente nella bassa stratosfera. Nell'emisfero meridionale si nota una costante minore percentuale di CO₂.

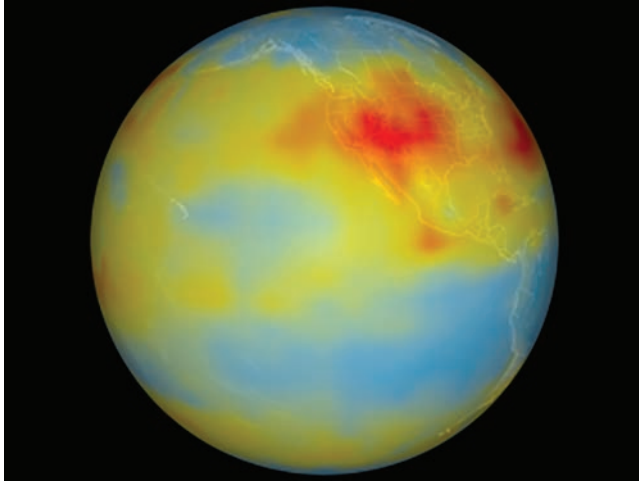


Figura 5. Immagine satellitare della distribuzione di CO_2 sulla superficie della troposfera (NASA, 2009).

Quanto mostrato dalle misure e osservazioni eseguite in osservatori e tramite satelliti evidenzia come, a causa dell'alta concentrazione delle attività antropiche, la maggiore concentrazione di CO_2 si trovi nell'emisfero settentrionale, mentre quello meridionale è caratterizzato da contenuti più bassi.

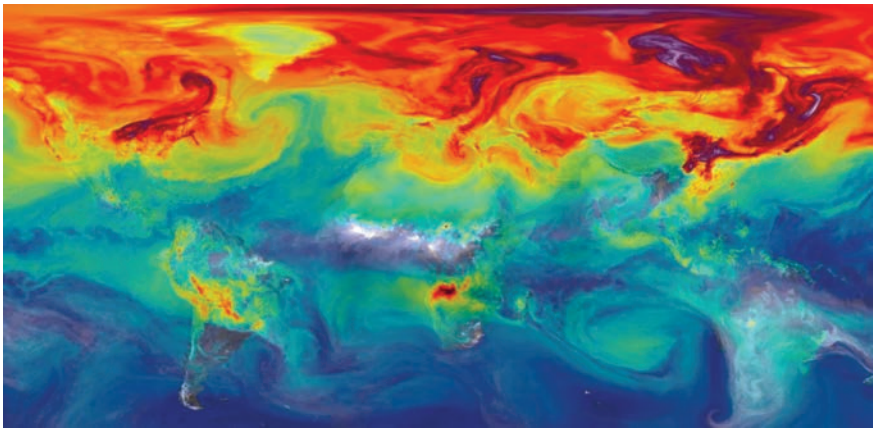


Figura 6. Densità di CO_2 nell'atmosfera (NASA/GSFC, 2015, Public Domain).

I livelli di CO₂ variano nel tempo e nello spazio. Si riconoscono delle fluttuazioni periodiche stagionali, dovute alle attività biogeniche, con concentrazioni massime in primavera-estate e minime in inverno. La CO₂, inoltre, si diffonde rapidamente dalle sorgenti di inquinamento anche per effetto della circolazione atmosferica, disperdendosi su tutti i mari e continenti, e talora concentrandosi su vaste aree del pianeta.

Modellazioni eseguite sulle emissioni di CO₂ nell'atmosfera da sorgenti poste negli Stati Uniti, in Europa e in Cina hanno mostrato che nell'arco di un semestre questo gas si è rapidamente diffuso in tutto l'emisfero settentrionale e in un anno solare si è distribuito uniformemente nell'intera atmosfera terrestre.

6. *La temperatura*

La temperatura terrestre è un indicatore cruciale per comprendere i cambiamenti climatici che stanno influenzando il nostro pianeta. Sulla base del VI rapporto IPCC (2021), così come è anche rappresentato nella figura 2, la temperatura globale sta cambiando con una velocità mai riscontrata negli ultimi 800.000 anni. La temperatura media globale del pianeta nel decennio 2011-2020 è stata di 1.09 °C superiore a quella del periodo 1850-1900, con un riscaldamento più accentuato sulle terre emerse rispetto all'oceano. I dati rilevati evidenziano come ciascuno degli ultimi quattro decenni è stato successivamente più caldo di qualsiasi decennio che lo ha preceduto dal 1850. Non solo, gli ultimi 7 anni (2015-2022) sono stati i più caldi del periodo industriale.

In figura 7 le barre di colore più scuro rappresentano i valori delle anomalie rispetto al periodo di riferimento considerato (1979 al 2020). Questi valori così elevati di temperatura sono stati spesso causati da persistenti ondate di calore che hanno interessato tutta la Terra.

I valori di temperatura media globale mostrano sostanzialmente questa forte tendenza all'aumento, ma per avere un quadro sufficientemente chiaro del problema è opportuno considerare come tali temperature si distribuiscano sulla Terra. La figura 8 dà una chiara visione di come l'incremento della temperatura media globale presenti delle forti anomalie regionali. Le anomalie termiche in figura 8 sono calcolate per

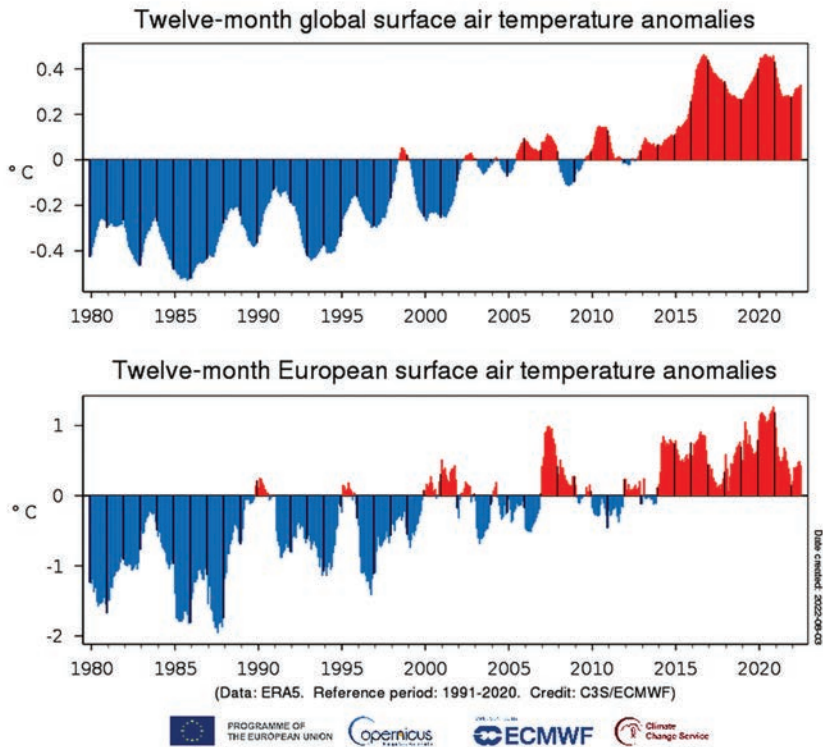


Figura 7. Valori medi annuali delle anomalie della temperatura dell'aria superficiale media globale (in alto) ed europea (in basso) per il periodo 1980-2021 (fonte: ERA5; credit: Copernicus Climate Change ECMWF.Service).

il periodo 2011-2020 facendo riferimento alle temperature medie del trentennio 1951-1980.

Secondo la NASA la temperatura superficiale media globale della Terra nel 2022 è stata pari al 2015 come la quinta più calda mai registrata. Continuando la tendenza al riscaldamento a lungo termine del pianeta, le temperature globali nel 2022 sono state di $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ sopra la media per il periodo di riferimento (1951-1980). Gli ultimi 9 anni sono stati gli anni più caldi da quando è iniziata la moderna registrazione dei dati nel 1880. Ciò significa che nel 2022 la Terra era di circa $1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ più calda rispetto alla media della fine del XIX secolo (NASA 2023). Come si può notare la regione artica presenta un riscaldamento

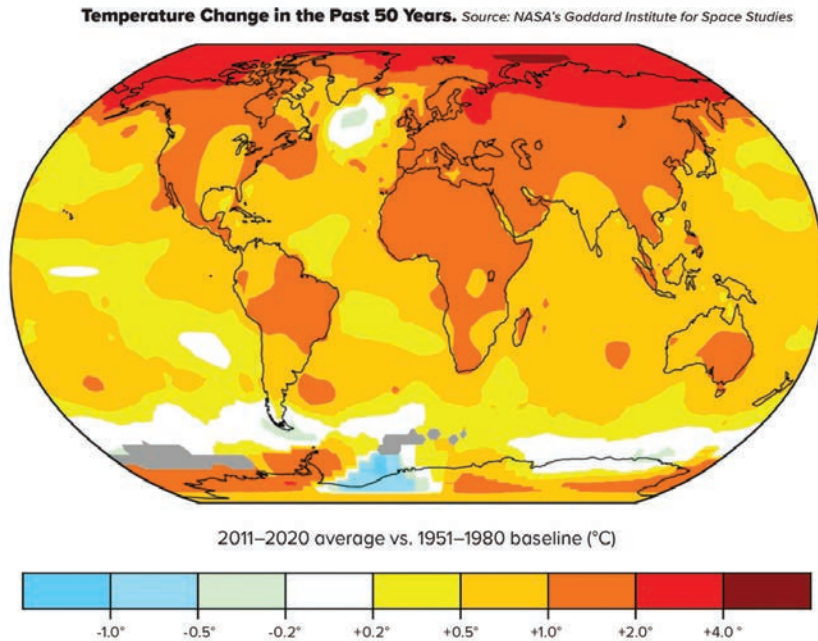


Figura 8. *Mapa delle anomalie termiche per il periodo 2011-2020 calcolate rispetto al periodo 1951-1980 (credit: NASA's Goddard Institute for Space Studies).*

tendenziale tra i più forti, circa 4 °C in più rispetto alla media globale. Le terre emerse dell'emisfero settentrionale mostrano notevoli incrementi (1.5-2 °C), negli oceani e nell'emisfero meridionale gli aumenti di temperatura risultano più modesti.

L'aumento della temperatura della zona artica è determinato dalla così detta *amplificazione artica*. Questo fenomeno è dovuto al fatto che l'atmosfera artica è molto stabile e ben stratificata e tale configurazione limita fortemente i movimenti di aria lungo la verticale atmosferica. La bassa atmosfera polare è quindi isolata, non potendo scambiare con gli strati alti masse d'aria, umidità ed energia. Quindi il calore non è in grado di fluire verso l'alto e, se avviene un riscaldamento della bassa atmosfera, l'eccesso di energia termica non può essere dissipato verso l'alto (Rizzotti 2021).

Il forte riscaldamento della zona artica ha una serie di importanti implicazioni sul cambiamento climatico globale, determinando lo scioglimento dei ghiacci polari e influenzando la circolazione atmosferica.

7. Ghiaccio polare

Il ghiaccio marino del Circolo Polare Artico subisce ciclicamente delle espansioni nel periodo invernale mentre si ritrae durante la stagione estiva. Il ghiaccio marino raggiunge la sua massima estensione alla fine dell'inverno e la sua minima estensione alla fine dell'estate, poiché gli oceani si raffreddano e si riscaldano in ritardo rispetto all'atmosfera. L'aumento delle temperature comporta lo scioglimento dei ghiacciai e di conseguenza la riduzione dell'estensione e dello spessore del ghiaccio. Negli ultimi anni il rapporto tra espansione e riduzione si sta dimostrando deficitario: il ghiaccio invernale non riesce a recuperare la quantità disciolta durante l'estate. L'aumento di temperatura dovuto all'effetto di amplificazione polare, accompagnato da una sempre maggiore incidenza di ondate di calore, porta ad una continua perdita della massa di ghiaccio. Dal 1979 a oggi, come riportato dall'IPCC su oceani e ghiacci (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*), si è riscontrata una perdita media lineare della superficie ghiacciata di 83.000 km² annui; in altri termini, in una finestra temporale di 43 anni, la calotta polare artica si è ridotta di circa 3,59 milioni di km², con un calo tra il 1979 e il 2017 pari al 13% per decennio rispetto alla media 1981-2010.

Nel 2021 il ghiaccio marino del Circolo Polare Artico (figura 9) ha raggiunto la sua minima estensione stagionale il 18 settembre e, secondo le rilevazioni satellitari, la contrazione si è assestata attorno ai 4,86 milioni di km².

Anche la diminuzione graduale dell'*albedo*, legata alla capacità della superficie del ghiaccio e della neve di riflettere i raggi solari nell'atmosfera, contribuisce fortemente al disgelo per l'aumento conseguente della temperatura del mare. A seguito dell'aumento delle concentrazioni di gas a effetto serra, il ghiaccio e la neve si formano più tardi in autunno e si sciolgono precocemente in primavera, esponendo più a lungo le superfici di acqua e di terra sottostanti, che assorbono maggiore energia.

Questo processo riscalda ulteriormente la superficie e l'atmosfera della regione, provocando uno scioglimento ancora più rapido del ghiaccio e della neve, e mettendo in moto un circolo vizioso che si autoalimenta e che è alla base della ragione per la quale l'Artico si sta riscaldando tre volte più velocemente rispetto ad altre regioni (amplificazione polare).



Figura 9. Vista satellitare della calotta artica il 18 settembre 2022. La linea gialla indica i contorni della calotta nel periodo di riferimento 1981-2010 (fonte: <https://twitter.com/NASAEarth/>).

L'effetto dell'amplificazione polare influenza lo strato superficiale del *Permafrost*, cioè di quello strato di terreno permanentemente ghiacciato che si trova ad alte latitudini e ad alte quote (Nord Europa, Siberia e America settentrionale). Lo strato superficiale di *Permafrost* è il più sensibile ai cambiamenti del clima. Si scioglie durante il periodo estivo (non solo nelle regioni artiche, ma anche oltre la quota di 2600 m sulle Alpi, ad esempio) in modo quasi irreversibile, in quanto gli inverni non riescono a ripristinare completamente lo strato ghiacciato. Lo strato più profondo, che può arrivare anche a profondità di 1500 m in Siberia, non ha mai subito decongelamento dall'ultima era glaciale, circa 10.000 anni fa. Oltre a queste variazioni stagionali, le elevate temperature estive derivate dall'effetto serra e dalle ondate di calore portano a scioglimenti irreversibili di larghe porzioni di territorio. Con la fusione del *Permafrost* aumenta il *termocarsismo*, fenomeno che crea depressioni e laghi: in pratica le zone cominciano ad assomigliare alle regioni carsiche. Inoltre gli eventi di fusione veloce, come i laghi nati dal disgelo e i più frequenti incendi nella tundra, sono responsabili di notevoli emissioni di metano e altri gas serra.

Ancora più drammatica appare la condizione della Groenlandia. Lo scioglimento del ghiaccio in Groenlandia è aumentato a un livello

senza precedenti per almeno 350 anni e fino a cinque volte di più rispetto all'epoca preindustriale. Tra il 2012 e il 2016 la regione ha perso circa 247 miliardi di tonnellate di ghiaccio ogni anno. Si tratta di una perdita quasi sicuramente maggiore rispetto al periodo 1992-2001, stimata in 8 miliardi di tonnellate all'anno.

Nuovi dati mostrano che la calotta glaciale della Groenlandia è nel mezzo della sua più grande stagione di scioglimento registrata finora.

Il diagramma del bilancio di massa della calotta glaciale della Groenlandia di figura 10 evidenzia la forte perdita di massa subita nel periodo della moderna industrializzazione.

L'ondata di caldo che ha destabilizzato il Nord Europa a fine luglio 2022 è migrata verso nord, portandosi sulla Groenlandia. Di particolare rilevanza sono state le due ondate di calore verificatesi a fine luglio e inizio agosto 2022. Se la temperatura media dell'aria continuerà ad aumentare, oltre la metà della superficie della calotta glaciale della Groenlandia presto si sarà pressoché fusa.

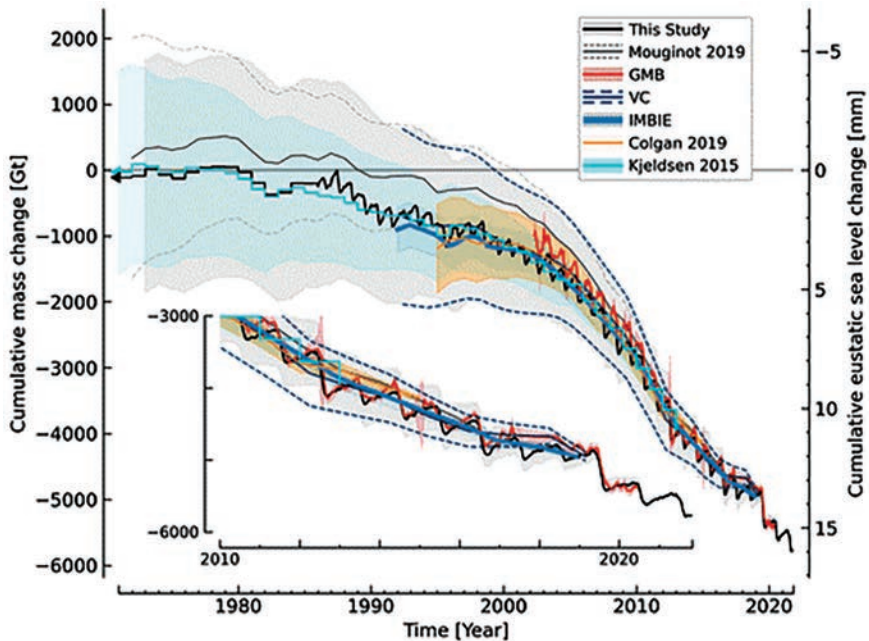


Figura 10. Perdita di ghiaccio della piattaforma glaciale della Groenlandia (Mankoff et al. 2021).

In figura 11 è visibile lo stato di avanzato scioglimento del ghiaccio che ricopre la quasi totalità della calotta glaciale, incluso il Summit (la vetta più alta del ghiacciaio), il 30 luglio. Questo evento ha interessato l'87% della superficie della calotta glaciale e la Groenlandia ha perso oltre 160 miliardi di tonnellate di ghiaccio solo nel mese di luglio 2022.

Dalla figura è evidente come nell'estate groenlandese la totalità delle aree costiere è priva di ghiacci e le nevicate invernali vengono completamente sciolte durante il periodo estivo. Inoltre, è particolarmente

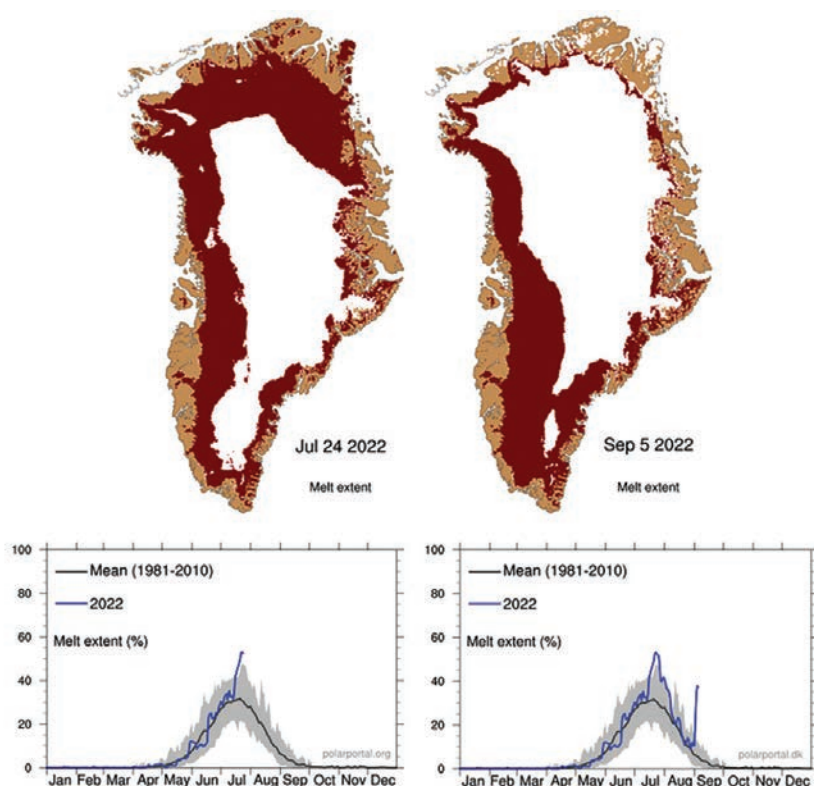


Figura 11. Mappa della Groenlandia nell'estate 2022. Le diverse colorazioni indicano la perdita totale di ghiaccio (in grigio), la zona in cui il ghiaccio sta fondendo (in arancio) e la parte ancora ghiacciata (in bianco). Sotto viene riportato l'andamento della temperatura dell'aria da aprile a settembre (estate artica). La curva in rosso rappresenta i valori rilevati nell'estate del 2022 e confrontati con la media degli ultimi 30 anni (curva blu) (fonte: Earth Observatory NASA).

rilevante la presenza di ghiaccio in fusione in tutta la parte meridionale dell'isola.

Un'altra ondata di calore con un picco di 14-16 °C sopra la media si è verificata l'8 e 9 agosto. La Groenlandia ha avuto un picco estivo di perdita di massa a causa del deflusso dell'acqua fusa il 22 luglio, quando ha raggiunto le 10 Gt/giorno (la media del periodo si attesta intorno alle 5 Gt/giorno) (vedi anche figura 13).

La calotta glaciale della Groenlandia si sta pericolosamente avvicinando a un punto di non ritorno, superato il quale se ne scioglierà irrimediabilmente una porzione significativa. Anche se dovessimo fermare di colpo le emissioni di CO₂, il principale dei gas a effetto serra responsabili del riscaldamento globale, superata quella soglia la porzione meridionale del secondo corpo ghiacciato più grande del mondo – dopo l'Antartide – andrà perduta. In un recentissimo lavoro (Höning et al. 2023) è stato calcolato che il punto di non ritorno per il ghiaccio della Groenlandia verrà superato quando saranno state immesse nell'atmosfera 1.000 Gt di CO₂. Poiché attualmente si stima che ne siano già state emesse circa 500 Gt e le emissioni globali attualmente stanno raggiungendo 40 Gt/anno, il punto di non ritorno potrebbe essere raggiunto già nel 2050.

A questo punto di non ritorno corrisponderebbe la completa fusione della distesa ghiacciata da 1,7 milioni di km². Se ciò dovesse accadere, il livello del mare si alzerebbe di 7 metri, divorando letteralmente intere regioni costiere e isole. Anche l'Italia verrebbe completamente stravolta nella sua geografia da un simile evento.

La perdita di ghiaccio in Groenlandia è stata la causa principale dell'innalzamento del livello globale del mare, contrariamente a quanto è avvenuto nei precedenti 100 anni, in cui sono stati i ghiacciai montani ad essere i principali responsabili del cambiamento del livello del mare. Se l'intera calotta dovesse scomparire, il livello dei mari aumenterebbe globalmente di 7.3 metri.

8. *Ondate di calore*

Le ondate di calore, note anche come onde di calore, si riferiscono a periodi di temperature atmosferiche molto elevate e prolungate che possono verificarsi in una determinata area geografica. Questi eventi

di calore estremo sono determinati principalmente dalla persistenza di un'alta pressione in aree già calde per altri effetti, quali alta temperatura, assenza di venti, maggiore irraggiamento solare e concentrazione di anidride carbonica (CO_2) nell'atmosfera.

Quando un'area viene influenzata da un'area di alta pressione prolungata, l'aria viene spinta verso il basso e, per effetto della compressione subita, si riscalda ulteriormente. A causa della subsidenza atmosferica, salendo in quota l'aria risulta più calda (inversione termica) L'intensità del fenomeno può essere anche notevole, con la temperatura che aumenta fino a diversi gradi in poche centinaia di metri di quota.

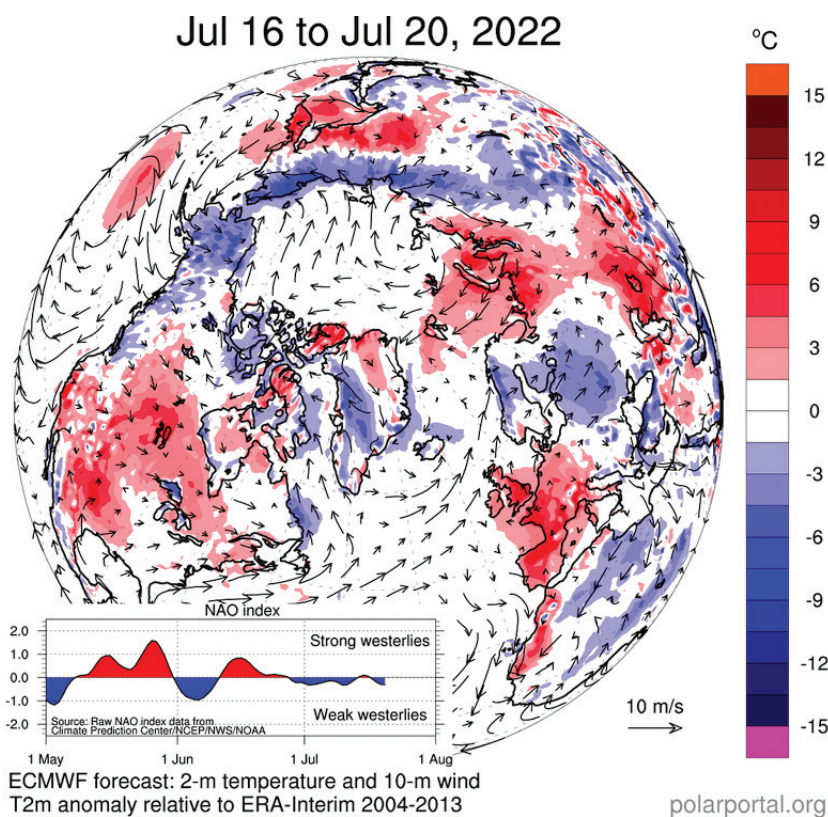


Figura 12. Mappa delle anomalie termiche (ondate di calore) che hanno interessato l'Europa e il Nord America nel luglio 2022. Le frecce indicano l'intensità e la direzione dei venti (Stendel, Mottram 2022).

Tutto ciò fa sì che l'aria calda venga intrappolata verso il suolo, con un conseguente accumulo di calore nell'atmosfera e un aumento delle temperature nella regione interessata. Le condizioni di alta pressione spesso comportano cieli sereni e assenza di nuvole, il che permette al Sole di riscaldare la superficie terrestre in modo più efficace. La presenza nell'aria di sostanze inquinanti (CO_2) fa sì che queste assorbano calore, contribuendo all'incremento della temperatura. Sebbene la CO_2 stessa non causi direttamente una specifica ondata di calore, contribuisce al riscaldamento globale e aumenta la probabilità di eventi di calore estremo.

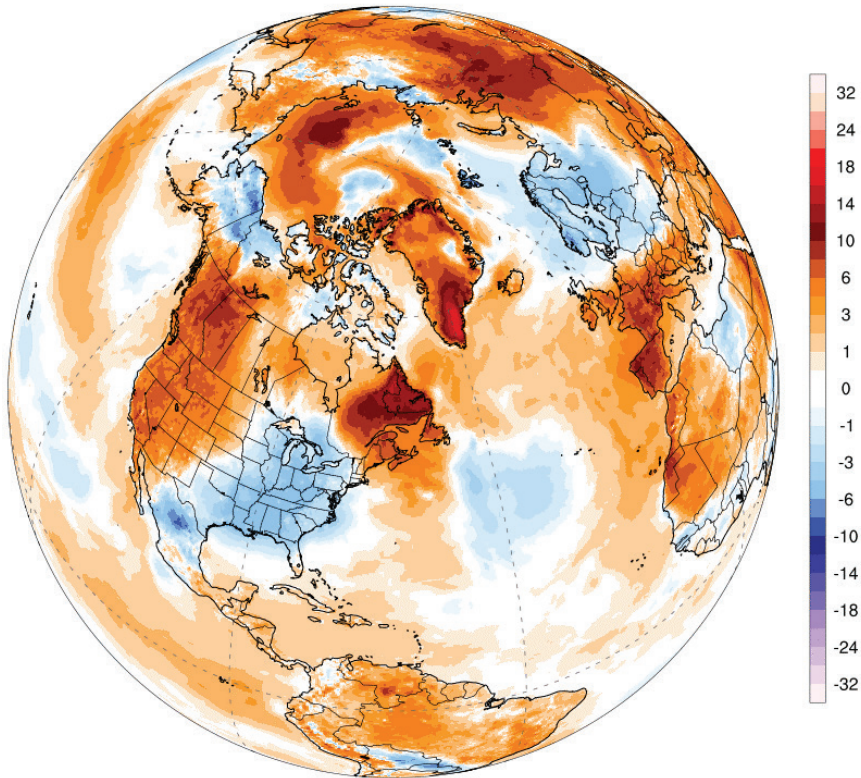


Figura 13. *Mapa delle anomalie termiche (ondate di calore) che hanno interessato tutto l'emisfero settentrionale il 6 settembre 2022 (Climate Reanalyzer.org). Le anomalie si riferiscono alla differenza della temperatura media osservata per il giorno specifico rispetto alla media delle temperature osservate nei giorni analoghi nel periodo 1979-2000.*

Il sistema ad alta pressione che preme sul terreno si espande verticalmente, creando una sorta di “isola” di calore, che allontana altri sistemi meteorologici. Riduce anche al minimo il vento e la copertura nuvolosa, rendendo l’aria più soffocante.

La figura 12 può essere d’aiuto per comprendere quanto sin qui detto. Nei quattro giorni considerati (dal 16 al 20 luglio 2022) l’emisfero settentrionale è stato interessato da innumerevoli ondate di calore (zone rosse), tutte collegate con aree di alta pressione. I venti (frecce nere) mostrano come queste aree siano completamente isolate rispetto alla circolazione atmosferica generale e in esse i venti siano deboli o assenti.

La figura 13 mostra uno scenario analogo a quello di figura 12, ma in esso spicca l’ondata di calore che ha colpito la Groenlandia, con il conseguente forte scioglimento dei ghiacci di cui si è precedentemente parlato.

La diffusione e la contemporaneità delle ondate di calore in tutto il mondo mostrate dalle figure 12 e 13 indicano come il riscaldamento globale possa essere considerato la causa primaria di questi fenomeni, che si stanno diffondendo su scala planetaria. Con l’accumulo di gas serra nell’atmosfera le temperature medie sono in aumento, rendendo più probabile la comparsa di ondate di calore più frequenti e intense nelle diverse regioni.

9. *Gli oceani*

La superficie del mare rappresenta il confine tra l’oceano e l’atmosfera. La conoscenza della distribuzione della temperatura della superficie marina (*Sea Surface Temperature*, SST) è un elemento essenziale per comprendere i flussi di energia tra oceano e aria, e conseguentemente il ruolo degli oceani nel plasmare il tempo e il clima. Le osservazioni di SST effettuate dalle navi risalgono a oltre 150 anni fa e sono alcune delle registrazioni strumentali più lunghe disponibili per la comprensione del clima. Grazie all’avvento della tecnologia satellitare a partire dagli anni settanta, si ha un monitoraggio continuo della parte superficiale dell’oceano su scala globale. Questo ha permesso di calcolare che più del 60% del calore totale assorbito è accumulato effettivamente negli strati superficiali (0-700 m). La restante parte, circa il 30%, viene in-

vece immagazzinata negli strati più profondi, ma la mancanza di una copertura ben distribuita di dati profondi non consente ancora di formulare un quadro complessivo del reale accumulo di tale energia.

La distribuzione delle temperature degli oceani e mari sono elementi chiave del sistema climatico, come la circolazione atmosferica, la ciclonogenesi e i modelli di precipitazioni. Le osservazioni su scala globale di SST sono necessarie per la stima del cambiamento globale del clima e di taluni eventi estremi. Le ondate di calore marine, i fronti oceanici e le regioni di upwelling vengono evidenziate da questi monitoraggi.

L'andamento medio globale della temperatura superficiale dei mari nel tempo è riportato nel grafico di figura 14.

L'SST medio globale è aumentato da quando sono iniziate le registrazioni nel 1850. Inizialmente, la temperatura media era abbastanza costante. All'inizio del XX secolo si è avuto un periodo di riscaldamento che è continuato fino agli anni quaranta, seguito da circa tre decenni con pochi cambiamenti complessivi. Alla fine degli anni settanta l'SST medio globale ha iniziato bruscamente a salire e il riscaldamento

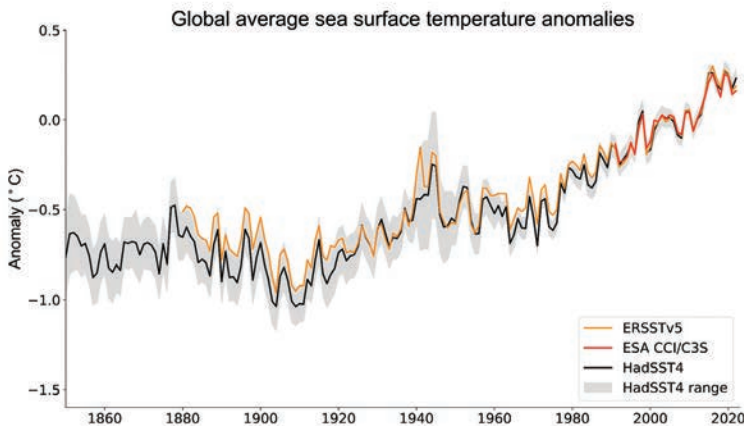


Figura 14. *Variazione media annuale della temperatura (°C) della superficie marina rispetto al trentennio di riferimento 1991-2020. I differenti colori si riferiscono ai diversi data-set utilizzati.*

continua ancora oggi. Si stima che, nell'intero periodo delle registrazioni, la SST media globale sia aumentata di quasi $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e che l'aumento negli ultimi quattro decenni sia di circa $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'ultima media quinquennale è di circa $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sopra la media del periodo di riferimento 1991-2020. Le differenze tra i set di dati sono maggiori nei record più vecchi a causa della non standardizzazione nelle misure. Dalla fine degli anni settanta le misurazioni sono state effettuate anche da boe ormeggiate e alla deriva.

Tutti i data-set mostrano che la SST media globale è aumentata negli ultimi tre decenni, ma l'aumento non è stato uniforme in tutte le parti dell'oceano. Il calcolo di una linea di *best fit* per singole regioni negli ultimi tre decenni fornisce un'indicazione del recente tasso di riscaldamento o raffreddamento. Tra le aree a più rapido riscaldamento vi sono parti dell'Oceano Artico, del Mar Baltico, del Mar Nero e parti del Pacifico extratropicale. Tuttavia, anche su periodi di pochi decenni,

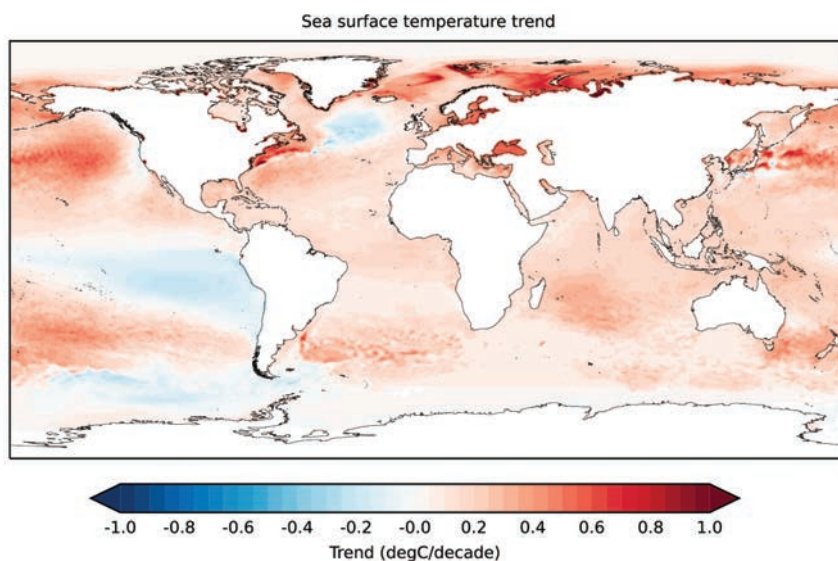


Figura 15. Andamento annuale delle anomalie del SST ($^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) per il periodo 1993-2022 (data source: ESA CCI/C3S SST Climate Data Record v3.0; Credit: C3S/ECMWF/UK Met Office).

le tendenze locali possono essere influenzate da, e anche mascherare, variabilità interna (figura 15). Un'area di raffreddamento nell'Atlantico settentrionale, a sud della Groenlandia e dell'Islanda, è coerente con le tendenze centenarie stimate da fonti di dati *in situ* e una delle poche aree a livello globale ad essersi raffreddata su tali scale temporali.

Allo stato attuale il riscaldamento dell'oceano sta già contribuendo ad accelerare i processi connessi al cambiamento climatico, come nel caso dell'innalzamento del livello globale del mare dovuto all'espansione termica (e quindi all'aumento di volume) che l'acqua subisce quando si riscalda. È probabile che il riscaldamento dei primi 700 m degli oceani abbia contribuito con una media di 0.6 mm/anno all'innalzamento del livello del mare dall'inizio degli anni settanta, a cui dobbiamo aggiungere ulteriori contributi relativi al calore accumulato anche negli strati più profondi sottostanti. Se poi consideriamo anche l'effetto indotto dallo scioglimento dei ghiacciai terrestri, queste stime crescono ulteriormente. Il rapporto del 2019 degli esperti del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC) riporta che, se il riscaldamento dovesse continuare con i ritmi finora registrati, entro il 2100 l'aumento del livello marino globale sarebbe di 0.6-1.1 m (<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-1/>).

10. *Livello marino*

Il livello del mare viene misurato con due metodi principali: mareografi e altimetri satellitari. Utilizzando i dati di decine di stazioni in tutto il mondo, si è potuto calcolare una media globale e adattarla alle differenze stagionali. Dall'inizio degli anni novanta il livello del mare è stato misurato dallo spazio utilizzando altimetri radar, che determinano l'altezza della superficie del mare misurando la velocità di ritorno e l'intensità di un impulso radar diretto verso l'oceano.

Il livello medio globale (figura 16) del mare è aumentato di 21-24 cm dal 1880. Nel 2021 il livello medio globale del mare era cresciuto di 97 mm rispetto ai livelli del 1993, e questo lo rende il valore medio annuale più alto dal 1993 a oggi.

Il livello medio globale dell'acqua nell'oceano è aumentato di 3.6 mm all'anno dal 2006 al 2015, ovvero 2.5 volte il tasso medio di

GLOBAL SEA LEVEL

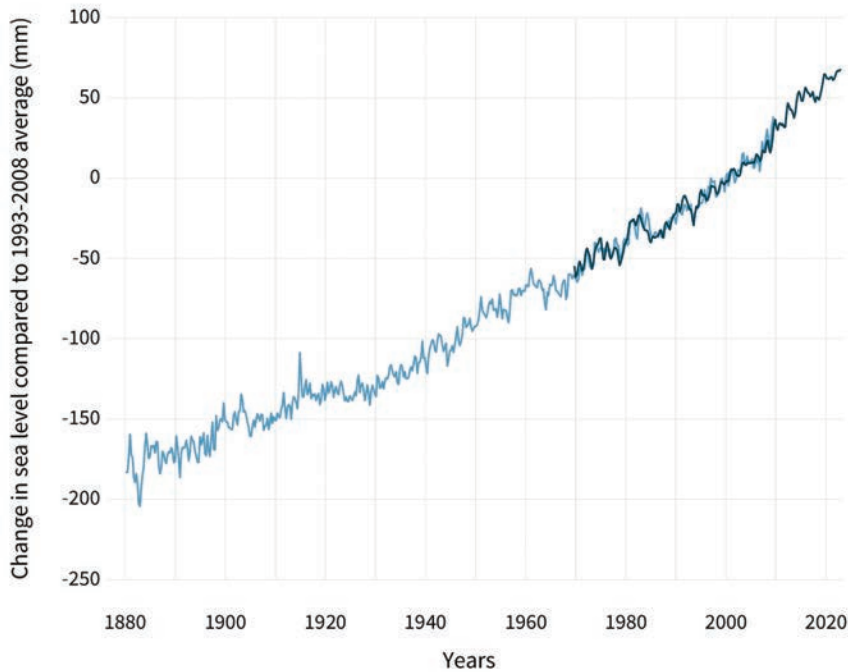


Figura 16. *Livello medio marino (valori ogni tre mesi) rilevati da mareografi sino al 1980 e misure satellitari dopo il 1980 (curva in blu scuro). I valori sono riportati come differenze (Lindsey 2022).*

1.4 mm all'anno per la maggior parte del XX secolo. Entro la fine del secolo è probabile che il livello medio globale del mare aumenti di almeno 0.3 m sopra i livelli del 2000, anche se le emissioni di gas serra seguiranno un percorso relativamente basso nei prossimi decenni.

L'innalzamento del livello dell'acqua è dovuto principalmente a una combinazione di due fattori di acqua di fusione dei ghiacciai e delle calotte glaciali e all'espansione termica dell'acqua di mare sotto l'effetto del suo costante riscaldamento.

Un terzo contributo, molto minore, all'innalzamento del livello del mare è dato dal calo della quantità di acqua liquida sulla terraferma: falde acquifere, laghi e bacini idrici, fiumi, umidità del suolo. Questo spostamento di acqua liquida dalla terra all'oceano è in gran parte dovuto al drenaggio delle acque sotterranee. Ovviamente queste stime

non tengono conto dell'eventuale scioglimento delle calotte glaciali poste sulle terre emerse (Groenlandia e continente antartico).

Le misure satellitari mostrano anche una certa differenza tra i diversi oceani e mari. In alcuni bacini oceanici, il livello del mare è salito fino a 15-20 cm dall'inizio della registrazione satellitare. Le differenze regionali esistono a causa della variabilità naturale nella forza dei venti e delle correnti oceaniche, che influenzano quanto e dove gli strati più profondi dell'oceano immagazzinano il calore. Il livello medio globale del mare è aumentato di circa 21-24 cm dal 1880. L'innalzamento del livello dell'acqua è dovuto principalmente a una combinazione di acqua di fusione dei ghiacciai e delle calotte glaciali e all'espansione termica dell'acqua di mare mentre si riscalda. Nel 2021, il livello medio globale del mare era di 97 mm sopra i livelli del 1993, rendendolo il valore medio annuale più alto dal 1993 ad oggi.

Va sottolineato che nel caso lo scioglimento della calotta glaciale della Groenlandia e di alcuni ghiacciai antartici, come ad esempio il Thwaites Glacier (Schmidt et al. 2023), dovesse continuare con i ritmi attuali, entro il 2100 il livello medio marino potrebbe innalzarsi in modo catastrofico, causando la sommersione di ampie regioni della Terra.

11. *Il Mediterraneo*

Sino agli anni ottanta nei paesi del Mediterraneo le estati erano determinate dall'anticiclone delle Azzorre, che rappresentava una zona di alta pressione posta nella parte centrale dell'Oceano Atlantico e che si contrapponeva alla depressione presente sull'Islanda. Tale depressione è la sorgente di fronti barici che attraversano l'Atlantico da ovest verso est. Quando questi fronti si muovono dall'alto Atlantico e interessano le nostre latitudini si dice che il flusso è zonale, ovvero i fronti perturbanti provenienti da ovest interessano con piogge e temporali vaste aree dell'Europa. Può capitare che questo flusso zonale venga bloccato e allora il flusso assume un andamento meridiano (flusso meridiano). In queste condizioni, scambi con nord-sud, non esiste più un marcato coinvolgimento dell'oceano, con conseguente significativo calo di piogge (siccità). Da qui nascono anche le configurazioni di blocco faurici di ondate di calore in estate e di ondate di gelo in tarda primavera.

Il nostro pianeta, già moderatamente caldo, mostra che le alte latitudini, per effetto dell'amplificazione artica, si sono riscaldate più di quelle a latitudine medio-bassa. In tal modo il gradiente medio di temperatura diminuisce e il flusso portante perde velocità, comincia a ondulare fino a fermarsi più frequentemente rispetto al passato. In queste condizioni l'anticiclone delle Azzorre tende a dirigersi più frequentemente verso le alte latitudini, lasciando che il promontorio dell'anticiclone nord africano assuma un sempre maggior controllo del Mediterraneo centrale e dell'Europa occidentale.

In tal modo, nel periodo estivo assistiamo sempre più di frequente all'insorgere di ondate di calore che colpiscono la totalità del bacino del Mediterraneo, con temperature roventi che non solo riscaldano le terre emerse ma hanno profondi effetti sulla temperatura delle acque. In realtà a causa di queste ondate di calore, sempre più persistenti, la temperatura media delle acque superficiali marine negli ultimi 10 anni

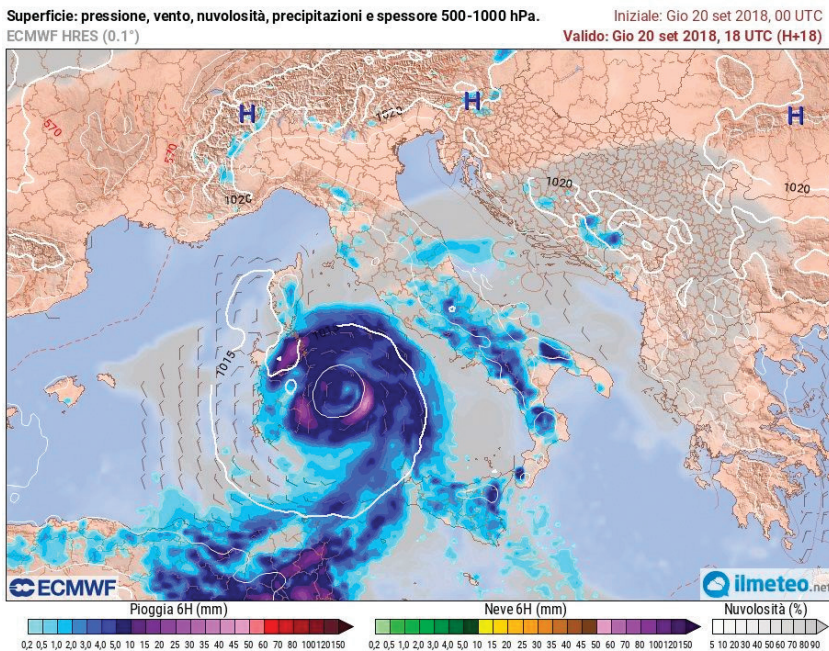


Figura 17. Immagine della medicanè sul Mar Tirreno alle 18 del 20 settembre 2018 nei modelli meteo ECMWF.

è aumentata di circa 3 °C, con punte che raggiungono i 30 °C. Assistiamo quindi ad una tropicalizzazione del Mediterraneo.

Essendo il Mediterraneo un mare chiuso, le alte temperature estive riscaldano anche le acque più profonde, trasformando il mare in un enorme contenitore di calore che sta modificando il clima di tutte le regioni circostanti e diventa una bomba a orologeria per l'innesto e l'alimentazione di violente perturbazioni con piogge alluvionali.

Oltre alle ondate di calore sempre più frequenti, altri eventi estremi si stanno verificando con intensità e frequenza sempre maggiori. Le caratteristiche genetiche di questi eventi estremi dipendono sempre dall'energia termica accumulata sul mare. Il mare molto caldo, con i primi transiti di masse d'aria instabili in quota è la genesi di grossi nuclei temporaleschi, come i così detti sistemi temporaleschi a mesoscala. Questi, a contatto con aree dove sono in atto significative avvezioni di vorticità positiva alle quote superiori della troposfera, possono successivamente evolvere in sistemi ciclonici a cuore caldo, e di tipo tropicale, che divengono apportatori di precipitazioni torrenziali, in grado di scatenare degli eventi alluvionali lungo le aree colpite, scaricando grosse quantità di pioggia (350-500 mm in 24 ore). A questo tipo di eventi appartengono i medicane (*Mediterranean Hurricane*) che sono una struttura depressionaria di tipo tropicale (*Tropical Like Cyclone*, TCL) che può formarsi nel bacino del Mar Mediterraneo soprattutto nella stagione autunnale. Questi eventi, una volta abbastanza rari, traevano origine nel basso bacino del Mediterraneo (sempre più caldo delle aree circostanti) e procedendo da ovest verso est lambivano la costa meridionale della Sicilia e della Calabria dissolvendosi nel Mar Egeo.

La figura 17 riporta un'immagine rielaborata dell'evento verificatosi il 18-20 settembre 2018 che ha interessato il Tirreno meridionale, causando notevoli danni lungo la costa laziale e della Calabria.

Attualmente, questi fenomeni sono divenuti sempre più frequenti (se ne contano una dozzina tra novembre 2022 e marzo 2023) e si stanno spostando sempre più a nord coinvolgendo tutta l'Italia. Uno dei più catastrofici di questi eventi è rappresentato dall'alluvione che ha colpito la Romagna nel mese di maggio 2023.

12. CO_2 negli oceani

Gli oceani svolgono un ruolo importante nella regolazione della quantità di CO_2 nell'atmosfera perché la CO_2 può facilmente scambiarsi tra aria e mare, cioè entrare e uscire rapidamente dagli oceani. Dei tre ambienti in cui viene immagazzinato il carbonio – atmosfera, oceani e biosfera terrestre – circa il 93% della CO_2 si trova negli oceani. Una volta negli oceani, la CO_2 non assorbe più calore.

Secondo il recente *Rapporto dell'IPCC sull'oceano e la criosfera* negli ultimi 50 anni, gli oceani hanno assorbito oltre il 90% del calore causato dai gas serra dovuti ad attività antropiche, aiutando così il processo di raffreddamento del pianeta. Questo processo è agevolato indirettamente anche dall'assorbimento da parte degli oceani della CO_2 presente nell'atmosfera. La quantità di anidride carbonica assorbita è stata solo stimata da parte della comunità scientifica, essendo particolarmente difficile riuscire ad individuare con precisione il cosiddetto “pozzo di assorbimento di carbonio” degli oceani, quantificando i flussi di CO_2 aria-mare. Il calcolo di questi flussi, infatti, non dipende solo dallo scambio di anidride carbonica che avviene sulla superficie del mare, ma è determinato in gran parte dalla turbolenza, vale a dire il movimento e la miscelazione costanti di aria e acqua.

I due fondamentali meccanismi che controllano la distribuzione del carbonio negli oceani sono la solubilità e le così dette “pompe biologiche”. La solubilità è azionata da due fattori interconnessi. In primo luogo – premesso che la CO_2 è solubile più del doppio nelle acque fredde polari che nelle calde acque equatoriali – le correnti superficiali trasportano l'acqua dai tropici ai poli, le acque si raffreddano e assorbono più CO_2 dall'atmosfera. In secondo luogo, le zone di alta latitudine sono anche regioni in cui si formano le acque intermedie e profonde. Mentre queste acque si raffreddano e, diventando più dense, sprofondano nell'oceano interno, trasportando la CO_2 accumulata in superficie. Nel caso delle pompe biologiche, la produzione primaria di fitoplancton marino trasforma CO_2 e sostanze nutritive dall'acqua di mare in materiale organico. Sebbene la maggior parte della CO_2 assorbita dal fitoplancton venga riciclata vicino alla superficie, una frazione consistente, forse il 30%, sprofonda nelle acque più profonde prima di essere riconvertita in CO_2 dai batteri marini. Solo lo 0.1% circa raggiunge il

fondale marino per essere sepolto dai sedimenti. La CO_2 che viene riciclata in profondità viene poi trasportata lentamente su lunghe distanze dalla circolazione termoalina su larga scala.

Già nel 2000 venne dimostrato (Feely et al. 2001) che la distribuzione di CO_2 nei diversi strati degli oceani era cambiata dal periodo preindustriale a quello più recente. Mentre nel passato si osservava, in tutti gli oceani, una maggiore concentrazione negli strati profondi, i dati post 1990 indicavano un arricchimento considerevole di CO_2 nei primi 1.000 m. In particolare, in tutti gli oceani si riscontrava un notevole aumento della CO_2 nelle aree comprese tra la latitudine 60° e 40° N.

Attualmente gli oceani assorbono circa il 25% della CO_2 atmosferica emessa dalle attività umane, con un tasso di circa 2 Gt/anno. Va sottolineato che questo rappresenta una piccola porzione dell'assorbimento di CO_2 da parte degli oceani, considerando il reale fabbisogno

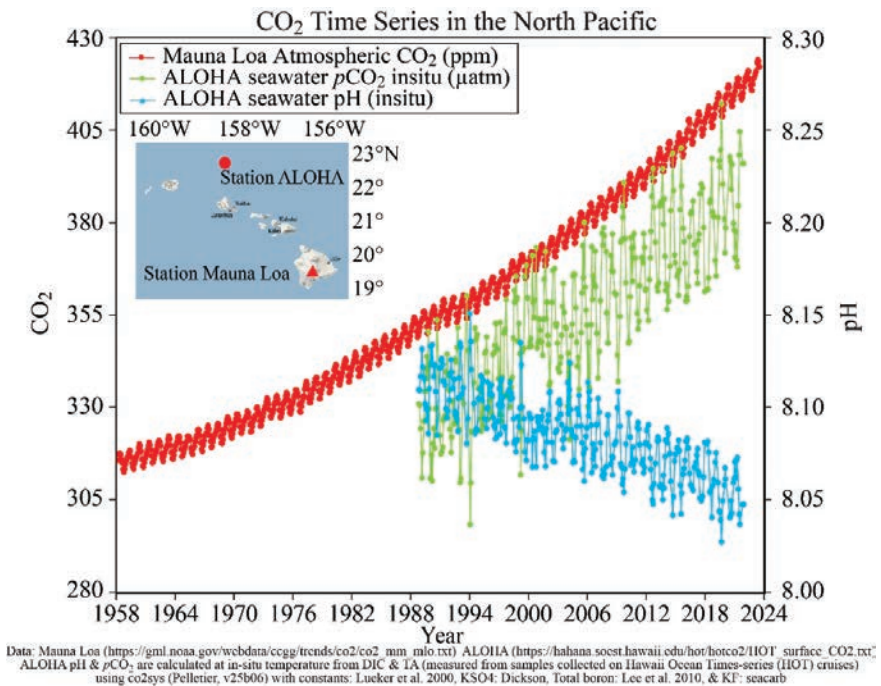


Figura 18. Andamento dell'aumento della CO_2 rispettivamente nell'atmosfera (linea rossa) e nell'Oceano Pacifico (linea verde) e quello delle misure di pH marino (linea blu) rilevate presso l'Osservatorio del Mauna Loa (Isole Hawaii) (NOAA 2023).

di CO₂ per l'oceano. Prima dell'era industriale il fabbisogno di CO₂ per le attività della vita marina era di circa 700 Gt/anno e questa quantità rappresentava l'equilibrio tra quanto assorbito e quanto rilasciato dal mare. Poiché però la CO₂ continua ad aumentare nell'atmosfera e la CO₂ è un gas acido, l'assorbimento di CO₂ antropogenico consuma ioni di carbonato e abbassa il pH dell'oceano. Questo provoca la così detta *acidificazione* del mare.

La figura 18 mostra la correlazione tra l'innalzamento dei livelli di anidride carbonica nell'atmosfera a Mauna Loa (rosso) con i crescenti livelli di CO₂ disciolti nell'oceano nella vicina Stazione Aloha, e il conseguente aumento di acidità dell'oceano visto come una diminuzione del pH dell'oceano. Il riscaldamento globale da CO₂ provoca un doppio colpo agli oceani perché non solo riscalda l'oceano assorbendo parte dell'aumento della temperatura atmosferica, ma assorbe anche circa un terzo dell'aumento di CO₂, che reagisce con l'acqua per produrre acido carbonico. Quindi, gli oceani aiutano a ridurre la CO₂ atmosferica e rallentare il riscaldamento globale, ma con conseguenze negative importanti per la chimica e la biologia degli oceani.

13. Conclusioni

In questa relazione si è voluto mettere a fuoco alcuni aspetti trattati nel *Sixth Assessment Report* dell'IPCC senza voler prendere alcuna posizione nell'intricata disputa tra sostenitori e negazionisti del cambiamento climatico. Si è voluto fare riferimento anche alle situazioni del passato remoto del nostro pianeta proprio per considerare che certi fenomeni sono sempre esistiti, ma che mai nella storia della Terra eventi estremi, come quelli che giornalmente ormai interessano le nostre comunità, si sono presentati con tale frequenza e con tale intensità.

Abbiamo considerato che il clima e anche la circolazione atmosferica su piano sia regionale che globale si stanno modificando ed evolvendo. Il nostro Mediterraneo sta divenendo un mare di tipo tropicale a causa dell'ingresso costante del così detto promontorio africano (le propaggini settentrionali dell'anticiclone africano), che sta sostituendo l'azione benefica dell'anticiclone delle Azzorre. Ciò sta portando gravi ondate di calore su tutta l'Europa meridionale, serie alternanze di siccità

e periodi alluvionali, cicloni di tipo tropicale (mai verificatisi con tale forza e di tale ampiezza).

Sicuramente i ghiacciai terrestri si stanno progressivamente estinguendo in un modo che appare irreversibile. I ghiacci polari (per effetto di amplificazione polare) e quelli della Groenlandia sono prossimi al raggiungimento del punto di non ritorno, cioè il momento in cui qualsiasi provvedimento venga preso il sistema non risponde più ed evolve in modo più o meno caotico alla ricerca di un nuovo equilibrio.

Bibliografia

- Berger A., Loutre M.F. *An Exceptionally Long Interglacial Ahead?* Science 2002;297(5585):1287-1288. <https://doi.org/10.1126/science.1076120>
- Copernicus-Climate Change Service. *Trend in annual sea surface temperature anomalies (°C/decade) for the period 1993-2022*. 2023. Data source: ESA CCI/C3S SST Climate Data Record v3.0.
- Feely R.A., Sabine Ch.L., Takahashi T., Wanninkhof R. *Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global CO₂ Survey*. Oceanography 2001;14(4):18-32. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.03>
- Franks P.J., Royer D.L., Beerling D.J. et al. *New Constraints on Atmospheric CO₂ Concentration for the Phanerozoic*. Geophysical Research Letters 2014;41(13):4685-4694. <https://doi.org/10.1002/2014GL060457>
- Höning D., Willeit M., Calov R., Klemann V., Bagge M., Ganopolski A. *Multistability and Transient Response of the Greenland Ice Sheet to Anthropogenic CO₂ Emissions*. Geophysical Research Letters 2023;50(6):e2022GL101827. <https://doi.org/10.1029/2022GL101827>
- Kramer LR., He H., Soden B.J., Oreopoulos L., Myhre G., Forster P.M., Smith C.J. *Observational Evidence of Increasing Global Radiative Forcing*. Geophysical Research Letters 2021;48(7):e91585. <https://doi.org/10.1029/2020GL091585>
- Krauss M. *La fisica del cambiamento climatico*. Milano: Raffaello Cortina; 2022.
- Lamb H.H. *The cold Little Ice Age climate of about 1550 to 1800*, in *Climate: Present, Past and Future*. London: Methuen; 1972.
- Lindsey R. *Climate Change: Global Sea Level*. 2022. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>
- Mankoff K.D. et al. *Greenland ice sheet mass balance from 1840 through next week*. Earth System Science Data 2021;13(10):5001-5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>

- Osman M.B., Tierney J.E., Zhu J., Tardif R., Hakim G.J. *Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum*. Nature 2021;599:239-244. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4>
- NASA. *Global Temperature Anomalies from 1880 to 2022*. 2023. Scientific Visualization Studio.
- NOAA. *Carbon Dioxide*. Global Climate Change. Vital Signs of the Planets 2023. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- NOAA. *Hawaii Carbon Dioxide Time-Series*. 2022. PMEL Carbon Program. <https://www.pmel.noaa.gov/co2/file/Hawaii+Carbon+Dioxide+Time-Series>
- Rizzotti G. *Amplificazione artica: nuove ricerche di Enea e Cnr*. Close-up Engineering 2021. <https://energycue.it/amplificazione-artica-nuove-ricerche-enea-cnr/29215/>
- Schmidt B.E., Washam P., Davis P.E.D. et al. *Heterogeneous melting near the Thwaites Glacier grounding line*. Nature 2023;614:471-478). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05691-0>
- Stendel M., Mottram R. *How the Greenland ice sheet fared in 2022*. Guest Post in CarbonBrief - Clear on Climate 2022. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-how-the-greenland-ice-sheet-fared-in-2022/>

ROBERTO DANOVARO*

*Climate Change Impacts
on the Mediterranean Sea Ecosystems*

Abstract: The Mediterranean Sea (<1% of the ocean surface, containing only the 0.3% of its volume) is a hot spot of marine biodiversity and hosts several habitats that contribute to increase the biodiversity of its dark portion. Mediterranean Sea ecosystems are increasingly subjected to anthropogenic impacts, including overfishing, which overlaps with the increasing impacts of global change. Here I summarize the main evidence collected so far on the impact of climate change on the Mediterranean ecosystems. The rise of seawater temperatures, which in being documented at unprecedented rates, is causing a significant shift in biodiversity. The increase in the frequency and intensity of episodic climate-driven events (e.g., heatwaves) are impacting the biodiversity and ecosystem functioning of the Mediterranean Sea, which result in massive mortality events, lower resilience of the impacted habitats, accelerated organic matter biogeochemical cycling, increased metabolism, miniaturization of the organisms' size and increased spread of microbial diseases. Given the higher sensitivity of the Mediterranean Sea ecosystems, specific measures are needed to adapt to ongoing climate change, restore damaged habitats and increase Mediterranean resilience.

1. *Vulnerability of the Mediterranean Sea to Global change*

The Mediterranean basin surface is ca 0.82% of the world ocean surface, with an average depth of ca 1,500 m (maximum depth 5,267 m), and a total volume representing ca 0,3% of the total ocean volume. Despite this, the Mediterranean Sea hosts ca 7.5% of the total number of marine species (Coll et al. 2010). The Mediterranean Sea, due to its small volume, is expected to react faster to climate change than the ocean (Bianchi 2007; Boero et al. 2008; Lejeusne et al. 2010).

* Professore ordinario di Ecologia, Università Politecnica delle Marche, Ancona.

For this reason, the Mediterranean Sea has been proposed as a “miniature ocean” that can be used as a model to anticipate the response of the global oceans to various kinds of human pressures.

The unique features of the Mediterranean basin (Sardà et al. 2004; Danovaro et al. 2010) include:

a) highly constant temperatures from roughly 300-500 m to the bottom, and bottom temperatures of about 12.8 °C to 13.5 °C in the western basin and 13.5 °C to 15.5 °C in the eastern basin (Emig and Geistdoerfer 2004);

b) high salinity, from about 38 to 39.5 with the stratification of the water column;

c) limited freshwater inputs (the freshwater deficit is equivalent to about 0.5-0.9 m y⁻¹, compensated by the Atlantic inflow of surface water), which influence also the deeper salinity values;

d) high oxygen concentrations, and e) food limited conditions, with strong energetic gradients and low nutrient concentrations in the eastern basin (Danovaro et al. 1999). Seasonally, during late spring and summer, the whole Western Mediterranean is strongly stratified with a thermocline at 20-50 m deep. In winter, the water column is more homogeneous, especially in the open sea.

The Mediterranean basin is characterized by the presence of small gyres (eddies) that have implications for the upwelling of deeper waters and the influence on primary productivity. This consequently affects the flux of organic matter settling to the deep seafloor. Episodic events of dense shelf water cascading, with currents speeds up to 1 m s⁻¹, have been documented in several canyons (Canals et al. 2006). Rapid vertical transport of surface waters to great depth occur as well as a result of dense water convection, when surface waters become denser as a result of evaporation and cooling. These phenomena, known as cascading, occur periodically over short terms (weeks). Given the limited average depth of the Mediterranean basin, the deep-water turnover is relatively rapid (from 50 to 80 years; Lacombe and Tchernia 1972; Danovaro et al. 2010) when compared with the wider oceanic regions, but this is largely compromised by its vulnerability to climate change and the much higher rates of deep-water warming, which have shown an acceleration in the last decades.

2. *Documenting the Global change in the Mediterranean Sea*

The Mediterranean, moreover, is also one of the areas in which different aspects of climate change have been better documented. Among these, three processes have been described in detail:

1) the increase in surface temperature at basin scale, starting from 1980 (Nykjaer 2009);

2) the increase in temperature and salinity in the eastern Mediterranean basin and in the deep waters of the western Mediterranean, starting from 1950 (e.g. Rixen et al. 2005);

3) increasing salinity and cooling of intermediate levantine waters (LIW, Levantine Intermediate Waters) (Brankart and Pinardi 2001; Painter and Tsimplis 2003);

4) the increase in the frequency of episodes of investigation of the summer thermocline with consequent massive mortality since the 90s (Rivetti et al. 2014).

It is a combination of important processes that are leading to profound changes in the biodiversity of the entire basin: these changes represent a possible model for understanding the ecosystem processes that, driven by climate change, will act on a global scale. In addition, the Mediterranean Sea is experiencing various typologies of climate induced changes, which can be summarized as follows:

a) Episodic, short-term events of surface water warming (marine heatwaves, MHW);

b) transient phenomena occurring in relatively short terms but with long lasting effects;

c) chronic changes in water column conditions.

The number and intensity of heatwaves is increasing in the last decades. In the period from May to August 2022, MHWs were spanning over nearly the entire Mediterranean Sea, with three-month average sea surface temperature anomalies reaching values as high as 4.6 °C locally, outstripping the summer of 2003, which held the previous record high. Western Mediterranean warming is evident from 2015, with marine heatwaves present almost every year (with maximum extent and intensity in 2003 and 2022). MHW are visible down to ca 100-m depth. In the Ligurian Sea the heatwave of 2022 reached on 21 July, the anomalous temperature of 5 °C above the average, and was still present in mid September.

3. *Ecological impacts of Global change in the Mediterranean Sea*

The main ecological consequences of global change can be here summarized as a result of the various components affected:

1. Mass mortality events on mesophotic hard bottoms and coral forests related to heatwaves;
2. Extensive mortality events on soft bottoms related to hypoxic phenomena;
3. Spreading of microbial diseases among shallow water sessile fauna;
4. Decreased coverage of algal forests (*Cystoseira* group) and habitat forming species related to rising temperatures;
5. Decreased primary production in surface waters related to the increased surface water working and stratification;
6. Decreased benthic production related to the lower organic C export from the photic zone;
7. Habitat shift due to the competition with non-indigenous tropical species;
8. Altered biodiversity in deep-sea sediments associated to transient phenomena;
9. Lower fishery production as a result of the reduced primary production and food availability.

Ecosystem goods and services are intimately dependent on biodiversity and all of these impacts have crucial cascade effects on local biodiversity, through a rarefaction of populations, shift in assemblage structure or local biodiversity loss. Every single change in biodiversity has effects on ecosystem services (i.e., the benefits that human population derive, directly or indirectly, from ecosystem functions), which play a crucial role in sustaining people's well-being (UNEP-WCMC 2011; MEA 2005). Mediterranean marine ecosystems provide a wide variety of ecosystem services and play a key role in sustaining human well-being (Armstrong et al. 2012). Among them C storage is crucial also for contrasting the global change. Several other services are essential, although not always appreciated, and include habitat provision, nursery grounds, trophic support, refugia (Mengerink et al. 2014; Levin and Le Bris 2015). The societal impacts of global climate change in the Mediterranean Sea are widespread. It is already evident the migration and change in the distribution of populations of commercial interest.

This impact will result from warming-induced changes in metabolism (Deutsch et al. 2015) and body size (Cheung et al. 2013) linked to latitudinal or depth shifts in species distributions, while the impacts of acidification on precious species, such as the red coral (Cerrano et al. 2013), are expected to rise in the long term.

References

- Armstrong C.W., Foley N., Tinch R., van den Hove S. *Services from the deep: steps towards valuation of deep sea goods and services*. Ecosyst. Serv. 2012;2:2-13.
- Bianchi C.N. *Biodiversity issues for the forthcoming Mediterranean Sea*. Hydrobiologia 2007;580:7-21.
- Boero F., Féral J.P., Azzurro E., Cardin V., Riedel B., Despalatovi M., Munda I., Moschella P., Zaouali J., Fonda Umani S., Theocharis A., Wiltshire K., Briand F. (2008) *Climate warming and related changes in Mediterranean marine biota*. In: Briand F, ed. *Climate Warming and Related Changes in Mediterranean Marine Biota*. Monaco: CIESM Workshop Monographs No. 35; 2008. p. 5-21.
- Brankart J.M., Pinardi N. *Abrupt cooling of the Mediterranean Levantine intermediate water at the beginning of the 1980s: Observational evidence and model simulation*. J Phys Oceanogr 2001;31:89-114.
- Canals M., Puig P., de Madron X.D., Heussner S., Palanques A., Fabres J. *Flushing submarine canyons*. Nature 2006;444:354-357. <https://doi.org/10.1038/nature05271>
- Cerrano C., Cardini U., Bianchelli S., Corinaldesi C., Pusceddu A., Danovaro R. *Red coral extinction risk enhanced by ocean acidification*. Sci Rep 2013;3:1457.
- Cheung W.W.L., Sarmiento J.L., Dunne J., Frölicher T.L., Lam V.W.Y., Palomares M.L.D., Watson R., Pauly D. *Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems*. Nat Clim Change 2013;3:254-258.
- Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., Kaschner K., Ben Rais Lasram F., Aguzzi J., Ballesteros E., Bianchi C.N., Corbera J., Dailianis T. et al. *The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats*. PLoS ONE 2010;5(8):e11842.
- Danovaro R., Company J.B., Corinaldesi C. et al. *Deep-sea biodiversity in the*

- Mediterranean Sea: the known, the unknown, and the unknowable*. PLoS ONE 2010;5(8):e11832.
- Danovaro R., Dell'Anno A., Fabiano M., Pusceddu A., Tselepidis A. *Deep-sea ecosystem response to climate changes: the eastern Mediterranean case study*. Trends Ecol Evol 2001;16:505-510.
- Danovaro R., Dinet A., Duineveld G., Tselepidis A. *Benthic response to particulate fluxes in different trophic environments: A comparison between the Gulf of Lions-Catalan Sea (Western Mediterranean) and the Cretan Sea (Eastern Mediterranean)*. Progr. Oceanogr. 1999; 44(1-3):287-312.
- Deutsch C., Ferrel A., Seibel B., Pörtner H.O., Huey R.B. *Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats*. Science 2015;348:1132-1135.
- Emig C.C., Geistdoerfer P. *The Mediterranean deep-sea fauna: historical evolution, bathymetric variations and geographical changes*. Carnets Geol Madrid 2004;4(A01):10. <https://doi.org/10.4267/2042/3230>
- Lacombe H., Tchernia P. *Caractères hydrologiques et circulation des eaux en Méditerranée*. In: Stanley D.J., ed. *The Mediterranean Sea*. Stroudsberg: Dowden, Hutchinson and Ross; 1972. p. 26-36.
- Lejeusne C., Chevaldonné P., Pergent-Martini C., Boudouresque C.F., Perez T. *Climate change effects on miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea*. Trends Ecol Evol 2010;25:250-260.
- Levin L.A., Le Bris N. *The deep ocean under climate change*. Science 2015; 350:766-768.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being, synthesis*. Washington (DC): Island Press; 2005.
- Mengerink K.J., Van Dover C.L., Ardron J., Baker M., Escobar-Briones E., Gjerde K., Koslow J.A., Ramirez-Llodra E., Lara-Lopez A., Squires D., Sweetman A.K., Levin L.A. *A call for deep-ocean stewardship*. Science 2014;344:696-698.
- Nykjaer L. *Mediterranean Sea surface warming 1985–2006*. Clim Res 2009;39:11-17.
- Painter S.C., Tsimplis M. *Temperature and salinity trends in the upper waters of the Mediterranean Sea as determined from the MEDATLAS dataset*. Cont Sci Res 2003;23:1507-1522.
- Rivetti I., Fraschetti S., Lionello P., Zambianchi E., Boero F. *Global warming and mass mortalities of benthic invertebrates in the Mediterranean Sea*. PLoS ONE 2014;9(12):e115655.
- Rixen M., Beckers J., Levitus S., Antonov J., Boyer T., Maillard C., Fichaut M., Balopoulos E., Iona S., Dooley H., Garcia M., Manca B., Giorgetti A.,

Manzella G., Mikhailov N., Pinardi N., Zavatarelli M. *The Western Mediterranean Deep Water: a proxy for climate change*. Geophys Res Lett 2005;32(12):L12608.

Sardà F., Calafat A., Flexas M., Tselepides A., Canals M., Espino M., Tursi A. *An introduction to Mediterranean deep-sea biology*. Sci Mar 2004;68(S3): 7-38.

UNEP-WCMC. *Marine and coastal ecosystem services: Valuation methods and their application*. UNEP-WCMC Biodiversity. Series No. 33; 2011.

MONICA MONTEFALCONE*

*Capacità di ricupero delle scogliere coralline maldiviane
agli effetti del cambiamento globale*

Abstract: The alteration of one or more environmental factors, such as temperature, light or nutrients dissolved in water, represents a source of stress for marine organisms. Hard corals that build tropical coral reefs are sensitive to the rise in water temperature, which is the main cause of the well-known bleaching and mortality events. In 1998, a severe global thermal anomaly hit coral reefs of the Maldives causing a massive bleaching event that resulted in about 90% of coral mortality. In April 2016, a new thermal anomaly hit the Maldivian reefs, with surface water temperatures among the highest ever recorded that persisted for several weeks, causing bleaching and mass mortality. Since 1997, scientific expeditions have regularly been conducted every year to monitor health status and resilience of Maldivian coral reefs. The collection of a 25-year historical series of data provides information on the state of the coral community before, during and after the disturbance events, allowing to evaluate the recovery capacity of Maldivian reefs over time. Recovery of hard coral cover values similar to those observed prior the 1998 mass mortality event (60-70%) was achieved in 2014, 16 years after the first bleaching event thanks to a recovery rate of about 3.3% per year. The second coral bleaching mostly affected branched and tabular *Acropora* corals, especially at shallower depths (between 3 m and 10 m) and in the lagoon reefs, and showed a comparatively lower coral mortality (around 70%) than the former event, thus providing evidence in support to the adaptative hypothesis of corals to thermal anomalies. Maldivian reefs recovered in the following years with a faster rate of about 7.2% per year, and in 2022 hard corals had already reached cover values around 55%. However, a high spatial variability in the recovery pattern of reefs has been observed, where the less resilient reefs are those more affected by local human (e.g., population density, tourism) and natural (e.g., hydrodynamics) pressures. Climate change predictions suggest that anomalous climatic events will inevitably be more frequent in the years to come, affecting the resilience of coral reefs. In this context, continuous research and monitoring activities will be of fundamental importance to verify the adaptability and the survival strategies of coral communities and to predict the future of Maldivian coral reefs.

* Professore associato di Ecologia, Seascape Ecology Lab., Università di Genova.

1. *Introduzione*

Le scogliere coralline tropicali sono un patrimonio naturale unico in termini di biodiversità associata, servizi ecosistemici e risorse fornite all'umanità. L'alterazione di uno o più fattori ambientali, come temperatura, luce o nutrienti disciolti in acqua, rappresenta una fonte di stress per gli organismi marini. I coralli ermatipici, i principali responsabili della costruzione delle scogliere coralline, sono molto sensibili all'alterazione dei fattori ambientali; in particolare, l'innalzamento della temperatura rappresenta la principale causa degli ormai noti eventi di sbiancamento dei coralli (*coral bleaching*), con conseguente mortalità di massa. A causa delle elevate temperature, le alghe simbiotiche (i.e., zooxantelle) che vivono nei tessuti dei coralli vengono espulse dalla colonia, provocandone il totale o parziale sbiancamento. I coralli possono sopravvivere in queste condizioni qualora l'anomalia termica che ha causato lo sbiancamento non durasse troppo a lungo; diversamente, se le alte temperature non diminuissero in tempi ragionevolmente brevi, le colonie andrebbero incontro a stress e quindi alla morte.

Le emissioni antropogeniche di carbonio hanno causato un aumento di 1 °C nella temperatura superficiale del mare a partire dal periodo preindustriale (Hoegh-Guldberg et al. 2007), e questo riscaldamento globale della temperatura sta causando, sempre più frequentemente, eventi di sbiancamento dei coralli e di mortalità di massa nella maggior parte delle regioni tropicali (Baker et al. 2008). Lo stress termico sui coralli è inoltre amplificato dal fenomeno dell'ENSO (*El Niño - Southern Oscillation*) (Brown et al. 2013), un periodico evento di anomalia termica i cui effetti si ripercuotono sul clima di tutto il pianeta. Gli episodi sempre più frequenti di sbiancamento dei coralli avvenuti in tutto il mondo negli ultimi decenni hanno provocato catastrofiche perdite nella copertura corallina, portando a cambiamenti nella struttura e composizione delle comunità coralline talvolta irreversibili (Morri et al. 2015), con un conseguente declino della biodiversità (Richardson et al. 2018). Le anomalie termiche a scala globale stanno aumentando in frequenza, gravità ed estensione geografica fin dagli anni ottanta (Heron et al. 2016; Hughes et al. 2018). In particolare, l'ENSO avvenuto nel 1998 ha colpito le scogliere coralline in tutto l'Oceano Indiano (Donner et al. 2017). Le Maldive sono state tra i paesi più colpiti, con una

mortalità dei coralli dell'80-100% a seconda delle specie presenti e della località geografica (Bianchi et al. 2006). A partire dalla metà del 2014, le temperature dell'acqua sono aumentate abbastanza da innescare uno sbiancamento su larga scala nell'Atlantico, nel Pacifico e nell'Oceano Indiano, che è proseguito nel 2015 e si è esteso nell'emisfero australe nel 2016 (Eakin et al. 2016). Questo evento di riscaldamento legato a un nuovo ENSO è stato senza precedenti, sia per durata sia per intensità, causando lo sbiancamento dei coralli nel 72% delle scogliere coralline mondiali (Heron et al. 2017) con conseguente mortalità di massa dei coralli (Hughes et al. 2017). Anche le Maldive sono state fortemente colpite da questo evento di sbiancamento globale nell'aprile del 2016 (Perry e Morgan 2017), con temperature delle acque superficiali tra le più alte mai registrate (2-3 °C sopra la media stagionale) (Montefalcone et al. 2018), che si sono mantenute per diverse settimane, causando nuovamente un fenomeno di mortalità di massa dei coralli.

I monitoraggi a lungo termine sono necessari per comprendere le tendenze negli ecosistemi marini e la loro risposta alle perturbazioni umane e le serie storiche di dati sono essenziali per definire i tassi di ricupero e per fornire le *baselines* rispetto alle quali misurare il cambiamento (Gatti et al. 2015; 2017). Sfortunatamente, lunghe (scala decennale) e ininterrotte serie di dati sono rare per gli ecosistemi marini, il che rende particolarmente difficile determinare l'entità e la velocità con cui stia avvenendo il cambiamento climatico globale sugli oceani.

Questo studio ha l'obiettivo di analizzare una serie storica di dati lunga venticinque anni (1997-2022) sullo stato delle scogliere coralline delle Maldive, che comprende i due principali eventi di ENSO avvenuti nel 1998 e nel 2016. Dal 1997 sono state condotte spedizioni scientifiche annuali alle Maldive per monitorare lo stato delle scogliere coralline, permettendo così di confrontare il loro stato prima, durante e dopo questi eventi di sbiancamento e documentando la capacità e i tempi necessari per il successivo ricupero.

2. *Spedizioni scientifiche alle Maldive*

A partire dal 1997 i ricercatori del laboratorio di Ecologia del Paesaggio Marino del DiSTAV dell'Università di Genova (membri del



Figura 1. Ricercatori del DiSTAV (Università di Genova) durante le attività subacquee di rilevamento visivo e monitoraggio dello stato delle comunità coralline delle Maldive.

consiglio scientifico e direttivo della *International School for Scientific Diving*) hanno regolarmente condotto attività di ricerca per monitorare lo stato di salute delle scogliere coralline maldiviane, organizzando ogni anno, tra i mesi di aprile e maggio, una spedizione scientifica alle Maldive. Durante ogni spedizione sono stati monitorati un numero minimo di otto siti scelti randomicamente negli atolli di Baa, Goidhoo, Thoddoo, Rasdhoo, Ari, Malé Nord, Malé Sud, Felidhoo, Mulaku, Gaafu Alifu e Fuvahmulah. In totale sono stati monitorati 158 siti, distribuiti in maniera tale da coprire da nord a sud la maggior parte dell'estensione geografica dell'arcipelago delle Maldive. La rotta delle crociere differiva leggermente da un anno all'altro, ma alcuni siti sono stati rivisitati più volte negli anni. La posizione di ciascun sito è stata registrata utilizzando un GPS. In ogni sito i dati (descritti più dettagliatamente di seguito) sono stati raccolti in immersione subacquea con autorespiratore ad aria, a profondità comprese tra i 4 e 6 m.

La composizione delle comunità di scogliera corallina è stata descritta utilizzando una serie di categorie bentiche che combinano taxa con forme di crescita simili (Morri et al. 2015). In particolare, è stata misurata la copertura totale dei coralli duri (*hard corals*) sulla scogliera sommando la copertura (in %) delle seguenti categorie di corallo duro: *Acropora* ramificate, *Acropora* digitate, *Acropora* tabulari, altri coralli ramificati, coralli fogliosi, coralli massivi, coralli incrostanti, *Fungiidae*, *Tubastrea micranthus*, *Heliopora coerulea*, *Millepora* spp. Per ciascuna di queste categorie bentiche la percentuale di copertura del substrato è

stata stimata visivamente utilizzando la tecnica di Wilson et al. (2007), con due subacquei che nuotano a una distanza di 1-2 m sopra il fondo e osservano un'area di circa 20 m², in tre repliche di stima visiva in ciascuno dei reef monitorati e per ogni anno (figura 1).

3. Capacità di ricupero delle scogliere coralline maldiviane

La temperatura superficiale del mare (SST, *Sea Surface Temperature*) alle Maldive è aumentata significativamente ($r=0,85$) nel tempo (1948-2021), con un incremento massimo di circa 1,6 °C negli ultimi settant'anni (figura 2). Similmente anche la popolazione residente alle Maldive è aumentata lentamente ma costantemente negli ultimi decenni, specialmente negli atolli centrali delle Maldive, mentre il numero di turisti nel paese è cresciuto in modo esponenziale (Montefalcone et al. 2020).

L'andamento generale dei principali biocostruttori sulle scogliere coralline maldiviane superficiali (~5 m di profondità) negli ultimi venticinque anni è osservabile dai valori medi annui di copertura % dei coralli duri (figura 3). A causa dello sbiancamento del 1998, la copertura dei

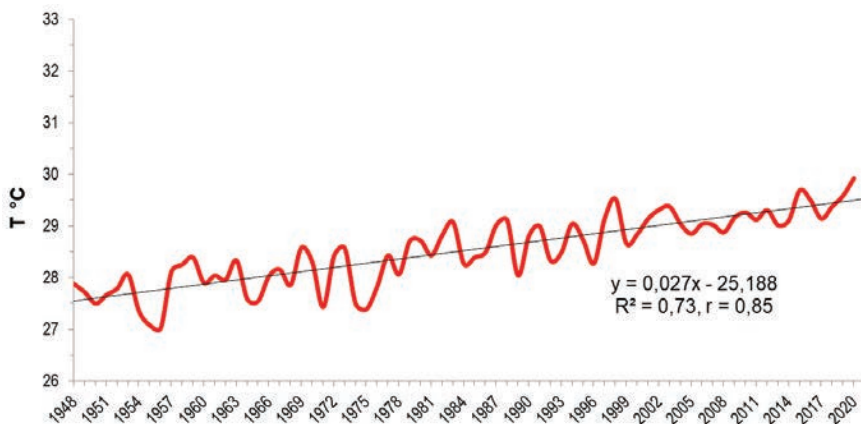


Figura 2. Aumento nel tempo (1948-2021) della temperatura superficiale del mare alle Maldive. Dati di SST (*Sea Surface Temperature*) ottenuti da US National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/>).

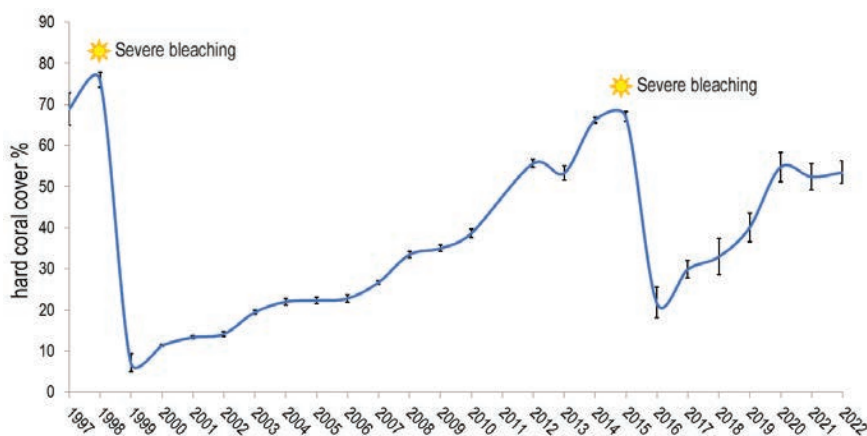


Figura 3. Andamento negli ultimi venticinque anni (1997-2022) dei valori medi (\pm e.s.) della copertura (in %) dei coralli duri (hard coral) sulle scogliere coralline delle Maldive a 5 m di profondità. Sono indicati i due anni (1998 e 2016) in cui sono avvenuti i due eventi severi di sbiancamento (bleaching) dei coralli.

coralli duri sulle scogliere superficiali è passata da un valore di $76 \pm 2,2\%$ nel 1998 a un valore di $7,2 \pm 0,3\%$ nel 1999. I coralli ramificati e tabulari del genere *Acropora*, dominanti in molte delle scogliere coralline prima del *bleaching*, sono risultati i più vulnerabili all'impatto climatico, scomparendo quasi completamente nel 1999 (Morri et al. 2015). Il ricupero nel tempo è proceduto lentamente negli anni seguenti grazie al reclutamento dei pochi coralli che erano sopravvissuti, e solo nel 2014 sono stati nuovamente raggiunti valori di copertura simili a quelli di pre-sbiancamento, con valori medi pari al $67,1 \pm 3,8\%$ nel 2015. Nel 2016, come conseguenza del nuovo e ancor più severo evento di sbiancamento (figura 4), molti dei coralli ramificati e tabulari presenti alle minori profondità (~5 m) sono morti, portando a valori di copertura media dei coralli duri sulle scogliere pari a $21,8 \pm 2,1\%$. La maggior parte dei coralli massivi e dei coralli ramificati del genere *Pocillopora* sono sopravvissuti a questo secondo evento, mostrando talvolta solo una mortalità parziale. Già a partire dall'anno successivo, l'alto tasso di reclutamento dei coralli sopravvissuti e la rapida crescita delle nuove colonie hanno permesso alle scogliere maldiviane di recuperare nel tempo, raggiungendo valori medi di copertura dei coralli duri pari a $53,5 \pm 4,6\%$ a maggio del 2022, indicativi di un ricupero quasi totale della comunità corallina (figura 5).



Figura 4. Scogliere coralline delle Maldive completamente sbiancate osservate durante la spedizione scientifica alle Maldive nel mese di maggio 2016, effettuata durante l'anomalia termica del 2016.

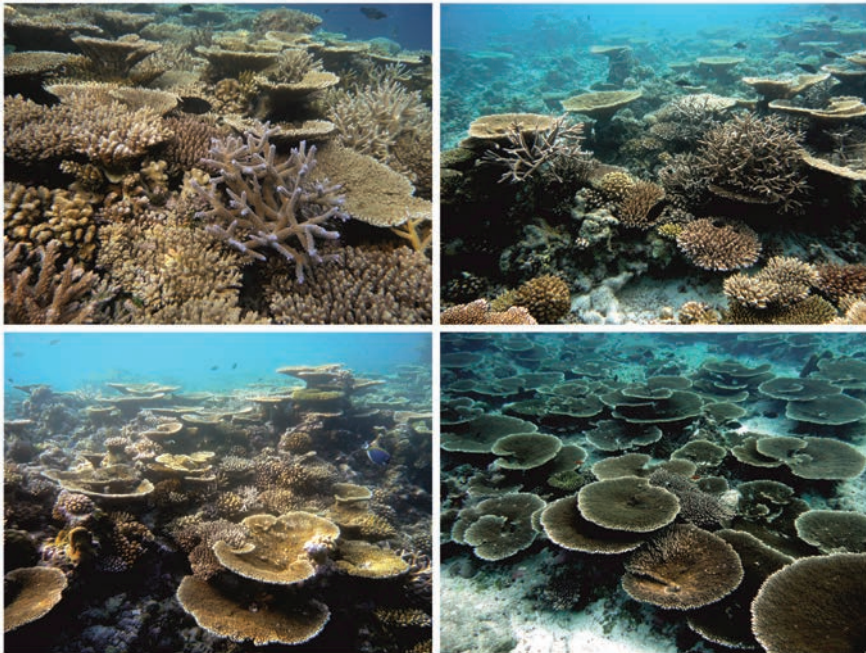


Figura 5. Scogliere coralline delle Maldive monitorate durante l'ultima spedizione scientifica tra aprile e maggio 2022, dove si osserva un'elevata copertura del fondo con i coralli duri, indicativa di un ricupero quasi totale della comunità corallina.

La disponibilità di una serie storica di dati lunga venticinque anni ha permesso di confrontare le capacità di ricupero delle scogliere coralline maldiviane dopo i due eventi di sbiancamento e mortalità di massa che le hanno colpite. Il tasso di ricupero annuo dei coralli duri dopo il *bleaching* del 1998 è stato pari a 3,3%, e ha permesso alle scogliere coralline di recuperare quasi completamente la copertura originaria dei coralli duri in sedici anni. Anche se l'anomalia termica del 2016 è stata dichiarata la più intensa e dannosa mai registrata (Eakin et al. 2016; Hughes et al. 2017), i coralli delle Maldive sono sopravvissuti in misura maggiore rispetto al 1998 (21,8% nel 2016 *vs* 7,2% nel 1999). La minore mortalità dei coralli nel 2016 potrebbe fornire un supporto all'ipotesi adattativa nei confronti delle anomalie climatiche (*adaptive bleaching hypothesis*) per alcune specie di coralli (McClanahan e Muthiga 2014; Montefalcone et al. 2020).

Il tasso di ricupero annuo dei coralli duri dopo il secondo *bleaching* del 2016 è stato pari al 7,2%, e ha permesso alle scogliere coralline di recuperare alti valori di copertura media dei coralli duri, superiori al 55% già nel 2022, a soli sei anni di distanza dall'impatto. Il ricupero delle scogliere coralline maldiviane dall'ultimo evento severo di sbiancamento sta quindi procedendo a una velocità doppia rispetto a quanto accaduto in precedenza. Possiamo inoltre ipotizzare che, se il tasso di ricupero dei coralli duri procederà a tale velocità anche nei prossimi anni, la copertura originale delle scogliere coralline potrà essere raggiunta già nel 2024, richiedendo quindi la metà del tempo che ci è voluto per recuperare dall'anomalia termica del 1998 (16 anni *vs* 8 anni), un ulteriore dato a supporto dell'ipotesi adattativa di McClanahan e Muthiga (2014).

Nonostante i veloci tassi di ricupero delle scogliere coralline maldiviane, i monitoraggi condotti negli ultimi anni hanno evidenziato una maggiore variabilità spaziale nella capacità di ricupero dei coralli, e le scogliere coralline meno resilienti sono apparse quelle maggiormente esposte alle pressioni locali sia di origine antropica (e.g., densità di popolazione, turismo) sia naturale (e.g., esposizione a venti e correnti, posizione geografica) (Montefalcone et al. 2020). In queste scogliere la copertura di coralli duri, specialmente alle minori profondità, è ancora bassa e la comunità è dominata dalle componenti abiotiche, quali coralli morti, sabbia e pezzame (figura 6).

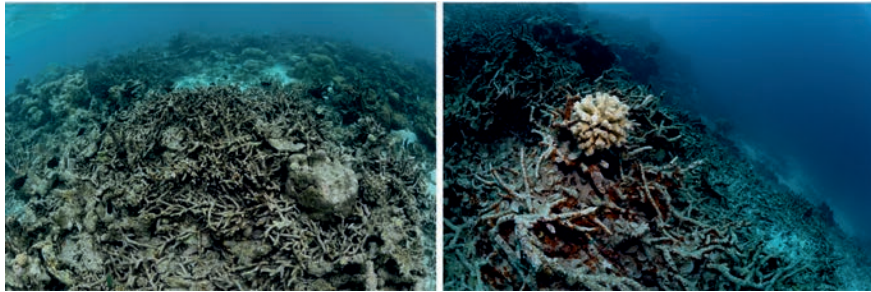


Figura 6. Alcune scogliere coralline delle Maldive monitorate a maggio 2019 dove il fondale è ancora dominato da coralli morti, sabbia e pezzame, un chiaro segnale dell'effetto del bleaching del 2016.

4. Prospettive future

Le previsioni sul cambiamento climatico suggeriscono che gli eventi climatici anomali saranno inevitabilmente più frequenti negli anni a venire, mettendo a dura prova la resilienza delle scogliere coralline (Heron et al. 2017). È probabile che lo sbiancamento dei coralli diventi un fattore di stress cronico in futuro (Hughes et al. 2018), implicando una ripetuta mortalità dei coralli. L'aumento previsto della temperatura globale fino a 5-6 °C entro il 2100 causerebbe due severi eventi di sbiancamento dei coralli ogni decennio (Hughes et al. 2018), una frequenza che impedirà il ricupero delle scogliere coralline maldiviane. In questo contesto saranno di fondamentale importanza le continue attività di ricerca e monitoraggio durante le prossime spedizioni scientifiche, al fine di verificare le strategie di risposta e la sopravvivenza delle comunità coralline al disturbo e prevedere il futuro delle scogliere maldiviane. I risultati raccolti nella serie storica lunga venticinque anni (Montefalcone et al. 2022) forniscono dei segnali incoraggianti, che confermano la capacità di ricupero dei coralli alle anomalie climatiche e suggeriscono una loro potenziale capacità adattativa allo stress.

L'Università di Genova collabora inoltre con l'organizzazione no profit *Save the Beach Maldives* in progetti di restauro dei coralli (*coral restoration*), con la realizzazione di strutture (*coral farm*) dove i coralli sono seguiti durante la loro crescita e vengono fatti riprodurre (*coral nursery*) in condizioni ambientali favorevoli. Molte colonie di corallo

traslocate nelle strutture sono raccolte da siti impattati e soggetti a forti pressioni e vengono fatte crescere, riprodurre e sviluppare con la finalità di poterle poi ritrasportare, una volta adulte, sulle scogliere coralline per il loro ripristino in ambiente naturale.

Ringraziamenti

Le spedizioni scientifiche alle Maldive sono organizzate grazie alla collaborazione con Albatros Top Boat (Verbania, Milano e Malé): ringraziamo in modo particolare Donatella “Dodi” Telli, Massimo Sandrini e Herbert Fontana per il loro supporto, e tutto lo staff delle barche *Conte Max* e *Duca di York* per la loro assistenza durante il lavoro sul campo. Ringraziamo anche Save the Beach Maldives, in particolare Beybe (Assan Hamed) e Irene Pancrazi, Camilla Corcione (Università di Genova) e tutti i partecipanti nelle attività sul campo, che hanno aiutato a raccogliere dati.

Bibliografia

- Baker A.C., Glynn P.W., Riegl B. *Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2008;80:435-471. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.003>
- Bianchi C.N., Morri C., Pichon M., Benzoni F., Colantoni P., Baldelli G., Sandrini M. *Dynamics and pattern of coral recolonization following the 1998 bleaching event in the reefs of the Maldives*. In: Suzuki Y., Nakamori T., Hidaka M., Kayanne H., Casareto B.E., Nadaoka K., Yamano H., Tsuchiya M., Eds. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*. Japanese Coral Reef Society, Tokyo: 2006. p. 30-37.
- Brown C.J., Sauters M.I., Possingham H.P., Richardson A.J. *Managing for interactions between local and global stressors of ecosystems*. PLoS ONE 2013;8:e65765. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065765>
- Donner S.D., Rickbeil G.J.M., Heron S.F. *A new, high-resolution global mass coral bleaching database*. PLoS ONE 2017;12:e0175490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175490>

- Eakin C.M., Liu G., Gomez A.M., De La Cour J.L., Heron S.F., Skirving W.J., ... Strong A.E. *Global coral bleaching 2014-2017*. Reef Encounter 2016;31:20-26. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01844-2>
- Gatti G., Bianchi C.N., Montefalcone M., Venturini S., Diviaco G., Morri C. *Observational information on a temperate reef community helps understanding the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s*. Marine Pollution Bulletin 2017;114(1):528-538. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.022>
- Gatti G., Bianchi C.N., Parravicini V., Rovere A., Peirano A., Montefalcone M., ... Morri C. *Ecological change, sliding baselines and the importance of historical data: Lessons from combining observational and quantitative data on a temperate reef over 70 years*. PLoS ONE 2015;10 (2):e0118581. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118581>
- Heron S.F., Eakin C.M., Douvère F. *Impacts of climate change on World Heritage Coral Reefs: A first global scientific assessment*. Paris: UNESCO World Heritage Centre; 2017.
- Heron S.F., Maynard J.A., van Hooidonk R., Eakin C.M. *Warming trends and bleaching stress of the world's coral reefs 1985-2012*. Scientific Reports 2016;6:38402. <https://doi.org/10.1038/srep38402>
- Hoegh-Guldberg O., Mumby P.J., Hooten A.J., Steneck R.S., Greenfield P., Gomez E., ... Hatzioios M.E. *Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification*. Science 2007;318:1737-1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- Hughes T.P., Anderson K.D., Connolly S.R., Heron S.F., Kerry J.T., Lough J.M., ... Wilson S.K. *Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene*. Science 2018;359:80-83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Hughes T.P., Kerry J.T., Álvarez-Noriega M., Álvarez-Romero J.G., Anderson K.D., Baird A.H., ... Wilson S.K. *Global warming and recurrent mass bleaching of corals*. Nature 2017;543:373-377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>
- McClanahan T.R., Muthiga N.A. *Community change and evidence for variable warm-water temperature adaptation of corals in Northern Male Atoll, Maldives*. Marine Pollution Bulletin 2014;80:107-113. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.035>
- Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N. *Long term change in bioconstruction potential of Maldivian coral reefs following extreme climate anomalies*.

- Global Change Biology 2018;24:5629-5641. <https://doi.org/10.1111/gcb.14439>
- Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N. *Influence of local pressures on Maldivian coral reef resilience following repeated bleaching events, and recovery perspectives*. *Frontiers in Marine Science* 2020;7:587. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00587>
- Montefalcone M., Oprandi A., Azzola A., Morri C., Bianchi C.N. *The tale of the Maldivian coral reefs after repeated coral bleaching*. *Biologia Marina Mediterranea* 2022: in press.
- Morri C., Montefalcone M., Lasagna R., Gatti G., Rovere A., Parravicini V., ... Bianchi C.N. *Through bleaching and tsunamis: Coral reef recovery in the Maldives*. *Marine Pollution Bulletin* 2015;98:188-200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.050>
- Perry C.T., Morgan K.M. *Bleaching drives collapse in reef carbonate budgets and reef growth potential on southern Maldives reefs*. *Scientific Reports* 2017;7:40581. <https://doi.org/10.1038/srep40581>
- Richardson L.E., Graham N.A.J., Pratchett M.S., Eurich J.G., Hoey A.S. *Mass coral bleaching causes biotic homogenization of reef fish assemblages*. *Global Change Biology* 2018;24(7):3117-3129. <https://doi.org/10.1111/gcb.14119>
- Wilson S.K., Graham N.A.J., Polunin N.V.C. *Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs*. *Marine Biology* 2007;151:1069-1076. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0538-3>

PAOLA RIVARO*

*L'importanza della biogeochimica per valutare
gli effetti del cambiamento climatico
sull'ecosistema antartico*

Abstract: Biogeochemistry refers to the cycling of chemical elements through living systems and their environments by physical, chemical, biological and geological processes. The biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, phosphorus, and some essential trace elements such as iron have strong implications in the Antarctic Ocean for the functioning of the marine ecosystem at regional and global scales and for the exchange of gases between the sea and the atmosphere. This communication describes the role of the Southern Ocean in the Earth's climate system, with regards to the Ross Sea, and the existing knowledge on the biogeochemical cycles of carbon and iron, the key factors that regulate their distribution, and their possible variations in response to future climate change.

1. *Introduzione*

L'Oceano Meridionale o Antartico svolge un ruolo fondamentale nella regolazione del clima a scala globale, poiché funge da motore nella circolazione delle varie correnti oceaniche interagendo con la circolazione atmosferica e con le acque di fusione dei ghiacciai antartici. Esso circonda completamente l'Antartide, fino all'interfaccia con le acque subtropicali. A livello superficiale l'elemento più rilevante è la corrente circumpolare antartica (*Antartic Circumpolar Current, AAC*), compresa tra il fronte antartico e il fronte subantartico. Tale corrente, diretta da ovest verso est, è guidata non solo dal regime dei potenti venti occidentali, ma anche dalla topografia del fondo marino e si caratterizza per essere l'unica corrente che fluisce intorno al globo senza incontrare

* Accademica, professore associato di Chimica, Università di Genova.

terre emerse che la ostacolano. Quando questa corrente incontra quella polare (innescata dai venti orientali e diretta verso ovest), il sistema dei venti mantiene attivi i vortici ad andamento orario che caratterizzano le regioni dei mari di Ross e di Weddell (figura 1).

Nell'Oceano Meridionale avviene un notevole scambio di energia tra le acque fredde antartiche e quelle settentrionali più calde; si tratta di un processo che tende a compensare l'eccesso di energia prodotto nelle acque equatoriali, fondamentale per il mantenimento del sistema

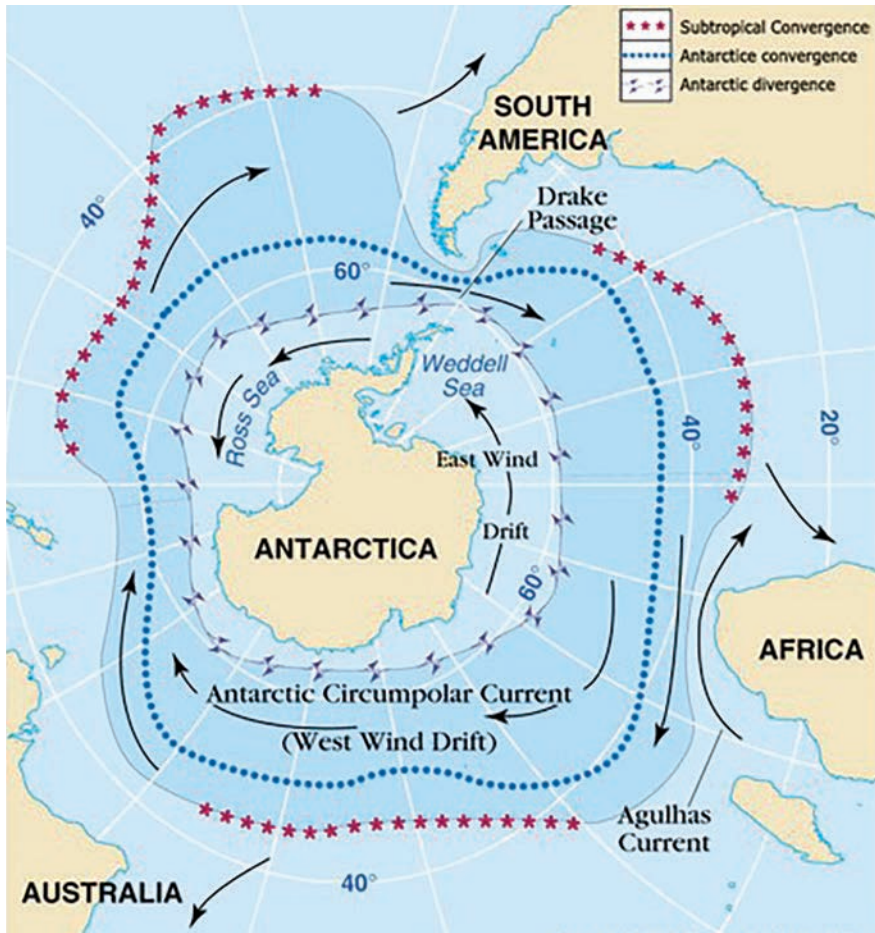


Figura 1. Rappresentazione schematica della corrente circumpolare antartica.

climatico globale. Lungo la corrente circumpolare si realizza, infatti, lo scambio di energia e del contenuto di sali che regola e condiziona il trasferimento delle sostanze chimiche e delle specie biologiche, consentendo all'ecosistema antartico di mantenere le sue peculiari caratteristiche. La zona che meglio manifesta questi fenomeni è la convergenza antartica, dove l'acqua superficiale antartica molto fredda, ma di minore salinità, incontra l'acqua superficiale subantartica, più calda e più salata.

L'Oceano meridionale è uno dei principali siti di formazione di acque profonde (*Antarctic Bottom Water*, AABW, definite da temperatura = -1°C , salinità = 34.65 e densità = 27.85 kg m^{-3}), che andranno ad occupare le maggiori profondità degli altri bacini oceanici. Dal momento che le AABW si originano a seguito di fenomeni di sprofondamento di acque superficiali, la loro formazione e diffusione sono importanti nel bilancio climatico terrestre, poiché consentono la redistribuzione di freddo, oltre che di gas (ossigeno O_2 , diossido di carbonio CO_2 e altri gas serra) (Orsi et al. 2001).

Il settore Pacifico dell'Oceano Meridionale può essere suddiviso in due sezioni: l'area occidentale, contenente il Mare di Ross e il Ross Gyre, e la sezione orientale, che include i mari di Bellingshausen e di Amundsen (Rubin et al. 1998).

Il Mare di Ross è un ambiente oceanografico unico, in quanto oltre a essere un importante sito per la formazione delle AABW (Jacobs et al. 1985), mostra una delle più elevate biomasse fitoplanctoniche e tassi di produzione primaria (PP) tra i più elevati dell'Oceano Meridionale (Arrigo et al. 1998). L'area del Mare di Ross è classificata come zona costiera e di piattaforma continentale (CCSZ), nella quale le dinamiche del fitoplancton sono in gran parte controllate dalla struttura idrologica e dal regime d'irradianza (Nelson e Smith 1991).

Il Mare di Ross (figura 2) è caratterizzato da un'ampia piattaforma continentale, con un'estensione di circa 500.000 km^2 . È considerato come confine settentrionale la linea che congiunge Cape Colbeck, a 158° W , e Cape Adare, a 170° E . Verso sud, a circa 78.5° S , è delimitato da uno strato di ghiaccio continentale, il Ross Ice Shelf (RIS), che si estende lungo quasi la metà della piattaforma continentale ed è spesso circa 250 m verso il lato rivolto a nord (Jacobs e Comiso 1989).

La profondità media del fondale è di circa 500 m. La piattaforma continentale pende verso il continente ed è più frastagliata e profonda

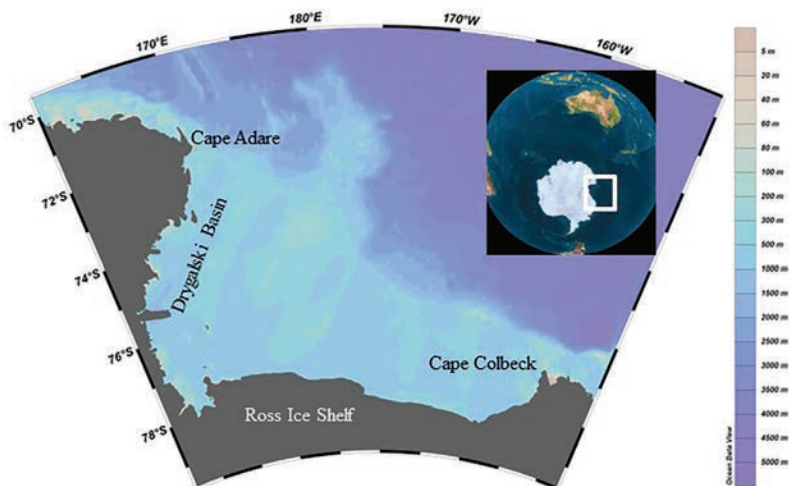


Figura 2. *Mappa del Mare di Ross. La scala di colore rappresenta la profondità del fondale (m). Nel riquadro è evidenziata la posizione del Mare di Ross nel continente antartico.*

sul lato occidentale, dove il Drygalski Basin (che è il bacino più profondo del Mare di Ross) raggiunge una profondità di 1200 m. Questa morfologia irregolare deriva dall'erosione del fondale marino a causa dell'azione dei ghiacciai, che hanno creato strette depressioni trasversali (Catalano et al. 1997). Ciò influenza il movimento delle masse d'acqua favorendone, ad esempio, la risalita verso la superficie.

La fisiografia della regione genera forti venti catabatici che spirano dal continente verso l'oceano, portando alla formazione in inverno di aree a ridotta concentrazione di ghiaccio chiamate *polynya* che sono mantenute parzialmente o totalmente libere dal ghiaccio, nonostante le temperature dell'ambiente circostante siano inferiori al punto di congelamento dell'acqua di mare (Parish et al. 2006).

2. *Biogeochimica*

Con il termine biogeochimica si fa riferimento al ciclo di elementi chimici attraverso i sistemi viventi e i loro ambienti mediante processi

fisici, chimici, biologici e geologici. I cicli biogeochimici del carbonio, dell'azoto, del fosforo e di alcuni elementi in tracce essenziali come il ferro hanno forti implicazioni nell'Oceano Antartico per il funzionamento dell'ecosistema marino a scala regionale e globale e per lo scambio di gas tra mare e atmosfera.

L'Oceano Meridionale svolge infatti un ruolo cruciale nella regolazione del clima globale in quanto è un'importante zona pozzo per l'assorbimento di CO_2 atmosferico e nella biogeochimica oceanica globale, in quanto fornisce nutrienti al termocline globale, influenzando così la produzione primaria globale e l'export di carbonio.

Nell'Oceano Meridionale e nel Mare di Ross in particolare, vista la sua elevata PP, i cicli biogeochimici degli elementi sono influenzati dal fitoplancton attraverso processi a livello di comunità e la composizione delle specie. Per esempio, il carbonio, l'azoto, il fosforo e il ferro sono necessari per sostenere la produzione primaria nelle acque superficiali ben illuminate. I produttori primari a loro volta influenzano il ciclo di questi elementi, attraverso l'export verticale di sostanza organica verso gli strati profondi della colonna d'acqua, processo noto come "pompa biologica". La pompa biologica rappresenta un fattore chiave per la variabilità temporale e spaziale della biogeochimica ed esercita un forte controllo sull'assorbimento di CO_2 da parte degli oceani e sul clima globale (Henley et al. 2020).

Diversi gruppi di fitoplancton svolgono ruoli molteplici in una serie di cicli biogeochimici (Boyd 2019): le diatomee che sono i principali motori della pompa biologica del carbonio e dei cicli del silicio e dell'azoto (Tréguer et al. 2018), le aptofite come *Phaeocystis antarctica* sono importanti nel ciclo dello zolfo (Goto-Azuma et al. 2019) e i coccolitoforidi nel ciclo del carbonio inorganico (Balch et al. 2011).

Nell'Oceano Meridionale il cambiamento climatico può condizionare la biogeochimica sia indirettamente, modificando la dinamica del ghiaccio marino, le caratteristiche fisiche delle acque e il regime dei venti, sia direttamente attraverso l'assorbimento di CO_2 . Le risposte dell'ecosistema possono variare in maniera significativa nello spazio e nel tempo e tra aree di piattaforma e di mare aperto, come risultato delle differenze nelle dinamiche degli organismi, del fabbisogno e della disponibilità di nutrienti e di elementi in tracce essenziali e nelle capacità di export del carbonio.

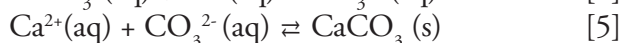
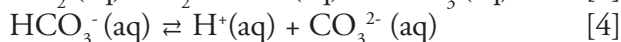
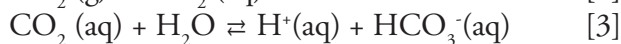
Nei prossimi paragrafi verranno presentati gli aspetti più significativi dei cicli biogeochimici di carbonio e ferro nel Mare di Ross e le conoscenze più recenti sui fattori chiave che ne regolano la distribuzione e le possibili variazioni in risposta al cambiamento climatico.

3. CO_2 atmosferico, acidificazione oceanica e conseguenze sul ciclo del carbonio

Gran parte del carbonio che si trova in acqua di mare è sotto forma di carbonio inorganico disciolto (CT) dato dalla somma della concentrazione di tre specie:

$$C_T = [CO_2(aq)] + [HCO_3^-(aq)] + [CO_3^{2-}(aq)] \quad [1]$$

L'assorbimento e la regolazione del CO_2 atmosferico da parte degli oceani sono strettamente legati a un insieme di equilibri chimici definito sistema dei carbonati.



Il diossido di carbonio atmosferico ($CO_2(g)$) è trasferito nelle acque marine superficiali attraverso l'interfaccia atmosfera-acqua [2]. Secondo la legge di Henry, la concentrazione di $CO_2(aq)$ è direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas in atmosfera ($CO_2(g)$) e inversamente proporzionale alla temperatura e alla salinità dell'acqua di mare. Uno degli effetti della dissoluzione del CO_2 è l'aumento degli ioni H^+ in soluzione, come risultato della dissociazione dell'acido carbonico (H_2CO_3) formatosi per reazione del CO_2 con H_2O [3]. Lo ione carbonato acido ($HCO_3^-(aq)$) si dissocia ulteriormente in ione H^+ e ione carbonato ($CO_3^{2-}(aq)$) [4]. Infine, il $CO_3^{2-}(aq)$ reagendo con gli ioni calcio in soluzione ($Ca^{2+}(aq)$) può portare alla formazione di carbonato di calcio in forma solida ($CaCO_3(s)$) [5].

Il $CaCO_3$ è presente negli oceani nelle sue due forme allotropiche aragonite (rombica) e calcite (trigonale). Questo minerale proviene da

processi di erosione o dilavamento delle rocce e dagli scheletri degli organismi marini. Il grado di saturazione (Ω) è il parametro che descrive la condizione di stabilità del CaCO_3 sia minerale sia biogenico in ambiente marino ed è definito come:

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{K'ps} \quad [6]$$

dove $K'ps$ è il prodotto di solubilità apparente che dipende dalla salinità, pressione e temperatura dell'acqua di mare e dalla fase minerale considerata (calcite o aragonite).

La stabilità di CaCO_3 , che consente la formazione di gusci e scheletri di organismi marini, si verifica in condizioni di sovrasaturazione ($\Omega > 1$), mentre la dissoluzione in condizioni di sotto saturazione ($\Omega < 1$).

Osservando l'andamento del contributo percentuale delle specie che definiscono il C_T in soluzione acquosa in funzione del pH, a pH intorno a 8 il CO_2 rappresenta solo l'1% circa del C_T , lo ione HCO_3^- circa il 91% e lo ione CO_3^{2-} l'8% circa. Tra le specie esiste dunque un ordine di grandezza in termini di concentrazione (figura 3).

Sono proprio queste proporzioni relative tra le specie del C_T che determinano il pH marino (valore medio circa 8.1) e che, costituendo

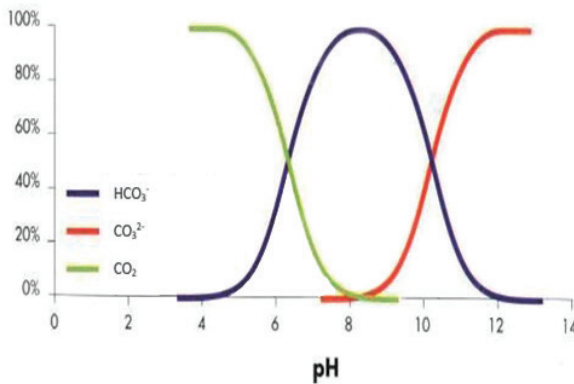


Figura 3. Andamento del contributo percentuale delle specie che costituiscono il C_T in acqua di mare in funzione del pH.

un sistema tampone, lo mantengono costante, entro certi limiti, a variazioni dell'ambiente esterno. Tale valore comunque non è assoluto ma può variare di $\pm 0,3$ unità a causa di fattori locali, regionali e stagionali.

La pompa biologica è importante nella regolazione del ciclo del carbonio nel mare di Ross, particolarmente durante la stagione estiva e primaverile e si affianca al trasferimento del CO_2 nelle acque profonde alla pompa fisica (ovvero il trasferimento dovuto al mescolamento delle masse d'acqua). Il CO_2 viene convertito in carbonio organico durante la fotosintesi da parte del fitoplancton e di altri produttori primari, viene accumulato nei tessuti di organismi animali e vegetali e successivamente trasferito nelle acque profonde e al sedimento alla morte degli organismi.

L'equilibrio tra solubilità del CO_2 in acqua, equilibri del sistema dei carbonati, trasferimento attraverso la pompa fisica e biologica determinano la differenza di pressione parziale del CO_2 ($p\text{CO}_2$) tra acqua di mare e atmosfera, e di conseguenza se le acque superficiali oceaniche si comporteranno come pozzo o sorgente di CO_2 . L'entità dei flussi di CO_2 dipende soprattutto dalla velocità del vento, che influisce significativamente sulla velocità di trasferimento del gas mare-aria.

L'assorbimento di CO_2 nell'Oceano Meridionale tramite la pompa fisica e biologica sta modificando la chimica delle acque marine, portandole verso l'acidificazione. L'acidificazione oceanica è un tema legato al cambiamento climatico che sta impattando gli organismi marini e l'intero ecosistema (Fabry et al. 2008).

L'incremento della concentrazione del CO_2 sta alterando il sistema dei carbonati, causando una diminuzione del pH e della concentrazione degli ioni CO_3^{2-} (Doney et al. 2009). La disponibilità di ioni carbonato è essenziale per la costruzione di scheletri di aragonite da parte degli organismi marini. Studi modellistici stimano che le acque dell'Oceano Meridionale saranno sotto sature rispetto all'aragonite in tempi più rapidi rispetto ad altri bacini oceanici, ad eccezione dell'Oceano Artico, a causa del loro essere zona pozzo di CO_2 e per la loro bassa alcalinità (Orr et al. 2005). L'effetto combinato di molteplici fattori (riscaldamento e addolcimento delle acque superficiali, apporti differenti di masse d'acqua e flussi differenti di CO_2 tra atmosfera e oceano) potrebbero alterare parzialmente le proiezioni fatte sull'acidificazione e sulla sotto saturazione nelle aree costiere (McNeil et al. 2008; Lencina-Avila et al. 2018). Tuttavia, alcuni recenti studi hanno mostrato i primi effetti della

variazione della chimica del carbonio sulla catena alimentare dell'Oceano meridionale. Si è osservato ad esempio uno shift dei popolamenti fitoplanctonici a favore di specie che meglio si accrescono in acque con maggiore contenuto di CO_2 (Tortell et al. 2008) o la parziale dissoluzione sulle conchiglie di pteropodi (Bednarsek et al. 2012).

Infine, la capacità di assimilazione del ferro da parte delle diatomee ha mostrato dipendenza dalla disponibilità di ioni carbonato, con possibili conseguenze negative per la crescita di questi organismi fitoplanctonici se la concentrazione di questi ioni dovesse ridursi in futuro per un'ulteriore diminuzione del pH, causata dall'aumento del CO_2 atmosferico (McQuaid et al. 2018).

4. *L'importanza del ferro nella biogeochimica antartica*

Nell'ambiente marino il ferro (Fe) è un elemento in tracce (con concentrazione nell'ordine delle nmoli kg^{-1}), che riveste un ruolo fondamentale come micronutriente, necessario per la crescita del fitoplancton e la produzione di sostanza organica attraverso la fotosintesi.

I primi studi sul Fe come elemento micronutriente risalgono agli anni trenta del secolo scorso: esperimenti in laboratorio dimostrarono che il ferro aveva un effetto positivo sulla crescita fitoplanctonica (Harvey 1933).

Negli anni ottanta è stato riconosciuto il suo ruolo come cofattore in molti enzimi cellulari legati al trasporto di elettroni nella fotosintesi e nella respirazione, alla fissazione dell'azoto, alla biosintesi della clorofilla e all'assimilazione e riduzione dei nitrati.

L'ipotesi del ferro, formulata da Martin nel 1990 sulla base di dati ottenuti dall'analisi di carote di ghiaccio antartico, ha stimolato gli studi sulla relazione fra il controllo esercitato dal Fe nella produzione primaria e la conseguente modulazione della concentrazione atmosferica di CO_2 , con implicazioni sulla regolazione del clima globale (Martin 1990).

Secondo Martin, durante l'ultimo massimo glaciale la polvere atmosferica, trasferendo Fe agli oceani, avrebbe consentito un aumento della produttività del fitoplancton, con conseguente riduzione della concentrazione di CO_2 atmosferico a 200 ppm. L'aumento delle concentrazioni di CO_2 da 200 a 280 ppm durante l'Olocene può di con-

seguenza essere collegato a una minore quantità di polvere atmosferica contenente ferro e quindi ad un minore assorbimento di CO₂ da parte del fitoplancton.

Operativamente il Fe in acqua di mare viene classificato in tre fasi: particellato (Fep, separato dalla fase disciolta mediante filtrazione impiegando un filtro con porosità nominale di 0,40 o 0,20 µm), disciolto (Fed) e colloidale (Fec) (Boyd e Elwood 2010).

Ciascuna di queste frazioni fornisce un contributo alla concentrazione totale del ferro (Fe tot) e può essere più o meno biodisponibile per gli organismi.

Il Fed è la frazione di Fetot maggiormente biodisponibile ed è a sua volta definita dal contributo di diverse frazioni, schematicamente riconducibili a Fe libero (Felb), Fe complessato da ligandi inorganici (FeLi) e Fe complessato da ligandi organici (FeLo), che arriva a costituire il 99% del Fed (Xuewu e Millero 2002).

Molte indagini sono attualmente in corso per classificare i ligandi organici e per comprendere la biodisponibilità e le modalità di assimilazione dei complessi FeLo da parte degli organismi.

Le concentrazioni più elevate dei Lo sono state riscontrate frequentemente in corrispondenza dei massimi di biomassa fitoplanctonica, individuati da misure di clorofilla o fluorescenza, mostrando un ciclo annuale con incrementi durante i periodi più produttivi, anche in aree povere di ferro (Boye et al. 2001).

La concentrazione di ferro in acqua di mare nell'Oceano Meridionale è regolata dal bilancio tra apporti e rimozione. Le acque oceaniche del largo e quelle delle zone di piattaforma continentale antartica differiscono nella dinamica degli elementi in tracce, a seguito di differenze significative nella circolazione delle masse d'acqua, della profondità del fondale, della produzione primaria, della biogeochimica e dell'interazione con la criosfera e l'atmosfera (Henley et al. 2020).

Il mescolamento verticale e gli input atmosferici dai continenti sono la principale sorgente di Fe per la maggior parte dell'Oceano Meridionale. Nelle aree di piattaforma, come nel Mare di Ross, si sommano anche input continentali e dai sedimenti, intrusione di acque di origine circumpolare (*Circumpolar Deep Water*, CDW) e rilascio di materiale da piattaforme glaciali continentali (*ice shelf*) e iceberg (Planquette et al. 2013).

Recenti studi, inoltre, annoverano tra le maggiori fonti di ferro la fusione di ghiaccio di origine glaciale nelle zone costiere al margine della calotta glaciale antartica. La maggior parte degli studi su quest'ultima sorgente sono stati condotti nell'Antartide Occidentale, dove da anni sono osservati apporti di acqua da fusione di ghiaccio glaciale che aumentano la concentrazione di ferro potenzialmente biodisponibile per la crescita fitoplanctonica (Monien et al. 2017).

Tuttavia, recenti misure evidenziano che anche nel settore orientale dell'Antartide vi è un aumento dei tassi di fusione di ghiaccio continentale che potenzialmente potrebbe aggiungere ferro alle acque superficiali della zona di piattaforma (Rignot et al. 2013).

Si ipotizza infine che l'intrusione della CDW, oltre ad avere un ruolo diretto nell'apporto di Fe, potrebbe averne uno indiretto a causa del trasferimento di calore, favorendo la fusione di ghiaccio glaciale in area di piattaforma (Rignot et al. 2013).

Il ghiaccio marino ha un ruolo cruciale nel ciclo biogeochimico antartico del ferro, poiché presenta valori di concentrazione compresi in un intervallo tra 0,2 e 110 nM, significativamente elevati se confrontati con quelli di Fe delle acque superficiali, inferiori a 0,2 nM (Lannuzel et al. 2016). Tale arricchimento è dovuto all'accumulo di Fe da parte del ghiaccio marino durante la stagione autunnale/invernale, quando avviene la sua formazione annuale attorno al continente Antartico. Nella stagione estiva la fusione del ghiaccio porta ad un consistente rilascio di ferro aumentando la produttività (Marsay et al. 2017).

Nonostante le potenziali sorgenti di Fe elencate per le acque del Mare di Ross, i tassi di rilascio durante la stagione primaverile/estiva possono essere limitati, condizionando la produzione primaria. Il Fe è quindi in grado di influenzare l'intera comunità fitoplanctonica, i cicli dei nutrienti nel Mare di Ross e contribuisce attraverso la pompa biologica in modo significativo all'assorbimento del CO₂ atmosferico.

È possibile che, per effetto del cambiamento climatico in atto, le sorgenti, la distribuzione e il ciclo biogeochimico del ferro nell'Oceano Antartico vengano alterati. Ad esempio, si prevede che nelle acque superficiali ci sarà un aumento (sia in termini di frequenza sia di entità) di apporto da ricadute atmosferiche provenienti dai continenti dell'emisfero Meridionale di polveri minerali ricche di ferro, a causa dell'incremento della siccità e dell'intensità dei venti (Henley et al. 2020). Sono

previsti anche incrementi degli input di polveri dallo stesso continente antartico, poiché la perdita di ghiaccio espone più terreno all'azione dei venti catabatici.

È molto probabile che il rafforzamento delle correnti oceaniche superficiali porti ad un maggiore trasporto vorticoso e quindi a input di acque ricche di ferro dai tropici al sub-antartico. Al contrario, è previsto un indebolimento della circolazione verticale con conseguenti effetti sulla stratificazione verticale della colonna d'acqua, che potrebbero a loro volta incidere sulla distribuzione di nutrienti ed elementi in tracce rigenerati provenienti dalle profondità oceaniche (Tagliabue et al. 2017).

Recenti studi confermano che il riscaldamento delle acque che circondano l'Antartide favoriscono la fusione dei ghiacciai e l'aumento del distacco degli iceberg, rilasciando materiale terrigeno ricco di ferro (van der Merwe et al. 2019). È anche probabile che la maggiore erosione prodotta dagli iceberg nelle aree costiere poco profonde, a seguito del ritiro delle piattaforme di ghiaccio, aumenti anche gli apporti di ferro dai sedimenti alle acque superficiali. Il riscaldamento probabilmente ridurrà l'estensione e lo spessore del ghiaccio marino antartico, che accumula ferro e altri metalli bioattivi per il successivo rilascio nelle acque superficiali durante i mesi primaverili e all'inizio dell'estate (Lannuzel et al. 2010).

Infine, l'acidificazione degli oceani altererà la speciazione e la solubilità degli oligoelementi e dei nutrienti essenziali nell'acqua di mare, ma non è ad oggi chiaro se l'abbassamento del pH sarà causa di un aumento o diminuzione della disponibilità di ferro per il fitoplancton (Shi et al. 2010).

Bibliografia

- Arrigo K.R., Robinson D.H., Worthen D.L., Schieber B., Lizotte M. *Bio-optical properties of the southwestern Ross Sea*. J. Geophys. Res. 1998;103(C10):683-695.
- Bednarsek N., Tarling G.A., Bakker D.C.E., Fielding S., Jones E.M., Venables H.J. et al. *Extensive dissolution of live pteropods in the Southern Ocean*. Nat. Geosci. 2012;5:881-885. doi: 10.1038/ngeo1635
- Balch W.M., Drapeau D.T., Bowler B.C., Lyczkowski E., Booth E.S., Al-ley D. *The contribution of coccolithophores to the optical and inorganic carbon budgets during the Southern Ocean gas exchange experiment: new*

- evidence in support of the "Great Calcite Belt" hypothesis. *J. Geophys. Res. Oceans* 2011;116:C00F06.
- Boyd P.W. *Physiology and iron modulate diverse responses of diatoms to a warming Southern Ocean*. *Nat. Clim. Change* 2019;9:148-152. doi: 10.1038/s41558-018-0389-1
- Boyd P.W., Elwood M. *The biogeochemical cycle of iron in the ocean*. *Nat. Geosci.* 2010;3:675-682. doi: 10.1038/ngeo964
- Boye M. et al. *Organic complexation of iron in the Southern Ocean*. *Deep Sea Res. I* 2001;48:1477-1497.
- Catalano G., Povero P., Fabiano M., Benedetti F., Goffart A. *Nutrient utilization and particulate organic matter changes during summer in the upper mixed layer (Ross Sea, Antarctica)*. *Deep Sea Res. I* 1997;44:7-112.
- Doney S.C., Fabry V.J., Feely R.A., Kleypas J.A. *Ocean acidification: the other CO₂ problem*. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2009;1:169-192. doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163834
- Fabry V.J., Seibel B.A., Feely R.A., Orr J.C. *Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes*. *ICES J. Mar. Sci.* 2008;65:414-432. doi: 10.1093/icesjms/fsn048
- Goto-Azuma K., Hirabayashi M., Motoyama H., Miyake T., Kuramoto T., Uemura R. et al. *Reduced marine phytoplankton sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials*. *Nat. Commun.* 2019;10:3247. doi: 10.1038/s41467-019-11128-6
- Harvey H. *On the rate of diatom growth*. *J. Mar. Biol. Assoc.* 1933;19.
- Henley S.F., Cavan E.L., Fawcett S.E., Kerr R., Monteiro T., Sherrell R.M., Bowie A.R., Boyd P.W., Barnes D.K.A., Schloss I.R., Marshall T., Flynn R., Smith S. *Changing Biogeochemistry of the Southern Ocean and Its Ecosystem Implications*. *Front. Mar. Sci.* 2020;7:581. doi: 10.3389/fmars.2020.00581
- Jacobs S.S., Comiso J.C. *Sea ice and oceanic processes on the Ross Sea continental shelf*. *J. Geophys. Res.* 1989;94:195-211. doi: 10.1029/JC094iC12p18195
- Jacobs S.S., Fairbanks R., Horibe Y. *Origin and evolution of the water masses near the Antarctic continental margin: evidence from H18 2O/H18 2O ratios in seawater*. In: Jacobs S.S., ed. *Oceanology of the Antarctic Continental Shelf*, Antarctic Research Series, Vol. 43. Washington, DC: American Geophysical Union; 1985. p. 59-85.
- Lannuzel D. et al. *Iron in sea ice: Review and new insights*. *Elementa* 2016;4:1-19. doi: 10.12952/journal.elementa.000130
- Lannuzel D., Schoemann V., de Jong J., Pasquer B., van der Merwe P., Masson F., Tison J.L., Bowie A. *Distribution of dissolved iron in Antarctic*

- Sea ice: Spatial, seasonal, and inter-annual variability.* J. Geophys. Res. 2010;115:G03022. doi: 10.1029/2009JG001031
- Lencina-Avila J.M., Goyet C., Kerr R., Orselli I.B.M., Mata M.M., Touratier F. *Past and future evolution of the marine carbonate system in a coastal zone of the Northern Antarctic Peninsula.* Deep Sea Res. Part II 2018;149:193-205. doi: 10.1016/j.dsr2.2017.10.018
- Marsay C., Barrett P., McGillicuddy D., Sedwick P. *Distributions, sources, and transformations of dissolved and particulate iron on the Ross Sea continental shelf during summer.* J. Geophys. Res. Oceans 2017;122:6371-6393. doi: 10.1002/2017JC013068
- Martin J.H. *Glacial - Interglacial CO₂ Change: The Iron Hypothesis.* Paleceanography 1990;5:1-13.
- McNeil B.I., Matear R.J. *Southern Ocean acidification: a tipping point at 450-ppm atmospheric CO₂.* Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2008;105:18860-18864. doi: 10.1073/pnas.0806318105
- McQuaid J.B., Kustka A.B., Oborník M., Horák A., Mccrow J.P., Karas B.J. et al. *Carbonate-sensitive phytoferritin controls high-affinity iron uptake in diatoms.* Nature 2018;555:534-537. doi: 10.1038/nature25982
- Monien D., Monien P., Brünjes R., Widmer T., Kappenberg A., Silva Busso A., Brumsack H. *Meltwater as a source of potentially bioavailable iron to Antarctica waters.* Antarctic Science 2017;29(3):277-291. doi: 10.1017/S095410201600064X
- Nelson D.M., Smith W.O. Jr. *Sverdrup revisited: critical depths, maximum chlorophyll levels, and the control of Southern Ocean productivity by the irradiance-mixing regime.* Limnology and Oceanography 1991;36:1650-1661.
- Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O., Bopp L., Doney S.C., Feely R.A. et al. *Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms.* Nature 2005;437:681-686. doi: 10.1038/nature04095
- Orsi A.H., Jacobs S.S., Gorgon A.L., Visbeck M. *Cooling and ventilating the abyssal ocean.* Geophys. Res. Letters 2001;28(15):2923-2926.
- Parish T.R., Cassano J.J., Seefeldt MW. *Characteristics of the Ross Ice Shelf air stream as depicted in Antarctic Mesoscale Prediction System simulations.* J. Geophys. Res. 2006;111:D12109.
- Planquette H., Sherrell R.M., Stammerjohn S., Field M.P. *Particulate iron delivery to the water column of the Amundsen Sea, Antarctica.* Mar. Chem 2013;153:15-30. doi: 10.1016/j.marchem.2013.04.006
- Rignot E., Jacobs S., Mouginit J., Scheuchl B. *Ice-shelf melting around antarctica.* Science 2013;80:266-270. doi: 10.1126/science.1235798

- Rubin S.I., Takahashi T., Chipman D.W., Goddard J.G. *Primary productivity and nutrient utilization ratios in the Pacific sector of the Southern Ocean based on seasonal changes in seawater chemistry*. Deep-Sea Res. I 1998;45:1211-1234.
- Shi D., Xu Y., Hopkinson M., Morel F. *Effect of ocean acidification on iron availability to marine phytoplankton*. Science 2010;32:676-679. doi: 10.1126/science.1183517
- Tagliabue A. et al. *The integral role of iron in ocean biogeochemistry*. Nature 2017;543:51-59. doi: 10.1038/nature21058
- Tortell P.D., Payne C.D., Li Y.Y., Trimborn S., Rost B., Smith W.O. et al. *CO₂ sensitivity of Southern Ocean phytoplankton*. Geophys. Res. Lett. 2008;35:L04605. doi: 10.1029/2007GL032583
- Tréguer P., Bowler C., Moriceau B., Dutkiewicz S., Gehlen M., Aumont O. et al. *Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump*. Nat. Geosci. 2018;11:27-37. doi: 10.1038/s41561-017-0028-x
- van der Merwe P. et al. *High lability Fe particles sourced from glacial erosion can meet previously unaccounted biological demand: Heard Island, Southern Ocean*. Front. Mar. Sci. 2019;6:332. doi: 10.3389/fmars.2019.00332
- Vraspir J., Butler A. *Chemistry of Marine Ligands and Siderophores*. Ann. Rev. Mar. Sci. 2009;1:43-63. doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163712
- Xuewu L., Millero F.J. *The solubility of iron in seawater*. Mar. Chem. 2002; 77:43-54. doi: 10.1016/S0304-4203(01)00074-3

L'ECONOMIA CIRCOLARE

ILARIA MARZOLI* – MARIA PARODI** – CARLO SENESI***

*AMIU e l'economia circolare
presso il Polo impiantistico di monte Scarpino*

Abstract: The Municipality of Genoa recently received, during the General States on Sustainable Management and Development of Territories (RemTech-21/23 September 2022), an acknowledgment for the work carried out in the field of Circular Economy. AMIU also contributed to obtaining the award, thanks to its efforts in recent years at the Scarpino landfill, which represents a fundamental asset for the Municipality. AMIU promoted the regeneration of large areas and last year inaugurated the production plant of biomethane from landfill gas on industrial scale.

AMIU has always been committed to promoting a sustainable future, where the circular economy can find an increasingly important place also and above all in the management of the waste cycle.

Engineer Carlo Senesi, Manager of the Plant Management Area, Engineer Maria Parodi of the Energy Manager Sector and Dr. Iliara Marzoli of the Design Office present the most recent activities in the field of Circular Economy, saving raw materials and the recovery of resources involving the Monte Scarpino plant complex.

Many projects are promoted thanks to European funding and partnerships with important national operators.

1. *La storia*

La discarica di monte Scarpino ha una superficie di circa 6 ettari e occupa la testa della valle entro cui scorre il rio Cassinelle; è ricompresa tra una quota minima, al piede, di circa 350 m s.l.m. e una quota massima di circa 600.

* Ufficio Progettazione, AMIU Genova SpA.

** Settore Energy Manager, AMIU Genova SpA.

*** Dirigente Area Gestione Impianti, AMIU Genova SpA.

SCARPINO 1, 1969-1995

Nel 1968, per volontà del Comune di Genova, in un periodo in cui non esisteva normativa specifica né sensibilità verso i temi ambientali, viene creata a Scarpino una discarica per i rifiuti.

Il primo atto per l'utilizzo del sito come discarica per la città di Genova fu un'Ordinanza Sindacale del 23/09/1968.

La gestione della discarica ha sempre seguito gli aggiornamenti normativi in tema ambientale. In particolare, le prime norme a livello nazionale recepite per Scarpino sono state:

- L. 319/76 - norma a tutela delle acque dall'inquinamento;
- D.P.R. 915/82 Decreto del Presidente della Repubblica del 10/09/1982 n. 915 - Attuazione delle direttive Cee n. 75/442 relativa ai rifiuti;
- Deliberazione del Comitato Interministeriale del 27/07/1984, approvate ai sensi del DPR 915/82 (primo progetto di adeguamento della discarica alle norme di settore).

Nel 1986 AMIU Genova S.p.A. subentra nella gestione e avvia la riconversione della discarica in Polo impiantistico, per adeguarsi alle norme e ai sempre maggiori volumi di rifiuti in ingresso.

SCARPINO 2, 1995-2015

Successivamente, per garantire il corretto funzionamento e la disponibilità del sito, evitando problematiche di carattere igienico-sanitario sul territorio, Regione Liguria emise una serie di ordinanze specifiche, fino al 30 giugno 1995, ai sensi dell'art. 12 del DPR 915/82 e dell'art. 32 della L. 833/78.

Negli anni a seguire, il sempre maggior interesse verso i temi ambientali portò un adeguamento normativo a livello nazionale con conseguente emanazione di specifici decreti, tra cui ricordiamo in particolare:

- D.Lgs. 05/02/1997, n. 22 - Attuazione della direttiva 91/156/CEE sui rifiuti, della direttiva 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e della direttiva 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio;
- D.Lgs. 22/1997 con adeguamento D. Lgs. 36/2003;
- D.Lgs. 59/2005 - Attuazione integrale della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento;
- D.Lgs. 03/04/2006, n. 152 - Testo Unico in materia ambientale.

Proprio in seguito all'emanazione del T.U. in materia ambientale, nel 2013 AMIU intraprese il procedimento di Autorizzazione Integrata Ambientale (2013-2018 Istruttoria A.I.A.).

Nel 2015 si arrivò alla chiusura delle aree della discarica denominate Scarpino 1 e 2 attraverso accordi conciliativi con gli Enti e alla definizione dell'invaso di Scarpino 3.

SCARPINO 3, OGGI

Con A.D.1186/2018 del 31 agosto 2018 viene autorizzata l'A.I.A. per la gestione della discarica di Scarpino 3 ai sensi del D.Lgs. 152/2006.

La vita attesa della discarica è pari a 12 anni.

La discarica di monte Scarpino è certificata UNIEN ISO 14001:2015.

2. *Focus ambiente economia circolare*

MESSA IN SICUREZZA LOTTI SCARPINO 1 E 2 (CAPPING)

La realizzazione della copertura superficiale finale delle aree non interessate dal nuovo vaso di Scarpino 3 è stata autorizzata dall'A.D. 2229 del 20/07/2016 e dall'A.D. 3852 del 28/12/2016.

Le attività di *capping* prevedono la copertura superficiale finale delle aree ricomprese all'interno della ex discarica di Scarpino 1 e 2 e non utilizzate per la realizzazione del nuovo vaso di Scarpino 3.

Le attività principali legate a tale progetto sono:

- Regolarizzazione e riprofilatura dell'area;
- Adeguamento impianto di estrazione biogas esistente;
- Realizzazione di un'adeguata stratigrafia (differenziata in funzione della pendenza dei versanti, della presenza dell'impianto SIMAM2 ecc.) di protezione del corpo rifiuti dall'infiltrazione delle acque meteoriche.

LOTTO SCARPINO 3: GESTIONE E REALIZZAZIONE

La realizzazione del nuovo vaso della discarica di Scarpino è stata autorizzata dall'A.D. 1186 del 08/06/2018.

Fra le attività propedeutiche a tale realizzazione vi è la copertura superficiale provvisoria – autorizzata dall'A.D. 2229 del 20/07/2016 – dell'intera area su cui insisterà il nuovo vaso di S3.

Le attività, in questo caso, prevedono:

- Regolarizzazione della barriera di confinamento del fondo invaso, superiore allo strato di materiale minerale compattato, attraverso la posa di un pacchetto di impermeabilizzazione;
- Approntamento dell'invaso attraverso la realizzazione e l'impermeabilizzazione dell'argine di base e delle sponde;
- Realizzazione sistemi di estrazione/convogliamento del percolato prodotto.

Si ricorda che il lotto Scarpino 3 si riferisce all'area della discarica in cui, a seguito di pre-trattamento in impianti specializzati al fine di ridurre la frazione putrescibile e ridurre al minimo la componente di materiale riciclabile, vengono ad oggi conferiti i rifiuti.

Per le attività previste dal *capping* e la realizzazione dell'invaso S3 si è posta particolare attenzione all'aspetto ambientale al fine di minimizzare, per quanto possibile, l'impatto dei lavori. Pertanto si è introdotto l'utilizzo di materiali cosiddetti *End of Waste*, Materie Prime Seconde e Sottoprodotti; gli stessi sono stati utilizzati anche per la realizzazione del sottofondo per le piste interne.

Tra le prescrizioni previste dal Piano di Monitoraggio e Controllo contenuto nell'AIA di Scarpino 3 sono presenti i seguenti monitoraggi:

- Monitoraggio e controllo della stabilità effettuato tramite: rilievi topografici basati su mire ottiche e capisaldi, inclinometri, piezometri;
- Monitoraggio della qualità dell'aria con campionamento a monte e a valle della discarica;
- Monitoraggio delle emissioni diffuse attraverso *gas-spy* e 4 punti mobili con posizione variabile in funzione dell'avanzamento della coltivazione;
- Monitoraggio dei parametri meteorologici;
- Monitoraggio analitico della qualità delle acque sotterranee e superficiali;
- Monitoraggio della qualità del percolato;
- Caratterizzazione geotecnica del rifiuto-prove meccaniche ogni 20.000 m³ di rifiuto conferito;
- Monitoraggio *profile gauge*-rilievo fondo invaso S3.

GESTIONE DEL PERCOLATO (IMPIANTO SIMAM 2)

Per il trattamento del percolato prodotto dalle ex discariche Scarpino 1 e 2 viene utilizzato un impianto di depurazione a osmosi inversa denominato SIMAM2.

L'impianto, avente potenzialità di 220 mc/h, ha seguito un rigoroso iter autorizzativo da parte degli Enti competenti prima di entrare in funzione ed è attualmente soggetto ai controlli previsti dall'AIA S3.

Il trattamento prevede i seguenti passaggi:



L'impianto è attualmente coinvolto nelle attività di *revamping* secondo quanto previsto dal Progetto GE6.1.4.f, finanziato dal PON METRO – REACT EU, che promuove la sostenibilità ambientale ed ecologica nell'ambito della gestione della discarica e, sinteticamente, prevede:

- acquisizione da parte di AMIU e ulteriore ammodernamento dell'impianto di depurazione;
- riqualificazione dell'impianto SIMAM2 con risparmio di materie prime;
- prevenzione di rifiuti speciali, con conseguente abbattimento dei costi economici e ambientali di trasporto e stoccaggio (solfato d'ammonio sottoprodotto certificato REACH);
- il permeato verrà ulteriormente depurato e reimpiegato come acqua industriale per le attività di discarica;
- l'acqua industriale verrà impiegata per i sistemi antincendio, la bagnatura delle piste e altri utilizzi utili al funzionamento dell'impianto con l'obiettivo di rendere l'impianto autosufficiente dal punto di vista idrico, limitando l'utilizzo della risorsa idrica esclusivamente per l'acqua potabile;
- verrà fatta richiesta agli Enti di una modifica autorizzativa che permetta la possibilità di trattare anche il percolato di Scarpino 3 (produzione ca. 17.000 m³/y), attualmente smaltito in autobotti.

CAMPO FOTOVOLTAICO (1.5 MW) PROGETTO FINANZIATO REACT-EU/PON METRO

Nell'ambito del finanziamento REACT-EU – PON METRO è prevista la realizzazione, entro il 2023, di un campo fotovoltaico di taglia 1.5 MW (Progetto GE6.1.4.g) al fine di incrementare l'autoproduzione di energia elettrica del polo impiantistico di monte Scarpino.

L'impianto verrà installato in corrispondenza della porzione più vecchia della discarica (Scarpino 1 e Scarpino2).

Durante la fase di progettazione definitiva, a seguito di una riunione di coordinamento con gli Enti competenti, è emersa la necessità di avviare l'iter di assoggettabilità a VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) dell'impianto.

Stante la normativa attualmente vigente in materia di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili e le relative semplificazioni recentemente introdotte, Regione Liguria ha comunicato l'esclusione del progetto dal campo di applicazione della VIA. Risulta quindi attualmente in corso la progettazione dell'impianto.

I FUTURI SVILUPPI, I NUOVI IMMOBILI DI SERVIZIO E IL BIODIGESTORE (PNRR)

È in fase di validazione il progetto relativo ai nuovi immobili ad uso uffici, spogliatoio e locali di servizio e un edificio ad uso uffici. Si tratterà di edifici a energia quasi zero "nZEB" (nearly Zero Energy Building). I progetti di tutti gli edifici si rifanno infatti ai principi delle costruzioni a basso impatto ecologico: la struttura è in legno e l'involucro è opaco, sia per le superfici verticali sia per quelle orizzontali e di copertura, con un notevole isolamento termico che ne garantirà un bassissimo consumo energetico.

PNRR – Progetto Biodigestore: presentata la proposta progettuale di AMIU per la realizzazione di un impianto di recupero della frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU) proveniente dalla raccolta differenziata del genovesato costituito da due sezioni d'impianto: pre-trattamenti e digestione anaerobica.

Il biodigestore verrebbe inserito all'interno del contesto del Polo impiantistico multifunzionale (discarica S3, costruendo impianto TMB e impianti di trattamento percolato) di monte Scarpino, rendendo sempre maggiore l'interconnessione tra i diversi impianti.

IMPIANTO VALORIZZAZIONE BIOGAS/BIOMETANO ASJA – RENERWASTE

L'impianto ASJA, con produzione di biometano da biogas (1.500 Nmc/h di biogas in ingresso all'impianto) a seguito di un processo di purificazione e upgrading, è entrato in funzione a fine 2020.

Il biometano (95% di metano) è un combustibile rinnovabile utilizzato per produrre energia elettrica e calore (utenze domestiche e industriali) e come carburante per l'autotrazione.

Sono 5,5 i milioni di mc/anno di biometano prodotti dall'upgrading del biogas da discarica di Rifiuti Solidi Urbani (RSU), per un totale di 4.510 t/anno di petrolio risparmiato.

La captazione del biogas di discarica evita la dispersione nell'ambiente del suo componente più dannoso: il metano (CH_4) che avvelena la nostra atmosfera 21 volte in più rispetto all'anidride carbonica (CO_2).

IMPIANTO DI TRATTAMENTO MECCANICO BIOLOGICO (TMB)

Per l'impianto TMB, previsto per il trattamento del rifiuto residuo urbano con produzione di CSS, frutto di pianificazione sovraordinata, è stata attivata la concessione in regime di project financing (AMIU Genova SpA - IREN Ambiente SpA) per la progettazione, costruzione, gestione ed esercizio dell'impianto di trattamento meccanico biologico. La realizzazione dell'impianto, a cura della Società di progetto RI.MA Srl (100% IREN Ambiente SpA), è iniziata nel corso del 2021 con le opere di consolidamento. Città Metropolitana, con A.D. 43 del 13/01/2021, ha rilasciato Autorizzazione Integrata Ambientale a RI.MA Srl per la gestione e l'esercizio del TMB.

Il progetto prevede i seguenti obiettivi:

- Valorizzazione dei rifiuti recuperabili previa selezione e invio ad altri impianti per il recupero finale;
- Riduzione volumetrica del materiale con aumento della vita utile degli impianti di smaltimento;
- Produzione di CSS-combustibile (dalla frazione secca del rifiuto), da avviare a recupero energetico;
- Stabilizzazione del rifiuto organico putrescibile con riduzione dell'impatto ambientale della discarica (biogas, concentrazioni percolato ecc.) e ottenimento di uno scarto derivante dalla frazione secca caratterizzato da percentuale di materiale organico putrescibile inferiore al 15%.

LUCA BANFI*

Il ruolo della chimica organica nell'economia circolare

Abstract: Every year, hundreds of millions of metric tons of organic compounds are produced worldwide. The main starting material for them continues to be oil. About 15% of oil is employed for this goal. The indispensability of these molecules in everyday life is undisputable. However, production from oil represents a clear example of *linear economy*, contributing to the unbalance of carbon dioxide cycle. Therefore, we should try to turn into a real *circular economy*, using biomass as starting material. This is not simple, since we have to devise and develop a completely new chemistry. Some examples are illustrated in this paper. In doing so, we must also try to find new molecules endowed with a lower environmental footprint, while observing, during their synthesis, the twelve principles of Green Economy.

La chimica organica è quella branca della chimica che studia i composti del carbonio. Ma come mai un singolo elemento chimico è ritenuto così importante da dedicargli un'intera disciplina? I motivi sono essenzialmente due: a) i composti del carbonio sono quelli di cui sono costituiti gli organismi viventi; b) solo il carbonio, fra tutti gli elementi chimici, consente di ottenere un numero estremamente alto di molecole diverse, consentendo un'enorme chemiodiversità. Le due ragioni sono intimamente correlate, perché la biodiversità del mondo vivente ha bisogno di questa enorme chemiodiversità. È stato calcolato che, combinando il carbonio con pochi altri elementi (H, O, N, S, alogeni) si possono avere 10^{60} molecole differenti,¹ pur limitandosi a molecole relativamente piccole (<500 u.m.a.). Al momento sono note circa 10^8 - 10^9 molecole, il che significa che abbiamo esplorato solo una minima

* Accademico, professore ordinario di Chimica organica, Università di Genova.

parte dello “spazio chimico”. Facendo un paragone geografico è come se, di tutta la superficie della Terra, avessimo esplorato una zona molto più piccola della punta di uno spillo.

La chimica organica è una scienza piuttosto giovane: la si considera nata intorno al 1830. In meno di due secoli, i chimici sono diventati sempre più bravi a “costruire” le molecole organiche, preparando quindi numerosissime sostanze, anche non esistenti in natura. Queste molecole, “artificiali” o “naturali” che siano, hanno trovato innumerevoli applicazioni pratiche, contribuendo in modo decisivo al progresso della scienza e dell’umanità. Le applicazioni delle sostanze organiche vanno dai materiali strutturali (plastiche, gomme ecc.) ai materiali funzionali (ad es. OLED), ai prodotti per la pulizia, l’igiene e la cosmesi e, *last but not least*, a molecole con attività biologica, come i farmaci o i pesticidi. Ogni anno si producono centinaia di milioni di tonnellate di sostanze organiche. L’umanità non può fare a meno di tutto ciò, a meno di tornare indietro di duecento anni, con una popolazione mondiale molto inferiore all’attuale.

Una domanda che possiamo porci è la seguente: dato che abbiamo esplorato solo una minima parte dello “spazio chimico”, le molecole utili che abbiamo trovato finora sono sicuramente le migliori? E come mai abbiamo trovato proprio queste?

Una risposta può essere data se andiamo a vedere qual è stata finora la principale fonte delle molecole organiche che abbiamo prodotto e che produciamo. L’origine ultima di materiale organico deve per forza essere di tipo biologico. Tuttavia, possiamo dividere le fonti in due grandi categorie: quelle fossili (*in primis* il petrolio) e le biomasse. La differenza è fondamentale: la rinnovabilità. Il petrolio ha avuto bisogno di milioni di anni per formarsi dalla decomposizione di materiale organico. Le biomasse invece sono “fresche”: le otteniamo direttamente da organismi viventi, quasi esclusivamente vegetali. Le prime non sono rinnovabili, a meno di poter aspettare centinaia di milioni di anni. Le seconde invece possono essere continuamente rinnovate. Se per esempio tagliamo selettivamente alcuni alberi di un bosco, il bosco ricresce e quindi non modifichiamo la sua capacità di trasformare la CO₂ in materiale organico. Le biomasse sono quindi una fonte di carbonio in linea di principio inesauribile. Quando le sostanze organiche prodotte da esse arrivano a fine ciclo e si trasformano, per combustione o decom-

posizione, in CO_2 , questa viene riassorbita dal mondo vegetale, grazie all'energia del sole, riformando nuove biomasse.

Nonostante ciò, finora la fonte di gran lunga più importante per le sostanze organiche è stata chiaramente il petrolio, per vari motivi: a) il suo basso costo; b) la sua elevata disponibilità (almeno finora); c) la maggiore facilità di manipolazione chimica. Voglio soffermarmi in particolare su quest'ultimo punto. Il petrolio è una miscela complessa di idrocarburi, cioè di sostanze organiche costituite solo da carbonio (C) e idrogeno (H). Per ottenere le varie sostanze organiche di utilità pratica dobbiamo *aggiungere* atomi di ossigeno, azoto, zolfo, alogeni e quindi inserire quelli che i chimici organici chiamano *gruppi funzionali* (figura 1). Al contrario, le molecole ricavabili da biomasse sono tipicamente molto funzionalizzate e ricche di atomi di ossigeno. In questo caso dobbiamo *de-funzionalizzare*, togliere atomi di ossigeno e aggiungere atomi di azoto, zolfo, alogeni.

La scienza, come altre attività umane, tende a comportarsi come l'ubriaco che cerca le chiavi di casa. Non sapendo dove le ha perse, le

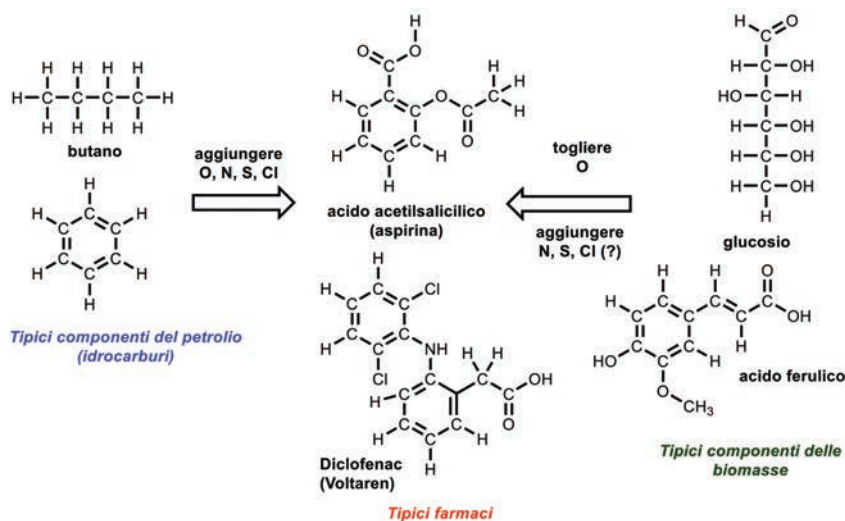


Figura 1. Mentre partendo dal petrolio bisogna aggiungere atomi di O, N, S, alogeni, partendo dalle biomasse bisogna de-funzionalizzare, togliendo soprattutto atomi di ossigeno e aggiungendo azoto, zolfo e alogeni. Come esempio di molecole organiche di utilità pratica sono qui mostrati due noti farmaci.

cerca dove c'è più luce (*streetlight effect*).² La chimica organica è partita dal petrolio perché era più facile aggiungere che togliere e le molecole ottenute sono state probabilmente quelle più facili da ottenere mediante le reazioni che via via sono state scoperte dai chimici.

Da questo punto di vista è emblematico il caso del cloro, inteso come molecola biatomica Cl_2 . Il Cl_2 è un gas di colore verde (da qui il suo nome), piuttosto tossico e reattivo. Al contrario dell'anione cloruro (Cl^-) che è invece diffusissimo (basti pensare al sale comune, cloruro di sodio o NaCl), la molecola di cloro non esiste in natura. Esso era già stato ottenuto in laboratorio usando forti ossidanti, ma la svolta avvenne nel 1892, quando fu sviluppato il processo soda-cloro.³ Questo processo, di natura elettrochimica, consente di convertire, con consumo di energia, una soluzione acquosa di cloruro di sodio (praticamente una materia prima a costo zero) in idrossido di sodio (detto anche "soda caustica") e in cloro biatomico (Cl_2) (figura 2). Anche se all'epoca l'interesse del processo era soprattutto per la produzione di soda (che, tra le altre cose, serve a produrre il sapone), ci si avvide presto che il cloro è una delle poche sostanze capace di reagire con gli idrocarburi, che sono

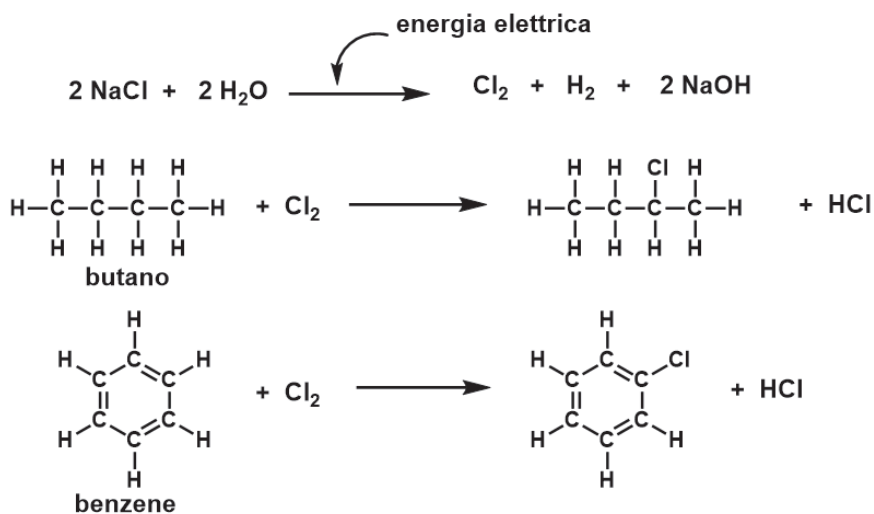


Figura 2. In alto l'equazione stechiometrica del processo soda-cloro. In basso due equazioni che mostrano come il cloro possa reagire con due tipici idrocarburi, derivati dal petrolio, introducendo nelle molecole organiche un atomo di cloro.

solitamente quasi inerti, tant'è vero che sono anche detti “paraffine”, dal latino *parum* e *affinis* (poco affini, cioè poco reattivi).

La facilità di introduzione del cloro sugli scheletri di atomi di carbonio degli idrocarburi ha fatto sì che molte molecole organiche che abbiamo usato e usiamo contengano atomi di cloro. Per esempio, molti farmaci (si veda il diclofenac in figura 1) e molti pesticidi contengono cloro. Il più famoso è probabilmente il DDT (figura 3), che ha avuto un ruolo importantissimo nella lotta contro le zanzare e quindi contro la malaria, soprattutto in Africa, ma anche in Italia. Il suo scopritore ha vinto, nel 1948, il premio Nobel per la medicina, proprio per il contributo decisivo del DDT alla limitazione di questa grave malattia.⁴ Tuttavia, come spesso accade, le medaglie hanno anche un rovescio. Nel 1962 fu pubblicato il libro *Silent Spring*, scritto da una biologa statunitense, Rachel Carson. La Carson denunciò l'uso eccessivo del DDT e di altri pesticidi clorurati in agricoltura. Il libro rappresentò la nascita del movimento ambientalista. Queste sostanze sono state infatti poi riconosciute come *interferenti endocrini*,⁵ potendo causare problemi riproduttivi in alcune specie animali, tra cui gli uccelli acquatici a cui faceva riferimento Rachel Carson.

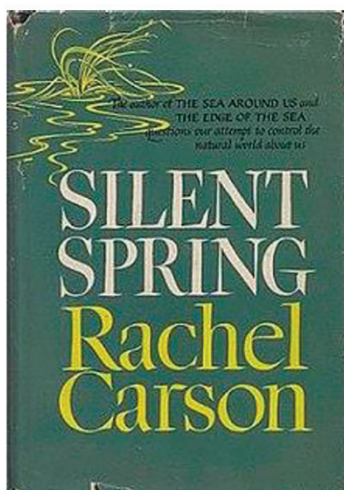
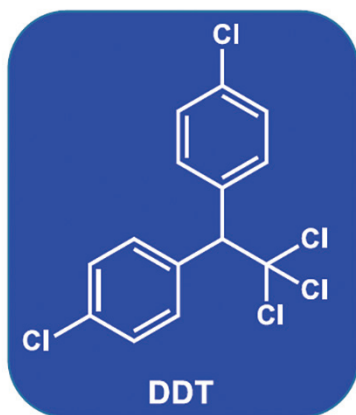


Figura 3. Formula del DDT e copertina del libro *Silent Spring* di Rachel Carson, da molti considerato il punto di inizio della sensibilità ambientale.

Non voglio qui iniziare una discussione sui pro e i contro dei pesticidi. Il DDT ha sicuramente salvato milioni di vite umane ed è tuttora raccomandato dall'OMS in alcune zone funestate dalla malaria. Voglio solo suggerire che, se avessimo ricercato e trovato pesticidi partendo, come materie prime, da biomasse, non avremmo avuto bisogno del cloro e avremmo forse prodotto pesticidi caratterizzati da minor impatto ambientale. Ci tengo a precisare che questa è solo un'ipotesi, non un fatto dimostrato.

Ma, oltre a ciò, è evidente (figura 4) che la produzione di sostanze organiche dal petrolio è un esempio di *economia lineare*. Ogni atomo di carbonio contenuto nel petrolio diventa, prima o poi, a fine vita, una molecola di CO_2 , senza alcuna possibilità di ritrasformare la CO_2 in petrolio. Tutto questo contribuisce allo sbilancio del ciclo della CO_2 . È vero che solo il 15% del petrolio è utilizzato per produrre molecole organiche

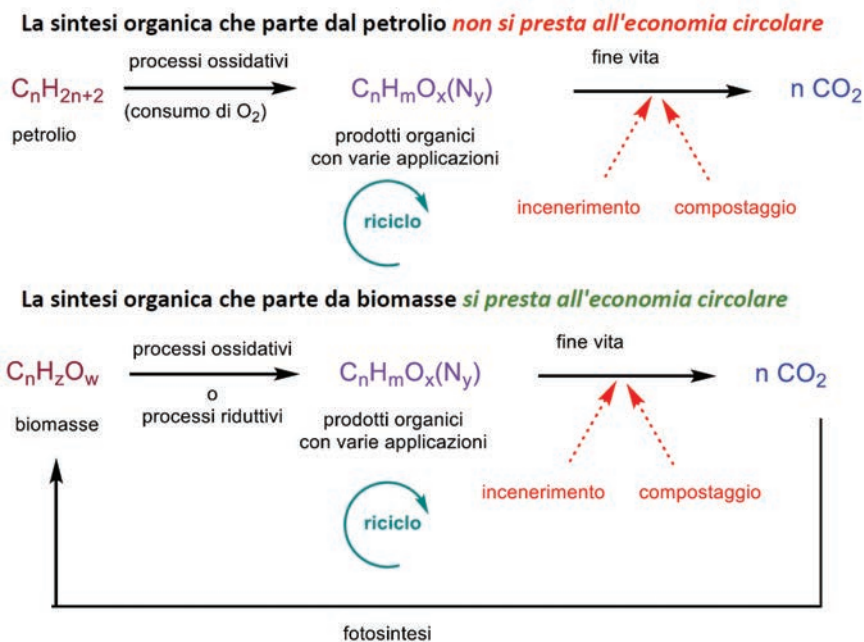


Figura 4. Confronto tra la linearità dell'economia basata sulla produzione di sostanze organiche dal petrolio e la circolarità dell'economia basata sulla produzione di sostanze organiche da biomasse. Partendo dal petrolio, ogni atomo di carbonio diventa, a fine vita, CO_2 senza possibilità che questa ritorni a dare petrolio.

(il resto è usato per produrre energia), ma il 15% non è una quantità trascurabile. Inoltre, il petrolio è destinato a finire prima o poi e quando, auspicabilmente presto, riusciremo a non usarlo più per produrre energia, quel 15% potrebbe diventare il 100% di utilizzo del petrolio.⁶

È giunto perciò il momento di provare a svincolarci dal petrolio e di ripensare l'approccio generale per l'ottenimento di molecole organiche, partendo da fonti rinnovabili (biomasse) in modo da poter realizzare una vera economia circolare (figura 4).

Ma da dove derivano le biomasse? Le biomasse di prima generazione sono essenzialmente prodotti agricoli di coltivazioni tradizionali, quali il mais, la canna da zucchero, l'olio di palma ecc. Un possibile problema nell'uso di queste biomasse è il fatto che sono in competizione con il cibo. Il loro uso massiccio (soprattutto se utilizzate per produrre energia) può portare ad un aumento dei prezzi, con conseguenze letali sulla popolazione mondiale più povera. Oppure (è il caso dell'olio di palma, usato per produrre biodiesel) distogliere gli agricoltori da coltivazioni più utili per la nutrizione. Queste problematiche, già messe in luce dall'uso di biomasse per scopi energetici, si possono ripetere, anche se in misura minore, per l'uso come fonti di sostanze organiche nell'industria chimica. Si tende quindi sempre più ad utilizzare biomasse di seconda generazione, derivanti da piante che crescono spontaneamente in terreni non coltivabili, oppure di origine boschiva. Il legno, ad esempio, è una biomassa che può essere prelevata senza ridurre la superficie boschiva, né diminuire la capacità del bosco di assorbire e immagazzinare CO₂. Anche i rifiuti urbani o della produzione agroalimentare possono essere utili biomasse di seconda generazione. Infine, le alghe o altri organismi marini possono essere impiegati per produrre biomasse di terza generazione.

La sintesi di sostanze organiche più o meno complesse da biomasse non è semplice, perché bisogna modificare completamente le strategie sviluppate in quasi due secoli. Mentre partendo dal petrolio si deve *aggiungere*, partendo da biomasse occorre *togliere*. Inoltre il petrolio offre una gamma molto ampia di scheletri di atomi di carbonio, mentre con le biomasse le varianti sono più limitate. Una chimica del tutto nuova deve essere costruita e in ciò la ricerca accademica e industriale possono (e devono) svolgere un ruolo fondamentale. Un aiuto importantissimo può derivare dalle cosiddette *biotecnologie bianche*, che sfruttano

l'uso industriale di enzimi e microorganismi. I microorganismi e gli enzimi, opportunamente ingegnerizzati, possono infatti trasformare le molecole primarie derivanti da biomasse (*in primis* il glucosio) in altre sostanze, aumentando la chemiodiversità delle molecole da cui partire.

In generale, possiamo uscire dalla dipendenza dal petrolio in due modi: a) sintetizzando le stesse sostanze, ma cambiando il materiale di partenza (passando quindi da fonti fossili a fonti rinnovabili); b) trovando nuove molecole di origine bio, con le stesse proprietà applicative, ma possibilmente caratterizzate da minore impatto ambientale (ad es. biodegradabili, meno tossiche ecc.).

Le figure 5 e 6 mostrano due esempi di questi due approcci alternativi. Nella figura 5 si vede come siano stati sfruttati microorganismi geneticamente modificati per de-funzionalizzare il glucosio, che è il monomero ottenibile da depolimerizzazione della cellulosa. La cellulosa è un polimero del glucosio ed è la sostanza naturale più abbondante

Il glucosio è altamente funzionalizzato. Per ottenere sostanze simili a quelle derivate dal petrolio bisogna defunzionalizzare. *Facciamo lavorare i microorganismi!*

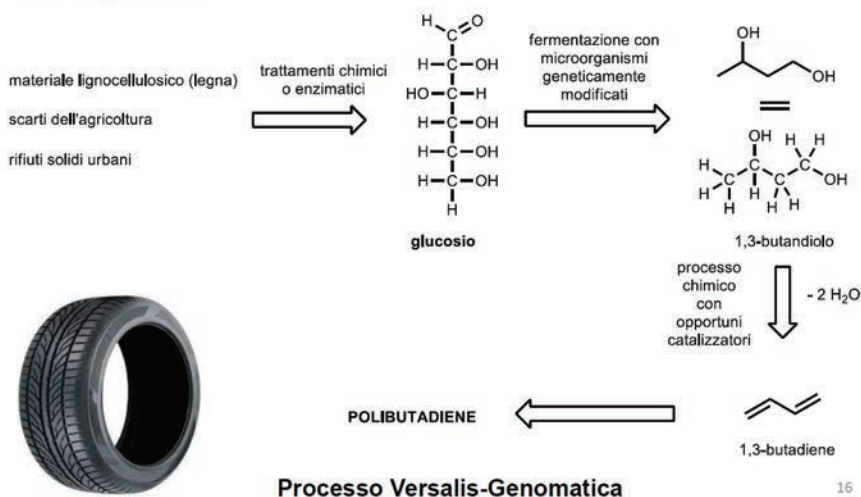


Figura 5. Ottenimento del bio-butadiene da fonti cellulose grazie ad una combinazione di processi microbiologici e chimici. Il butadiene è un monomero essenziale per la sintesi del polibutadiene, una gomma sintetica con vari usi: ad es. i pneumatici o le suole delle scarpe.

sulla Terra. È presente in varie biomasse di seconda generazione, tra cui la legna, i rifiuti organici, sfalci ecc. Il trattamento microbiologico fornisce una sostanza “semplificata” (l’1,3-butandiolo), che viene ulteriormente de-funzionalizzata a dare il butadiene, un tipico idrocarburo che finora è stato ottenuto dal petrolio.⁷ Il butadiene è poi polimerizzato a dare il polibutadiene, una gomma artificiale usata, per esempio, nelle mescole dei pneumatici o per le soles delle scarpe. Questo è un esempio del primo approccio: ottenere la stessa sostanza (il polibutadiene), ma partendo da biomasse. Si tratta di una strategia più semplice, perché porta ad un materiale che conosciamo bene da molti anni e il cui uso può sfruttare tecnologie già sviluppate.

La figura 6 mostra invece il secondo approccio, relativo alla sostituzione del PET, un poliestere che trova molte applicazioni, tra cui le bottiglie di plastica. Invece di ottenere da biomasse il necessario monomero (acido tereftalico), si è pensato di utilizzare un monomero completamente differente, in modo però di ottenere una plastica con caratteristiche simili. Ciò è certamente più difficile, perché il nuovo materiale non sarà mai identico al vecchio e potrebbe avere proprietà da un lato migliori, ma per altri aspetti peggiori. È quindi necessario ottimizzarlo studiando le condizioni di lavorazione, l’aggiunta di coadiuvanti ecc.

D’altronde, un materiale con struttura chimica più simile alle sostanze naturali avrà più probabilità di essere biodegradabile o compostabile. I sacchetti compostabili che troviamo al supermercato sono stati ideati in questo modo, svincolandosi dai classici polimeri di tipo idrocarburo (polietilene, polistirene) o clorurati (poli cloruro di vinile, PVC), che non vengono attaccati dai microorganismi, e indirizzandosi verso polimeri naturali o simili ad essi. Da questo punto di vista un materiale molto promettente è l’acido polilattico (che sarebbe meglio chiamare poli acido lattico, in quanto il polimero non ha più proprietà acide). L’acido lattico, come fa intendere il nome stesso, è un prodotto di fermentazione dei carboidrati da parte di opportuni microorganismi (questa fermentazione è alla base della produzione dello yogurt). Può essere trasformato in un poliestere che, grazie alla relativamente facile idrolisi enzimatica dei gruppi estere che tengono uniti i monomeri, viene depolimerizzato e metabolizzato da microorganismi, risultando quindi biodegradabile. C’è ancora molto lavoro da fare per dotarlo di proprietà comparabili a quelle dei polimeri basati sul petrolio, ma la

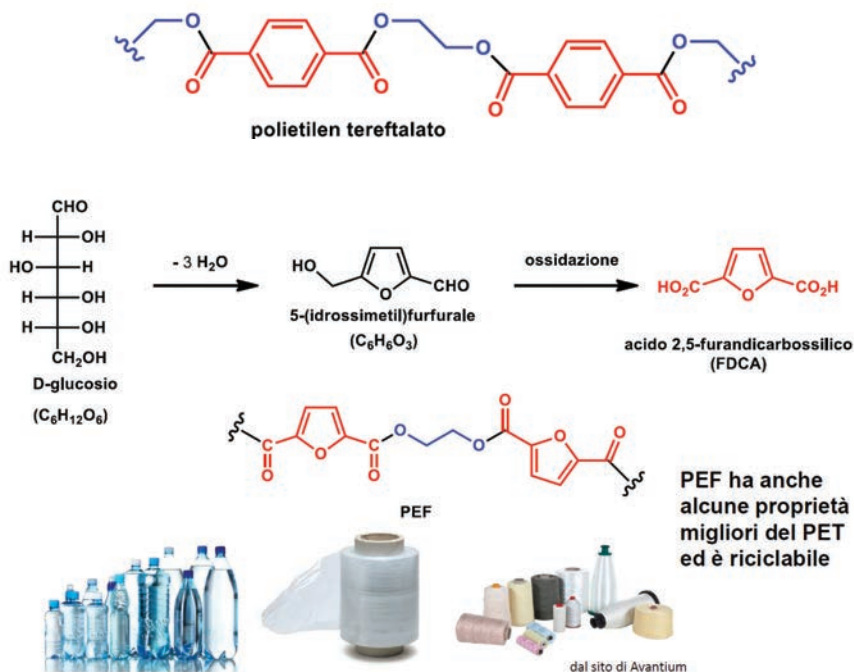


Figura 6. Un possibile sostituto “bio-based” del PET (polietilentereftalato, mostrato in alto). Invece di produrre acido tereftalico da biomasse (cosa difficile), si è deciso di sfruttare l’acido 2,5-furandicarbossilico (FDCA) per ottenere il PEF, un nuovo materiale “bio-based”. FDCA deriva in pochi passaggi dal glucosio, le cui fonti più economiche sono sempre i materiali ligno-cellulosici.

ricerca, a cui contribuiscono anche colleghi del mio dipartimento, sta facendo passi da gigante. Il prezzo finale non potrà mai competere con gli attuali polimeri derivati sul petrolio, ma prima o poi dovremo capire che per valutare il costo di un qualunque oggetto bisogna mettere in conto anche il costo del fine vita e i costi ambientali.

Queste applicazioni sono tutte nel campo dei polimeri e quindi di materiali strutturali. Tuttavia, abbiamo visto come le molecole organiche possano trovare numerose applicazioni. Alcune di esse, come è il caso dei materiali strutturali, sono *bulk* (cioè prevedono grosse quantità) e a basso valore aggiunto. Altre però (come è il caso dei farmaci) portano a sostanze prodotte in minore quantità, ma con alto valore commerciale. In questo caso la ricchezza di gruppi funzionali, che è

tipica delle sostanze di origine naturale, può costituire un vantaggio. Invece di defunzionalizzare, possiamo sfruttare la complessità di partenza per generare nuova complessità.

Ci sono vari modi per degradare il glucosio. Alcuni li abbiamo già visti più sopra. Per trattamento acido si ottiene il 5-(idrossimetil)furfurale⁸ (figura 6); per trattamento microbiologico possiamo ottenere, tra gli altri, l'1,3-butandiolo (figura 5) o l'acido lattico.⁹ Il levoglucosenone,^{10, 11} che mantiene i 6 atomi di carbonio originari del glucosio, può invece essere ottenuto per degradazione termica (figura 7). La cosa interessante è che non è necessario depolimerizzare preventivamente la cellulosa. Quantità apprezzabili di levoglucosenone sono ottenibili mediante processi di pirolisi applicati direttamente alla cellulosa, ma anche

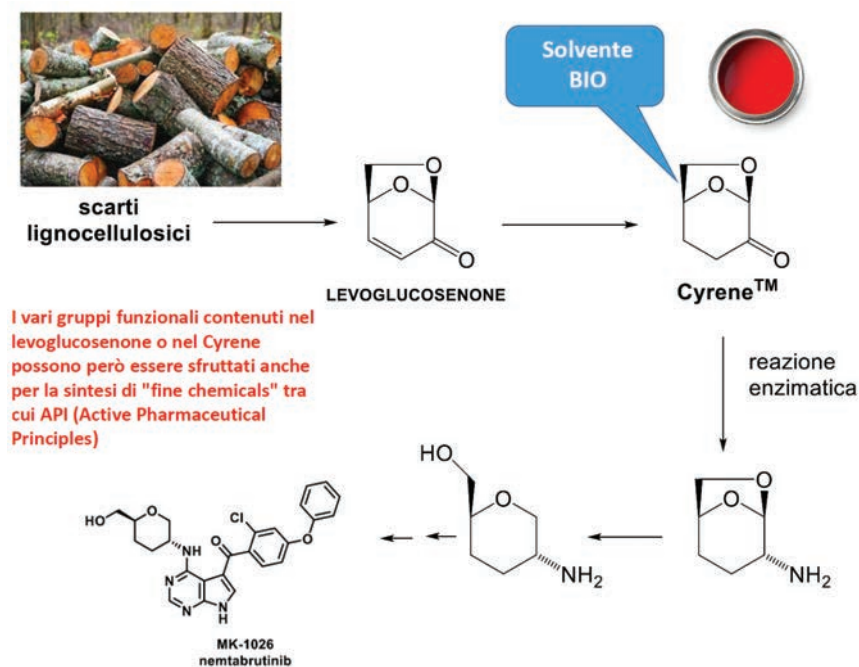


Figura 7. Il levoglucosenone è un interessante materiale di partenza, che può essere ottenuto per pirolisi di legna, carta o scarti contenenti cellulosa. Può essere utilizzato per applicazioni bulk (il Cyrene è un solvente "bio" per vernici), ma può anche essere sfruttato per la sintesi di molecole più complesse, quali i farmaci. In questa applicazione, l'introduzione di azoto è stata realizzata con le biotecnologie "bianche".

a materiali lignocellulosici vari, tra cui la legna o gli scarti, senza bisogno di eseguite complicate purificazioni e separazioni dei componenti.

Tramite una semplice addizione di idrogeno, il levoglucosenone è convertito in Cyrene™, prodotto da una spin-off australiana, che intende commercializzarlo come solvente bio per sostituire i classici solventi derivanti dal petrolio (figura 7). Tuttavia, ancora più interessante sembra essere la possibilità di sfruttarlo per produrre sostanze ad alto valore aggiunto, quali i cosiddetti API (Active Pharmaceutical Ingredients). Recentemente, i chimici della Merck, in collaborazione con l'azienda CODEXYS, specializzata nell'uso di enzimi, hanno utilizzato il Cyrene™ per la sintesi di un importante API di loro interesse, un inibitore enzimatico di tirosina chinasi con attività antitumorale.¹² Qui va fatta un'importante considerazione. Il glucosio, che, come abbiamo visto, è un po' il protagonista in molti utilizzi di biomasse, ha formula $C_6H_{12}O_6$. Ha quindi tanti atomi di ossigeno quanti di carbonio, cosa non molto comune nelle sostanze organiche che usiamo abitualmente, ma non ha atomi di azoto. D'altra parte, è rarissimo avere farmaci che non contengano azoto. Quindi un punto cruciale in qualsiasi sintesi di API che parta da materiale di degradazione della cellulosa è rappresentato dall'introduzione di uno o più atomi di azoto.

Nell'esempio riportato in figura 7, ciò è stato realizzato con l'ausilio delle biotecnologie "bianche", ossia tramite degli enzimi della famiglia delle amminotransferasi,¹³ che sono in grado di realizzare delle *amminazioni riduttive*. In parole povere, se guardate la formula del Cyrene™, è presente un doppio legame C=O. L'amminazione riduttiva introduce un atomo di azoto sullo stesso carbonio (togliendo l'ossigeno), ma al tempo stesso trasforma il legame doppio in legame singolo. Le amminotransferasi sono diffuse in natura, ma, come spesso accade per gli enzimi, funzionano solo sui substrati a cui sono preposte e il Cyrene™ non è certo uno di questi. Per poter realizzare il processo, i ricercatori della CODEXYS hanno dovuto modificare gli enzimi originali, per renderli efficaci sul Cyrene™. Ciò è stato realizzato con sofisticate strategie di ingegneria genetica. Le biotecnologie ci stanno pertanto dando gli strumenti per poter utilizzare enzimi "artificiali" che potranno in futuro rendere più "verdi" le nostre sintesi. Questi enzimi artificiali, infatti, sono sempre formati dai soliti 20 amminoacidi, sono non tossici, perfettamente biodegradabili e quindi costituiscono dei catalizzatori verdi per eccellenza.

A proposito di chimica verde, in precedenza ho un po' semplificato dicendo che una produzione di composti organici che parta da biomassa è in principio aderente all'economia circolare. Ciò è vero per una sintesi ideale, in cui mescoliamo i nostri reagenti e otteniamo una resa del 100% di un prodotto che contiene tutti gli atomi dei reagenti, senza alcuno scarto. Nella realtà questo non è purtroppo vero, ma dobbiamo tendere a questo obiettivo ideale. Inoltre, la difesa dell'ambiente non può solo limitarsi allo sbilancio della CO₂. Dobbiamo tenere presenti anche altre alterazioni dell'ambiente che possono essere causate dalle produzioni chimiche, nonché della sicurezza dei lavoratori e delle persone che vivono nelle vicinanze degli impianti.

Nel XX secolo i progressi della chimica organica erano stati soprattutto rivolti a riuscire a preparare qualunque molecola noi volessimo ottenere. Ora, nel XXI secolo, l'enfasi deve necessariamente spostarsi da "cosa riusciamo a preparare" a "come lo prepariamo". Come ha detto T.S. Eliot, "l'importante non è la meta, ma il viaggio". Questa massima deve essere applicata anche alla sintesi organica. A tale scopo, alcuni anni fa, sono stati coniati dodici principi della chimica verde, che sono mostrati nella figura 8.¹⁴ Usando dei codici colorati, ho cercato di classificare questi dodici principi in tre finalità di base. La prima, che ho chiamato "climate", ha a che vedere con la salute del pianeta e l'inquinamento *globale*: ridurre lo sbilancio dell'anidride carbonica, ridurre lo spreco di risorse ecc. La seconda, che ho chiamato "less pollution", si riferisce alla riduzione dell'inquinamento *locale*, di acqua, suolo ecc. La terza, che ho chiamato "safety", si riferisce alla prevenzione di incidenti che possono arrecare danni ai lavoratori o alle persone che vivono nelle vicinanze degli impianti.

Riguardo a queste ultime due finalità, un concetto fondamentale che va tenuto presente è che non basta adottare soluzioni che minimizzino i rischi, quali per esempio impianti chiusi che non permettano sversamenti, sistemi di allarme ecc. Bisogna anche, fin dall'inizio, progettare processi di sintesi che siano intrinsecamente più sicuri. Un esempio molto rappresentativo di questo concetto è l'incidente più grave della storia dell'industria chimica: quello verificatosi a Bhopal, in India, nel 1984.

L'impianto era di nuova costruzione e i progettisti avevano installato tutta una serie di dispositivi per evitare rischi di fuoriuscita dei due gas tossici, fosgene e metil isocianato, che venivano prodotti e accumu-

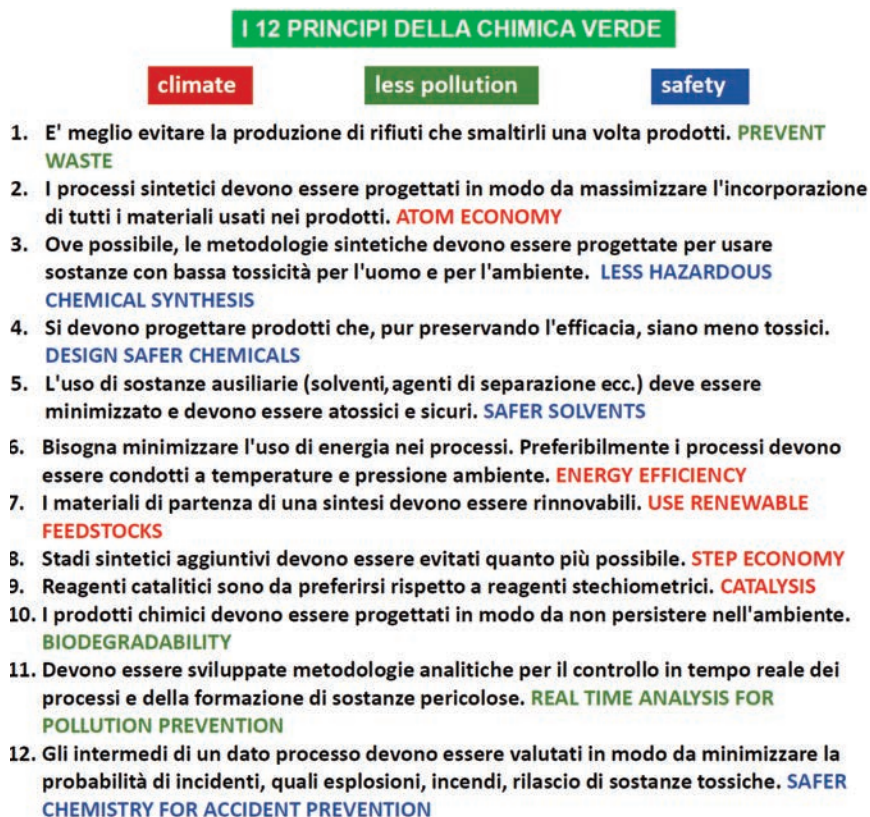


Figura 8. *I dodici principi della chimica verde.*

lati prima dell'uso per ottenere il prodotto finale (figura 9). Purtroppo, però, una serie di errori umani e un comportamento irresponsabile di dirigenti che, stando a migliaia di chilometri di distanza, avevano deciso di risparmiare sulla prevenzione e la sorveglianza, fecero sì che, in un giorno disgraziato, una fuoriuscita dei due gas tossici provocasse una nube che il vento spinse verso la città.

Si comprese allora che l'errore non risiedeva solo nel non aver fatto funzionare bene i vari dispositivi di sicurezza, ma anche nell'aver previsto una sintesi che necessitava l'accumulo di due sostanze così pericolose (si vedano i principi n. 3 e n. 12 della chimica verde). Ora lo stesso fitofarmaco viene prodotto con un processo che evita del tutto il metil isocianato e in cui il fosgene viene preparato in continuo e subito tra-

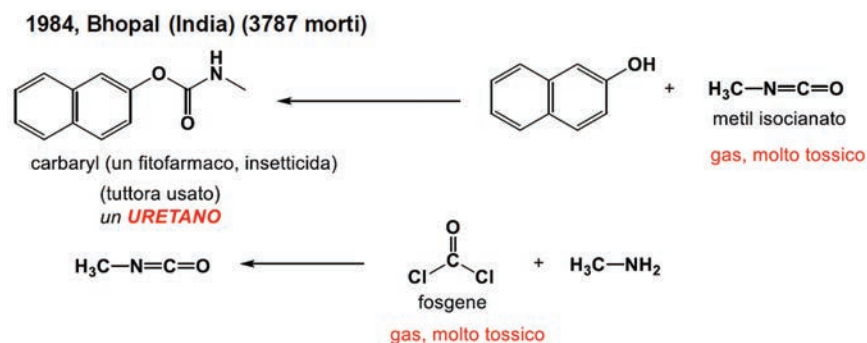


Figura 9. La sintesi del carbaryl, così come era prevista nell'impianto di Bhopal. Sia il fosgene che il metil isocianato venivano prodotti e immagazzinati in attesa del loro uso per la sintesi del prodotto finale, che invece è una sostanza stabile e non pericolosa.

sformato in un intermedio molto meno pericoloso, senza quindi essere accumulato. Nel 1984 i principi della chimica verde non erano ancora stati enunciati. In seguito sono stati anche messi a punto degli indicatori che ci consentono di misurare quanto una sintesi sia verde. Pertanto, chi deve decidere tra varie vie alternative ha ora tutti i mezzi per puntare sempre di più su sintesi verdi, mentre il compito dei ricercatori, specie quelli accademici, è quello di ricercare e trovare, anche con l'aiuto di mezzi biotecnologici, nuove reazioni più sostenibili, per sostituire quelle meno aderenti ai dodici principi della chimica verde.

In conclusione, la chimica organica continuerà ad avere un ruolo molto importante nel trovare sempre nuove molecole che siano in grado di risolvere i problemi del mondo, quali per esempio farmaci innovativi o pigmenti per produrre celle fotovoltaiche organiche, più facilmente smaltibili e meno soggette alla carenza di materie prime. Ma dovrà senza dubbio farlo partendo da materiale rinnovabile, in modo da eliminare nel corso degli anni la sua dipendenza dal petrolio. Dovrà inoltre valutare sempre più, fin dai banchi dei laboratori di ricerca di base, il costo ambientale delle sintesi che vengono sviluppate, cercando di privilegiare quei processi che più rispettano i dodici principi della chimica verde. Le nuove generazioni dovranno essere formate già con questa *forma mentis*. Poiché la gatta frettolosa partorisce gattini ciechi, auspico quindi un'era futura in cui la qualità vinca sulla frenesia del "subito".

Bibliografia

- [1] Kirkpatrick P., Ellis C. *Chemical space*. *Nature* 2004; 432:823-823.
- [2] Battaglia M., Atkinson M.A. *The streetlight effect in type 1 diabetes*. *Diabetes* 2015;64:1081-1090.
- [3] Crook J., Mousavi A. *The chlor-alkali process: A review of history and pollution*. *Environmental Forensics* 2016;17:211-217.
- [4] *Nobel Prize for Medicine: Dr. Paul Müller*. *Nature* 1948;162:727-727.
- [5] Roy J.R., Chakraborty S., Chakraborty T.R. *Estrogen-like endocrine disrupting chemicals affecting puberty in humans – a review*. *Medical science monitor: international medical journal of experimental and clinical research* 2009;15:RA137-145.
- [6] <https://theconversation.com/oil-companies-are-going-all-in-on-petrochemicals-and-green-chemistry-needs-help-to-compete-153598>.
- [7] <https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2016/02/versalis-e-genomatica-ottengono-in-laboratorio-bio-gomma-con-bio-butadiene-da-zuccheri.html>.
- [8] Fan W., Verrier C., Queneau Y., Popowycz F. *5-Hydroxymethylfurfural (HMF) in Organic Synthesis: A Review of its Recent Applications Towards Fine Chemicals*. *Curr. Org. Synth.* 2019;16:583-614.
- [9] Li Y., Bhagwat S.S., Cortés-Peña Y.R., Ki D., Rao C.V., Jin Y.-S., Guest J.S. *Sustainable Lactic Acid Production from Lignocellulosic Biomass*. *ACS Sust. Chem. Eng.* 2021;9:1341-1351.
- [10] Comba M.B., Tsai Y.-H., Sarotti A.M., Mangione M.I., Suárez A.G., Spanevello R.A. *Levoglucosenone and Its New Applications: Valorization of Cellulose Residues*. *Eur. J. Org. Chem.* 2018;2018:590-604.
- [11] Kudo S., Goto N., Sperry J., Norinaga K., Hayashi J.-I. *Production of Levoglucosenone and Dihydrolevoglucosenone by Catalytic Reforming of Volatiles from Cellulose Pyrolysis Using Supported Ionic Liquid Phase*. *ACS Sust. Chem. Eng.* 2017;5:1132-1140.
- [12] <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/acs-webinars/2022/slides/2022-09-08-nemtabrutinib-gci2.pdf>.
- [13] Ferrandi E.E., Monti D. *Amine transaminases in chiral amines synthesis: recent advances and challenges*. *World J. Microb. Biotech.* 2017;34:13.
- [14] Anastas P., Eghbali N. *Green Chemistry: Principles and Practice*. *Chem. Soc. Rev.* 2010;39:301-312.

ADRIANA SACCONÉ*

*Le risorse non sono infinite.
Elementi chimici in via di esaurimento*

Abstract: Chemical elements are neatly arranged in the Periodic Table that in 2019 has celebrated the 150th anniversary since its proposal by the Russian chemist Dmitrij Mendeleev. To date, 118 elements are known, ranging from Hydrogen to Oganesson, the latter identified in 2015. The first 94 elements of the Periodic Table exist naturally on our planet (the remaining 24 are artificially created), but only 80 of the natural ones have at least one stable isotope. In other words, less than 100 elements are the building blocks of all materials sustaining the needs of life as well as life itself. Moreover, the availability of many elements that are essential to modern technology, including those for low-carb energy production, must be considered critical, and we may not expect that new stable elements may be discovered. For our technological development, and not only for that, we must acknowledge that geological resources are limited and not renewable.

The global access to higher welfare levels, made possible by technological progress, and the constant increase of world population, require ever increasing consumption of non-renewable natural resources. The challenge will be to decouple economic growth from the rising natural resources consumption through the adoption of sustainability principles based on re-use, reparation, reconditioning and recycling of existing materials that must be made as durable and efficient as possible.

1. *Elementi chimici e Sistema Periodico*

Gli elementi chimici non sono distribuiti in modo regolare nella crosta terrestre e quindi spesso abbondanza e disponibilità non coincidono; alcuni dei più abbondanti sono ampiamente distribuiti, altri sono concentrati in poche località. In massa la crosta terrestre, che costituisce circa l'1% della massa del nostro pianeta, consiste di: ossigeno (46.6%), silicio (27.7%), allu-

* Accademica, già professore ordinario di Chimica generale e inorganica, Università di Genova.

minio (8.1%), ferro (5.0%), calcio (3.6%), sodio (2.8%), magnesio (2.1%), potassio (2.6%), titanio (0.61%). Tutti gli altri elementi hanno ciascuno un'abbondanza inferiore allo 0.15% (Greenwood 1997; Rhodes 2019).

La forma essenziale della Tavola Periodica è familiare a molti, ma nel 2011 lo United Kingdom's Chemistry Innovation Knowledge Transfer Network ha pubblicato una nuova Tavola che, analizzando la sostenibilità economica dell'estrazione e la limitazione dell'offerta dovuta anche a motivazioni geopolitiche, ha classificato come "in via di esaurimento" 44 degli elementi conosciuti.

Nel gennaio 2019 la European Chemical Society ha rilasciato un nuovo format della Tavola Periodica (figura 1) che indica non solo quali elementi sono potenzialmente in esaurimento, ma anche la loro relativa abbondanza mediante una scala areale logarithmica. Si evidenzia che una

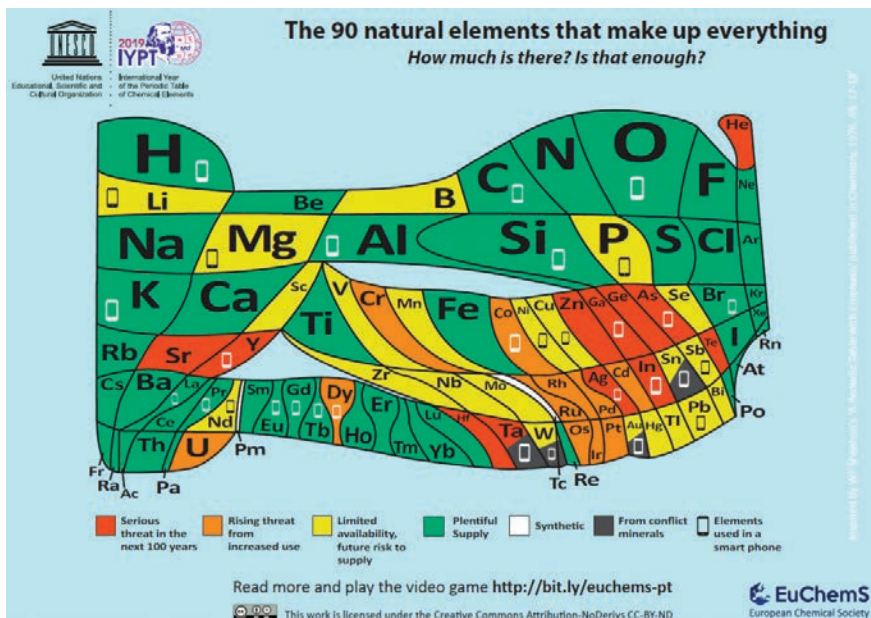


Figura 1. La Tavola Periodica dell'abbondanza degli elementi chimici (European Chemical Society 2019). I 90 principali elementi sono evidenziati con aree e colori diversi a seconda della disponibilità in natura. Nel 2021 la Tavola è stata aggiornata e la casella del litio è stata colorata in arancione, indicando un rischio più elevato per il crescente utilizzo di questo elemento.

sessantina di elementi con proprietà molto eterogenee possono essere considerati “rari” in quanto si collocano all’interno di uno spazio di criticità tridimensionale (rischio di approvvigionamento, rischio ambientale, vulnerabilità alla restrizione dell’offerta) e il controllo della loro estrazione mineraria può riscrivere gli attuali equilibri economici.

Il progresso tecnologico moderno ha ampliato nel tempo il numero di elementi utilizzati. Nel passato l’uomo utilizzava solo sette metalli (ferro, rame, piombo, argento, oro, stagno e mercurio) e nel recente passato circa una ventina. Attualmente la quasi totalità degli elementi chimici trova almeno un impiego in campo industriale o militare.

Molti elementi rari sono indispensabili per le nuove tecnologie dell’informazione e della comunicazione (Rhodes 2019; Matlin et al. 2019). Un esempio può essere lo smartphone, che necessita di circa 30 elementi chimici (indicati in figura 1 con un simbolo stilizzato), per oltre la metà dei quali potrà essere difficile soddisfare la domanda in un prossimo futuro, tenuto conto che ogni mese, nella sola Europa, vengono sostituiti più di 10 milioni di smartphone. In altri termini, la loro sostituzione comporta la perdita annua di circa 1000 t di rame, 30 t di argento, circa 3 t di oro, 1 t di palladio ecc. Altri esempi sono il germanio (fibre ottiche), l’indio (chip elettronici), il tantalio (condensatori di circuiti elettrici), il gruppo degli elementi delle terre rare (proprietà elettromagnetiche, ottiche, catalitiche).

La Commissione Europea ha compilato una lista, soggetta a revisione e aggiornamento periodico, di materie prime critiche (CRMs) a cui per la significativa importanza economica in settori quali elettronico, aerospaziale, difesa, salute, tecnologie ambientali, per l’elevata dipendenza dalle importazioni, per la mancanza di possibili sostituti, è richiesto un “accesso senza ostacoli”. L’elenco rilasciato nel 2020 individua 30 differenti materiali, la maggior parte dei quali sono elementi chimici (antimonio, berillio, germanio, indio, niobio, tungsteno, scandio, afnio, elementi del gruppo del platino, terre rare ecc.).

2. *Nuove tecnologie ed elementi chimici critici*

Sino al Settecento solo tre elementi (carbonio, ferro e calcio) erano utilizzati per la produzione di energia (derivata dall’uso di legname,

vento e acqua). Nell'Ottocento, a seguito della rivoluzione industriale, e nel Novecento, con l'invenzione del motore a combustione interna, gli elementi chimici utilizzati in campo energetico sono aumentati in numero, sino ad arrivare ai tempi attuali, quando la produzione di energia a basse emissioni di carbonio richiede nuove tecnologie comportanti l'utilizzo di nuovi materiali, e quindi di elementi chimici non utilizzati precedentemente in campo energetico (figura 2).

Attualmente, la maggior parte dell'energia utilizzata dall'uomo deriva ancora dai combustibili fossili (carbone, petrolio, gas); l'emergenza climatica in corso, dei cui effetti siamo quotidianamente testimoni, rende urgente la transizione verso un'economia decarbonizzata che porti ad una limitazione delle emissioni in atmosfera di CO_2 . Tenuto conto anche di fattori difficilmente governabili, quali l'aumento della popolazione mondiale e il fenomeno del massiccio inurbamento, verso il 2050 la produzione elettrica dovrà più che raddoppiare, due terzi della quale dovrebbero essere ottenuti da fonti rinnovabili, quali fotovoltaico ed eolico.

Qui di seguito saranno discussi gli aspetti e le problematiche di alcuni elementi chimici di importanza fondamentale per lo sviluppo tecnologico, in particolare nel campo della transizione energetica.

Litio. È utilizzato negli accumulatori agli ioni litio (comunemente noti come batterie al litio) che hanno cambiato il nostro modo di comunicare, lavorare e muoverci, permettendo al mondo di diventare...

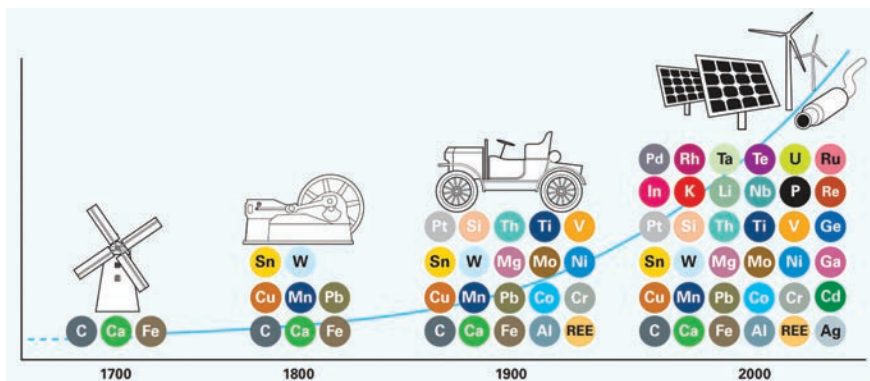


Figura 2. Gli elementi chimici più usati nelle tecnologie di produzione dell'energia a partire dal periodo pre-rivoluzione industriale (Zepf et al. 2014).

ricaricabile. Computer, smartphone, dispositivi medici, auto elettriche, satelliti funzionano con questi accumulatori, che attualmente sono i più diffusi e utilizzati al mondo.

Il litio è il metallo più leggero del Sistema Periodico. È poco abbondante (circa 20 mg per ogni kg di crosta terrestre) ed è concentrato in poche aree geografiche del pianeta. Si ottiene principalmente tramite un processo di evaporazione di acque salate (acque sotterranee, laghi salati) che comporta diversi problemi ambientali, quali: elevato uso di acqua (circa 1800 m³ d'acqua per tonnellata di litio) che provoca un forte scompenso idrico (essiccamento del paesaggio), considerando che i giacimenti di litio sono spesso in aree aride; impatto sulle popolazioni rurali della zona del cosiddetto "triangolo del litio" (area al confine tra Bolivia, Cile e Argentina); notevole emissione di CO₂ da processi di estrazione, lavorazione e trasporto.

Rispetto agli accumulatori tradizionali sono più compatti e leggeri, possono essere ricaricati diverse volte senza diminuire l'efficienza, sono molto versatili, con design e dimensioni facilmente adattabili alle più diverse applicazioni. Presentano comunque alcuni svantaggi quali: costi elevati, tensione massima limitata, durabilità (migliorabile), impatto ambientale (legato alla produzione del litio) (Giglio 2021).

Un'alternativa economica alle batterie agli ioni litio può essere data dalle batterie agli ioni sodio. Anche se la chimica delle batterie a sodio è parzialmente diversa, la tecnologia di produzione può essere facilmente scalabile. Le batterie a ioni sodio, a fronte di alcuni vantaggi quali prestazioni costanti in un range di temperatura ampio, migliore resistenza al calore, hanno però una densità energetica più bassa, cioè è necessario avere batterie più grandi e pesanti per ottenere autonomie paragonabili a quelle delle batterie agli ioni litio.

Cobalto. È utilizzato nei catodi delle batterie a litio (ossido di litio e cobalto) per cellulari e auto elettriche, come catalizzatore per l'industria petrolifera, come componente di superleghe (leghe molto stabili ad alta temperatura, adatte in campo energetico per le pale di turbine a gas).

È relativamente scarso (abbondanza 29 ppm) con una produzione globale nel 2021 di circa 170.000 t. Oltre il 50% della produzione di cobalto proviene dalla Repubblica Democratica del Congo con estrazioni spesso su piccola scala a gestione "artigianale" e clandestina. Fa parte dei

cosiddetti “metalli dei conflitti” in quanto ottenuto da minerali estratti in zone dove operano gruppi armati, eserciti e attori esterni che spesso perpetuano violenza e sfruttamento tramite lavoro forzato, condizioni estreme dei minatori e lavoro minorile (Murray 2022). Il termine “minerali dei conflitti” si riferisce anche a cassiterite (stagno), wolframite (tungsteno), coltan (tantalio e niobio) e minerale d’oro (questi minerali a volte sono indicati come 3TG, sulla base delle iniziali in inglese degli elementi).

Gli elementi delle Terre rare (REE). Sono un gruppo di 17 elementi chimici caratterizzati da proprietà chimiche molto simili, per cui sono particolarmente difficili da separare l’uno dall’altro. Non sono elementi particolarmente rari: molti hanno abbondanze comparabili a quelle di rame, zinco, stagno, e persino gli elementi meno comuni del gruppo, tullio e lutezio, sono circa 200 volte più abbondanti dell’oro. I pochi depositi sfruttabili contengono miscele degli elementi, che devono poi essere separati gli uni dagli altri con procedimenti chimici inquinanti, per essere alla fine commercializzati sotto forma di ossidi.

Gli elementi delle terre rare giocano un ruolo importante dato che oggi è quasi impossibile che un qualsiasi componente con un certo contenuto tecnologico non abbia tra i suoi costituenti una percentuale di terre rare, normalmente dell’ordine dello 0.1-5% in peso. Le troviamo nei dispositivi elettronici di ultima generazione, in particolare, in batterie ricaricabili per il settore dell’automotive (specie elettrico e ibrido), in magneti permanenti per turbine eoliche e motori elettrici, come fosfori per TV e LCD ecc. (Balaram 2019).

La Cina è attualmente leader mondiale nella produzione, estrazione e raffinazione di terre rare (oltre il 90% nel primo decennio del 2000 ma ridotto al 58% nel 2020, anche se nel settore della lavorazione e produzione dei magneti permanenti la quota di mercato delle aziende cinesi è dell’85-90%). Il suo ruolo si è consolidato alla fine del XX secolo a seguito dell’aumento della domanda da parte del settore dell’elettronica. Il quasi-monopolio cinese della produzione e del trattamento delle terre rare pone questioni di rilevanza strategica per le politiche industriali di Stati Uniti, Giappone, Europa e rappresenta un fattore di rischio, potendo essere strumentalizzato tramite la restrizione selettiva delle esportazioni verso alcuni paesi e la riduzione delle quote di terre rare destinate all’export.

3. *Nuove risorse*

Anche tralasciando gli aspetti geopolitici, bisogna avere ben presente che molti elementi critici per lo sviluppo tecnologico provengono da fonti limitate e non rinnovabili. Questo fatto venne messo in evidenza già cinquant'anni fa, nel 1972, da un celebre rapporto commissionato al MIT dal Club di Roma, *I limiti dello sviluppo* (*The limits of growth*), in cui veniva sottolineata l'incompatibilità tra le dinamiche esponenziali di crescita economica e demografica delle società industrializzate e la finitezza delle risorse terrestri (Meadows 1972; 2022).

Alla ricerca di nuove risorse vengono comunque esplorati nuovi possibili contesti, quali:

Nuove prospezioni minerarie in ambienti anche estremi. Si scontrano con diversi problemi, tra i quali costi elevati, tempi lunghi di messa in atto della coltivazione delle miniere, vulnerabilità ambientale, accettazione da parte delle popolazioni residenti. Emblematico a questo riguardo è il caso di Kvanefjeld (Groenlandia), in cui il ritiro dei ghiacci dovuto al cambiamento climatico potrebbe rendere semplice ed economico sfruttare i giacimenti minerari, se non fosse che nel 2021 il parlamento della Groenlandia ha approvato una legge che blocca il sito, pur essendo il sesto giacimento di uranio al mondo e un importante deposito di terre rare.

Fondali marini (deep sea mining). Sui fondali marini si trovano quelle che potrebbero essere le più grandi riserve mondiali sfruttabili di metalli necessari per le tecnologie avanzate. Sono riserve in forma di solfuri polimetallici, croste di ferromanganese con elevate concentrazioni di cobalto, noduli polimetallici, cioè rocce sferoidali accumulate sui fondi oceanici tra i 3500 e i 6500 m di profondità, contenenti manganese, ferro, nichel, cobalto, rame, titanio, molibdeno. Un'area di $9 \cdot 10^6$ di km² tra le Hawaii e le coste occidentali del Nord America si stima abbia una densità di noduli pari a 15 kg/m².

I problemi legati a questo tipo di estrazione sono la costosa e complessa realizzazione di strumenti che possano sopportare le enormi pressioni dei fondali oceanici per lunghi periodi di tempo senza la necessità di frequenti manutenzioni e soprattutto gli effetti devastanti sull'habitat marino di fauna e flora a tutte le profondità, con impatto sconosciuto sul sistema climatico globale, causati dall'attività estrattiva. Il dragaggio

del fondale avrebbe non solo effetti diretti ma anche indiretti, quali sollevamento di sedimenti, rumori e vibrazioni, acque di lavaggio dei sedimenti stessi ecc. (EASAC 2023).

4. *La via del riciclo*

A fine vita dei prodotti, i metalli possono essere recuperati e riciclati nel processo produttivo un numero teoricamente illimitato di volte conservando inalterate le loro proprietà. In questo modo non solo si riduce la domanda primaria di questi elementi non rinnovabili, ma si ottiene un notevole risparmio energetico e una conseguente diminuzione delle emissioni di CO₂, dato che l'estrazione di un metallo dai suoi minerali richiede un processo fortemente energivoro. Poiché non tutto il metallo può essere economicamente recuperato, il riciclo non può essere del tutto sostitutivo dell'estrazione primaria, ma può tuttavia mitigare la portata del problema.

In questo contesto giocano un ruolo importante i rifiuti delle nostre città, in particolare quelli elettrici ed elettronici, dai quali è possibile estrarre risorse utili al ciclo produttivo. Nel 2020 sono stati raccolti nell'Unione Europea 10.3 kg per abitante di rifiuti elettrici ed elettronici, ma meno del 40% di essi viene riciclato (dati del Parlamento Europeo 2020). L'*urban mining* è quindi un processo virtuoso che, ricavando materie "seconde" (metalli e materiali critici) da apparecchiature elettriche ed elettroniche dismesse, può rientrare fra le alternative sostenibili all'approvvigionamento di risorse non rinnovabili. Per concretizzare meglio, da 1000 t di rifiuti elettrici/elettronici domestici si possono ricavare 500 t di ferro, 25 t di rame, 20 t di alluminio e 15 t di altri materiali, anche critici.

Il riciclo rientra nei principi dell'economia circolare (Stahel e Reday-Mulvey 1981; Stahel 2010), un modello di produzione e consumo che contrasta il tradizionale modello economico lineare dipendente dalla disponibilità di grandi quantità di materie prime ed energia reperibili e a basso costo e il cui schema è "estrarre, produrre, utilizzare e gettare". Fra le strategie proprie del modello economico lineare troviamo anche l'obsolescenza programmata dei prodotti. L'economia circolare implica invece condivisione, prestito, riutilizzo,

riparazione, ricondizionamento e riciclo di materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile. Quando il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, dove possibile, con il riciclo. Il “rifiuto” è quindi considerato una risorsa e rientra in un ciclo virtuoso. Il ciclo di vita dei prodotti viene pertanto esteso, contribuendo anche a ridurre i rifiuti e a “non gettare via gli elementi della Tavola Periodica”.

Bibliografia

- Balaram V. *Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact*. *Geoscience Frontiers* 2019;10:1285-1303. doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
- EASAC (European Academies' Science Advisory Council). *Deep-Sea Mining: assessing evidence on future needs and environmental impacts*. June 2023.
- European Chemical Society (EuChemS). *La Tavola Periodica dell'Abbondanza*. 2019.
- European Commission. *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions, Brussels, September 2020.
- Giglio E. *Extractivism and its socio-environmental impact in South America. Overview of the “lithium triangle”*. *América Crítica* 2021;1:47-53. doi: 10.13125/americanacritica/4926
- Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1997.
- Matlin S.A., Mehta G., Hopf H., Krief A. *The Periodic Table of the Chemical Elements and Sustainable Development*. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2019;4170-4173. doi: 10.1002/ejic.201801409
- Meadows D., Meadows D., Randers J., Behrens W.W. III. *I limiti dello sviluppo*. Milano: Mondadori; 1972.
- Meadows D., Meadows D., Randers J. *I nuovi limiti dello sviluppo. La salute del pianeta nel terzo Millennio*. Milano: Mondadori; 2022.
- Murray A., *Cobalt Mining: The Dark Side of the Renewable Energy Transition*. Earth.org, September 2022. <https://earth.org/cobalt-mining/>
- Rhodes C.J. *Endangered elements, critical raw materials and conflict mineral*. *Science Progress* 2019;102:304-350. doi: 10.1177/0036850419884873

-
- Stahel W.R., Reday-Mulvey G. *Jobs for Tomorrow: The Potential for Substituting Manpower for Energy*. New York: Vantage Press; 1981.
- Stahel W.R., *The Performance Economy (2nd edition)*. New York: Palgrave Macmillan; 2010.
- Zepf V., Ruler A., Rennie C., Ashfield M., Simmons J. *Materials critical to the energy industry. An introduction (2nd edition)*. London: BP; 2014.

LA TRANSIZIONE ECOLOGICA:
ENERGIA E RISORSE

LUCA BRAGOLI*

Energia eolica e fotovoltaica

Abstract: ERG, as a pioneer, has undertaken and completed its ecological transition path and intends to continue in this direction, still focusing for its development on technologies without climate-altering emissions, such as wind, photovoltaic and electrochemical storage. In fact, the role of wind and photovoltaic energy in the current and prospective energy panorama is significant for fighting climate change and freeing economies from foreign fossil fuels: the two pillars of the sustainable development strategy of Italy and Europe in this century, and an objective which is achievable immediately through a decisive transition towards renewable energy.

The decarbonisation objectives of the energy sector in Italy and Europe are described, focusing on the main renewable technologies to which extraordinary diffusion and development targets are assigned as part of a progressive greater electrification, such as wind and photovoltaic sources.

However, such a “replacement” path requires a change of pace on various fronts, primarily institutions, to remove the obstacles that still stand in the way of concretely achieving the decarbonisation objectives adopted for medium and long term.

1. *Storia e futuro di ERG*

Con 85 anni di presenza nel settore energetico, ERG, guidata dalla visione dei propri azionisti di riferimento, la famiglia Garrone-Mondini, ha scelto di raccogliere la sfida della decarbonizzazione completando da tempo la propria transizione energetica da *oil* a *green*. Oggi ERG è un operatore rinnovabile, primo operatore eolico italiano, nella *top ten* dei produttori eolici europei e tra i leader nel fotovoltaico.

ERG ha intrapreso un percorso che ha portato alla trasformazione radicale del proprio modello di business in tempi non sospetti, quando

* Avvocato, Chief Regulatory & Public Affairs Officer, ERG SpA, Genova.

il settore delle rinnovabili era ancora in una fase iniziale di sviluppo; attuando, di fatto, in poco più di dieci anni, una “transizione ecologica” abbandonando il settore del petrolio e acquisendo un ruolo da protagonista nella generazione di energia elettrica prevalentemente da fonti rinnovabili.

Grazie alla *vision* del proprio management e al lavoro delle proprie persone, ERG è riuscita ad interpretare e anticipare il cambiamento del panorama energetico globale per rispondere alle nuove esigenze di mercato prima di altre aziende.

Con l'ultimo piano industriale 2022-2026 l'azienda si è data l'obiettivo di continuare a sviluppare il proprio portafoglio rinnovabile: lo scopo è raggiungere al 2026 una potenza installata di 4,6 GW, con un incremento di 2,2 GW e investimenti per circa 3,5 miliardi di euro.

Il Piano Industriale 2022-2026 di ERG, inoltre, integra al suo interno il Piano ESG, allineato agli SDGs (Sustainable Development Goals) delle Nazioni Unite, che conferma la missione del Gruppo “keep growing in RES acting as #SDGsContributor”.

Nel Piano di ERG sono inclusi obiettivi specifici legati all'innovazione, includendo in tale accezione anche lo *storage* elettrochimico, che costituisce una tecnologia al momento non del tutto consolidata per le installazioni fisse in sinergia con le rinnovabili non programmabili, ma certamente destinata ad uno sviluppo rilevante nei prossimi anni.

Eolico offshore galleggiante, particolarmente idoneo per i mari italiani più ventosi per via della elevata loro profondità, e idrogeno sono prospettive di sviluppo che ERG ha analizzato e monitora con attenzione, con l'idea che saranno “cantierabili” verso la fine del decennio.

2. *I cambiamenti climatici e il rimedio necessario*

La transizione energetica e la lotta al *climate change* sono oggi pilastri fondamentali dello sviluppo sostenibile, unico modello economico che consenta di mantenere ed estendere il benessere finora conquistato alle future generazioni, senza compromettere definitivamente l'equilibrio della biosfera.

Come dimostrano i dati fisico-termodinamici e come la comunità scientifica sostiene da decenni, vi è una correlazione diretta tra l'in-

cremento della temperatura media terrestre e le emissioni di gas serra legati alle attività antropiche, in particolare dall'era industriale. Una evidenza scientifica che porta inoltre a sottolineare come vi sia una stretta correlazione tra il valore della temperatura media terrestre e frequenza e magnitudo degli eventi di alterazione climatica (eventi climatici estremi, siccità, scioglimento dei ghiacci perenni, innalzamento del livello dei mari).

È pertanto necessario ridurre, e a lungo termine invertire, il trend di crescita della temperatura atmosferica per contenere i disastri del cambiamento climatico; l'obiettivo sancito dalle Conference of Parties delle Nazioni Unite, sin dall'Accordo di Parigi del 2015, è non a caso il contenimento di tale incremento entro 1,5 °C entro fine secolo.

Il raggiungimento di tale obiettivo necessita una reazione immediata per un cambiamento radicale del livello di emissioni di gas serra, partendo dai settori economici che più incidono sulle emissioni.

Il primo dei settori su cui agire radicalmente è appunto quello della produzione di energia, attraverso una transizione rapida e massiva verso l'utilizzo di energie rinnovabili al posto delle fonti di origine fossile, la cui gestione e combustione è la principale causa di emissione di gas serra (metano e anidride carbonica *in primis*).

3. *Lo stato e le prospettive globali per le energie rinnovabili*

Secondo l'analisi della International Energy Agency (IEA), le nuove installazioni di impianti di generazione elettrica da fonti rinnovabili nel mondo hanno registrato nel 2021 il livello record di 290 GW, in ulteriore crescita rispetto al già eccezionale 2020. Più della metà della potenza installata aggiuntiva è costituita da impianti fotovoltaici (PV) di varie taglie.

Nel breve termine, gran parte dell'incremento di capacità rinnovabile globale avrà luogo in Cina (43%), seguita da Europa, Stati Uniti e India.

L'Europa è prevista in accelerazione trainata dal pacchetto "Fit for 55",¹ grazie a strumenti di supporto e di mercato quali le aste governative, la diffusione dei contratti di approvvigionamento di lungo termine (PPA – Power Purchase Agreement) e le installazioni private e domestiche di pannelli solari.

Il settore delle energie rinnovabili costituirà una forte attrattiva per il sistema finanziario, che giocherà quindi un ruolo fondamentale per il progresso delle installazioni.

Nonostante il rincaro dei prezzi degli impianti, il PV costituirà il 60% della crescita complessiva delle rinnovabili elettriche a livello globale, con 1.100 GW di nuova capacità in esercizio nel periodo 2022-2026 (Cina, Europa e India si confermeranno i mercati maggiori).

L'evoluzione dell'eolico *onshore* dovrebbe rivelarsi meno impetuosa, rallentata da tematiche di accettazione locale degli impianti, connessione alla rete elettrica e da complesse procedure autorizzative. La crescita media nel periodo è comunque di circa 75 GW all'anno, il 25% in più del periodo 2015-2020.

L'incremento dei costi di trasporto e delle materie prime, registrato già nel 2021, ha causato secondo l'Agenzia un innalzamento dei prezzi degli aerogeneratori fino al 25% rispetto all'anno precedente.

4. *Focus sull'Europa*

Come già accennato, l'Unione Europea mantiene la leadership delle ambizioni climatiche già acquisita da almeno un decennio; è anzi determinata a rafforzarla, avendo adottato un piano strategico, l'European Green Deal, che intende portare il nostro continente alla neutralità climatica netta entro metà secolo.

Tale obiettivo, insieme alla riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, è contenuto nella cosiddetta "Climate Law", un Regolamento del Consiglio UE e del Parlamento adottato a metà del 2021 che assegna a livello comunitario l'obiettivo dell'annullamento delle emissioni nette di gas serra per attività antropiche entro il 2050.

Per pianificare adeguatamente la traiettoria di avvicinamento a tale obiettivo finale è stato adottato il pacchetto "Fit for 55", che costituisce l'insieme di oltre 14 tra direttive, regolamenti e linee guida da adottare per conseguire il target di riduzione delle emissioni del 55% al 2030.

Tale pacchetto è stato peraltro confermato dalla più recente strategia, denominata REPowerEU, nata in reazione all'invasione dell'Ucraina da parte della Russia e dalla conseguente crisi dei prezzi e delle linee di approvvigionamento di gas naturale. Attraverso REPowerEU

l'Unione Europea ha ulteriormente rafforzato la necessità di transizione verso le energie rinnovabili e l'efficienza energetica come leve principali e indispensabili per ridurre il grado di dipendenza energetica dell'Europa dai paesi esteri, notoriamente molto elevata.²

Tra i principali provvedimenti del pacchetto spicca la revisione della Direttiva sulle Energie Rinnovabili (cosiddetta RED III), attraverso cui l'Unione Europea ha portato al 42,5% la quota di energie rinnovabili sui consumi finali lordi di energia che dovrà essere raggiunta entro il 2030.

Trasponendo a livello nazionale tali obiettivi specifici per le rinnovabili, si tratterà di incrementare la capacità installata in campo solare ed eolico, rispetto ai valori del 2020, di oltre 60 GW nei circa otto anni da qui al 2030. In pratica, occorre un incremento complessivo medio annuo tra 8 e 9 GW, quasi il doppio di quanto richiesto dal precedente Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC).

5. *Rinnovabili, leva strategica anche economica*

La necessità di puntare sulle energie rinnovabili è resa oggi ancor più pressante e urgente dalla terribile crisi dei prezzi energetici, esacerbata dal conflitto in Ucraina, che ha messo in forte difficoltà consumatori domestici e aziende in Europa, e in particolare l'Italia, a causa della sua forte dipendenza dal gas naturale.

È questa una delle conseguenze di scelte politiche che negli ultimi anni hanno mantenuto e talvolta accresciuto un legame troppo stretto con le fonti energetiche fossili, per di più acquistate dall'estero, antepo- nendo obiettivi meramente economici di breve termine ad una più ampia e lungimirante strategia di decarbonizzazione e indipendenza energetica.

L'Europa sta infatti pagando l'aver rallentato la sostituzione del gas con le rinnovabili, che avrebbero garantito al continente prezzi dell'energia, in particolare quella elettrica, di tutt'altra dimensione (come ben si vede non appena eolico e solare "fanno il prezzo" sul mercato).

Anche e soprattutto nei momenti di picco dei prezzi del gas naturale e quindi dell'energia elettrica, grazie alle rinnovabili le nostre bollette sono risultate meno costose: i prezzi offerti dalle energie rinnovabili sul mercato all'ingrosso sono infatti molto inferiori al prezzo offerto dagli

impianti termoelettrici e contribuiscono quindi ad abbassare il prezzo finale dell'elettricità, nel modello di mercato europeo determinato con il sistema marginale (System Marginal Price).

In aggiunta a tale effetto, contratti di lungo termine di energie rinnovabili “per le differenze a due vie” aggiudicati attraverso aste governative o tramite PPA consentirebbero la stabilizzazione su valori ridotti del costo dell'energia per i cittadini e le imprese, aumentando nel contempo la sicurezza di approvvigionamento per la riduzione dell'esposizione alle instabilità geopolitiche dei paesi fornitori.

6. *Rinnovabili, principali ostacoli*

Nonostante le evidenze sul piano climatico ed economico sopra descritte, le rinnovabili non “decollano” e anzi, in paesi come l'Italia, stanno vivendo un periodo di particolare crisi, con ritmi di crescita del tutto lontani e inadeguati rispetto al passo richiesto dagli obiettivi europei e nazionali.

Diversi sono gli ostacoli che oggi di frappongono tra le esigenze di sviluppo delle rinnovabili e il loro reale dispiegamento in campo.

Uno dei principali è costituito dal nodo autorizzativo: è necessario snellire l'iter autorizzativo, accelerare il *permitting*, dare seguito alle molte disposizioni di semplificazione approvate per legge negli ultimi due anni.

Un problema esteso riguarda l'ordinamento vigente in Italia in materia di competenza sui temi dell'energia. In base al titolo V della nostra Costituzione, l'energia è una delle materie sottoposte al potere concorrente tra Stato e Regioni, il che complica ulteriormente, in fase applicativa, il già complesso e stratificato contesto normativo e procedurale. Inoltre, diversi provvedimenti attuativi specifici e puntuali, previsti dalle leggi vigenti e importantissimi per la riuscita della decarbonizzazione, tardano ad essere promulgati: fra tutti, sono da evidenziare il decreto per la programmazione e allocazione dei meccanismi di sostegno per le fonti rinnovabili previsto dalla legge di recepimento dell'attuale “Direttiva Rinnovabili” e il decreto per l'identificazione dei criteri necessari alla definizione delle “aree idonee” per lo sviluppo delle fonti rinnovabili.

Provvedimenti che secondo la legge avrebbero dovuto essere emanati entro giugno 2022, e scontano invece un notevole ritardo.³

Un esempio – purtroppo negativo – del conflitto tra Stato e Regioni è rappresentato dalla postura della Regione Sardegna rispetto ad un progetto di *repowering* di ERG già autorizzato dal governo nazionale. La Regione ha infatti presentato ricorso al TAR contro il decreto di autorizzazione da parte della Presidenza del Consiglio dei Ministri del progetto di *repowering* del parco eolico ERG di Nulvi Ploaghe in provincia di Sassari, mandando in stallo l'esecuzione di un'iniziativa peraltro fortemente sostenuta dai comuni dei territori interessati.

Tornando alle considerazioni generali, mancano obiettivi vincolanti in capo alle Regioni anche per l'assenza di una disciplina per la declinazione regionale degli obiettivi nazionali (cd. *burden-effort sharing*). In tale contesto emerge la generale inadeguatezza dell'apparato amministrativo, in termini di dotazione organica, competenze e livello di digitalizzazione.

A complicare il quadro vi è poi, per quanto riguarda gli aspetti più squisitamente industriali, la cosiddetta “greenflation”, ossia la crescita repentina del costo delle tecnologie legato all'incremento dei prezzi delle materie prime, dei noli e del tasso di cambio euro/dollaro. Dopo anni di calo, vi è stata un'inversione di tendenza e gli operatori delle rinnovabili stanno assistendo a un'impennata del costo complessivo per produrre energia da fonti pulite, come wind & solar (LCOE - Levelized Cost of Energy).

Nonostante tali inefficienze, le energie rinnovabili restano comunque le fonti elettriche più convenienti e lo rimarranno in modo strutturale nei prossimi anni.

7. *Rinnovabili, possibili soluzioni*

Ripercorrendo le considerazioni descritte in precedenza si intuisce chiaramente quali siano le principali azioni per rimuovere le rinnovabili dall'attuale fase di stallo e sbloccare finalmente tutto il loro potenziale economico, climatico e di securizzazione energetica.

Sul fronte del *permitting*:

- deve essere definita la disciplina del *burden-effort sharing* per le Regioni;

- le Regioni devono adeguare i propri piani energetici, identificando al più presto le “aree idonee”. A livello centrale, occorre emanare le linee guida previste per legge per l’individuazione di tali aree. Ad entrambi i livelli, adeguare le strutture amministrative, le competenze e le dotazioni digitali.

Sul fronte delle *policy* di sviluppo delle rinnovabili, occorre dare immediatamente seguito alla legge nazionale,⁴ pubblicando i decreti attuativi per il nuovo calendario di aste con visibilità quinquennale. Tali aste dovrebbero essere tecnologicamente specifiche, come già avviene in Francia e Germania.

È inoltre necessario:

- adeguare compiutamente le tariffe a base d’asta dei procedimenti competitivi per le rinnovabili ai nuovi costi delle tecnologie, indicizzandone poi il valore all’andamento dei prezzi di materiali e impianti;
- rimuovere le decurtazioni automatiche delle tariffe che oggi colpiscono il *repowering*.

Sul fronte delle reti elettriche e della connessione degli impianti, serve:

- favorire l’ampliamento, l’ammodernamento e la digitalizzazione delle reti di trasmissione e distribuzione, provvedendo ad ottimizzare lo sfruttamento della rete esistente;
- gestire in modo più efficace la priorità nelle richieste di connessione, sulla base di criteri di solidità e credibilità industriale del progetto a monte e del relativo proponente;
- sincronizzare degli interventi di *upgrade* della rete con i piani di investimento degli operatori e-FER di taglio industriale.

Note

¹ Pacchetto di riforme e nuova normativa per traguardare l'obiettivo definito dalla "Climate Law" dell'Unione Europea di una riduzione delle emissioni di gas serra al 2030 del 55% rispetto al 1990 (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541).

² Il *dependency rate* dell'UE per l'energia (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Energy_dependency_rate#:~:text=It%20is%20defined%20as%20net,energy%20products%20have%20been%20stocked) è stato pari al 56% nel 2021, con una leggera flessione nel 2020. In Italia, tale indice è stato pari all'86,5% nel 2000, per scendere al 73,5% nel 2020 anche grazie all'evoluzione delle rinnovabili.

³ Al 28 ottobre 2022.

⁴ DLgs 199/2021 di recepimento della RED II.

ANDREA BOMBARDI*

Idrogeno verde: produzione, storage e utilizzo

Abstract: Hydrogen is a clean energy vector, and its massive adoption will substantially contribute to the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere due to anthropological activities.

Hydrogen is a solution for sustainability complementary with electrification, use of alternative fuels with a low carbon content, CO₂ capture, storage or reuse, and more generally optimization and efficiency of energy-intensive processes. The conversion of energy resources, whether renewable or not, into pure hydrogen can take place through different technologies and methodologies: in this specific context we focus on so-called green hydrogen, produced exclusively from renewable sources through hydrolysis; aspects related to the value chain of this element will be addressed: from production to transport, from storage to distribution systems towards end users.

This analysis provides an overview of the characteristic of the green hydrogen production process, including aspects related to the availability and costs of water and electricity, but also of how technological and climatic factors play a fundamental role for energy security. Furthermore, the diffusion of hydrogen in the end uses of energy is also particularly conditioned by regulatory, technical and market-related aspects: on the latter we need to make substantial progress at European and international levels to achieve economic competitiveness. Nonetheless, regarding transport, storage and distribution of hydrogen, it is essential to evaluate the compatibility of existing infrastructures and the necessary investments for their conversion enabling large scale adoption, especially in a global context where global hydrocarbon traffic could be gradually replaced by international hydrogen trade for which import/export terminals are the key elements, enabling the energy transition process of various industrialized countries. Finally, regarding energy end users, those sectors that could benefit the most from hydrogen adoption replacing fossil-based resources are analyzed. These include industries with high temperature processes, mobility and residential sectors. The planet is committed to the climate neutrality which is not only supported by a growing awareness of sustainability and an increasing concern about impacts arising

* Ingegnere, RINA SpA, Genova.

from anthropological activities, but also by a huge mobilization of collective financial resources directed towards the realization of far-sighted and highly effective projects in the fight against the rise in average environmental temperatures and the intensive exploitation of limited and concentrated natural resources.

1. *Il potenziale dell'idrogeno nel percorso di decarbonizzazione*

La decarbonizzazione è un passaggio essenziale della transizione energetica ed è volta alla limitazione dei quantitativi di gas climalteranti in atmosfera allo scopo di contenere l'innalzamento delle temperature medie globali con il fine ultimo di minimizzare i cambiamenti climatici: da qui l'obiettivo fissato, per esempio, dal Consiglio Europeo di ridurre, entro il 2030, le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990 e di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Tali obiettivi, con la legge europea sul clima, risultano altresì vincolanti per l'Unione Europea e i suoi Stati membri.

Le riforme e gli aggiornamenti legislativi a livello europeo dovranno sostenere questi nuovi obiettivi, garantendo una transizione giusta e socialmente equa, mantenendo e rafforzando l'innovazione e la competitività dell'industria dell'Unione Europea, assicurando altresì la parità di condizioni rispetto agli operatori economici dei Paesi terzi e sostenendo la posizione di capofila dell'Unione Europea nella lotta globale contro i cambiamenti climatici.

La transizione energetica deve essere attuata nell'ambito dell'intera catena del valore dell'energia, dalla produzione al trasporto, agli utilizzi finali. Cionondimeno, questa rivoluzione verde deve potere essere messa in atto facendo ricorso a tutte le opzioni tecnicamente percorribili: dallo sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili a scapito delle risorse di origine fossile, alla elettrificazione dei consumi, dall'adozione di carburanti alternativi alla cattura della anidride carbonica emessa da quei comparti non elettrificabili, dalla produzione di gas sintetici al riutilizzo della CO₂ catturata, dall'ottimizzazione dei processi energivori al loro efficientamento. In questo scenario, l'idrogeno, uno degli elementi più abbondanti sulla Terra, rappresenta un'ottima opportunità per veicolare gli apporti energetici verso gli utilizzatori finali in completa assenza della molecola di carbonio.

Oggi è opinione diffusa a livello globale il potenziale dell'idrogeno quale elemento attivatore di un processo di sostenibilità, anche in maniera complementare alle altre soluzioni precedentemente menzionate.

2. *I metodi per la produzione di idrogeno*

Come detto, l'idrogeno è estremamente abbondante sulla Terra, ma non in forma pura: come estrarre idrogeno dalle risorse naturali, come farlo in maniera sostenibile ed efficace sono domande alle quali il progresso tecnologico deve rispondere in maniera puntuale.

Oggi i metodi conosciuti per l'estrazione di questo elemento sono molteplici e ne è nata una differenziazione per colori che andremo ad illustrare brevemente nel seguito.

L'idrogeno cosiddetto nero (o marrone) è prodotto mediante il processo di gassificazione del carbone, con i sottoprodotti di CO₂ e monossido di carbonio rilasciati in atmosfera. Analogamente, sotto il profilo di rilascio di gas climalteranti, l'idrogeno grigio – che è attualmente il metodo più comune di produzione di idrogeno – è estratto dai combustibili di origine fossile, quali ad esempio il gas metano, utilizzando il metodo *Steam Methane Reforming* (SMR).

Oggi questa pratica è largamente adottata, specie nel settore della raffinazione degli idrocarburi: tali processi necessitano infatti di idrogeno, la cui disponibilità è assicurata solo da produzione propria presso il sito di raffinazione stesso. Se il processo di *Steam Methane Reforming* è associato ad una pratica di cattura della CO₂ altrimenti rilasciata in atmosfera, l'idrogeno prodotto è contraddistinto dal colore blu.

Nel caso in cui la materia prima dalla quale si vuole estrarre l'idrogeno sia gas metano proveniente da fonti rinnovabili e si adotti il processo pirolitico per la separazione dell'elemento in oggetto, si parla di idrogeno turchese.

Si identifica infine il colore bianco, riferendosi comunemente a quei quantitativi di idrogeno puro presente all'interno della crosta terrestre, prevedendo pratiche di estrazione simili a quelle adottate per il gas naturale.

Concludiamo la rassegna dei metodi per l'estrazione dell'idrogeno con quelle pratiche che prevedono l'impiego della tecnologia di elettro-

lisi della molecola di acqua (H_2O). Tale tecnologia dà origine all'idrogeno cosiddetto rosa, nel caso in cui l'elettricità impiegata per la scissione della molecola sia di derivazione nucleare, mentre sarà verde l'idrogeno estratto mediante l'impiego di elettricità proveniente dallo sfruttamento di risorse rinnovabili quali, ad esempio, sole e vento: in entrambi i casi abbiamo ossigeno quale sottoprodotto della reazione.

3. *La relazione tra rinnovabili e idrogeno*

L'aumento dello sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili è un andamento che si riscontra in tutti i Paesi a livello globale. Nel 2019¹ il contributo che l'energia rinnovabile ha apportato sul consumo finale di energia è stato pari al 18,2%, mentre nel 2020 la percentuale è salita al 20,4%, con l'impegno di raggiungere il 40% entro il 2030 come previsto dal pacchetto "Fit for 55".

Su scala globale, secondo IRENA,² la componente riconducibile alle fonti rinnovabili per quanto riguarda gli impianti di generazione di energia elettrica sarà pari al 90% nel 2050: di quest'ultima, circa i tre quarti saranno dipendenti da energia rinnovabile caratterizzata da un alto livello di intermittenza, quale ad esempio solare ed eolico.

In questo contesto risulta sempre più necessario l'adozione di un vettore che consenta di trasferire quantitativi energetici nello spazio e nel tempo diverso dall'elettricità. I prodotti chimici, tra i diversi vettori energetici, sono quelli che consentono l'immagazzinamento di quantitativi di energia più elevata, e tra questi l'idrogeno, in relazione alla sua estrazione per via elettrolitica da fonte rinnovabile, risulta complementare ad assolvere ai compiti di trasporto, stoccaggio e distribuzione di energia verso gli utilizzatori finali.

Nell'atto della conversione dell'energia rinnovabile in idrogeno devono essere tenuti in considerazione diversi fattori fisici e tecnologici. Tra questi evidenziamo il consumo di acqua e le prestazioni della tecnologia adottata per l'elettrolizzatore.

Il rapporto stechiometrico di contenuto di idrogeno nell'acqua ci riporta un consumo di 9 kg di H_2O per l'estrazione di 1 kg di H_2 . Questo consumo idrico è il limite minimo difficilmente riscontrabile in applicazioni reali che vedono la necessità di trattare l'acqua disponibile

attraverso processi di demineralizzazione e deionizzazione; cionondimeno i consumi idrici si riscontrano anche per alcuni circuiti di raffreddamento di cui l'impianto di estrazione di H_2 necessita nel suo complesso.

In relazione alle tecnologie, quelle oggi più avanzate sono le seguenti: a cella elettrolitica alcalina (AEC), a membrana a scambio protonico (PEM), a membrane a scambio anionico (AEM) e a celle a ossidi solidi.

La tecnologia cella elettrolitica alcalina (AEC) è attualmente la più diffusa: opera a bassa temperatura, ha un costo contenuto di investimento con una catena di fornitura che non fa un largo impiego di metalli rari.

La tecnologia a membrana a scambio protonico (PEM) è anch'essa caratterizzata da una bassa temperatura di impiego, presenta costi maggiori e fa largo uso di metalli rari, ma garantisce, oltre ad una compattezza degli ingombri, anche una elevata purezza dell'idrogeno.

La tecnologia a membrane a scambio anionico risulta essere ancora ad un livello di maturità basso, ma promettente in termini di flessibilità di impiego e di sfruttamento di risorse rare.

Infine, la tecnologia a ossidi solidi associa ad un'alta efficienza una elevata resilienza alle impurezze in entrata con un'alta purezza dell'idrogeno in uscita, sebbene operi ad alta temperatura (700-800 °C) e presenti una maturità tecnologica limitata.

Il progresso tecnologico è dunque essenziale per avanzare sulle performance degli elettrolizzatori, ma lo è ancora di più quando si tratta di affrontare la sfida relativa alla disponibilità di acqua da destinare all'estrazione di H_2 , soprattutto in quelle regioni del pianeta particolarmente dotate di risorse energetiche rinnovabili ma i cui quantitativi di acqua sono estremamente limitati. In molti di questi casi, la scienza consentirà una vera e propria rivoluzione quando sarà consentita l'estrazione di idrogeno direttamente da acqua di mare, non solo salata ma anche caratterizzata dalla presenza di microrganismi. In questo senso riportiamo i recenti sviluppi sugli elettrolizzatori a tecnologia senza membrana che si basano sulla separazione indotta del flusso di fluido forzato.

Questi dispositivi hanno architetture simili alle celle a combustibile a flusso laminare e alle batterie a flusso che le hanno precedute, sebbene la dinamica dei fluidi alla base del loro funzionamento possa essere diversa a causa della presenza di bolle di gas. Alcuni sviluppi prototipali,

con un livello di maturità ancora non adatto alla commercializzazione, sono caratterizzati da importanti sottoprodotti come l'idrossido di magnesio e la silice, oltre che naturalmente l'ossigeno e l'idrogeno. Non trascurabile, infine, la possibilità di catturare la CO₂ dall'acqua di mare, di particolare interesse in un'epoca di acidificazione dei mari, o ancora modificare il pH per applicazioni di trattamento dell'acqua.

Se il progresso tecnologico può supportare in merito all'impiego di acqua non pura, le limitazioni geografiche dei diversi Paesi giocano comunque un ruolo importante nelle scelte strategiche per l'adozione di un vettore energetico piuttosto che un altro. L'Arabia Saudita, per esempio, in uno scenario di produzione di idrogeno con un costo di 2 USD/Kg H₂ verde, presenterebbe terre idonee per circa l'85% della sua estensione territoriale: tale percentuale cala drasticamente fino al solo 6% se teniamo in considerazione la disponibilità d'acqua che il territorio saudita può destinare alla estrazione di H₂. Questa analisi, condotta da IRENA,³ è stata fatta in considerazione dell'indicatore dello stress idrico, definito come il rapporto fra i prelievi idrici totali e gli apporti idrici superficiali/sotterranei. Nell'analisi sono state pertanto escluse tutte le aree in cui i prelievi sono superiori all'offerta in termini di quantitativi di acqua. La predisposizione di un Paese allo sfruttamento di risorse energetiche rinnovabili ed eventualmente all'impiego dell'energia elettrica prodotta per l'estrazione dell'idrogeno è un fattore estremamente importante anche per identificarne il potenziale di indipendenza energetica, ancor di più per un paese, come l'Italia, scarsamente dotato di risorse energetiche di origine fossile. Lo scenario della linea guida per la strategia nazionale per l'idrogeno prevede una domanda italiana di questo vettore energetico al 2030 pari a circa 0,7 milioni di tonnellate di H₂. Tale domanda potrà essere soddisfatta dall'installazione di circa 28 GW nel caso dello sfruttamento dell'energia solare,⁴ che corrisponderebbero a oltre 410 km² – oltre l'estensione del lago di Garda – da destinare alla produzione di idrogeno. Più in generale dunque pensare di decarbonizzare i comparti energivori facendo ricorso solo alla disponibilità di idrogeno autoprodotta entro i confini nazionali è estremamente difficile e assistiamo ad un susseguirsi di annunci bilaterali tra nazioni anche molto distanti tra loro per la commercializzazione di idrogeno su scala globale. Solo a titolo d'esempio, IRENA sostiene che la commercializzazione su scala globale al 2050 di

ammoniaca, derivata dall'idrogeno estratto, crescerà di 25 volte rispetto al volume di produzione attuale.

4. *Trasportare, stoccare e distribuire idrogeno*

La scelta strategica dell'adozione dell'idrogeno come vettore energetico non può prescindere dalle analisi relative a come trasportare, stoccare e infine distribuire questo vettore verso gli utilizzatori finali di energia.

L'idrogeno può essere impiegato nella sua forma gassosa compressa oppure in forma liquida. La versione compressa ad alta pressione, tipicamente fino a 700 bar, è impiegata anche in stoccaggi a bordo veicolo per applicazione nell'ambito della mobilità, mentre la versione in forma liquida prevede l'adozione di accorgimenti estremamente efficaci per lo stoccaggio criogenico. Oltre alla condizione gassosa e liquida, sono in fase di studio altri tipi di stoccaggio che sfruttano le caratteristiche di adsorbimento di alcuni materiali o ancora il processo di stoccaggio chimico tra cui gli idruri metallici e alcuni liquidi organici. Questi ultimi si caratterizzano per una fase di idrogenazione esotermica a pressione tra 25 e 50 bar nell'atto dello stoccaggio dell'idrogeno nel liquido, e da una fase di deidrogenazione endotermica a pressioni più basse – tipicamente tra 1 e 5 bar – nella fase di rilascio del vettore energetico.

Una quarta opzione è rappresentata dalla conversione dell'idrogeno in ammoniaca: in questo caso si ottiene un vantaggio operativo rappresentato da una elevata capacità di stoccaggio e da una più alta densità energetica volumetrica rispetto all'idrogeno, da una infrastruttura di riferimento matura dal punto di vista tecnologico, ma è necessario un progresso tecnologico in tema di riconversione o nuova estrazione dell'idrogeno dall'ammoniaca. Le eventuali fasi di purificazione sono inoltre caratterizzate da un elevato fabbisogno energetico, e non bisogna dimenticare l'elevata tossicità dell'ammoniaca.

In definitiva, l'ammoniaca verde sintetizzata da fonti energetiche rinnovabili è un argomento emergente che può aprire mercati significativi e fornire un percorso per decarbonizzare una varietà di applicazioni che oggi dipendono dai combustibili fossili. Con l'industria emergente dell'ammoniaca verde si desiderano tecnologie corrispondenti per recuperare l'energia immagazzinata. Vanno in questa direzione gli studi

sulle celle a combustibile ad ammoniaca diretta. Questi dispositivi sono studiati per ottenere direttamente energia elettrica dall'ammoniaca, producendo i sottoprodotti di azoto e acqua (H_2O): il livello di maturità tecnologica di queste celle ad ammoniaca è ancora ridotto e non adatto ad un impiego industriale, ma promettono una maggiore efficienza complessiva del sistema – dalle risorse rinnovabili alla conversione diretta in energia agli utilizzatori finali, pur considerando l'eventuale trasporto dell'ammoniaca – e una minore degradazione degli elettrodi rispetto ai combustibili idrocarburici, oltre alla possibilità di prevedere un processo reversibile nell'impiego delle celle a combustibile ad ammoniaca. Tra i punti di debolezza evidenziamo però la possibile formazione di NO_x dovuta ad una non perfetta conversione chimica. Attualmente esistono diversi tipi di celle a combustibile ad ammoniaca, tra cui: a ossido solido (SOFC-O e SOFC-H), a tecnologia alcalina (AAFC), a membrana alcalina FC (AMFC) e infine le celle a combustibile microbiche.

In definitiva il problema del trasporto, dello stoccaggio e della distribuzione dei vettori energetici in generale, ma dell'idrogeno in particolare, non può prescindere da una analisi complessiva dell'intera catena del valore dell'energia, considerando pertanto dove e in quale modo l'idrogeno viene prodotto e per quali utilizzi finali se ne prevede l'impiego. Le opzioni molto diverse tra loro, idrogeno puro in gas o liquido, ammoniaca, materiali adsorbenti e a stoccaggio chimico, presentano vantaggi e svantaggi in termini di efficienza, costo, fattibilità tecnica e reimpiego di infrastrutture esistenti.

I parametri principali che definiscono il costo del trasporto, ad esempio, sono la dimensione dell'impianto di produzione e la distanza da coprire nel trasferimento del vettore. La dimensione definisce infatti le economie di scala, e maggiore è la dimensione dell'impianto di produzione, tipicamente maggiori sono le ottimizzazioni possibili. Dovendo identificare la soluzione di minimo costo per il trasporto di idrogeno, per dimensioni di progetto fino a $0,4 \text{ MtH}_2/\text{anno}$ di produzione, il LOHC può rappresentare un'opzione vantaggiosa; oltre tali valori l'idrogeno gassoso trasportato via gasdotto o trasformato in ammoniaca per essere trasferito via nave sono le scelte oggi più economiche.⁵

A tal proposito, se come detto, la maturità tecnologica per il trasferimento dell'ammoniaca è adatta allo sviluppo di produzioni e commer-

cializzazioni su scala globale, il trasferimento di idrogeno gassoso nelle infrastrutture esistenti originariamente progettate per il gas naturale merita un approfondimento. La riqualificazione dei gasdotti, infatti, è ancora una sfida che potrebbe implicare modifiche sostanziali a seconda dei materiali e delle caratteristiche della infrastruttura, con la necessità di indagini dedicate in ambito di compatibilità dei materiali, metallici ed eventualmente non metallici, che costituiscono la rete di gasdotti e gli impianti ivi inclusi, tra cui impianti di spinta, di stoccaggio, di regolazione, di trattamento e impianti metrologici. Attualmente, in via transitoria, risulta di interesse anche la valutazione di accettabilità di una determinata percentuale di idrogeno miscelato nel gas naturale oggi presente nei gasdotti. È di recente pubblicazione l'aggiornamento del decreto del Ministero dello sviluppo economico del 18 maggio 2018 "Regola tecnica sulle caratteristiche chimico fisiche e sulla presenza di altri componenti nel gas combustibile" per mezzo del Decreto Ministeriale del 3 giugno 2022, che introduce la possibilità di iniezione fino al 2% in volume di idrogeno nelle reti gas italiane. A tal proposito, vi è consenso sul fatto che l'adeguamento per miscele a percentuale limitata può richiedere, in alcuni, anche solo modifiche modeste alla rete esistente.

5. *L'idrogeno negli usi finali di energia e lo scenario globale di riferimento*

La catena del valore dell'energia trova il suo completamento nell'impiego dei vettori energetici presso gli utilizzatori finali. Tipicamente i vettori energetici vengono impiegati come materia prima nell'industria, per esempio quella petrolchimica, o come fonte di energia termica, elettrica o ancora meccanica.

Analizzando l'impiego di idrogeno nel settore petrolchimico, abbiamo già fatto menzione del suo impiego nel settore della raffinazione degli idrocarburi, ma possiamo menzionare anche quello dei fertilizzanti o dell'industria dell'ammoniaca.

L'idrogeno può anche essere impiegato per ottenere apporti termici tramite combustione, quest'ultima, ricordiamo, esente da emissione di quantitativi di anidride carbonica. Gli apporti termici in questione trovano applicazione in diversi processi industriali ad alta temperatura non elettrificabili e dunque senza una opzione di decarbonizzazione alternativa

rispetto all'impiego di combustibili senza contenuto di carbonio. L'industria dell'acciaio, del vetro, della ceramica sono tutti comparti difficilmente decarbonizzabili e l'idrogeno rappresenta una soluzione percorribile, a fronte di una conversione del processo ad alta temperatura che sia idoneo all'accettazione di percentuali di idrogeno crescenti o alla completa sostituzione dei combustibili di origine fossile oggi impiegati. Analoghe considerazioni possono essere fatte per quanto concerne l'uso residenziale.

Mediante l'impiego di celle a combustibile, inoltre, l'idrogeno può essere impiegato per l'ottenimento di energia elettrica. Tali applicazioni trovano spazio nell'ambito dello stoccaggio dell'energia, ma anche del dispacciamento dell'energia stessa oltre che in affiancamento a siti di produzione di energia elettrica da rinnovabile al fine di assolvere alla funzione compensativa dovuta all'intermittenza della disponibilità delle risorse naturali.

Infine, un breve cenno in merito all'energia meccanica che può essere convertita dal vettore idrogeno: sia per mezzo di una combustione sia per mezzo dell'impiego di celle a combustibili per la generazione di energia elettrica successivamente impiegata per alimentare motori elettrici, l'idrogeno, o i suoi derivati quali l'ammoniaca, può essere il vettore energetico di riferimento per alcune applicazioni della mobilità. Assistiamo oggi ad una progressiva elettrificazione del comparto della mobilità, ma anche questa soluzione presenta alcuni limiti tecnologici per i quali l'idrogeno può rappresentare una soluzione alternativa. I pesi legati ai sistemi di accumulo di energia elettrica a bordo veicolo e le conseguenti limitazioni in termini di autonomia di percorrenza sono risolti dall'impiego di idrogeno a fronte, a seconda delle applicazioni, di spazi adeguati all'accumulo dell'idrogeno gassoso. Nello specifico si pensa che il settore della mobilità pesante su gomma, o alcune applicazioni marittime possano essere particolarmente adatte all'impiego dell'idrogeno o di suoi derivati, sia per mezzo di sistemi di propulsione basati sulla tecnologia del motore a combustione interna che del motore elettrico.

6. *Elementi finali riguardanti il supporto agli investimenti*

L'adozione dell'idrogeno, soprattutto in queste prime fasi in cui la fattibilità tecnica spesso non è ancora affiancata da una sostenibilità

economica, deve essere supportata da una politica tecnica, regolatoria ed economica incentivante al fine di affrontare con tempi certi la transizione energetica nel rispetto dei più alti standard di sicurezza.

A tale proposito, vogliamo fare qui menzione di alcune iniziative a livello europeo e nazionale che sono volte alla creazione di un ambiente favorevole alla diffusione dell'idrogeno quale nuovo vettore energetico pulito per le diverse applicazioni. In tema infrastrutturale, menzioniamo la *European Hydrogen Backbone*, iniziativa promossa da un gruppo di trentuno operatori di infrastrutture energetiche, uniti attraverso una visione condivisa dell'Europa climaticamente neutra con la missione di accelerare il percorso di decarbonizzazione definendo il ruolo fondamentale dell'infrastruttura per il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno, basata su gasdotti esistenti e nuovi, consentendo lo sviluppo di un mercato competitivo dell'idrogeno promuovendo la concorrenza, la sicurezza dell'approvvigionamento, la sicurezza della domanda e la collaborazione transfrontaliera tra i Paesi europei e i loro vicini.

La *European Hydrogen Backbone* prevede lo sviluppo di cinque corridoi per l'idrogeno, tra cui il corridoio del Mare del Nord e il corridoio nordico e del Baltico, funzionali entrambi sia agli sviluppi nell'eolico *offshore* e *onshore* sia ai raggruppamenti industriali che accelereranno sull'adozione di sistemi a idrogeno; il corridoio sud-ovest, per una rete sinergica tra Spagna e Portogallo in materia di estrazione di H₂ e Francia in materia di stoccaggi; il corridoio Nord Africa - Italia per l'approvvigionamento di grandi quantità di idrogeno verde a costi competitivi dalla parte settentrionale del continente africano verso le regioni meridionali italiane e ancora il corridoio dell'Europa sud-orientale, volto al collegamento di regioni ad alto potenziale nell'Europa orientale, oggi particolarmente esposte ai temi di sicurezza energetica anche in considerazione dei recenti sviluppi in materia di conflitto Russia-Ucraina.

Non solo infrastrutture, ma anche investimenti volti a rafforzare tutta la catena del valore dell'idrogeno in Europa: oltre 10,5 sono i miliardi di euro messi a disposizione dall'Unione Europea per finanziare progetti di interesse comunitario negli ambiti della tecnologia per la generazione di idrogeno, delle tecnologie di riferimento per le celle a combustibile, per gli aspetti connessi alle infrastrutture e agli usi finali, in particolare nei processi industriali. Complessivamente sono stati finanziati più di 70 progetti, presentati da più di 60 società, auspicando, da parte di

queste ultime, il coinvolgimento degli operatori economici di piccole e medie dimensioni che fanno parte della loro filiera di riferimento.

Non meno rilevanti, inoltre, sono le componenti volte all'accelerazione sui temi di sostenibilità e transizione energetica identificate a livello europeo per il Next Generation EU che trovano applicazione nei piani nazionali, di cui all'italiano Piano di Ripresa e Resilienza con obiettivi in termini di riforme e investimenti da completarsi entro il 2026. Tra queste menzioniamo la Missione 2: Rivoluzione verde e transizione ecologica, che prevede investimenti nell'ambito della produzione di idrogeno in aree industriali dismesse, l'utilizzo dell'idrogeno nei settori difficili da decarbonizzare, la sperimentazione dell'impiego di idrogeno per il trasporto stradale e ferroviario, e ancora semplificazioni in ambito amministrativo per la riduzione degli ostacoli normativi alla diffusione dell'idrogeno.

Per concludere, desideriamo fare qui menzione di due iniziative comunitarie di recente annuncio, che supportano la diffusione dell'idrogeno verde e attestano l'impegno degli Stati membri nel proseguire il percorso di decarbonizzazione anche attraverso l'impiego di questo vettore energetico.

La prima iniziativa riguarda la redazione del piano REPowerEU, volto alla rapida riduzione della dipendenza dai combustibili fossili russi identificando nell'idrogeno l'elemento di sostituzione nel lungo periodo, individuando investimenti mirati per la sicurezza delle forniture energetiche e per gli approvvigionamenti di idrogeno verde, sia esso prodotto entro i confini comunitari o importato: l'obiettivo previsto è una capacità produttiva pari a 10 milioni di tonnellate l'anno entro il 2030, e un valore analogo in termini di importazione. Il piano è volto, cionondimeno, all'identificazione di un target di utilizzo dell'idrogeno nell'industria e nei trasporti – per i quali verranno pubblicati due atti delegati – e allo sviluppo di standard e regolamenti dedicati.

La seconda iniziativa riguarda la creazione di una banca europea dell'idrogeno, un ecosistema volto dunque alla creazione di un mercato per l'idrogeno, al fine di colmare il divario negli investimenti e collegare la domanda e l'offerta futura. La banca dell'idrogeno investirà 3 miliardi di euro per capitalizzare il rapido sviluppo dell'economia dell'idrogeno, con l'obiettivo di affrancare i Paesi comunitari dalla dipendenza dai combustibili fossili di origine extra EU.

Note

¹ GSE, *Fonti rinnovabili in Italia e in Europa* (https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/GSE%20-%20Fonti%20rinnovabili%20in%20Italia%20e%20in%20Europa%20-%202020.pdf).

² IRENA, *World Energy Outlook 2022* (<https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>).

³ *Ibid.*

⁴ Rapporto GdL Idrogeno Assorisorse (https://www.assorisorse.org/wp-content/uploads/2022/11/1_IDROGENO_ASSORISORSEweb.pdf).

⁵ IRENA, *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal 2022* (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf).

L'ACCADEMIA INCONTRA LE IMPRESE

MARCO RIPANI*

Fisica ed energia nucleare

Abstract: The main concepts in the field of nuclear energy are discussed, illustrating the main aspects and technical challenges of radioactivity, fission and fusion processes, and the practical use of nuclear energy. The worldwide situation in the use of this energy source is briefly illustrated, as well as the topics of safety, environmental impact and sustainability.

1. *Introduzione*

L'atomo è il costituente microscopico della materia ordinaria, dagli esseri viventi alle galassie. Seppure il nome, derivato dal greco antico *átomos*, indichi un'entità indivisibile, oggi sappiamo che gli atomi sono strutture complesse, formate da un nucleo atomico, di carica elettrica positiva e con dimensioni di circa 0,000000000001 mm – un millesimo di miliardesimo di mm, circondato da una “nube di elettroni”, di carica elettrica negativa. Sono appunto gli elettroni che determinano le dimensioni dell'atomo, che è all'incirca 100.000 volte più grande del suo nucleo. Il nucleo è a sua volta composto da particelle chiamate protoni (carica elettrica positiva) e neutroni (senza carica elettrica). L'atomo più semplice è quello dell'elemento Idrogeno, formato da un solo protone e nessun neutrone. Come detto, gli elettroni sono dotati di carica elettrica negativa e sono in numero uguale ai protoni, in modo di bilanciare le cariche elettriche e rendere l'atomo elettricamente neutro. Il numero di protoni (ed elettroni) determina l'elemento chimico.

* Research Director, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Genova.

Poiché cariche elettriche dello stesso segno si respingono, il ruolo dei neutroni è quello di fare da “colla” che tiene insieme il nucleo, tramite quella che si chiama “forza nucleare forte”. Quindi, più il nucleo è grande, più ha bisogno di neutroni. Infatti, mentre per esempio il nucleo della forma di Ossigeno più abbondante in natura presenta otto protoni e otto neutroni, il nucleo della forma di Piombo più abbondante in natura presenta 82 protoni e 126 neutroni e nel linguaggio nucleare lo si indica come Piombo 208 (dove 208 è il numero totale di protoni e neutroni). Ma esistono anche Ossigeno con 8 protoni e 9 o 10 neutroni e Piombo con 124 o 125 neutroni. Questi atomi presentano caratteristiche chimiche pressoché identiche (come si diceva, è il numero di protoni a determinare la chimica), ma differiscono dal punto di vista nucleare e vengono chiamati *isotopi* (ovvero occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi).

2. *La radioattività*

Certi nuclei atomici sono “instabili”, cioè tendono a rompersi, liberando energia in modo da far passare il sistema a uno stato di energia minima. Un po’ come accade a un bicchiere, posto sul bordo di un tavolo, che alla minima sollecitazione può cadere e infrangersi. Per esempio, il nucleo dell’Uranio 238 (92 protoni, 146 neutroni) ha una certa tendenza a disintegrarsi tramite un processo chiamato *decadimento α* , in cui questo nucleo si trasforma nel nucleo di un altro elemento chiamato Torio 234 (90 protoni, 144 neutroni) e la trasformazione avviene tramite emissione di un nucleo di Elio (detto anche particella α e formato da due protoni e due neutroni). In questo processo di trasformazione viene anche liberata dell’energia, che si manifesta come energia del moto dei nuclei di Elio e Torio. Questo processo avviene spontaneamente, ovvero senza interventi esterni, ma i tempi con cui si verifica sono dettati dalla dinamica delle forze elettromagnetiche (la repulsione tra i protoni) e nucleari (l’attrazione tra protoni e neutroni).

3. *Le specie nucleari*

Vediamo quindi che esistono molte *specie nucleari*, che vengono catalogate con due numeri: Z , ovvero il numero di protoni (o elettroni),

che, come detto sopra, determina l'elemento e quindi la chimica, e A , ovvero il numero totale di nucleoni (protoni + neutroni), che specifica l'isotopo a parità di Z . Ciascuna specie nucleare è univocamente determinata dai suoi A e Z . Vi sono circa 1700 combinazioni ovvero specie (A, Z) note, di cui circa 300 stabili, in quanto l'insieme nucleare si trova in uno stato di minima energia e quindi in uno stato di equilibrio tale da impedire i decadimenti radioattivi, mentre le rimanenti specie sono instabili, cioè radioattive. Abbiamo visto però che i tempi con cui può avvenire il decadimento radioattivo, ovvero la durata di vita di questi nuclei, è determinata dall'azione delle forze in gioco. Ne risulta che alcune specie decadono in frazioni di secondo, altre in milioni o anche miliardi di anni. Il parametro tipico che si utilizza è l'*emivita*, detta anche *tempo di dimezzamento*. Dato un certo numero di nuclei radioattivi di una specie, l'emivita è il tempo medio necessario a dimezzare il numero di nuclei. In altre parole, mediamente in un tempo pari a un'emivita, metà dei nuclei di quella specie andrà incontro al decadimento radioattivo, trasformandosi.

4. I tipi principali di radioattività

Abbiamo visto prima che un tipo di decadimento radioattivo è quello α , in cui il nucleo emette un nucleo di Elio, perdendo due protoni e due neutroni e trasformandosi quindi in un altro elemento. Abbiamo poi il decadimento cosiddetto β , in cui un nucleo con $N=A-Z$ neutroni si trasforma in un nucleo con $N-1$ neutroni e contestualmente il numero di protoni aumenta da Z a $Z+1$, con simultanea emissione di un elettrone dal nucleo, accompagnato da una particella chiamata *antineutrino*. *Neutrini* e *antineutrini* sono particelle di massa estremamente piccola, che interagiscono con la materia in modo molto debole, tanto che essi possono anche attraversare chilometri di roccia senza subire collisioni. Vi è anche il gemello del decadimento β , in cui un nucleo con $N=A-Z$ neutroni si trasforma in un nucleo con $N+1$ neutroni e contestualmente il numero di protoni diminuisce da Z a $Z-1$, con simultanea emissione di un *antielettrone* dal nucleo, accompagnato da un neutrino. L'antielettrone, o *positrone*, è esattamente identico a un elettrone, ma è dotato di carica elettrica positiva.

Neutrini e antineutrini, elettroni e positroni rappresentano due casi di esistenza di materia e antimateria.

Infine, abbiamo il decadimento cosiddetto gamma (γ), in cui si ha l'emissione da parte del nucleo di un *raggio gamma*, ovvero di un quanto di energia elettromagnetica, o *fotone*. Si tratta appunto di energia elettromagnetica, così come nel caso di onde radio, microonde, radiazione infrarossa, visibile, ultravioletta, o raggi X: l'unica differenza tra i raggi gamma e questi altri tipi di radiazione elettromagnetica è la lunghezza d'onda, ovvero l'energia della radiazione. I raggi gamma hanno grande energia e sono quindi molto penetranti. Molto spesso, radiazione α e β portano a formare nuclei in stati eccitati che decadono per radiazione gamma, per cui la radiazione gamma si trova sempre come risultato di precedenti decadimenti α o β .

5. *Le radiazioni intorno a noi*

Le radiazioni fanno parte della nostra vita sulla Terra. Infatti, vivendo sul nostro pianeta, siamo sottoposti continuamente a radiazione di diversa origine. Una gran parte dell'esposizione è dovuta al gas Radon, che viene prodotto in una catena di decadimenti che hanno origine dall'Uranio. Dal cielo attraversano il nostro corpo circa 120 raggi cosmici al secondo (soprattutto particelle penetranti chiamate *muoni*). I raggi cosmici producono anche neutroni strappati dai nuclei intorno a noi e quindi il nostro corpo è attraversato da circa 30 neutroni al secondo. Anche il nostro stesso corpo è radioattivo, in quanto contiene isotopi radioattivi naturali di sostanze molto comuni quali il potassio, il cui isotopo radioattivo Potassio 40 è contenuto anche nell'acqua di mare, con circa 6000 decadimenti al secondo per metro cubo d'acqua.

Le radiazioni α , β e γ , così come i neutroni, sono radiazioni *ionizzanti*, in quanto hanno sufficiente energia per strappare gli elettroni dagli atomi e dalle molecole e quindi spezzare i legami molecolari. In particolare, queste radiazioni possono spezzare la catena del DNA all'interno delle cellule. Le cellule così danneggiate possono riuscire a riparare il danno, continuando a funzionare e riprodursi normalmente, come possono invece morire oppure mutare la loro funzionalità e ritmo di riproduzione, dando origine a tumori. Per questo, la *radioprotezione*,

ovvero le tecniche per minimizzare l'esposizione alle radiazioni e prevenire il più possibile eventuali danni biologici, costituisce una parte molto importante delle pratiche lavorative nel settore nucleare.

6. *La fissione*

Abbiamo visto che vi sono nuclei radioattivi che tendono a trasformarsi da soli, anche spaccandosi in due frammenti (decadimento α) e a questo punto potremmo chiederci se vi siano altri casi in cui un nucleo si spacca da solo, se questo processo sia utile e in questo caso se sia possibile renderlo più probabile. Possiamo immaginare che per renderlo più probabile sia necessario applicare una certa forza o somministrare al nucleo in questione una certa quantità di energia. Effettivamente, in determinati casi questa energia può essere fornita dall'arrivo dall'esterno di un neutrone, che viene attratto dalle forze nucleari e *catturato* dal nucleo con conseguente rilascio di energia.

Un caso speciale è quello dell'isotopo Uranio 235. L'Uranio naturale, come si trova in miniera, è composto dallo 0.7% di Uranio 235 e dal 99.3% di Uranio 238. L'Uranio 235 tende a rompersi, tipicamente in due frammenti, anche assorbendo un neutrone quasi fermo, mentre l'Uranio 238 ha bisogno per questo di un neutrone molto veloce, quindi la reazione è più difficoltosa. Per questo l'Uranio 235 è detto *fissile*. Infatti, il processo in cui un nucleo come quello dell'Uranio cattura un neutrone rompendosi di conseguenza in due frammenti è detto *fissione nucleare*. Un punto molto importante è che nel processo di fissione, contestualmente alla disintegrazione del nucleo in due frammenti, vengono emessi due o tre neutroni, i quali possono a loro volta produrre altre fissioni. Perciò, partendo da una singola fissione, a causa degli ulteriori neutroni emessi, potremmo averne altre due, e da queste due altre quattro e così via. Il fatto che da una reazione ne possiamo avere spontaneamente altre viene chiamato *reazione a catena* ed è una caratteristica del processo di fissione nucleare. I frammenti nucleari prodotti dalla fissione possiedono molta energia, che può essere ceduta per collisione agli atomi circostanti e quindi in ultima analisi produrre calore, che può essere sfruttato per produrre energia elettrica come in una qualsiasi centrale termica. È da notare che i frammenti della fissione sono pratica-

mente sempre nuclei radioattivi, tipicamente con radioattività β e nella maggior parte dei casi con emivite da molto brevi (ore o giorni) a mediamente lunghe (qualche decina di anni). Nella maggior parte dei reattori nucleari a fissione, per ragioni fisiche, costruttive e di efficienza, l'Uranio viene *arricchito*, in modo da contenere dal 3 al 5% di Uranio 235 fissile.

Un altro processo che può avere luogo quando un neutrone si avvicina a un nucleo è quello cosiddetto della *cattura radiativa*. In questo processo l'energia liberata dalla cattura del neutrone porta il nucleo risultante in uno stato eccitato che decade rapidamente per radiazione gamma. Spesso l'isotopo risultante, che si trova ad avere un neutrone in più, è radioattivo e può decadere per emissione α o β , spesso seguite a loro volta da altre emissioni gamma.

Il processo di cattura radiativa è molto interessante in quanto ha diverse conseguenze. Innanzitutto, in un impianto nucleare a fissione, questo processo può produrre radioattività nei materiali strutturali. Per esempio, il Cobalto contenuto nell'acciaio può essere trasformato in Cobalto 60, radioattivo. Questo significa che quando si dovrà smantellare l'impianto a fine vita si dovrà tenere conto della radioattività dei materiali e applicare opportuni criteri di radioprotezione. Un'altra conseguenza è data dalla cattura radiativa sull'Uranio 238. Infatti, questo tipo di Uranio non è fissile, in quanto per andare incontro alla fissione ha bisogno di essere colpito da neutroni veloci. Ma l'Uranio 238 può subire la cattura radiativa altrettanto bene, dando origine a una catena di trasformazioni con due aspetti rilevanti. Il primo è che in questa catena di trasformazioni vengono prodotti vari isotopi del Plutonio, un elemento non esistente in natura e prodotto solo attraverso questi processi artificiali. Il Plutonio presenta diversi isotopi fissili e quindi può esso stesso essere utilizzato come combustibile, se riciclato opportunamente. Perciò il processo di fissione brucia combustibile ma ne produce anche, un fatto peculiare di questo processo. Il secondo aspetto rilevante è che tutti gli elementi prodotti in questa catena di trasformazioni a partire dall'Uranio 238, cioè il Plutonio ma anche altri elementi artificiali quali Americio e Curio, sono radioattivi, presentando quasi sempre radioattività α e inoltre presentano emivite tipicamente molto lunghe, da qualche centinaio a decine o centinaia di migliaia di anni.

In sintesi, il funzionamento di un reattore nucleare a fissione produce tre tipi di sostanze radioattive: i frammenti stessi della fissione, i

materiali strutturali attivati per cattura dei neutroni, e i nuclei artificiali prodotti dalla cattura dei neutroni da parte dell'Uranio 238 presente nel combustibile. D'altra parte, fra questi elementi artificiali troviamo il Plutonio, che può essere esso stesso utilizzato come combustibile. È chiaro quindi che, a causa della grande quantità di sostanze radioattive prodotte, il funzionamento di un impianto nucleare a fissione richiede un'attenzione particolare agli aspetti di radioprotezione.

7. *Energie a confronto e quadro mondiale*

Una caratteristica saliente della fissione è il grande contenuto energetico dell'Uranio. Infatti, se confrontiamo vari combustibili, vediamo che un chilogrammo di Uranio fissile fornisce circa 8.2×10^7 MJ,¹ ovvero quasi 3 milioni di volte più di un chilogrammo di carbone e circa un milione e mezzo di volte più di un chilogrammo di metano.

Per avere un'idea del quadro mondiale, a marzo 2023 si avevano 422 reattori in operazione o in pausa operativa, 56 reattori in costruzione e 206 reattori in fermo definitivo. Attualmente, il nucleare da fissione fornisce circa il 5% dell'energia primaria² mondiale, circa il 10% dell'elettricità mondiale, circa il 18% dell'elettricità nei paesi OCSE, circa il 25% dell'elettricità nella UE, circa il 33% dell'elettricità a basse emissioni di carbonio nel mondo. È inoltre la forma di energia con la minore produzione di gas serra, insieme a idroelettrico ed eolico, e infine è una forma di energia "dispacciabile", ovvero disponibile su richiesta in modo continuativo.

8. *Produzione e gestione dei rifiuti radioattivi*

Abbiamo visto che il funzionamento di un reattore a fissione nucleare determina la produzione di una certa quantità di materiali radioattivi. Volendo adottare una generalizzazione grossolana, si può dire che l'operazione e lo smantellamento a fine vita di un impianto nucleare a fissione produce una certa quantità di rifiuti radioattivi, che vanno custoditi e smaltiti rispettando i criteri stringenti della radioprotezione. Innanzitutto, i rifiuti vanno sottoposti a opportuni processi di

trattamento (per es. pulizia da polveri e parti facilmente distaccabili) e condizionamento (per es. compattazione e successivo inserimento in appositi fusti).

A seconda del contenuto e della durata dei materiali radioattivi, vi sono tre tipologie di depositi per lo smaltimento dei rifiuti trattati e condizionati. Per i materiali con relativamente più bassa radioattività ed emivite brevi, si utilizzano depositi di superficie. Nel caso di radioattività maggiore e/o emivite mediamente lunghe, si utilizzano depositi semi-interrati. Infine, per materiali con radioattività particolarmente alte e/o emivite molto lunghe, compreso il caso del combustibile esaurito estratto dai reattori, si prevede di costruire depositi sotterranei a profondità di alcune centinaia di metri. Per il nucleare civile, la Finlandia è il paese più avanti nella realizzazione di tale deposito sotterraneo, che sarà pronto e operativo a breve.

Dobbiamo notare però che, per quanto riguarda il combustibile esaurito, alcuni paesi, in particolare la Francia, hanno implementato una filiera per il riciclaggio del Plutonio, che viene estratto dal combustibile esaurito e utilizzato insieme a Uranio 238 per produrre nuovo combustibile. Solo dopo questo passaggio, i materiali rimanenti vengono avviati all'immagazzinamento come rifiuti. In questo modo, l'utilizzo del combustibile è più efficiente in quanto il contenuto fissile viene maggiormente sfruttato.

9. *Le riserve di Uranio*

Una tipica grande centrale nucleare ha bisogno di circa 160 tonnellate di Uranio naturale all'anno. Con il consumo attuale, le riserve "convenzionali" (a buon prezzo) potrebbero durare un altro centinaio d'anni. Se l'uso dell'energia nucleare dovesse aumentare, si dovrebbe pensare a risorse più costose come i fosfati (fattibile) o estrazione dall'acqua di mare (ancora in studio). Se si cambiasse tipo di reattori passando a quelli senza acqua (reattori "veloci") o all'utilizzo del Torio per creare un tipo diverso di combustibile, le risorse potrebbero durare da qualche centinaio a qualche migliaio di anni.

10. *La fusione nucleare*

Mentre nella fissione un nucleo pesante come l'Uranio si spacca tipicamente in due frammenti, nella fusione avviene il processo opposto, in cui due nuclei leggeri, per esempio gli isotopi dell'idrogeno Deuterio (1 protone e 1 neutrone) e Trizio (1 protone e 2 neutroni), se dotati di sufficiente energia possono unirsi formando un nucleo di Elio (2 protoni e 2 neutroni), con l'emissione di un neutrone. Questo processo è chiamato *Fusione Nucleare*: è il meccanismo che alimenta le stelle, anche se in questo caso vengono coinvolti nuclei leggeri diversi. Per esempio, nel caso del nostro Sole, il ciclo primario vede la fusione di due protoni in Deuterio, con l'emissione di un positrone e un neutrino. A parità di energie in gioco, il processo di fusione di Deuterio e Trizio è enormemente più probabile della fusione nel Sole e inoltre la quantità di energia emessa è molto superiore.

I neutroni emessi dal processo di fusione Deuterio-Trizio possiedono molta energia cinetica, che può essere trasmessa per esempio a dell'acqua fatta circolare intorno all'impianto, scaldandola. Il calore così ottenuto può essere utilizzato per la produzione di elettricità. Anche i nuclei di Elio prodotti nel processo si muovono velocemente e la loro energia può contribuire a scaldare il plasma, di cui parleremo tra un momento.

La fusione nucleare non produce direttamente frammenti radioattivi come la fissione, anche se il Trizio è radioattivo e i neutroni attivano i materiali dell'impianto, così come avviene negli impianti a fissione. Inoltre, non produce nuclei radioattivi dal combustibile, come avviene per Plutonio e altri elementi nella fissione. Quindi, si può dire che la fusione è in grado di fornire energia più pulita rispetto alla fissione. Al momento, però, non sappiamo come costruire reattori che mantengano la reazione stabile a lungo e le ricerche in corso presso numerosi laboratori o che si svolgeranno presso impianti attualmente in costruzione come ITER non appaiono a breve termine. Bisogna tuttavia aggiungere che recentemente sono nate molte imprese private che si prefiggono lo scopo di realizzare impianti operativi e sfruttabili commercialmente in tempi più brevi rispetto ai progetti tradizionali come ITER, spesso utilizzando idee o innovazioni tecnologiche particolari come i cavi superconduttori ad alta temperatura. Si vedrà presumibilmente nei prossimi anni se le realizzazioni pratiche saranno all'altezza delle aspettative.

11. *Condizioni e tecnologie per la fusione*

Abbiamo detto che i nuclei di Deuterio e Trizio per fondere devono possedere sufficiente energia, questo per superare la forza elettrica che fa sì che i singoli protoni presenti in questi due nuclei si respingano. Questo si ottiene scaldando una miscela di gas di Deuterio e Trizio a temperature di parecchi milioni di gradi. A queste temperature, gli elettroni atomici sono completamente separati dai nuclei e quindi il gas si trasforma in un *plasma*, ovvero un insieme di nuclei (positivi) ed elettroni (negativi) che si muovono indipendentemente. Il plasma, quindi, è così caldo che va intrappolato (confinato) in modo da non toccare le pareti dell'impianto per non danneggiarle. Questo intrappolamento si ottiene attraverso potenti campi magnetici (*confinamento magnetico*), oppure bombardando un bersaglio di Deuterio e Trizio ghiacciati con laser di alta potenza (*confinamento inerziale*). Nel caso del confinamento magnetico, la struttura più comune è il cosiddetto *tokamak*, una ciambella di forma toroidale, all'interno della quale viene fatto il vuoto e poi viene iniettata la miscela di gas, circondata da bobine magnetiche per produrre i campi necessari.

Per riscaldare il plasma e mantenerlo alla temperatura necessaria si utilizzano tre tipi di sistemi: inizialmente si utilizza l'effetto Ohm, inducendo una corrente nel plasma tramite un magnete centrale, poi una combinazione di sistemi a radiofrequenza che trasferiscono energia a elettroni e ioni, rispettivamente, insieme agli iniettori di atomi neutri, la cui energia del moto viene trasferita al plasma. L'iniezione di atomi neutri è una tecnologia di punta che per il progetto ITER viene testata in Italia, nel nuovo laboratorio Neutral Beam Test Facility (NBTF) di Padova.

12. *La roadmap per la fusione e il progetto DTT*

Concludendo uno sforzo biennale dell'Organizzazione ITER³ e delle sette Agenzie nazionali per stabilire un nuovo programma di riferimento, nel 2016 il Consiglio ITER ha approvato il Programma integrato aggiornato per il progetto ITER, che identificava la data del primo plasma come dicembre 2025. Recentemente, a seguito di alcune

osservazioni e richieste di intervento da parte dell'Agenzia francese per la Sicurezza Nucleare (ASN) e di alcune non conformità riscontrate in particolari componenti da assemblare sulla macchina, il programma è stato rivisto, prevedendo un ritardo di alcuni anni rispetto a tale data.

Nella strategia europea, il successivo impianto DEMO è l'unico passaggio tra ITER e una centrale elettrica a fusione commerciale. Per raggiungere l'obiettivo della dimostrazione dell'elettricità da fusione entro il 2050, la costruzione di DEMO deve iniziare al più tardi all'inizio degli anni 2030, per consentire l'avvio delle operazioni all'inizio degli anni 2040.

Il progetto ITER ha anche un cuore italiano. Infatti, circa il 40% del valore delle commesse europee per la produzione della componentistica ad alto contenuto tecnologico è andato all'industria nazionale, che si è aggiudicata, in pochi anni, contratti per circa un miliardo di euro, oltre a 200 milioni di contratti da parte della ITER Organization. Nel caso particolare della NBTF a Padova e del futuro analogo impianto per ITER la percentuale di commesse europee vinte da aziende italiane è pari al 56%, per un totale di oltre 90 milioni di euro.

Infine, in Italia, a Frascati, si sta costruendo l'impianto DTT (Diverter Tokamak Test), un impianto dedicato alla sperimentazione di varie soluzioni per estrarre calore residuo e ceneri da un reattore a fusione, da applicare al futuro DEMO. Oltre al notevole successo nell'ottenimento di un finanziamento di 250 milioni di euro dalla BEI, vanno sottolineati anche qui i benefici per l'industria nazionale. Infatti, aziende italiane si sono già aggiudicate importanti commesse per un totale di circa 55 milioni di euro.

13. *La sfida dei materiali e il progetto IFMIF*

I materiali del reattore sono sottoposti a un grande stress, dovuto all'intenso bombardamento dei neutroni prodotti nella reazione di fusione. Vi è quindi anche la necessità di sviluppare materiali in grado di sostenere l'elevato flusso neutronico. Per questo è stato proposto di realizzare IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility), un laboratorio dove si possano riprodurre le condizioni gravose determinate dalla fusione. Il laboratorio IFMIF sarà basato su un potente

acceleratore di ioni Deuterio con potenza di fascio di 5 MW. I deutoni colpiscono un bersaglio di Litio liquido, producendo neutroni con intensità e spettro di energia simile a quello del reattore a fusione, permettendo di testare determinati materiali (per es. tipi di acciaio). A tale progetto l'Italia dà un importante contributo tecnico-scientifico con la realizzazione di un prototipo in corso di assemblaggio e test a Rokkasho (Giappone). L'Europa ha inoltre proposto di costruire una versione intermedia dell'impianto, chiamata IFMIF-DONES, la cui realizzazione dovrebbe avvenire in Spagna. La costruzione di componenti e sottosistemi della parte di IFMIF a responsabilità italiana è stata quasi interamente svolta nell'ambito dell'industria italiana, con commesse per lavorazioni di alta precisione, processi speciali e inoltre componenti, sistemi e controlli ad alto contenuto tecnologico.

14. *Conclusioni*

Possiamo quindi innanzitutto dire che la radioattività è un fenomeno naturale e i materiali radioattivi ci circondano da sempre. Dallo stato attuale dei reattori a fissione e dai piani di costruzione di nuovi impianti, vediamo che l'energia nucleare sarà ancora una delle fonti di elettricità a basse emissioni volta a coprire il carico di base in molti paesi (compresi diversi nuovi) per parecchi anni. Abbiamo visto inoltre che esistono soluzioni per la gestione dei rifiuti nucleari in sicurezza, le quali sono importanti anche per settori diversi dall'energia (per es. smaltimento di rifiuti da attività passate e di rifiuti di origine medica e industriale).

Gli impianti a fusione sono al centro di un programma di ricerca sperimentale molto intenso e potrebbero diventare una nuova fonte di energia nucleare più pulita negli anni Cinquanta di questo secolo. Il programma di ricerca sulla fusione comporta lo sviluppo di molte tecnologie, con importanti ricadute industriali.

Bibliografia

- IAEA (International Atomic Energy Agency). *Classification of Radioactive Waste*, General Safety Guide, No. GSG-1, 2004. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf
- IAEA. *Power Reactor Information System (PRIS)*. 2023. <https://pris.iaea.org/pris/>
- IEA (International Energy Agency). *Key World Energy Statistics 2020*. www.iaea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020.
- NEA (Nuclear Energy Agency). *Nuclear Energy Outlook 2008*. <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/6436-nuclear-energy-outlook-2008.pdf>
- NEA *Nuclear Energy Today. Second Edition*, 2012. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14560/nuclear-energy-today-second-edition?details=true
- NEA, IAEA. *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*, 2018. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?details=true

Sitografia

- DONES International Fusion Materials Irradiation Facility DEMO Oriented Neutron Source, <https://ifmif-dones.es/>
- DTT Divertor Tokamak Test facility, <https://www.dtt-project.it/>
- IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility, <https://www.ifmif.org/>
- ITER <https://www.iter.org/>

Note

¹ 1 MJ = 1 milione di Joule, dove il Joule è l'unità di misura dell'energia nel sistema di unità di misura MKS.

² Per energia primaria si intende l'energia presente in natura e utilizzata in qualsiasi attività umana prima di essere sottoposta a qualsiasi processo di conversione. Comprende per esempio l'energia contenuta nei combustibili grezzi.

³ Il progetto ITER è portato avanti da un'organizzazione internazionale di cui fanno parte Cina, Corea, Giappone, India, Russia, Stati Uniti e Unione Europea.

LEONARDO BELLODI*

*Energia e geopolitica:
la diversificazione delle fonti energetiche*

Abstract: Geopolitics and energy are part of the same strategic equation. This has always been true, although we tend to forget it in periods of relative calm and peace. The war in the Ukraine, the most threatening in recent decades for Europe and the world – especially for Africans, due to the food and energy crisis – brings us back to the reality of this equation and to our unpreparedness to deal with its current emergencies. The gas weapon is a double-edged sword. The keyword for those who want to emancipate themselves from Russian gas – or those who are forced to do so by American pressures – is diversification. In simple but practical words, replace Russian gas with supplies from other countries.

Nel primo numero del 2022 della prestigiosa rivista “Foreign Affairs” è apparso un articolo intitolato *The New Geopolitics of Energy*, scritto qualche settimana prima dell’inizio dell’invasione russa e nel bel mezzo della crisi energetica che ha portato a un’impennata dei prezzi del greggio e del gas e a difficoltà di approvvigionamento. Tanto è vero che nel settembre del 2021 il vice primo ministro cinese, Han Zheng, ha ordinato alle compagnie energetiche statali di assicurarsi idrocarburi a ogni costo, per fronteggiare l’inverno.

Nel loro articolo, gli autori osservavano come i leader europei chiedessero alla Russia di incrementare la produzione e l’export di gas, sottolineando il crescente ruolo di Mosca a garanzia della sicurezza degli approvvigionamenti europei. Ma non si riferivano solo al gas: Washington e Bruxelles, sostenevano gli autori dell’articolo, stavano contando sul petrolio russo per calmierarne i prezzi sui mercati globali.

* Adjunct Professor, Luiss Business School, Roma.

Qualche mese prima, a Glasgow, si era svolta la COP26 delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico. Di giorno i governanti presenti indicavano l'abbandono delle fonti fossili come unica strada per raggiungere l'ambizioso e necessario obiettivo di abbattere le emissioni di CO₂ entro il 2050, per limitare l'aumento delle temperature globali entro i 1,5 °C. La sera, lontani da microfoni e telecamere, chiamavano il presidente dell'Opec richiedendo l'aumento della produzione di petrolio.

Guardare a lungo termine mentre si cerca di risolvere un problema a breve termine. Negli scacchi con il termine *Zugzwang* ci si riferisce proprio alla situazione in cui un giocatore si trova in difficoltà perché qualunque mossa faccia subirebbe comunque una perdita immediata o nel breve termine.

Come ho descritto nel mio ultimo libro *Gas e Potere. Geopolitica dell'energia dalla Guerra fredda a oggi*, è una situazione analoga a quella in cui la comunità internazionale si trova dalla seconda metà del 2021, costretta da un lato a obbedire all'imperativo categorico di ridurre le emissioni di gas climalteranti, e dall'altro a fronteggiare gli aumenti vertiginosi dei prezzi del petrolio e soprattutto del gas. Aumenti che, accompagnati a un poderoso ritorno dell'inflazione, rischiano di alimentare il disagio sociale in Europa, negli Stati Uniti e in Asia e conflitti interni in un già precario Medio Oriente.

Dieci anni fa è stato il prezzo del grano ad accendere la miccia delle primavere arabe. Oggi la situazione sembra ripresentarsi, con l'aggravante di un vertiginoso aumento dei prezzi degli idrocarburi e di altre materie prime in seguito alla pandemia e al conflitto in Ucraina.

Un allarme che è riecheggiato già nell'ottobre dello scorso anno nel corso della riunione tenutasi a Mosca tra i vertici degli apparati dell'*intelligence* dei Paesi Cis (che riunisce nove dei quindici Paesi dell'ex Unione Sovietica) e, di nuovo, al Cairo all'inizio di novembre durante l'Arab Intelligence Forum.

Il disagio sociale dovuto all'aumento dei prezzi non è un fenomeno nuovo. Nel 2019, circa ottantamila persone hanno protestato in Iran sfidando il regime con il gesto simbolico, ma non privo di conseguenze, di bruciare statue ed effigi dell'ayatollah Khomeini. Disordini si sono registrati anche in India e in Sud America, senza dimenticare la protesta dei *gilets jaunes* in Francia nel corso del 2019.

L'aumento dei prezzi del gas e del petrolio è dovuto a diversi fattori. Innanzitutto, la drastica diminuzione degli investimenti nel settore *upstream* (esplorazione e produzione). Si calcola che nel 2020 siano diminuiti del 50% a livello mondiale e del 75% solo nell'Africa occidentale. Un *trend* che non potrà che accentuarsi: secondo l'Iea, entro la fine del 2022 le compagnie petrolifere dovrebbero annullare ogni nuovo investimento se si volesse raggiungere l'obiettivo di zero emissioni nette al 2050.

In secondo luogo, i primi effetti del cambiamento climatico: un inverno e una primavera piuttosto fredde hanno aumentato i consumi e non hanno consentito di riempire a sufficienza gli stoccaggi di gas. Fenomeno aggravato dalla drammatica siccità invernale che ha ridotto la produzione stagionale e, in prospettiva, l'apporto di energia idroelettrica, e dall'assenza di vento che ha fermato gli impianti eolici, soprattutto nell'Europa settentrionale, mettendo in pericolo la sicurezza energetica di molti Paesi.

Insomma, ci troviamo di fronte a una situazione *catch 22*.¹ Se aumentassimo gli investimenti sul lato dell'offerta di idrocarburi il prezzo scenderebbe, ma aumenterebbero le emissioni, mettendo a repentaglio gli obiettivi stabiliti con gli accordi di Parigi. Al fine di contenere il disagio sociale e di garantire una certa stabilità e pace sociale, da sempre gli Stati *rentier*, soprattutto quelli del Medio Oriente, del Nord Africa e del Golfo, sussidiano il costo di petrolio e gas: più elevati sono i prezzi, maggiore è l'esborso statale, che a un certo punto diventa insostenibile per le casse governative.

Secondo l'Organizzazione per lo sviluppo e la cooperazione economica (OECD), nel solo 2020, 192 Paesi hanno fornito questa tipologia di sussidi per un totale di 375 miliardi di dollari. Risorse finanziarie sottratte a potenziali investimenti pubblici nei settori della costruzione di infrastrutture, dell'istruzione, della sanità. In Libia, per fare un esempio eclatante, la necessità, rivelatasi vana, di contenere i dissidi sociali costa ogni anno al governo poco più del 15% del Pil.

Paradossalmente, i sussidi rischiano di alimentare, in certi casi, le entrate illegali di gruppi terroristici e organizzazioni criminali, dal momento che bassi prezzi in uno Stato favoriscono il contrabbando in Paesi limitrofi dove magari il governo non è così generoso. In Iran – che registra i prezzi del greggio più bassi al mondo, secondo solo a Venezuela e Sudan – i Guardiani della Rivoluzione contrabbandano i prodotti petroliferi in Iraq e Afghanistan.

Vi sono, infine, altre due variabili che rendono la risoluzione dell'equazione energetica globale sempre più complicata. Sono molti i Paesi che vivono quasi esclusivamente grazie ai proventi della vendita di idrocarburi. La transizione energetica, necessaria e ineludibile, priverà questi Paesi di ingenti introiti con il rischio – che diventa certezza più sale il peso in percentuale del settore energetico – che diventeranno instabili socialmente e politicamente (si pensi ad Algeria, Libia, Egitto, Nigeria, Kazakistan e gli stessi Paesi del Golfo), creando effetti *spillover* nei Paesi limitrofi, tra cui proteste sociali che potranno sfociare in guerre civili e migrazioni in larga scala.

Oggi si è aggiunta una nuova variabile: la comunità transatlantica, che fino all'altro ieri contava sulla Russia come fornitore affidabile e dai prezzi ragionevoli, si trova ora in forte imbarazzo. Ne farebbe volentieri a meno, ma non è semplice, da un giorno all'altro, ribaltare un sistema di interscambio di energia su cui si è costruito lo sviluppo industriale di oltre mezzo secolo. A causa della crisi ucraina, l'Unione europea ha scoperto che “il re è nudo”.

Nel frattempo, gli Stati Uniti sono diventanti tra i più grandi produttori di petrolio e *shale gas* al mondo e dunque hanno raggiunto una quasi totale indipendenza energetica (e questo spiegherebbe le crescenti frizioni politiche con i Paesi della regione del Golfo).

E infine, la Cina: affamata di idrocarburi per alimentare la sua crescente produzione industriale, non va troppo per il sottile e ha aumentato le importazioni dalla Russia, ottenendo anche qualche sconto.

L'Europa è in una posizione complicata, dovendo fronteggiare un mare di contraddizioni. È la capofila nella lotta al cambiamento climatico, ma rischia di essere la regione del mondo che pagherà il prezzo più alto della transizione energetica. Ha assunto, giustamente, posizioni molto dure nei confronti della Russia, ma per il proprio fabbisogno energetico è sempre più dipendente dalle importazioni dall'estero.

Infatti, in molti Paesi dell'Unione, l'Italia *in primis*, tempi burocratici inaccettabili e l'opposizione delle comunità locali ostacolano perfino la realizzazione di infrastrutture per le tecnologie rinnovabili. I costi continuano a crescere per l'industria europea, già appesantita da un costo del lavoro di gran lunga maggiore di quello della Cina e degli stessi Stati Uniti. L'Unione Europea, dunque, rischia di essere l'anello debole, perlomeno nel breve-medio periodo, del nuovo ordine ener-

getico mondiale che si va configurando. Un nuovo assetto globale che potrebbe vedere emergere un asse autoritario tra Cina e Russia.

Secondo il rapporto 2021 dell'Iea, per raggiungere gli obiettivi di *net zero* al 2050 si dovranno ridurre del 75%, nei prossimi dieci anni, le emissioni da consumo di energia da fossili, ma comunque gli Stati utilizzeranno ancora la metà del gas consumato rispetto a oggi. La Russia ne ha in abbondanza e non esiterà a venderlo a prezzi scontati ai nuovi alleati, la Cina *in primis*.

Malgrado in Europa il nucleare sia considerato un tabù (Francia esclusa, grazie alla politica lungimirante di De Gaulle), nel mondo, al di fuori della Russia, sono progettate o in corso di completamento 75 centrali nucleari. Più del 50% di queste sono costruite da società russe e il 20% da società cinesi. Un misero 2% è affidato a imprese americane. Di fatto, il mercato mondiale dell'energia nucleare è dunque gestito da russi e cinesi, che stanno imponendo i loro standard industriali.

Per quanto riguarda i rischi lungo la strada della transizione energetica, le nuove tecnologie (tra cui batterie elettriche e turbine eoliche) sono basate sull'utilizzo intensivo di metalli come cobalto, nickel, litio, rame e terre rare. La Cina ha in mano più della metà della produzione mondiale di queste ultime. E sempre la Cina produce ben il 90% di materiali semiconduttori (wafer al silicio monocristallino) necessari a realizzare le cellule per i pannelli solari.²

Mai sprecare una crisi, dicono gli economisti. La Cina sembra aver preso alla lettera l'insegnamento, adottando nei confronti della Russia un atteggiamento di cauta benevolenza nella recente crisi ucraina. Pechino ribadisce l'importanza dei principi cardine del diritto internazionale – dal rispetto della sovranità e dell'integrità territoriale fino alla non ingerenza negli affari interni di uno Stato – ma al contempo strizza l'occhio a Mosca quando avverte gli Stati Uniti e l'Unione Europea che l'invio di armamenti all'Ucraina potrebbe avere conseguenze inimmaginabili. Forse consapevole che la gestione del dossier ucraino da parte di Stati Uniti e Unione Europea potrà essere considerato un *benchmark* per quanto riguarda la questione in sospeso tra la Repubblica Popolare Cinese e Taiwan. Insomma, la Cina sembra fare di tutto per attrarre la Russia nella propria orbita geopolitica e poco importa che questo corrisponda agli interessi strategici di Mosca.

Usa e UE sono gli altri due attori nello scacchiere geo-energetico mondiale. Gli Stati Uniti sono (quasi) autosufficienti sul fronte energetico e lontani migliaia di chilometri dal conflitto.

E noi europei come siamo messi? L'Unione Europea è chiaramente un'esperienza spettacolare e unica nella storia, dove gli Stati fondatori – e quelli che nel tempo si sono uniti alla comunità – hanno ceduto in parte la loro sovranità per assicurare all'Europa pace e benessere economico, due risultati raggiunti pienamente per oltre settant'anni. Ma non vi è davvero sovranità senza un'indipendenza energetica e una forza militare.

Quando De Gaulle impose alla Francia la scelta del nucleare non lo fece per ragioni economiche, ma per garantire al suo Paese l'indipendenza energetica. Un ragionamento analogo a quello dell'allora contro-ammiraglio della Marina britannica, Winston Churchill, quando – avendo deciso di modificare la propria flotta sostituendo navi che andavano a carbone con navi che utilizzavano olio combustibile – si preoccupò di assicurarsi i rifornimenti petroliferi di cui aveva bisogno attraverso la Anglo-Persian Oil Company (poi divenuta BP). Da questo punto di vista l'Unione Europea ha una sovranità zoppa.

Ritorna spesso, nel dibattito pubblico, l'idea che alla fine a pagare le conseguenze delle scelte dei grandi del mondo sia sempre la gente comune. Nel contesto in cui ci troviamo oggi, parte della responsabilità ricade sulle scelte che abbiamo sottoscritto in passato. Nel caso dell'Italia, siamo stati noi a escludere il nucleare dal mix energetico, una decisione che pesa sulle nostre bollette ancora oggi. Siamo stati noi a non aver voluto costruire impianti di rigassificazione che ci avrebbero – in parte – affrancato dalla dipendenza dal gas russo. Siamo stati noi a ostacolare, anche con la violenza, la costruzione del TAP, il gasdotto che oggi ci permette di far arrivare il gas da un Paese diverso dalla Russia. Siamo stati noi a non voler partecipare alla fase iniziale del progetto EastMed, timorosi che un altro gasdotto potesse approdare sulle coste della Puglia. Non è stato Putin a imporci queste scelte (forse le ha osservate con una certa ironia): siamo stati noi con la nostra ipocondria a dire no a tutto, antepoendo l'egoismo individuale all'interesse generale. È proprio vero che spesso “il popolo è nemico della gente”.

Le nostre scelte, o meglio le non scelte, costringono l'Italia – e altri Paesi membri dell'Unione Europea – a far fronte all'emergenza energetica e ai nuovi assetti geopolitici attraverso la diversificazione delle

fonti di approvvigionamento, in termini sia geografici che di modalità di produzione dell'energia. L'incentivazione delle energie rinnovabili è la strada che dobbiamo percorrere senza esitare, ma nel breve periodo non sarà sufficiente per affrancarci dalla dipendenza dal Cremlino.

Per ragioni storiche, geografiche e culturali lo sguardo dell'Italia è da sempre rivolto a sud, ai Paesi del Nord Africa (Algeria, Egitto, Libia *in primis*) ma anche all'Africa subsahariana, regione ricca di idrocarburi.

Ma stringere accordi commerciali con questi Paesi non è sufficiente: abbiamo bisogno di una visione nei confronti dell'Africa che sia più strategica e orientata al lungo termine. Perché non possiamo contare sulla sicurezza dei nostri approvvigionamenti da una regione del mondo sempre più instabile, per ragioni economiche oltre che demografiche.

Inoltre, si sta verificando una vera e propria tempesta perfetta. È ciò che sta provocando la guerra scatenata dalla Russia nei confronti dell'Ucraina, vero e proprio "granaio" del mondo.

Proprio per questo, e seppure sia molto lontana dal teatro bellico, l'Africa subisce più di ogni altra regione del mondo le conseguenze dell'invasione russa su più fronti: alimentare, energetico, geopolitico.

Dal punto di vista alimentare, nel 2020 l'Africa ha importato derivate da Russia e Ucraina per un valore di circa 7 miliardi di dollari. Il continente ha fame: nel Sahel e nell'Africa occidentale 25 milioni di persone non hanno sufficiente accesso al cibo. Per il combinato disposto dell'aumento dell'inflazione e della scarsità di prodotti, i costi di grano, mais e semi di soia sono aumentati di circa il 30%, il picco più alto da dieci anni a questa parte, impoverendo ancora di più le casse degli Stati (praticamente tutti) che sussidiano la produzione di pane. In Kenya e in Sudan il lievitare dei prezzi ha provocato proteste e sommosse popolari.

La situazione non è differente in Nord Africa. L'Egitto importa da Ucraina e Russia il 60% dei cereali che costituiscono il 40% dell'apporto calorico giornaliero della popolazione. Il governo del Cairo ha pertanto deciso di intervenire, calmierando i prezzi, con conseguenze inimmaginabili per le casse di uno Stato che conta più di 100 milioni di cittadini.

Come se non bastasse, i raccolti, a causa del cambiamento climatico che ha provocato una siccità piuttosto severa, non sono stati all'altezza delle aspettative, alimentando in alcuni Paesi ulteriori carestie.

Gli alti prezzi del gas poi hanno creato un aumento dei prezzi dei fertilizzanti azotati (il metano è la materia prima per la loro produzione), senza considerare il fatto che la Russia è il più importante esportatore mondiale di questo tipo di fertilizzanti. Le sanzioni occidentali hanno così provocato restrizioni all'esportazione "indiretta", dal momento che, anche se non colpiscono direttamente il prodotto, è sempre più difficile trovare navi, equipaggi e assicuratori disposti a commerciare con Mosca, aggravando così la crisi logistica. Oltre all'Egitto, anche Camerun, Kenya, Ghana e Senegal dipendono largamente dalle importazioni russe.

Sul fronte degli idrocarburi (petrolio e gas) è vero che molti Stati africani sono tra i Paesi produttori (e membri dell'Opec), ma nel breve termine non beneficiano dell'aumento vertiginoso dei prezzi. Il consumo domestico di benzina è infatti largamente sussidiato e la maggiore spesa per lo Stato non è compensata dall'aumento del costo del barile e del gas. Inoltre, gli Stati del Golfo della Guinea, Camerun, Nigeria, Repubblica Democratica del Congo e Guinea Equatoriale, si avvalgono dell'essenziale cooperazione di società petrolifere russe (in particolare Tatneft e Lukoil), che sono a corto di soldi e nell'impossibilità di operare a causa delle sanzioni internazionali.

Nel medio-lungo termine, invece, alcuni governanti del continente africano potrebbero cogliere delle opportunità dal desiderio di diversificazione energetica europea. Mozambico, Algeria, Nigeria, Senegal, Tanzania si stanno attivando per aumentare le attività di esplorazione e perforazione (rese più facili grazie all'aumento dei prezzi) e offrirsi come principali fornitori (o quasi) dell'Europa. Si parla ormai da quasi vent'anni di un progetto molto ambizioso: il gasdotto transahariano, che potrebbe portare dalla Nigeria all'Europa, attraverso il Niger e l'Algeria, più di 30 miliardi di metri cubi all'anno, tre volte la capacità del TAP e del Green Stream (9 miliardi di metri cubi ciascuno), che attualmente trasportano il gas rispettivamente dall'Azerbaigian e dalla Libia.

Purtroppo, non possiamo contare molto, in questo periodo storico delicato, sulle importazioni dalla Libia, dal momento che i dissidi e le guerre interne – passate in secondo piano nel dibattito pubblico a causa della guerra ucraina – sono all'ordine del giorno e sempre più marcate.

Ma è la nuova scacchiera geopolitica globale, che sembra vedere una contrapposizione sempre più netta tra "democrazie" e "autocrazie", che potrebbe segnare i solchi più profondi nel continente africano, i

cui Paesi rimangono a oggi incerti e divisi sull'atteggiamento da tenere nei confronti della Russia. Si rischia così di creare una "seconda Guerra fredda" in una regione potenzialmente strategica per i futuri approvvigionamenti. Tanto più che il continente africano non è solo un grande produttore di idrocarburi, ma detiene risorse minerarie essenziali per rendere operativa la transizione energetica.

Materie prime che sono presenti in grandi quantità nella Repubblica Democratica del Congo (responsabile di circa il 65% dell'output globale di cobalto), Mali e Zimbabwe (litio), Sudafrica (platino), Madagascar (terre rare). In generale, secondo alcuni prospetti geologici i Paesi dell'Africa orientale e meridionale hanno enormi potenzialità minerarie.

In un breve ed efficace intervento di tre minuti e mezzo alle Nazioni Unite, il presidente del Kenya, con il supporto di Ghana e Gabon, ha stigmatizzato l'aggressione russa, evocando il principio del diritto internazionale di rispetto dell'integrità e sovranità territoriale. Al contrario, i Presidenti di Sudafrica e Uganda hanno ribadito il proprio supporto alla Russia. Quando 93 Stati membri delle Nazioni Unite hanno votato per la sospensione della Russia dal Comitato delle Nazioni Unite per i diritti dell'uomo, ben venti Stati africani si sono astenuti.

Sono principalmente tre i motivi che determinano un atteggiamento "benevolo" nei confronti di Mosca. Il primo è dovuto ai profondi legami della Russia con questi Paesi: forze paramilitari russe sono presenti in Mali e nella Repubblica Centrafricana, il governo del Sudan è in trattative per aprire una base russa sulle proprie coste mentre Sudan, Senegal, Mozambico ed Egitto importano gran parte del fabbisogno di cereali dalla Russia.

La seconda ragione è di carattere ideologico. La Russia, al contrario dell'Europa, è ancora percepita da molti governanti e popolazioni locali come il Paese che ai tempi dell'Unione Sovietica si batteva, attraverso la diplomazia e le forniture di armi, a fianco delle istanze indipendentiste contro i regimi coloniali di Parigi, Londra e Lisbona in un'ottica antioccidentale.

Infine, sono in molti in Africa a percepire l'atteggiamento europeo iniquo e discriminante, oltre a essere ancora intriso dei retaggi coloniali del passato. Non solo la storia passata, ma anche la stretta attualità sembra perpetuare vecchi, e mai del tutto superati, pregiudizi: i rifugiati ucraini, bianchi, sono stati accolti senza alcuna difficoltà in Europa an-

che da quei Paesi, come l'Ungheria e la Polonia, tradizionalmente contrari a ogni flusso migratorio proveniente dal Medio Oriente o dal Nord Africa. Ad esempio, milioni di persone hanno dovuto lasciare le loro case a causa del conflitto nel Tigray, in Etiopia, dove sono stati documentati indicibili crimini contro l'umanità. E in questi giorni in Africa c'è chi si chiede perché l'immigrazione nera subisca un trattamento così diverso rispetto a quella bianca.

Forse ha ragione Orwell. Siamo tutti uguali, ma qualcuno è più uguale degli altri.

In conclusione, fare pronostici sull'evoluzione a lungo termine del mercato del gas costituisce un esercizio temerario e spesso piuttosto inutile. Sono troppe le variabili sconosciute che condizionano l'equazione energetica. Tuttavia, possiamo provare a individuare alcune costanti, senza ovviamente nessuna garanzia che resteranno tali.

In primo luogo, per i prossimi dieci anni il gas costituirà ancora l'ingrediente fondamentale nel processo di transizione energetica. Le rinnovabili cresceranno in percentuale nel mix energetico e i relativi costi diminuiranno, ma in assenza del nucleare non sarà possibile fare a meno del gas naturale.

Il mondo, se non altro dal punto di vista energetico, sarà meno multilaterale. A differenza del mercato del petrolio, quello del gas è in mano a pochi Stati produttori che detengono il controllo, e spesso la proprietà di tutta la filiera, dall'estrazione al trasporto fino alla distribuzione. E se è vero che in Europa abbiamo adottato una politica di diversificazione, il resto del mondo non ha certo seguito il nostro approccio.

Cambieranno, poi, gli assetti geopolitici. L'Europa, che ha visto le relazioni energetiche ruotare intorno agli assi orientali, li sposterà verso ovest e verso sud. Certo, anche qui le incognite non mancano: non ci è dato sapere se lo *shale gas* americano potrà mai competere per prezzi e quantità con quello russo. E sul fronte sud pesano le incertezze relative alla stabilità politica e alle tensioni sociali che sono comuni a quasi tutti i Paesi del Nord Africa.

Resta infine un grande punto interrogativo riguardo a cosa accadrà al nostro rapporto con la Russia. È difficile sapere per quanto tempo Mosca sarà o meno considerata un paria dalla gran parte della comunità internazionale. O se, con il trascorrere degli anni, come è successo in altre parti del mondo – ad esempio in Siria o in Venezuela –, le sanzioni

verranno progressivamente meno, in omaggio alla necessità di ristabilire i rapporti commerciali.

Una cosa è certa: l'Europa si sta giustamente attrezzando per sostituire in larga parte il gas russo. Ma dobbiamo aspettarci costi più alti e soprattutto, almeno per quanto riguarda l'Italia, occorre abbandonare resistenze locali che anche oggi, nel mezzo dell'emergenza energetica, ritardano o non consentono la realizzazione di infrastrutture strategiche. È un paradosso condannare l'invasione russa da un lato e dall'altro ostacolare ogni tassello per la diversificazione dei nostri approvvigionamenti.

Questa è forse la vera incognita: la nostra capacità, e per nostra intendiamo soprattutto italiana, di essere coerenti. Condannare l'aggressione russa significa compiere scelte precise che ci consentano di affrancarci da Mosca. Questo oggi non sta succedendo.

Bibliografia

- Borisocheva K., *Analysis of the Oil and Gas Pipeline Links between Eu and Russia*. Athens: Cere, 2007, p. 7.
- COM(2014) 330 final, *Strategia europea di sicurezza energetica*, Bruxelles, 28.5.2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0330&from=SK>
- Danchenko I., Gaddy C. *The Mystery of Vladimir Putin's Dissertation*. The Brookings Institution, Foreign Policy Program Panel, 30 marzo 2006.
- Fulwood M., Sharples J., Henderson J. *Ukraine Invasion: What This Means for the European Gas Market*. Oxford Energy Comment, Oxford Institute for Energy Studies (OIES), marzo 2022. <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/03/Ukraine-Invasion-What-This-Means-for-the-European-Gas-Market.pdf>
- Goldman M.I. *Petrostate: Putin, Power, and the New Russia*. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- Golubkova K. *Russia's Yamal-Europe gas pipeline flows east as Ukraine crisis escalates*. Reuters, 22 febbraio 2022.
- Memorandum from Secretary of State Haig to President Reagan*, Washington, July 8, 1981. Subject: Controls on Exports to the Soviet Union, Foreign Relations of the United States (FRUS), 1981-1988, Volume III, Soviet Union, January 1981-January 1983. <https://history.state.gov/historical-documents/frus1981-88v03/d70>

- Memorandum of Conversation*, Washington, October 27, 1981, 3:15-4:05 p.m. Foreign Relations of the United States (FRUS), 1981-1988, Volume III, Soviet Union, January 1981-January 1983. <https://history.state.gov/historicaldocuments/frus1981-88v03/d97>
- Minutes of a National Security Council Meeting*, Washington, July 9, 1981, 3:30-4:30 p.m. Subject: East-West Trade Controls, Foreign Relations of the United States (FRUS), 1981-1988, Volume III, Soviet Union, January 1981-January 1983. <https://history.state.gov/historicaldocuments/frus1981-88v03/d71>
- Prina Cerai A., *Material Criticality for the Sustainable and Strategic Autonomy of the European Union: The Role of Circular Economy*. Master Thesis, Società Italiana per l'Organizzazione Internazionale (SIOI), novembre 2021.
- Protecting Europe's Energy Security Act of 2019* - S.1441. <https://www.congress.gov/116/bills/s1441/BILLS-116s1441rs>
- Protecting Europe's Energy Security Clarification Act of 2020* - H.R.7361. <https://www.congress.gov/116/bills/hr7361/BILLS-116hr7361ih.pdf>
- Putin V.V., *Mineral Resources in the Development Strategy of the Russian Economy*. Zapiski Gornogo Instituta (Transactions of the Mining Institute), 1999.
- Sentenza Corte Internazionale di Giustizia del 19.12.2005 nel caso delle Attività armate sul territorio del Congo, Repubblica Democratica del Congo c. Uganda. ICJ Reports, 2005:196-199.
- Støre J.G. *Drilling shutdown would mean end of green transition, Norway PM warns*. Financial Times, 25 ottobre 2021.

Note

¹ Una difficile situazione, in cui la soluzione al problema è relativamente impossibile perché è al contempo la causa del problema stesso.

² Circa il 58-60% di concentrati di terre rare vengono estratti in Cina, tuttavia a oggi il vero collo di bottiglia rimane *mid-downstream*: circa l'85-90% di REO (ossidi di terre rare) è processato e raffinato con tecnologie proprietarie, cifra che sale a più del 90% per la produzione di leghe metalliche e magneti permanenti.

ACCADEMIA LIGURE DI SCIENZE E LETTERE

COLLANA DI STUDI E RICERCHE

*ultimi volumi pubblicati**

- LIV GIOVANNI PAOLO & PAOLO FRANCESCO PELOSO, *L'ordito e la trama. Frammenti di storia sociale a Genova e Novi*, a cura di PAOLO FRANCESCO PELOSO, presentazione di PAOLA MASSA PIERGIOVANNI, Genova, 2012, Tomo I II III, 472, 202, 472 pp.
- LVI BIANCA MONTALE, *Pagine sparse su Genova risorgimentale*, Genova, 2014, 220 pp.
- LVII
(ESAURITO) *Luigi Burgo, Ricordi. Il ligure Luigi Burgo da progettista di centrali elettriche a industriale della carta. Considerazioni sulle memorie*, con presentazione di Sandro Bertini, Genova, 2014, 64 pp.
- LVIII
(ESAURITO) *La presenza degli Issel a Genova. Atti del convegno*, Genova, 29 aprile 2014, presentazione di Giuliano Fierro, Genova, 2015, 84 pp.
- LIX STANI GIAMMARINO, *Lorenzo Pareto nobile genovese, patriota, uomo politico e pioniere delle scienze geologiche*, Genova, 2015, 28 pp.
- LX *1866-2016 La terza guerra di Indipendenza 150 anni dopo. Eventi, echi, testimonianze*, a cura di ANNA MARIA LAZZARINO DEL GROSSO, con contributi di L. Bertuzzi, M. Brescia, L. Cattanei, D. Cofrancesco, P. Cugurra, C. Malandrino, L. Malusa, B. Montale, R. Ponte, M.S. Rollandi, R. Tedeschi, S. Verdino, Genova, 2017, 302 pp.
- LXI *La Liguria di Giovanni Castaldi cui seguono il valore delle monete e le genealogie di molte illustri casate*, a cura di GIAN LUIGI BRUZZONE, Genova, 2018, 630 pp.
- LXII
(ESAURITO) PAOLO FRANCESCO PELOSO, *Il vetro, il libro, la spada: stramberia e delirio in due personaggi di Miguel de Cervantes*, Genova, 2017, 152 pp.

*L'elenco completo dei volumi pubblicati nella "Collana di Studi e Ricerche" è visibile sul sito dell'Accademia al seguente link: <http://www.accademialigurediscienzeellettere.it/index.php/pubblicazioni/collana-studi-e-ricerche/>

- LXIII
(ESAURITO) *Viaggio in Liguria. Studi e testimonianze.* Atti del convegno di studi, Genova, 19 novembre 2019, a cura di MASSIMO BACIGALUPO e STEFANO VERDINO, con contributi di M. Bacigalupo, A. Balagura, L. Clerici, N. Dacrema, M. David, F. De Nicola, P. De Ville, A. Ferrando, I. Gigli Cervi, R. Grassi, M. Hollington, J.R. Masoliver, G. Rodda, F. Valese, S. Verdino, W. Wall, P. Whitfield, Genova, 2020, 242 pp.
- LXIV *Premi di ricerca 2020*, con presentazione di V. Lorenzelli e contributi di E. Ajmar, S. Brusco, I. Cainero, F. Campana, L. Ciarlo, D. Clinimarchi, A. Grosso, A. Guzzi, R. Turco, F. Verde, Genova, 2020, 222 pp.
- LXV
(ESAURITO) *Baudelaire. Due secoli di creazione.* Atti del convegno di studi, Genova, 9 novembre 2020, a cura di IDA MERELLO e ANDREA SCHELLINO, con contributi di C. Bayle, A. Cervoni, C. Chagniot, N. Ferrari, P. Kekus, F. Locatelli, B. Manzitti, I. Merello, F. Pusterla, H. Scepi, A. Schellino, F. Scotto, M. Spreafico, H. Védrine, J. Zanetta, Genova, 2021, 300 pp.
- LXVI
(ESAURITO) FRANCESCO MARIA ACCINELLI, *Dissertazione sopra l'origine delle confraternite ed oratori in Genova (1773)*, a cura di GIAN LUIGI BRUZZONE, Genova, 2021, 96 pp.
- LXVII *Dante nel mondo.* Atti del convegno di studi, Genova, 14-15 settembre 2021, a cura di MASSIMO BACIGALUPO e FRANCESCO DE NICOLA, con contributi di O.S. Damian, H. Doi, D. Finco, J. Galassi, R. Galli Pellegrini, M. Košuta, R. Marnoto, F. Meier, C. Ó Cuilleanáin, V. Peña Sánchez, M. Pérez Carrasco, O. Sedakova, F. I. Sensini, W. Wall, G. Zoras, Genova, 2022, 276 pp.
- LXVIII GAIA LEANDRI, *Architectural Imagery: A dialogue between designer and audience*, Genova, 2023, 174 pp.
- LXIX *Transizione ecologica. Il sapere e il saper fare.* Atti del Seminario permanente, Genova, settembre-novembre 2022, a cura di GIANCARLO ALBERTELLI, con contributi di L. Banfi, L. Bellodi, A. Bombardi, L. Bragoli, R. Danovaro, C. Eva, G. Manuzio, I. Marzoli, M. Montefalcone, M. Parodi, M. Ripani, P. Rivaro, A. Saccone, C. Senesi, Genova, 2023, 192 pp.