



**POLITECNICO**  
MILANO 1863



**Politecnico di Milano**  
**Università di Milano-Bicocca**  
**8 – 9 Maggio 2023**

**LISTA DEGLI ABSTRACTS**

## Table of Contents

<b>8 Maggio — Politecnico di Milano</b>	<b>3</b>
La rimozione di CO <sub>2</sub> : dalla ricerca nei laboratori agli obiettivi dell'Accordo di Parigi (S. Caserini) . . . . .	3
Il ruolo della rimozione di CO <sub>2</sub> negli scenari dell'ultimo rapporto IPCC (M. Tavoni) . . . . .	5
Acqua, sale e anidride carbonica: ingredienti semplici per equilibri complessi (P. Macchi, S. Varliero) . . . . .	6
Limenet, tecnologia per la cattura e stoccaggio di CO <sub>2</sub> in forma di bicarbonati di calcio (S. Cappello, G. Cappello, F. Campo) . . . . .	6
Possibili effetti ambientali dell'Ocean Alkalinity Enhancement: prime valutazioni a scala di laboratorio (A. Azzellino) . . . . .	8
Possibili effetti ambientali dell'Ocean Alkalinity Enhancement: la sperimentazione in mesocosmo (D. Basso) . . . . .	10
<b>9 Maggio — Università di Milano-Bicocca</b>	<b>11</b>
Il ruolo dell'oceano in un clima che cambia (S. Masina) . . . . .	11
La cattura di CO <sub>2</sub> nell'industria energivora (S. Stendardo) . . . . .	12
Quando il mantello terrestre incontra il mare: il ruolo delle serpentiniti nello stoccaggio di CO <sub>2</sub> (N. Malaspina) . . . . .	13
Carbon capture and mineral storage via the Carbfix method (S.R. Gislason) . . . . .	14
Equilibrio, disequilibrio e stoccaggio sperimentale dell'anidride carbonica in mare (G. Raos) . . . . .	15
Ridurre l'acidificazione degli oceani rimuovendo la CO <sub>2</sub> dall'atmosfera: i due obiettivi per una ricerca all'avanguardia nel Mediterraneo (M. Grosso) . . . . .	16
Esperimenti sulla stabilità chimica nel tempo dei bicarbonati di calcio realizzati dall'impianto Limenet di La Spezia (S. Cappello, S. Varliero) . . . . .	17
Vantaggi attesi e potenziali rischi dell'Ocean Alkalinity Enhancement per gli organismi: il progetto OACIS (D. Basso) . . . . .	18

## 8 Maggio — Politecnico di Milano

### Aula Pedefferri, 14:30 – 17:30

Aula Pedefferri  
14:30

#### La rimozione di CO<sub>2</sub>: dalla ricerca nei laboratori agli obiettivi dell'Accordo di Parigi

Stefano Caserini [1] [stefano.caserini@polimi.it](mailto:stefano.caserini@polimi.it)

<sup>1</sup>Politecnico di Milano

Per mantenere l'aumento medio della temperatura globale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali, come deciso nell'ambito dell'accordo di Parigi, sono necessari sia una drastica riduzione delle emissioni di gas climalteranti, sia la rimozione di ingenti quantità di CO<sub>2</sub> già presente nell'atmosfera. La disponibilità di tecnologie per rimuovere CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, chiamate tecnologie CDR (carbon dioxide removal), sarà quindi un fattore chiave per limitare nei prossimi decenni l'impatto delle attività umane sul clima. L'intervento presenta le diverse tecnologie CDR studiate e discusse nella letteratura scientifica; esempi sono il rimboschimento e la gestione forestale, le pratiche agricole per aumentare il tasso di carbonio nei suoli, la bioenergia con cattura e stoccaggio del carbonio (BECCS), la cattura di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera con successivo stoccaggio (DACCS), l'accelerazione del dilavamento naturale delle rocce carbonatiche o silicee (enhanced weathering), e l'alcalinizzazione degli oceani. Sebbene le attuali conoscenze sulle tecnologie CDR siano ancora incomplete, sono disponibili molte stime di costi, del potenziale di mitigazione e dei possibili effetti collaterali. Per ogni opzione sono presentati i fondamenti teorici, le interazioni con il ciclo del carbonio e le possibili criticità ambientali che ne possono limitare il potenziale. Un focus particolare è dato alle tecnologie CDR che coinvolgono gli oceani, ed in particolare l'alcalinizzazione dei mari, alla base del progetto di ricercar Desarc-Maresanus, discutendo il grande co-beneficio di contrastare la tendenza attuale di acidificazione del mare. Lo sviluppo delle tecnologie CDR è ancora molto limitato, in quanto si registrano numerose difficoltà dovute a ragioni ambientali, sociali ed economiche; in particolare, la disponibilità e affidabilità di stoccaggi permanenti di CO<sub>2</sub>, pur se potenzialmente molto elevata, rappresenta di fatto un ostacolo sostanziale all'implementazione su larga scala di BECCS e DACCS. Le stime disponibili in letteratura, riassunte nell'ultimo rapporto IPCC, indicano per diverse tecnologie CDR tutt'ora in fase di ricerca e sviluppo un potenziale di rimozione annua di diverse gigatonnellate di CO<sub>2</sub>. L'innovazione è quindi cruciale e ha lo scopo di produrre migliori efficienze (una maggiore quantità di carbonio rimosso), costi inferiori, un minor numero di effetti collaterali negativi e una maggiore accettazione da parte della società.

#### Riferimenti

1. Caserini S., Barreto B., Lanfredi C., Cappello G., Ross Morrey D., Grosso M. (2019) Affordable CO<sub>2</sub> negative emission through hydrogen from biomass, ocean liming, and CO<sub>2</sub> storage. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 24(7), 1231-1248. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9835-7>
2. Caserini, S., Pagano, D., Campo, F., Abbá, A., Serena, D. M., Righi, D., Renforth P., Grosso M. (2021) Potential of maritime transport for ocean liming and atmospheric CO<sub>2</sub> removal. *Frontiers in Climate*. 3:575900. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.575900>
3. Butenschön M., Lovato T., Masina S., Caserini S. and Grosso M. (2021) Alkalization scenarios in the Mediterranean sea for efficient removal of atmospheric CO<sub>2</sub> and the mitigation of ocean acidification. *Frontiers in Climate*. 3, 614537. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.614537>.
4. Caserini S., Storni N., Grosso M. (2022) The availability of limestone and other raw materials for ocean alkalinity enhancement. *Global Biogeochemical Cycles*, 36, 5. <https://doi.org/10.1029/2021GB007246>.

## **Carbon dioxide removal: from research in laboratories to the objectives of the Paris Agreement**

To keep the average global temperature increase below 2°C compared to pre-industrial levels, as agreed in the Paris Agreement, a drastic reduction in greenhouse gas emissions and the removal of massive amounts of CO<sub>2</sub> already present in the atmosphere is needed. The availability of technologies to remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere, called CDR (carbon dioxide removal) technologies, will therefore be a critical factor in limiting the impact of human activities on the climate in the coming decades. The speech presents the different CDR technologies studied and discussed in the scientific literature; examples are reforestation and forest management, agricultural practices to increase carbon content in soils, bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), atmospheric CO<sub>2</sub> capture and storage (DACCS), acceleration of the natural weathering of carbonate or siliceous rocks (enhanced weathering), and the enhancement of oceans alkalinity. For each option, the theoretical foundations, the interactions with the carbon cycle and the possible environmental criticalities that can limit its potential are presented. Although current knowledge of CDR technologies is still incomplete, many assessments of costs, mitigation potential and possible side effects are available. A particular focus is given to CDR technologies involving the oceans, particularly ocean liming, at the basis of the Desarc-Maresanus research project, discussing the great co-benefit of counteracting the current trend of seawater acidification. The development of CDR technologies is still very limited, because of environmental, social and economic reasons; in particular, the availability and reliability of permanent CO<sub>2</sub> storage, although potentially very high, represents a substantial obstacle to the large-scale implementation of BECCS and DACCS. The estimates available in the literature, summarized in the latest IPCC report, indicate an annual removal potential of several gigatons of CO<sub>2</sub> for various CDR technologies, today still in the research and development phase. Innovation will be crucial to increase efficiencies (more carbon removed), lower costs, manage and reduce adverse side effects and increase societal acceptance of CDR options.

**Aula Pedeferra**  
**15:10**

## **Il ruolo della rimozione di CO<sub>2</sub> negli scenari dell'ultimo rapporto IPCC**

*Massimo Tavoni [1] massimo.tavoni@polimi.it*

*<sup>1</sup>Politecnico di Milano,*

Gli scenari di stabilizzazione del clima giocano un ruolo chiave nelle valutazioni internazionali come quelle dell'IPCC. I percorsi conformi a Parigi prevedono che le emissioni raggiungano lo zero netto entro la metà del secolo e possibilmente diventino negative in seguito per compensare il carbonio extra. Anche in un mondo a emissioni zero, è probabile che la rimozione di CO<sub>2</sub> svolga un ruolo fondamentale per compensare i settori difficili da abbattere, ma l'entità e le strategie delle emissioni negative rimangono in gran parte incerte. In questo discorso, discuterò lo stato dell'arte degli scenari di emissione e le loro implicazioni per la rimozione di CO<sub>2</sub>, attingendo dal 6° rapporto di valutazione dell'IPCC e dalla successiva analisi. Sottolineo l'inevitabilità del CDR in tutti gli scenari, ma delinea le differenze a seconda dei fattori socio-tecnici e delle preoccupazioni sulla sostenibilità. Oltre ai fattori tecnologici e ambientali, anche le scelte etiche giocano un ruolo importante nel determinare la misura in cui gli assorbimenti di CO<sub>2</sub> giocheranno un ruolo nel garantire un clima sicuro e resiliente.

### **The role of CO<sub>2</sub> removal from the last IPCC report scenarios**

Climate stabilization scenarios play a key role in international assessments such as those of the IPCC. Paris-compliant pathways foresee emissions to reach net-zero by mid century and possibly go net-negative afterwards to make up for the extra carbon. Even in a net-zero world, CO<sub>2</sub> removal is likely to play a vital role to offset hard-to-abate sectors, but the magnitude and strategies of negative emission remain largely uncertain. In this talk, I will discuss the state of the art of emission scenarios and their implications for CO<sub>2</sub> removal, drawing from the IPCC 6th assessment report and subsequent analysis. I emphasize the inevitability of CDR in all scenarios but delineate differences depending on socio-technical factors and concerns about sustainability. Besides technological and environmental factors, ethical choices also play an important role in determining the extent to which CO<sub>2</sub> removals will play a role in ensuring a safe and resilient climate.

## Acqua, sale e anidride carbonica: ingredienti semplici per equilibri chimici complessi

*Piero Macchi [1] [piero.macchi@polimi.it](mailto:piero.macchi@polimi.it), Selene Varliero [1]*

*<sup>1</sup>Politecnico di Milano,*

La dissoluzione di CO<sub>2</sub> in acqua di mare. A differenza di altri gas atmosferici, la CO<sub>2</sub> si scioglie più copiosamente in acqua con l'effetto di aumentare l'acidità della soluzione. Se l'acqua contiene già molti ioni (come l'acqua di mare con ca. 35 g/l di sale), si forma un "tampone" che mantiene un pH di ca. 8.1. Tuttavia, l'aumento di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera sta gradualmente acidificando i mari e gli oceani, con ripercussioni sia in atmosfera (maggiore effetto serra) che nelle acque (riduzione del carbonato e problemi per il biota marino). Una soluzione relativamente semplice è quella di aumentare l'alcalinità delle acque di mare, sia per contrastarne l'acidificazione, sia per aumentare il sequestro di CO<sub>2</sub>. Questa soluzione però potrebbe richiedere spargimento di sostanze che alterano il pH aumentandolo notevolmente, sebbene per tempi limitati. Una soluzione è quella di disperdere in mare soluzioni alcaline ma già equilibrate al pH marino, centrando l'obiettivo di contrastare l'acidità delle acque e nel contempo sequestrando CO<sub>2</sub>.

## Water, salt and carbon dioxide: simple ingredients for complex chemical equilibria

Dissolving CO<sub>2</sub> in seawater. At variance from other atmospheric gases, CO<sub>2</sub> is dissolved quite easily in water which is mildly acidified. However, if we use a water solution containing many ions (like in seawater with ca. 35 g/l of salt), the solution is tempered at a pH of ca. 8.1. Nonetheless, the CO<sub>2</sub> increase in the atmosphere is modifying this equilibrium making the seawater more and more acidic, which is dangerous for the atmosphere (being a greenhouse gas) and for the seawater itself (because it reduces the amount of carbonates and affect the marine biota). A possible solution is the alkalization of seawater that would contrast acidification and increase the CO<sub>2</sub> sequestration. This solution, though, may require spreading compounds that increase the pH significantly, albeit for short amount of time. An alternative is spreading in seawater a solution which is previously alkalized, though maintaining the same pH as in seawater, thus reaching both targets, namely contrasting ocean acidification and increasing the CO<sub>2</sub> sequestration.

## Limenet, tecnologia per la cattura e stoccaggio di CO<sub>2</sub> in forma di bicarbonati di calcio

*Stefano Cappello [1] stefano.cappello@limenet.tech, Giovanni Cappello [1], Francesco Campo [2]  
1Limenet s.r.l. Società Benefit, 2Politecnico di Milano*

La tecnologia Limenet è un innovativo metodo per catturare e stoccare CO<sub>2</sub> in forma di bicarbonato di calcio nel mare. Il metodo consiste nell'accelerazione del processo naturale di dilavamento delle rocce carbonatiche che rimuove dall'atmosfera la CO<sub>2</sub>, il principale gas a effetto serra che causa il riscaldamento globale e l'acidificazione degli oceani. Nel sistema Limenet, si produce idrossido di calcio andando a raccogliere la CO<sub>2</sub>, prodotta durante la calcinazione, in reattori che, mischiando la CO<sub>2</sub>, acqua di mare e successivamente metà dello stesso idrossido di calcio prodotto, producono bicarbonati di calcio tamponando la CO<sub>2</sub>. L'altra metà dell'idrossido di calcio, considerabile quindi come decarbonizzato, viene utilizzato per rimuovere CO<sub>2</sub> proveniente da fonti industriali o da dispositivi che catturano la CO<sub>2</sub> dall'atmosfera. I bicarbonati di calcio sono poi rilasciati in mare. Il carbonio così stoccato rimane immagazzinato in mare sotto forma di bicarbonati per centinaia di migliaia di anni. In conclusione, il processo Limenet accelera esponenzialmente il ciclo geologico del carbonio che avverrebbe naturalmente su lunghissimi tempi nell'arco di migliaia di anni. I potenziali impatti ambientali dell'intero processo Limenet sono stati valutati tramite la metodologia dell'analisi di ciclo di vita, in inglese Life Cycle Assessment, una metodologia standardizzata che viene utilizzata nell'industria e nella ricerca scientifica al fine di valutare gli effetti di un prodotto o un processo lungo il suo intero ciclo di vita. I risultati dell'analisi del ciclo di vita applicata al processo Limenet sono promettenti. In particolare, per quanto riguarda il tema dei cambiamenti climatici i benefici dati dalla cattura e lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> compensano nettamente le potenziali emissioni di gas ad effetto serra generati dall'intero processo. Mostrano che la principale fonte di emissione è la produzione dell'energia elettrica richiesta dal processo. Di conseguenza, per ottenere benefici ambientali il processo deve basarsi su fonti energetiche devono rinnovabili. Mentre in sistemi energetici nazionali come quello italiano non sono ancora sufficientemente decarbonizzati per essere già ora utilizzati per alimentare il processo, altri come quello norvegese sono già attualmente principalmente rinnovabili e adatti allo scopo.

## Limenet, technology for the capture and storing of CO<sub>2</sub> in the form of calcium bicarbonate

Limenet technology is an innovative method for capturing and storing CO<sub>2</sub> in the form of calcium bicarbonate in the sea. The method consists of accelerating the natural process of carbonate weathering rocks that removes CO<sub>2</sub>, the main greenhouse gas that causes global warming and ocean acidification, from the atmosphere. In the Limenet system, calcium hydroxide is produced by collecting the CO<sub>2</sub> produced during calcination, in reactors that mix CO<sub>2</sub>, seawater and subsequently half of the same calcium hydroxide produced, producing calcium bicarbonates that buffers CO<sub>2</sub>. The other half of the calcium hydroxide could thus be considered decarbonized and could be used to remove CO<sub>2</sub> from industrial sources or contactors that capture CO<sub>2</sub> from the atmosphere. The calcium bicarbonates are then released into the sea. The carbon thus stored remains in seawater in the form of bicarbonates for hundreds of thousands of years. In conclusion, the Limenet process exponentially accelerates a process which would naturally take place over thousands of years. The potential environmental impacts of the whole Limenet process were assessed according to the Life Cycle Assessment methodology. This standardized methodology is used in industry and scientific research with the aim of assessing the environmental burdens of a product or a process throughout its entire life cycle. The results of the life cycle assessment applied to the Limenet process are promising, in particular as regards climate change: the benefits given by the capture and storage of CO<sub>2</sub> clearly offset the potential greenhouse gas emissions generated by the entire process. Furthermore, the results show that the primary emission source is the production of the electricity required by the process. Energy sources must be renewable to obtain environmental benefits. Consequently, although some national energy systems such as the Italian one is not enough decarbonised to be used for the process, others such as the Norwegian are already mainly renewable and suitable for the purpose.

Aula Pedeferrì  
17:00

## Possibili effetti ambientali dell'Ocean Alkalinity Enhancement: prime valutazioni a scala di laboratorio

*Arianna Azzellino [1] [arianna.azzellino@polimi.it](mailto:arianna.azzellino@polimi.it)*

<sup>1</sup>*Politecnico di Milano*

Dall'inizio della rivoluzione industriale, la concentrazione di biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) nell'atmosfera è aumentata a causa dell'attività umana. Durante questo periodo, il pH delle acque oceaniche superficiali è diminuito di 0,1 unità. Questo potrebbe non sembrare molto, ma la scala del pH è logaritmica, quindi, questa variazione rappresenta circa un aumento del 30% dell'acidità. L'oceano assorbe circa il 30% del biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) che viene rilasciato nell'atmosfera. Man mano che i livelli di  $\text{CO}_2$  atmosferico aumentano a causa dell'attività umana come la combustione di combustibili fossili (ad esempio le emissioni delle automobili) e la modifica dell'uso del suolo (ad esempio la deforestazione), anche la quantità di biossido di carbonio assorbito dall'oceano aumenta. Negli ultimi anni, c'è stato un crescente interesse per l'uso della calce (ossido di calcio) e della calce spenta (idrossido di calcio) come opzioni avanzate per contrastare l'acidificazione degli oceani e il cambiamento climatico. L'implementazione a livello globale di ocean liming e ocean alkalization comporta sfide che richiedono una conoscenza dettagliata degli aspetti chimici, biogeochimici, oceanografici ed ingegneristici. In questo contesto, comprendere quali potrebbero essere gli impatti potenziali sugli ecosistemi marini dovuti sia all'aumento dell'alcalinità sia alla generazione di picchi di pH che queste tecnologie comportano risulta essenziale. L'analisi della limitata letteratura disponibile suggerisce che il maggiore impatto dell'acidificazione/alcalinizzazione degli oceani potrebbe verificarsi sul fitoplancton e sullo zooplancton, cioè sulle alghe e sugli organismi animali microscopici che costituiscono la base delle catene alimentari marine fornendo una fonte cruciale di cibo per molti altri organismi. La letteratura evidenzia anche come componente potenzialmente vulnerabile possa essere il ciclo del carbonio e l'equilibrio degli scambi continui di  $\text{CO}_2$  tra l'atmosfera e l'oceano. Per questo motivo, sono stati effettuati esperimenti a scala di laboratorio, su acqua di mare sia artificiale che naturale. Sono stati indagati i potenziali impatti dell'apporto di calce all'oceano sulla sostanza organica disciolta (DOM) e su organismi del plancton. La DOM costituisce uno dei più grandi serbatoi di carbonio organico sulla Terra e svolge un ruolo chiave nel ciclo globale del carbonio, anche perché è di cruciale importanza per la catena alimentare. Sulla base degli esperimenti condotti, è stato osservato che la sua dinamica (cioè concentrazione, composizione) può essere influenzata dall'aumento del pH indotto dall'apporto di calce, anche se le potenziali implicazioni di questi cambiamenti non sono ancora completamente comprese. La DOM è anche influenzata da una marcata stagionalità che è una variabile cruciale che dovrebbe essere presa in considerazione per eventuali operazioni di ocean liming. Gli esperimenti sul fitoplancton (alghe) e sullo zooplancton (copepodi) hanno dimostrato che gli effetti avversi sono per lo più associati a condizioni di pH superiori a 9 e all'esposizione a picchi di pH più lunghi di 3 ore (ipotesi non realistica nelle condizioni operative che si ipotizzano). In particolare, lo zooplancton è risultato essere più sensibile ai picchi di pH, che possono influire fortemente sulla mobilità degli organismi e quindi sulla loro sopravvivenza. Lo stadio di vita è stato anche individuato come un importante fattore di influenza (gli stadi giovanili sono più sensibili degli stadi adulti ai picchi di pH).

## **Possible Ocean Alkalinity Enhancement environmental effects: first laboratory evaluation**

Since the industrial revolution, the concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere has increased due to human actions. During this time, the pH of surface ocean waters has fallen by 0.1 pH units. This might not sound like much, but the pH scale is logarithmic, so this change represents approximately a 30% increase in acidity. The ocean absorbs about 30% of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) that is released in the atmosphere. As levels of atmospheric CO<sub>2</sub> increase from human activity such as burning fossil fuels (e.g., car emissions) and changing land use (e.g., deforestation), the amount of carbon dioxide absorbed by the ocean also increases. In the last decade, the interest in Ocean Liming and Enhanced Ocean Alkalinization to contrast ocean acidification and climate change has grown. The implementation at the global scale of ocean liming and ocean-based CCS faces many challenges and constraints, which could be better managed with a detailed knowledge of the chemical, biogeochemical, oceanographic, and engineering aspects of these technologies. In this context, the understanding of the potential impacts on marine life due to the increase in seawater alkalinity and to potential pH peaks is critical. The analysis of the still very limited available literature suggests that the highest impact of ocean acidification/alkalinization should be expected on the phytoplankton and the zooplankton component, i.e., the microscopic algae and animal organisms which constitute the basis of the marine food webs, providing a crucial source of food to many other marine organisms. Literature also highlights as a potentially vulnerable component the ocean carbon cycle, and the balance of continuous CO<sub>2</sub> exchanges between the atmosphere and ocean. For this reason, experiments have been carried out at the laboratory scale, on both artificial and natural seawater. The potential impacts of ocean liming on Dissolved Organic Matter (DOM) and plankton organisms have been investigated. DOM is one of the largest organic carbon reservoirs on Earth and plays a key role in the global carbon cycle, also because it is of crucial importance to the food web. In light of conducted experiments, it was observed that its dynamics (i.e., concentration, composition) can be affected by pH increases induced by OAE even though the potential implications of these changes are still not fully understood. DOM is also affected by a marked seasonality which is a crucial variable that should be taken into consideration for ocean liming. The experiments on phytoplankton (algae) and zooplankton (copepods) showed that adverse effects are mostly associated with pH conditions higher than 9 and exposure to this pH peaks longer than 3 hours (which is not realistic in ocean liming operative conditions at sea). In particular, zooplankton was found to be more sensitive to pH peaks, which may strongly affect organisms' mobility and therefore their survivorship. Zooplankton life stage was also found to be an important factor of influence (juvenile stages are more sensitive to pH peaks).

Aula Pedeferrì  
17:30

## Possibili effetti ambientali dell'Ocean Alkalinity Enhancement: la sperimentazione in mesocosmo

*Daniela Basso [1] [daniela.basso@unimib.it](mailto:daniela.basso@unimib.it)*

<sup>1</sup>*Università di Milano-Bicocca*

Nella ricerca di soluzioni tecniche che consentano di ridurre la concentrazione di CO<sub>2</sub> che già è stata immessa in atmosfera, un ambito particolarmente promettente riguarda i metodi che permettono di aumentare l'alcalinità dell'oceano e quindi la sua capacità di assorbire CO<sub>2</sub>. Lo spargimento in mare di sostanze alcaline a base di calcio, effettuato sulla scia delle navi (Ocean Liming), è una proposta che deve essere sperimentata per studiarne gli effetti sull'ambiente naturale, in modo da evitare che il desiderato aumento dell'alcalinità sia accompagnato da impatti negativi. Per comprendere sistemi complessi, la procedura scientifica prevede una serie di esperimenti da condurre a scala di complessità e di realismo crescenti, passando dai primi test su singole specie di organismi a quelli nell'ambiente naturale. I mesocosmi sono sistemi sperimentali che permettono di svolgere studi alla scala di complessità dell'ecosistema, ma in ambiente completamente isolato e controllato. Un esperimento in mesocosmi, recentemente condotto nella struttura dell'Università di Vigo (Spagna), ha consentito di sperimentare per la prima volta l'ocean liming nelle acque naturalmente eutrofiche della costa atlantica spagnola, con due diverse concentrazioni di idrossido di calcio. Durante l'esperimento nei mesocosmi sono stati registrati pH, O<sub>2</sub>, salinità, temperatura, nutrienti e irraggiamento luminoso. Sono stati analizzati il C organico e inorganico, l'associazione batterica, la concentrazione di clorofilla-a, la comunità e il metabolismo del plancton e la risposta di alcune alghe calcaree bentoniche. I primi risultati suggeriscono che il trattamento ad alta concentrazione porti ad una diminuzione della produzione primaria e dell'efficienza del fitoplancton, mentre quello a bassa concentrazione possa essere preso in considerazione per ulteriori sperimentazioni.

## Possible environmental effects of Ocean Alkalinity Enhancement: mesocosm experiments

Among the technical solutions to reduce the concentration of CO<sub>2</sub> that has already been released into the atmosphere, a particularly promising strategy is to increase the alkalinity of the ocean and therefore its ability to absorb CO<sub>2</sub>. The release of calcium-based alkaline substances in the wake of ships (Ocean Liming) is a promising technique to increase alkalinity, that must be tested to prove its efficacy and prevent any negative impact on the natural environment. With the aim to approach complex natural systems, the scientific procedure calls for a series of experiments to be conducted on an increasing scale of complexity and realism, passing from the first tests on single species of organisms to those in the natural environment. Mesocosms are experimental systems that allow studies to be carried out at the ecosystem complexity scale, but in a completely isolated and controlled environment. A mesocosm experiment of ocean liming has been conducted in the Vigo facilities (Spain) with the naturally eutrophic waters of the Spanish Atlantic coast, to test two different concentrations of calcium hydroxide. During the experiment, pH, O<sub>2</sub>, salinity, temperature, nutrients and light were recorded in the mesocosms. Organic and inorganic C, bacterial community, chlorophyll-a concentration, plankton community and metabolism, and the response of some benthic calcareous algae were analysed. The first results suggest that the high concentration treatment leads to a decrease in the primary production and efficiency of phytoplankton, while the low concentration treatment can be considered for further experimentation.

## 9 Maggio — Università di Milano-Bicocca

**Aula Sironi, 14:30 – 17:30**

### Il ruolo dell'oceano in un clima che cambia

*Simona Masina [1] [simona.masina@cmcc.it](mailto:simona.masina@cmcc.it)*

*<sup>1</sup>Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici*

Gran parte dell'energia e della CO<sub>2</sub> che l'uomo ha immesso in atmosfera dall'inizio della rivoluzione industriale è stata assorbita dall'Oceano. Gli oceani, grazie alla loro maggiore capacità termica rispetto all'atmosfera, stanno agendo come una spugna che ha attutito gli effetti dei cambiamenti climatici. Si è stimato che durante gli ultimi 50 anni l'Oceano abbia assorbito il 90% del calore in eccesso prodotto dalle emissioni antropiche, cambiando in modo significativo la sua composizione termica. La temperatura superficiale è aumentata di circa 1 grado dal 1880 ad oggi e dall'inizio del XXI secolo osserviamo anno per anno ad una serie di record di anni caldi. Il tasso di riscaldamento degli oceani è più che raddoppiato dal 1993 e il calore sta diffondendo a profondità sempre maggiori. Il riscaldamento dell'oceano non consente il rimescolamento dei vari strati d'acqua e, di conseguenza, l'apporto di ossigeno e sostanze nutritive per la vita marina. I ghiacciai e le calotte polari stanno perdendo massa, contribuendo così, insieme all'espansione dell'oceano dovuta al suo riscaldamento, al tasso crescente di innalzamento del livello del mare. Le ondate di calore marine sono raddoppiate in frequenza dal 1982 e si prevede che avranno in futuro un ulteriore aumento in frequenza, durata, estensione e intensità. L'oceano ha inoltre assorbito tra il 20 e il 30% delle emissioni di biossido di carbonio indotte dall'uomo dagli anni '80, causando l'acidificazione degli oceani con implicazioni negative per la chimica e la biologia degli oceani. Dall'inizio dell'antropocene, il pH delle acque oceaniche superficiali è diminuito di 0,1 unità di pH. Questo cambiamento rappresenta un aumento di circa il 30% dell'acidità <https://www.ipcc.ch/srocc/>.

### The role of the ocean in a changing climate

Much of the energy and CO<sub>2</sub> that humans have released into the atmosphere since the beginning of the industrial revolution has been absorbed by the ocean. The oceans, thanks to their greater heat capacity than the atmosphere, are acting like a sponge that has mitigated the effects of climate change. It has been estimated that during the last 50 years the ocean has absorbed 90% of the excess heat produced by man-made emissions, significantly changing its thermal composition. The ocean surface temperature has increased by about 1 degree since 1880, and since the beginning of the 21st century we have observed a series of records of anomalously warm years year by year. The rate of ocean warming has more than doubled since 1993 and the heat is spreading to greater depths. The warming of the ocean does not allow the mixing of the various layers of water and, consequently, the supply of oxygen and nutrients for marine life. Glaciers and ice caps are losing mass, thus contributing, together with the expansion of the ocean due to its warming, to the increasing rate of sea level rise. Marine heatwaves have doubled in frequency since 1982 and are expected to further increase in frequency, duration, extent and intensity in the future. The ocean has also absorbed between 20 and 30 percent of human-induced carbon dioxide emissions since the 1980s, causing ocean acidification with negative implications for ocean chemistry and biology. Since the beginning of the Anthropocene, the pH of surface ocean waters has decreased by 0.1 pH unit. This change represents an increase of about 30% in acidity <https://www.ipcc.ch/srocc/>.

**Aula Sironi  
14:40**

## La cattura di CO<sub>2</sub> nell'industria energivora

Stefano Stendardo [1] [stefano.stendardo@enea.it](mailto:stefano.stendardo@enea.it)

<sup>1</sup>ENEA - Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development

La progressiva decarbonizzazione dell'economia italiana richiede la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie per l'utilizzo sicuro ed efficiente delle fonti rinnovabili, unitamente all'utilizzo e alla conversione di combustibili convenzionali a basse emissioni di carbonio. La transizione energetica avviene attraverso risorse distribuite verso processi industriali sempre più sostenibili. Questa transizione è resa possibile anche dall'uso di sistemi di accumulo termochimico e dall'uso efficiente di vettori energetici come l'elettricità e l'idrogeno. Le principali industrie ad alto consumo energetico e ad alte emissioni di carbonio (ad esempio acciaio, ferro e cemento) fanno dell'Italia la seconda economia in Europa. Tali processi produttivi hanno già raggiunto livelli di efficienza nell'uso delle risorse molto elevati e si stima che le opzioni tecnologiche aggiuntive per un uso più efficiente dell'energia consentirebbero una riduzione di CO<sub>2</sub> poco significativa. Di conseguenza, una sostanziale riduzione dell'anidride carbonica emessa dai processi industriali richiede l'implementazione di tecnologie per la cattura e l'utilizzo di CO<sub>2</sub>.

L'obiettivo principale di questo studio è l'ottimizzazione delle risorse e dell'energia di processi efficienti per chiudere il ciclo del carbonio mediante l'uso degli eccessi di elettricità rinnovabile nelle industrie energetiche e ad alta intensità di carbonio. In particolare, un processo intrinsecamente circolare basato su un materiale CaO come adsorbente di CO<sub>2</sub> [1-4] potrebbe essere implementato e studiato nell'industria energivora.

### Riferimenti

1. S. Stendardo and P.U. Foscolo - Chemical Engineering Science 2009 64(10): 2343-2352
2. S. Stendardo, L.K. Andersen, C.Herce – Chemical Engineering Journal 2013 220: 383 – 394
3. M. Morone, G. Costa, E. Georgakopoulos, V. Manovic, S. Stendardo, R. Baciocchi – Waste and Biomass Valorization 2017 8(5): 1381 – 1391
4. P. Librandi, G. Costa, S. Stendardo, R. Baciocchi – AiCHE 2019: 1-9

## Carbon Capture in Energy Intensive Industry

The progressive decarbonisation of the Italian economy requires the research and development of new technologies for the safe and efficient use of renewable sources, together with the use and conversion of conventional low-carbon fuels. The energy transition occurs via distributed resources towards increasingly sustainable industrial processes. This transition is also enabled due to the use of thermochemical storage systems and the efficient use of energy vectors such as electricity and hydrogen. The main industries with high energy consumption and high carbon emissions (e.g. steel, iron and cement) make Italy the second economy in Europe. These production processes have already reached very high levels of efficiency in the use of resources and it is estimated that the additional technological options for a more efficient use of energy would allow a reduction in CO<sub>2</sub> that is not very significant. Consequently, a substantial reduction in carbon dioxide emitted by industrial processes requires the implementation of technologies for the capture and use of CO<sub>2</sub>.

The main objective of this study is the resources and energy optimisation of efficient processes for closing the carbon cycle by means of the use of the excesses of renewable electricity in energy and carbon intensive industries. In particular, an inherently circular process based on a CaO material as CO<sub>2</sub> sorbent [1-4] will be implemented and studied in the energy intensive industry.

Aula Sironi  
15:20

## Quando il mantello terrestre incontra il mare: il ruolo delle serpentiniti nello stoccaggio di CO<sub>2</sub>

*Nadia Malaspina [1] [nadia.malaspina@unimib.it](mailto:nadia.malaspina@unimib.it)*

<sup>1</sup> *Università di Milano-Bicocca*

La litosfera, costituita prevalentemente da rocce derivate dal mantello, costituisce un sistema chimico e termico altamente reattivo, in cui l'interazione con l'acqua di mare ha conseguenze geofisiche, geochemiche e biologiche significative per il sistema marino globale e per i processi delle zone di subduzione. La serpentizzazione comporta l'idratazione dell'olivina e del pirosseno, i minerali dominanti nel mantello oceanico, e tipicamente incorpora >10% in peso di H<sub>2</sub>O nelle rocce. I processi di serpentizzazione hanno anche importanti conseguenze per i flussi geochemici globali a lungo termine, agendo come un serbatoio per H<sub>2</sub>O, Cl, B, U, S e in particolare C come fonte di stoccaggio di fluidi idrotermali contenenti carbonio. Tale carbonatazione può estendersi a più di 1000 m sotto il fondo marino, portando a quantità totali di CO<sub>2</sub> di diversi wt%. Imparando dalla reazione oceano-serpentinite nelle dorsale oceaniche, il serpentino, in particolare l'antigorite (il polimorfo ad alta temperatura del serpentino) mostra elevate velocità di reazione di carbonatazione, rendendo le rocce ricche di antigorite i migliori candidati per l'implementazione dello stoccaggio del carbonio in condizioni idrotermali. La struttura minerale dell'antigorite è costituita da un'ondulazione determinata da "colline" di SiO<sub>2</sub> e "valli" di brucite, Mg(OH)<sub>2</sub>, che favoriscono un processo di dissoluzione e precipitazione che porta alla carbonatazione che avviene sulla superficie di un substrato cristallino composito. Lo studio di questo processo di carbonatazione minerale su scala atomica, partendo da laboratori naturali come quelli delle dorsali medio oceaniche, consentirà di stabilire concetti e metodi di scienza delle superfici per identificare univocamente i colli di bottiglia del processo di carbonatazione e quindi pianificare un'utile strategia catalitica per la neutralizzazione del carbonio.

## When Earth's mantle meets the Ocean: the role of serpentinites in CO<sub>2</sub> storage

Lithosphere consisting predominantly of mantle-derived rocks constitutes a highly reactive chemical and thermal system, in which interaction with seawater has significant geophysical, geochemical, and biological consequences for the global marine system and for subduction zone processes. Serpentinization involves hydration of olivine and pyroxene, the dominant minerals in the oceanic mantle, and typically incorporates >10 wt% H<sub>2</sub>O into the rocks. Serpentinization processes also have major consequences for long-term, global geochemical fluxes by acting as a sink for H<sub>2</sub>O, Cl, B, U, S, and particularly C as a source of C-bearing hydrothermal fluids storage. Such carbonatization may extend to more than 1000 m below the seafloor, leading to total amounts of CO<sub>2</sub> of several wt%. Learning from ocean-serpentinite reaction at mid ocean ridge, serpentine, particularly antigorite (the high-temperature polymorph of serpentine) displays high carbonation reaction rates making antigorite-rich rocks as the best candidates for the implementation of carbon storage at hydrothermal conditions. The mineral structure of antigorite is made of a corrugation determined by "hills" of SiO<sub>2</sub> and "valleys" of brucite, Mg(OH)<sub>2</sub>, enhancing a dissolution and precipitation process leading to carbonation taking place on a composite crystalline substrate surface. The study of this mineral carbonation process at the atomic scale, starting from natural laboratories such as those at mid ocean ridges, will enable to establish concepts and methods of surface science for uniquely identifying bottlenecks of the carbonation process and therefore planning a useful catalytic strategy for carbon neutralization.

Aula Sironi  
15:40

## Carbon capture and mineral storage via the Carbfix method

*Sigurdur Reynir Gislason [1] sigrg@hi.is*

<sup>1</sup> *University of Iceland*

Il consorzio Carbfix era un consorzio internazionale di scienziati, ingegneri e dottorandi fondato nel 2007. Questo gruppo ha dimostrato che la CO<sub>2</sub> può essere catturata dai flussi di gas concentrati delle centrali elettriche, dissolta in acqua e iniettata in profondità nelle rocce basaltiche dove la CO<sub>2</sub> si mineralizza entro due anni dall'iniezione. In altre parole, trasformiamo la CO<sub>2</sub> in roccia. Questo è ora indicato come il "metodo Carbfix". È il modo più sicuro per immagazzinare CO<sub>2</sub>. A dicembre 2020 la Carbfix inc. società è stata costituita, per applicare questo metodo in tutto il mondo. Le persone chiave in Carbfix l'azienda sono ex dottorandi e postdoc del consorzio Carbfix. Questo metodo richiede una grande quantità di acqua. Ad esempio, 27 tonnellate di acqua, a 25°C per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> disciolta. Pertanto, stiamo attualmente sviluppando un metodo di mineralizzazione utilizzando acqua di mare. Il basalto costituisce la maggior parte del fondo oceanico e circa il 5% dei continenti. Quindi ci sono enormi opportunità di mineralizzazione nelle zone costiere della Terra. Il metodo Carbfix è stato utilizzato per catturare e immagazzinare la CO<sub>2</sub> dalla centrale elettrica di Hellisheidi nel sud-ovest dell'Islanda dal 2014. Viene anche applicato in un impianto di cattura diretta della CO<sub>2</sub> nell'aria presso il sito di Hellisheidi utilizzando la cattura dell'ammina seguita dallo stoccaggio del minerale Carbfix. Altri progetti del metodo Carbfix sono ora in preparazione in tutto il mondo. Il progetto CarbFix è stato uno sforzo congiunto di molti collaboratori e studenti che non possono essere tutti citati per motivi di spazio. Dal 2007 gli studenti di dottorato di CarbFix sono stati: Therese Flaathen, Alexander Gysi, Edda Sif Aradottir, Gabrielle Stockmann, Iwona Galeczka, Snorri Gudbrandsson, Jonas Olsson, Helgi Alfredsson, Sandra Snæbjörnsdottir, Jan Prikryl, Deirdre Clark e gli studenti di Master; Mahnaz Khalilabad, Diana Fernandez de la Reguera, Elisabet Ragnheidardottir e Kiflom Mesfin. La maggior parte degli studenti ha studiato presso l'Università dell'Islanda e alcuni hanno conseguito una laurea congiunta tra i partner della Carbfix University.

The Carbfix consortium was an international consortium of scientists, engineers and graduate students that was founded in 2007. This group has shown that CO<sub>2</sub> can be captured from concentrated gas streams from power plants, dissolved in water, and injected deep into basaltic rocks where CO<sub>2</sub> mineralizes within two years of injection. In other words, we turn CO<sub>2</sub> into stone. This is now referred to as the "Carbfix method". It is the safest way of storing CO<sub>2</sub>. In December 2020 the Carbfix inc. company was formed, to apply this method worldwide. The key persons in Carbfix the company are former Carbfix consortium PhD students and postdocs. This method requires a large amount of water. For example, 27 tonnes of water, at 25°C for each tonne of CO<sub>2</sub> dissolved. Thus, we are currently developing a mineralization method using seawater. Basalt forms the largest part of the oceanic floor and about 5% of the continents. Hence there are huge mineralization opportunities in the coastal areas of the Earth. The Carbfix method has been utilized to capture and store CO<sub>2</sub> from the Hellisheidi Power Plant in SW-Iceland since 2014. It is also applied in a direct air CO<sub>2</sub> capture plant at the Hellisheidi site using amine capture followed by Carbfix mineral storage. More Carbfix method projects are now in preparations worldwide. The CarbFix project was a joint effort by many collaborators that cannot be all cited for space reasons. From 2007 the CarbFix PhD-students have been: Therese Flaathen, Alexander Gysi, Edda Sif Aradottir, Gabrielle Stockmann, Iwona Galeczka, Snorri Gudbrandsson, Jonas Olsson, Helgi Alfredsson, Sandra Snæbjörnsdottir, Jan Prikryl, Deirdre Clark, and the MSc-students; Mahnaz Khalilabad, Diana Fernandez de la Reguera, Elisabet Ragnheidardottir and Kiflom Mesfin. Most of the students studied at the University of Iceland and some hold a joint degree between the Carbfix University partners.

**Aula Sironi**  
**16:20**

## **Equilibrio, disequilibrio e stoccaggio sperimentale dell'anidride carbonica in mare**

*Guido Raos [1] [guido.raos@polimi.it](mailto:guido.raos@polimi.it)*

<sup>1</sup> *Politecnico di Milano*

Quali sono gli equilibri chimici coinvolti nell'assorbimento dell'anidride carbonica da parte del mare? [1] In che modo questi equilibri vengono alterati da interventi rivolti a incrementare l'alcalinità degli oceani e accelerare l'assorbimento dell'anidride carbonica atmosferica? [2,3] Quali sono le possibili reazioni collaterali? E la cinetica dei processi conta qualcosa? Cercherò di rispondere ad alcune di queste domande, utilizzando sia dati di letteratura [4,5] che dalle nostre esperienze in laboratorio e sul campo. Questi ultimi vengono presentati in modo più esteso negli interventi di Macchi e Varliero, e di Varliero e Cappello.

### *Riferimenti*

1. R. E. Zeebe and D. Wolf-Gladow, *CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes*. Elsevier Oceanography Series (2001).
2. P. Renforth, G. Henderson. *Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration*. *Reviews of Geophysics* 2017, 55, 636.
3. S. Caserini et al., *Buffered accelerated weathering of limestone for storing CO<sub>2</sub>: Chemical background*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2021, 112, 103517.
4. C. A. Moras et al., *Ocean Alkalinity Enhancement – Avoiding Runaway CaCO<sub>3</sub> Precipitation during Quick and Hydrated Lime Dissolution*. *Biogeosciences* 2022, 19, 3537.
5. J. Hartmann et al., *Stability of Alkalinity in Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) Approaches – Consequences for Durability of CO<sub>2</sub> Storage*. *Biogeosciences* 2023, 20, 781

## **Equilibrium, disequilibrium and experimental storage of carbon dioxide in seawater**

What are the chemical equilibria involved in the absorption of carbon dioxide by the oceans?[1] How are these equilibria altered by interventions aimed at enhancing the oceans' alkalinity and speed up the absorption of atmospheric carbon dioxide? [2,3] What are the possible side reactions? And what is the role of kinetics in these processes? I will attempt to answer some of these questions, using data both from the literature [4,5] and from our laboratory and field experiments. The latter are presented more extensively in the talks by Macchi and Varliero, and by Varliero and Cappello.

Aula Sironi  
16:40

## Ridurre l'acidificazione degli oceani rimuovendo la CO<sub>2</sub> dall'atmosfera: i due obiettivi per una ricerca all'avanguardia nel Mediterraneo

Mario Grosso [1] [mario.grosso@polimi.it](mailto:mario.grosso@polimi.it)

<sup>1</sup> Politecnico di Milano

È ormai evidente e riconosciuto dalla comunità scientifica che per mantenere l'aumento medio della temperatura globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, come deciso nell'ambito dell'accordo di Parigi, non sia più sufficiente una drastica riduzione delle emissioni di gas serra, ma sia necessario rimuovere CO<sub>2</sub> dall'atmosfera in quantità tanto più ingenti quanto più lenta sarà la riduzione delle emissioni. Per realizzare questo obiettivo, oltre a ridurre le emissioni è necessario sviluppare strategie e processi per un'attiva rimozione dell'anidride carbonica (Carbon Dioxide Removal strategies - CDRs), grazie alla disponibilità di tecnologie all'avanguardia per emissioni negative (Negative Emission Technologies - NETs). L'aumento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera ed il conseguente aumento delle temperature, sono accompagnati da un altro problema: l'acidificazione degli oceani. Gli strati superficiali del mare infatti, a diretto contatto con l'aria e la CO<sub>2</sub> in essa contenuta, si riscaldano maggiormente e assorbono ancora più CO<sub>2</sub> dell'atmosfera; questo determina un aumento dei livelli di acidità delle acque, e se l'innalzamento della temperatura degli oceani è già causa di fenomeni preoccupanti, come lo sbiancamento delle barriere coralline, l'aumento dell'acidità delle acque rappresenta un'ulteriore seria minaccia per tutti gli ecosistemi acquatici. Per contrastare l'acidificazione dei mari, e consentire un maggior assorbimento di CO<sub>2</sub> atmosferica, numerosi gruppi di ricerca stanno studiando una tecnica chiamata ocean alkalization (alcalinizzazione dei mari), consistente nella dissoluzione in acqua marina di sostanze alcaline quali l'idrossido di calcio (calce idrata), in modo da aumentarne il pH e "tamponare" l'acidità.

### Riferimenti

1. Butenschön M., Lovato T., Masina S., Caserini S., Grosso M. (2021), Alkalinization Scenarios in the Mediterranean Sea for Efficient Removal of Atmospheric CO<sub>2</sub> and the Mitigation of Ocean Acidification. *Frontiers in Climate - Negative Emission Technologies*, volume 3, 11 pages, DOI: 10.3389/fclim.2021.614537
2. Caserini S., Pagano D., Campo F., Abbà A., De Marco S., Righi D., Renforth P., Grosso M. (2021) Potential of maritime transport for ocean liming and atmospheric CO<sub>2</sub> removal. *Frontiers in Climate - Negative Emission Technologies*. 3:575900. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.575900>
3. Sito web del progetto: [www.desarc-maresanus.net](http://www.desarc-maresanus.net)

## Reducing ocean acidification by removing CO<sub>2</sub>: two target for cutting-edge research in the Mediterranean Sea

It is now widely recognized that in order to reach the target of limiting global warming to well below 2°C above pre-industrial levels (as the objective of the Paris agreement), cutting the carbon emissions even at an unprecedented pace will not be sufficient, but there is the need for development and implementation of active Carbon Dioxide Removal (CDR) strategies. Among the CDR strategies that currently exist, relatively few studies have assessed the mitigation capacity of ocean-based Negative Emission Technologies (NET) and the feasibility of their implementation on a larger scale to support efficient implementation strategies of CDR. The ocean plays a particular role in the climate system acting as significant sink of atmospheric heat and CO<sub>2</sub>; this has caused the additional hazard of ocean acidification, that is the pH reduction of ocean seawater since the pre-industrial period, that is unprecedented in the last 65 million years and has significant implications for marine organisms affecting their metabolic regulation and capability to form calcium carbonate, destabilizing the ecosystem and ultimately threatening vital ecosystem services. Among the ocean-based NETs, artificial ocean alkalization via the dissolution of Ca(OH)<sub>2</sub>, known in short as ocean liming, has attracted attention due to its capability of contemporarily addressing two issues: global warming via increased levels of CO<sub>2</sub> and ocean acidification.

Aula Sironi  
17:00

## Esperimenti sulla stabilità chimica nel tempo dei bicarbonati di calcio realizzati dall'impianto Limenet di La Spezia

*Selene Varliero [1] [selene.varliero@polimi.it](mailto:selene.varliero@polimi.it) Stefano Cappello [2]*

*<sup>1</sup>Politecnico di Milano, <sup>2</sup>Limenet s.r.l Società Benefit*

L'aumento delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera ha numerose conseguenze. Nel mare si ha, tra i diversi impatti, una progressiva acidificazione causata dall'aumento della CO<sub>2</sub> disciolta in acqua. La tecnologia Limenet ha una doppia finalità: stoccare anidride carbonica e contrastare l'acidificazione dei mari. Il funzionamento di Limenet prevede di dissolvere CO<sub>2</sub> in un flusso di acqua marina, in cui verrà poi dosato idrossido di calcio affinché il pH della soluzione sia uguale quello dell'acqua di mare. Questo trasforma l'anidride carbonica in bicarbonati e di conseguenza in alcalinità equilibrata. E' infatti l'alcalinità che permette al mare di mantenere stabile il pH. In altre parole, si usa CO<sub>2</sub>, altrimenti emessa in atmosfera, per combattere l'acidificazione del mare. Limenet ha ingegnerizzato ed industrializzato la propria tecnologia realizzando un progetto pilota nel Centro di Supporto e Sperimentazione Navale (CSSN) della Marina Militare italiana di La Spezia in collaborazione con il Politecnico di Milano e l'università UNIGE di Genova. L'impianto è stato progettato e realizzato, con il supporto di Hyrogas, per rimuovere 10 kg/h di anidride carbonica in forma di bicarbonati di calcio. Grazie a questo progetto, è stato possibile studiare la stabilità dello stoccaggio di CO<sub>2</sub>, tramite misura di alcalinità, pH e carbonio nella soluzione prodotta da Limenet. Secondo letteratura, il processo può garantire uno stoccaggio di 10.000 anni ed è fondamentale valutare se ci sono processi che possano accelerare il rilascio di CO<sub>2</sub> dall'acqua. Tra gli sviluppi futuri, Limenet, assieme al Politecnico di Milano e l'università Milano-Bicocca, stanno progettando ulteriori studi sulla stabilità chimica e sull'impatto dell'aggiunta di alcalinità equilibrata sulle specie biologiche

## Experiments on the chemical stability through time of calcium bicarbonates in the Limenet facility, La Spezia

The increase in CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere has numerous consequences. For example, the sea is affected by a progressive acidification caused by the increase of CO<sub>2</sub> dissolved in water. Limenet technology has a dual purpose: to store carbon dioxide and counteract ocean acidification. The operation of Limenet involves dissolving CO<sub>2</sub> in a stream of sea water, in which calcium hydroxide will then be dosed in order to have the pH of the final solution equal to the pH of sea water. This turns carbon dioxide into bicarbonates and consequently into equilibrated alkalinity. Indeed, it is the alkalinity that allows the sea to keep the pH stable. In other words, CO<sub>2</sub>, otherwise emitted into the atmosphere, is used to fight ocean acidification. Limenet has engineered and industrialized its technology by carrying out a pilot project in the Centro di Supporto e Sperimentazione Navale (CSSN) of the Italian Navy in La Spezia in collaboration with Politecnico di Milano and the University of Genoa UNIGE. The plant was designed and built, with the support of Hyrogas, to remove 10 kg/h of carbon dioxide in the form of calcium bicarbonates. Thanks to this project, it was possible to study the stability of CO<sub>2</sub> storage, by measuring alkalinity, pH and inorganic carbon in the solution produced by Limenet. According to literature, the process can guarantee a storage of 10,000 years and it is crucial to evaluate whether there are processes that can accelerate the release of CO<sub>2</sub> from water. Among future developments, Limenet, together with Politecnico di Milano and Milano-Bicocca University, are planning further studies on chemical stability and the impact of adding equilibrated alkalinity among biological species.

Aula Sironi  
17:30

## Vantaggi attesi e potenziali rischi dell'Ocean Alkalinity Enhancement per gli organismi: il progetto OACIS

*Daniela Basso [1] [daniela.basso@unimib.it](mailto:daniela.basso@unimib.it)*

<sup>1</sup>*Università di Milano-Bicocca*

L'ecosistema marino è caratterizzato da molte variabili ambientali, tra cui il contenuto in nutrienti condiziona la produzione primaria derivante dalla fotosintesi, e con essa l'intera rete trofica. In funzione degli apporti dai continenti e delle caratteristiche oceanografiche, gli oceani e i mari del globo mostrano differenti concentrazioni di nutrienti, che sostengono reti trofiche molto diverse. La concentrazione di nutrienti nelle acque è considerato anche uno dei fattori che possono interagire con alcune tecniche di Ocean Alkalinity Enhancement, tra cui l'*enhanced weathering* e l'*ocean liming*, con effetti molto differenti e a volte opposti. Uno dei comparti del biota marino più interessanti per la ricerca sulle tecniche di mitigazione del cambiamento climatico globale attraverso l'Ocean Alkalinity Enhancement è quello degli organismi che sono produttori primari, produttori di  $\text{CaCO}_3$  (nei gusci, scheletri, conchiglie ecc.) e i cui resti costituiscono importanti depositi di carbonato disponibile alla naturale dissoluzione. Fotosintesi, calcificazione e dissoluzione hanno ruoli primari nel quadro dei cicli biogeochimici e la loro risposta alle tecniche di CDR su scala globale è un tassello fondamentale nel percorso verso la scelta di strategie vincenti nella sfida climatica che stiamo vivendo. Il progetto internazionale OACIS - OLIGOS ha l'obiettivo di chiarire la risposta all'*ocean liming* di due ambienti marini che si pongono agli estremi opposti dal punto di vista della disponibilità di nutrienti - le acque costiere eutrofiche dell'Atlantico nord-orientale e quelle fortemente oligotrofiche del Mediterraneo orientale - e di analizzare i potenziali impatti dell'alcalinizzazione sui produttori primari calcificanti del plankton (coccolitoforidi) e del benthos (alghe rosse calcaree).

## Expected advantages and potential impacts of Ocean Alkalinity Enhancement on the organisms: the OACIS project

The marine ecosystem is characterized by many environmental variables, among which nutrient concentration affects the primary production deriving from photosynthesis, and consequently, the entire food web. Depending on the contribution from continents and on their oceanographic characteristics, global oceans and seas show diverse nutrient concentrations, supporting very different food webs. The concentration of nutrients in marine waters is also considered one of the factors that can interact with some Ocean Alkalinity Enhancement techniques, including *enhanced weathering* and *ocean liming*, with very different and sometimes opposite effects. From the point of view of the research on Carbon Dioxide Removal through Ocean Alkalinity Enhancement, one of the most interesting component of the marine biota is formed by organisms that are primary producers, producers of  $\text{CaCO}_3$  (in shells, skeletons etc.) and, after death, components of important deposits of carbonate available to natural dissolution. Photosynthesis, calcification and dissolution have primary roles in the context of biogeochemical cycles, and modelling their response to the techniques of CDR on a global scale is a fundamental step towards a winning strategy for the mitigation of the ongoing climate change. The international project OACIS - OLIGOS is aimed at clarifying the response to ocean liming of two marine environments that are opposite from the point of view of nutrient availability - the eutrophic coastal waters of the north-eastern Atlantic and the strongly oligotrophic ones of the eastern Mediterranean - and to analyze the impact of alkalization on the primary calcifying producers of plankton (coccolithophorids) and benthos (calcareous red algae).