

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA**

**Corso di Laurea in Biologia**

**ELABORATO DI LAUREA**

**IL CAMBIAMENTO CLIMATICO E L'IMPATTO SUI  
MAMMIFERI MARINI**

**Tutor: Prof. Valerio Matozzo  
Dipartimento di Biologia**

**Laureanda: Marianna Merci**

**ANNO ACCADEMICO  
2021/2022**

## INDICE

Introduzione	2
1. Indicatori del cambiamento climatico	4
1.1 Temperature globali	4
1.2 Temperature superficiali marine e OHC	5
1.3 Acidificazione	7
2. Reti trofiche	10
2.1 Struttura generale	10
2.2 Rete trofica oceanica	11
2.3 Mar Mediterraneo	12
3. Impatto climatico sui mammiferi marini presenti nel Mar Mediterraneo	12
3.1 Specie di mammiferi marini presenti	12
3.2 Balenottera comune e <i>Meganyctiphanes Norvegica</i>	13
3.3 Visione generale degli impatti su altri mammiferi marini	16
4. Conclusione	17
5. Riferimenti bibliografici	19

## INTRODUZIONE

La Terra può essere considerata come un unico e complesso sistema dinamico in cui superficie terrestre, oceano e atmosfera interagiscono tra loro. Gli oceani, parte rilevante di questo complesso sistema, coprono circa il 72% della superficie terrestre. Da un lato, possono influenzare i modelli meteorologici locali e dall'altro su scala globale, i cambiamenti atmosferici possono alterare le proprietà degli oceani. Questi cambiamenti, come l'acidificazione e il riscaldamento delle acque, provocati da un aumento nelle concentrazioni atmosferiche di gas serra, possono avere un impatto importante sugli ecosistemi marini, sulla loro produttività e biodiversità.

La temperatura del mare sta cambiando ed è sempre più elevata a causa del riscaldamento globale, dovuto principalmente all'aumento notevole dai tempi preindustriali delle concentrazioni dei gas serra responsabili di trattenere sempre più energia solare nell'atmosfera. La maggior parte di questo calore viene immagazzinato negli oceani; per questo motivo svolgono un ruolo centrale come "regolatori del clima". Sulla superficie del mare la variazione di temperatura si avverte di meno rispetto che sulle terre emerse; infatti, per ragioni fisiche, l'acqua pone più resistenza al cambiamento di temperatura perché è in grado di immagazzinare più calore a parità di aumento di temperatura. Inoltre, si rimescola con i suoi strati più profondi, distribuendovi parte del calore immagazzinato. Se nell'ultimo secolo la temperatura media globale sulla superficie del pianeta è aumentata di circa 1 °C, quella della superficie del mare è cresciuta approssimativamente di "soli" 0,7-0,8 °C (Greenpeace, 2020). Eppure, questo basta a causare enormi danni alla vita marina. La temperatura della superficie del mare è un fattore fisico importante che caratterizza gli oceani e che varia naturalmente con la latitudine: più calda all'equatore e più fredda nelle regioni artiche e antartiche. Nel momento in cui gli oceani assorbono calore, la temperatura superficiale aumenta e il calore viene ridistribuito a strati d'acqua più profondi. La temperatura superficiale oceanica è un fattore determinante e influente nel ciclo vitale degli organismi marini, per cui le variazioni dei suoi valori possono ripercuotersi su tutta la comunità marina.

L'oceano assorbe inoltre quantità significative di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, mitigando così l'entità del cambiamento climatico. Tuttavia, l'aumento dei livelli di carbonio disciolto sta cambiando la chimica dell'acqua degli oceani rendendola più acida. Si stima che circa il 30% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> generate dalle attività umane dal 1980 siano state assorbite dagli oceani (Greenpeace, 2019).

Gli oceani giocano quindi un duplice ruolo: da un lato sono uno dei nostri migliori alleati contro i cambiamenti climatici, dall'altro ne subiscono le conseguenze con gravi possibili impatti. Purtroppo, alcuni significativi cambiamenti sono già in corso e l'influenza del cambiamento climatico nei nostri mari sembra destinata a peggiorare. Negli ecosistemi marini, infatti, l'aumento della diffusione della CO<sub>2</sub>

atmosferica e il cambiamento climatico sono associati a mutamenti simultanei di temperatura, circolazione, stratificazione, input nutritivo, contenuto di ossigeno e livelli di pH, con effetti biologici potenzialmente di ampia portata sulla struttura della comunità marina e della diversità.

Gli impatti dei cambiamenti climatici iniziano ad essere sempre più evidenti e, anche se sono necessari ulteriori studi per arrivare a capire con certezza quali saranno le conseguenze per il nostro “pianeta blu”, la comunità scientifica è concorde da tempo nel lanciare l’allarme: **“I nostri oceani sono fortemente minacciati, e se non interveniamo subito...rischiamo di perdere uno dei nostri migliori alleati contro la crisi climatica.”** (Greenpeace, 2019).

Influenzando una moltitudine di proprietà fisiche delle acque oceaniche, il cambiamento climatico può causare modifiche improvvise in interi sistemi ecologici. Un esempio è il Mar Mediterraneo. Sin dagli anni '80, ha subito importanti cambiamenti indotti dal clima: modificazioni atmosferiche, idrologiche ed ecologiche (Greenpeace, 2019). Queste alterazioni interessano quindi tutti i livelli trofici della rete alimentare e i cicli biogeochimici ad essi associati; di conseguenza, la resilienza complessiva degli ecosistemi diminuisce, rendendo gli ecosistemi marini più vulnerabili ad altri fattori di stress ecologici. Il Mar Mediterraneo comprende il 7% della biodiversità marina mondiale (> 17.000 specie marine catalogate), di cui circa un quinto sono considerati endemiche (Cetaceans Value and Conservation in the Mediterranean Sea, 2015). L’elevata ricchezza di specie rende il Mar Mediterraneo uno dei gli hotspot mondiali della biodiversità. Tuttavia le sue aree marine sono tra le ecoregioni più colpite a livello globale, a causa dei crescenti livelli di minacce antropiche.

Sebbene le estinzioni dovute ai cambiamenti climatici siano ancora rare, nei prossimi decenni potrebbero superare quelle causate dalla perdita di habitat e dallo sfruttamento eccessivo delle specie (Albouy, C., *et al.*, 2020). Tra la megafauna marina, i mammiferi ricoprono ruoli ecologici chiave e insostituibili nell'oceano e quindi il collasso delle loro popolazioni potrebbe avere conseguenze irreversibili per il funzionamento dell'ecosistema. I principali predatori oceanici sono oggetto di studio da parte dei ricercatori nell'ambito dell'International Climate Impacts sul programma Oceanic Top Predators (CLIOTOP). Numerosi dati raccolti hanno dimostrato che le condizioni ambientali, come la temperatura e la produttività marina, influenzano la distribuzione e i processi biologici di queste specie (Hobday, Alistair J., *et al.*, 2015).

L'Unione internazionale per la conservazione della natura (IUCN) identifica il 25% dei mammiferi marini come a rischio di estinzione, ma lo stato di conservazione di quasi il 40% rimane non noto a causa di dati insufficienti (Drivers and hotspots of extinction risk in marine mammals, 2012), la situazione potrebbe essere anche peggiore in quanto lo stato di molti altri rimane poco chiaro (Simmonds, Mark P., *et al.*, 2009). Vi è ampio consenso sul fatto che alcune specie potrebbero essere

particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici, compresi quelli con una gamma di habitat limitata o quelli per i quali il ghiaccio marino costituisce un habitat importante per la popolazione stessa e/o per quella delle loro prede.

I cetacei, sono mammiferi marini che rappresentano una componente essenziale della biodiversità marina. Hanno un ruolo ecologico fondamentale come predatori apicali nella catena alimentare marina e aiutano a mantenerne l'integrità e a prevenirne indebolimenti dell'ecosistema. Inoltre, alcuni cetacei vengono indicati come sentinelle o indicatori per lo stato degli ecosistemi marini, nonché "specie chiave", ossia quelle che rivestono un ruolo ecologico strategico. Se in una comunità una specie chiave viene a mancare, è molto probabile che si inneschi un processo di reazione a cascata con declino di molte altre specie e conseguente diminuzione della diversità biologica (Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, 2008).

Gli animali all'apice della catena trofica marina sono particolarmente colpiti da queste pressioni, con conseguente calo dei principali predatori dell'ecosistema marino. Questo porta al declassamento trofico. Tali impatti sono del tipo più drammatico: interrompono lentamente, ma in modo significativo, le interazioni ecologiche, agiscono prima a livello locale e poi su scala più ampia, portando potenzialmente a punti di svolta ecologici critici da cui non c'è quasi possibilità di ritorno (EEA, 2014). Ad oggi, il cambiamento climatico e tutto quello che ne consegue, è la più grande sfida politica globale.

## **1. INDICATORI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO**

### **1.1 TEMPERATURE GLOBALI**

I principali impatti osservati dei cambiamenti climatici nei mari globali sono: l'acidificazione, l'aumento del contenuto di calore e aumento della temperatura superficiale.

Il rapporto "*State of Climate in 2020 of American Meteorological Society*" ha confermato che il 2020 è stato tra i tre anni più caldi nei record risalenti alla metà del 1800. Il rapporto ha rilevato che i principali indicatori del cambiamento climatico precedentemente citati hanno continuato a riflettere tendenze coerenti con un pianeta in fase di riscaldamento.

Dopo due anni consecutivi (2019 e 2020) che si sono classificati tra i primi tre più caldi mai registrati, nel 2021 sono state registrate temperature leggermente più fredde, ma non di molto. La temperatura media della superficie terrestre e oceanica nel 2021 era di 0,84°C al di sopra della media del 20° secolo. Secondo un'analisi degli scienziati dei National Centers for Environmental Information (NCEI) della NOAA, il 2021 si è classificato al sesto posto nell'elenco degli anni più caldi mai registrato, risalente al 1880 (*Figura 1*).

January–December	Anomaly		Rank (out of 142 years)	Records			
	°C	°F		Year(s)	°C	°F	
<b>Global</b>							
Land	+1.35 ± 0.14	+2.43 ± 0.25	Warmest	6th	2020	+1.58	+2.84
			Coollest	137th	1884	-0.69	-1.24
Ocean	+0.65 ± 0.16	+1.17 ± 0.29	Warmest	7th	2016	+0.80	+1.44
			Coollest	136th	1904	-0.46	-0.83
Land and Ocean	+0.84 ± 0.15	+1.51 ± 0.27	Warmest	6th	2016	+0.99	+1.78
			Coollest	137th	1904	-0.45	-0.81

Figura 1 - Temperatura media globale del 2021 (NOAA, 2022).

A livello regionale, la temperatura media annuale di partenza per l'Africa è stata pari al 2019 come la terza più alta mai registrata, dietro al 2010 (la seconda più calda) e al 2016 (la più calda). Il Nord America, il Sud America, l'Europa e l'Asia hanno avuto una temperatura annuale che si classifica tra le nove più calde mai registrate.

Calcolando le anomalie delle temperature medie, da inizio anno, di ciascun mese (il valore di gennaio è l'anomalia media delle temperature di gennaio, il valore di febbraio è l'anomalia media di gennaio e febbraio e così via) si possono confrontare gli andamenti annuali attuali con quelli passati. È evidente come l'anno appena passato, indicato nella *Figura 2* con la linea nera, possa essere paragonato a quelli che sono stati in definitiva i dieci anni più caldi mai registrati: 2016 (1°), 2020 (2°), 2019 (3°), 2015 (4°), 2017 (5°), 2021 (6°), 2018 (7°), 2014 (8°), 2010 (9°), e 2013 (10°).

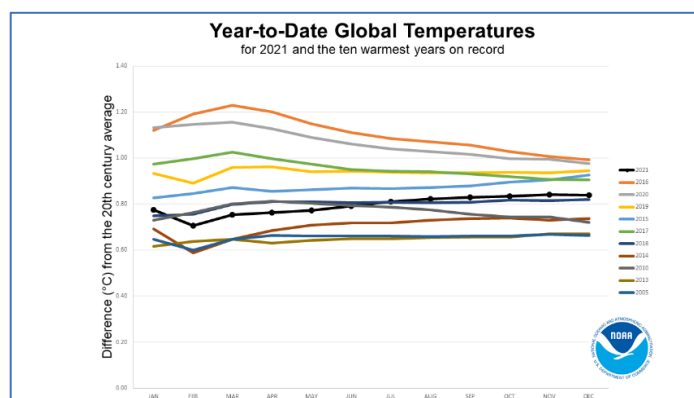


Figura 2 - Temperature globali annuali a confronto (NOAA, 2021).

## 1.2 TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL MARE (SST) E OHC

Andando ad analizzare nello specifico le SST, si osserva che hanno raggiunto valori quasi record. La temperatura media globale della superficie del mare del 2021 è stata la settima più alta mai registrata.

A livello globale, nell'ultimo trimestre del 2021 l'OHC globale è risultato il più alto tra i periodi ottobre-dicembre presenti nei record NOAA, che risalgono al 1955. In effetti, il 2021 è stato l'anno più caldo mai registrato per l'Oceano Mondiale. Nel

complesso, l'ultimo OHC trimestrale rivela condizioni diffuse più calde del normale rispetto alla media del 1955-2006, una situazione osservata dalla fine del 2016. Il contenuto di calore dell'oceano (OHC) presente negli strati superiori, dalla superficie a 700 metri, ha raggiunto livelli record. Questi valori elevati riflettono il continuo accumulo di energia termica dell'oceano, proveniente dal 90% del calore in eccesso della Terra accumulato a causa del riscaldamento globale.

L'oceano essendo la componente dominante del bilancio termico della Terra e la maggior parte del riscaldamento totale causato dai cambiamenti climatici si manifesta in un aumento di OHC, con l'attuale scenario delle emissioni antropiche si prevede un ulteriore riscaldamento degli oceani, essendone fortemente dipendente. Già a partire dagli anni '50 è diventata evidente una tendenza all'aumento del contenuto di calore negli strati superficiali dell'oceano. Osservazioni recenti mostrano un sostanziale riscaldamento anche dell'oceano più profondo (tra 700 e 2000 metri e sotto i 3000 m). Dal 1970 l'OHC è nettamente aumentato (*Figura 3*). Due terzi dell'aumento osservato di OHC si è verificato nei 700 m superiori dell'oceano, con aumenti negli strati al di sotto di 700 m per il restante terzo. Il riscaldamento maggiore si verifica vicino la superficie del mare, infatti, entro i 75m si è verificato un aumento di oltre 0,1 °C per decennio dal 1971. È stato stimato che l'assorbimento di calore sia raddoppiato negli ultimi decenni.

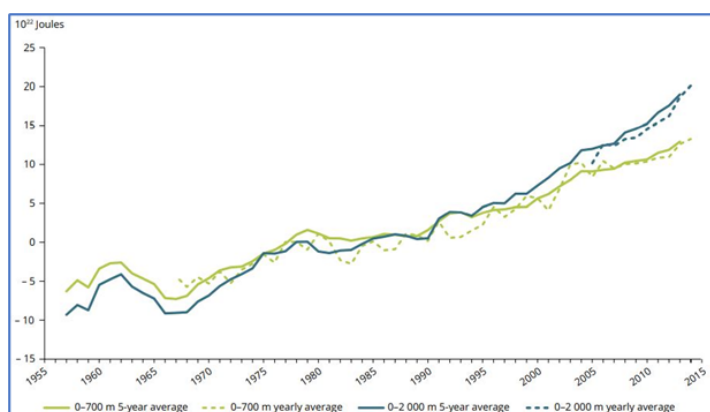


Figura 3 - Andamento globale OHC (NOAA for NCEI).

Dati più recenti (*Figura 4*) evidenziano l'incremento dell'accumulo di calore oceanico negli ultimi anni. Seppur le linee dei dati siano state calcolate in modo indipendente utilizzando metodi diversi da organizzazioni governative di quattro paesi: la *National Oceanic and Atmospheric Administration* degli Stati Uniti, la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* australiana, l'Istituto cinese di fisica atmosferica e il *Meteorological Research Institute* dell'Agenzia meteorologica giapponese, i risultati corrispondono, sottolineando la situazione critica. Per riferimento, l'aumento di 1 unità su questo grafico ( $1 \times 10^{22}$  joule) è pari a circa 17 volte la quantità totale di energia utilizzata da tutte le persone sulla Terra in un anno.

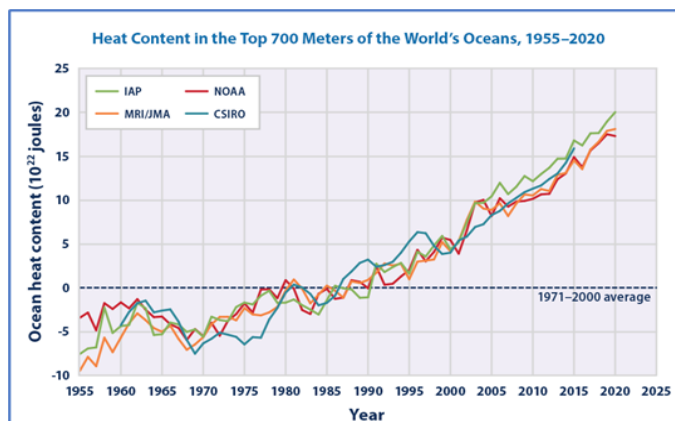


Figura 4 - Andamento globale OHC (SIRO, 2016; IAP, 2021; MRI/JMA, 2021; NOAA, 2021).

Tutte le proiezioni disponibili sulla temperatura dell'oceano suggeriscono che l'oceano continuerà a riscaldarsi e il riscaldamento maggiore è previsto per i primi cento metri, che tramite le correnti, trasferiranno gradualmente il calore a livelli più profondi. Il tasso di aumento di OHC è proporzionale alla variazione media globale della temperatura dell'aria superficiale. Nelle attuali condizioni climatiche, sono stati formulati diversi scenari di riscaldamento oceanico con intervalli medi globali previsti di riscaldamento superficiale che variano da circa 1°C a più di 3°C entro la fine del 21° secolo, e ad una profondità di 1000m una variazione compresa tra 0,5°C e 1,5°C (Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, 2017).

La temperatura della superficie del mare è un ulteriore importante fattore fisico caratteristico degli oceani. È un fattore determinante per il metabolismo delle specie e quindi per la loro distribuzione e fenologia, come la tempistica della stagionalità migratoria, gli eventi riproduttivi o i picchi di abbondanza. Il suo incremento può alterare la stratificazione della colonna d'acqua, con estesa e significativa influenza sui flussi verticali di nutrienti, influenzando così la produzione primaria e la struttura della comunità del plancton. Cambiamenti che inevitabilmente provocano effetti diffusi sulle specie marine e causano la riconfigurazione degli ecosistemi marini.

### 1.3 ACIDIFICAZIONE

Assorbendo anidride carbonica dall'atmosfera, l'oceano rallenta il cambiamento climatico globale. Ma quando viene assorbito dall'acqua di mare, il gas serra innesca una serie di reazioni chimiche, rendendo l'oceano più acido. In particolare, i livelli di anidride carbonica nell'atmosfera hanno raggiunto livelli record nel 2020, seppur anno di rallentamento economico in seguito alla pandemia globale con una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> stimata al 6%-7%. La concentrazione media annua globale di CO<sub>2</sub> atmosferica stimata nel 2020 era di 412,5 ppm. Valore di 2,5 superiore rispetto alle rilevazioni del 2019.

Considerando l'anno appena passato si sono evidenziati valori tendenzialmente crescenti (Figura 5): nel 2021 è stata rilevata una concentrazione atmosferica di 417 ppm.



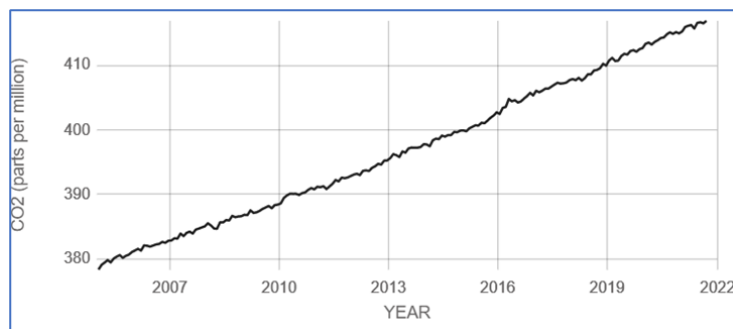


Figura 5 - Concentrazioni atmosferiche CO<sub>2</sub> (climate.nasa.gov, 2021).

L'anidride carbonica è un gas serra che una volta entrato nell'atmosfera, riflette il calore irradiato dalla terra. Con l'aumento atmosferico dei gas serra, si ha una maggiore quantità di energia termica reirradiata, e ciò provoca l'innalzamento delle temperature globali. A sua volta, quando la CO<sub>2</sub> si dissolve nell'oceano, innesca una reazione chimica con conseguenze di vasta portata con riduzione del pH dell'acqua. Secondo i dati rilevati a partire dall'inizio della rivoluzione industriale, l'oceano ha assorbito circa un terzo dell'anidride carbonica rilasciata nell'atmosfera dalle attività umane (Khatiwala, S., *et al.*, 2013). Se questo deposito naturale non esistesse, il nostro pianeta si riscalderebbe molto di più e molto più velocemente di quanto osserviamo oggi.

L'acidificazione degli oceani negli ultimi decenni si è verificata circa 100 volte più velocemente rispetto agli eventi naturali passati negli ultimi 55 milioni di anni. I modelli proiettano costantemente un'ulteriore acidificazione degli oceani in tutto il mondo. Il pH delle attuali acque oceaniche superficiali è già inferiore di 0,1 rispetto ai tempi preindustriali, si prevede che il pH della superficie dell'oceano diminuirà a valori tra 8,05 e 7,75 entro la fine del 21° secolo, a seconda dei futuri livelli di emissioni di CO<sub>2</sub> (Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, 2017). Dall'anno 1985, il pH globale della superficie oceanica sta diminuendo a un tasso di  $-0,0016 \pm 0,0006$  all'anno (Figura 6).

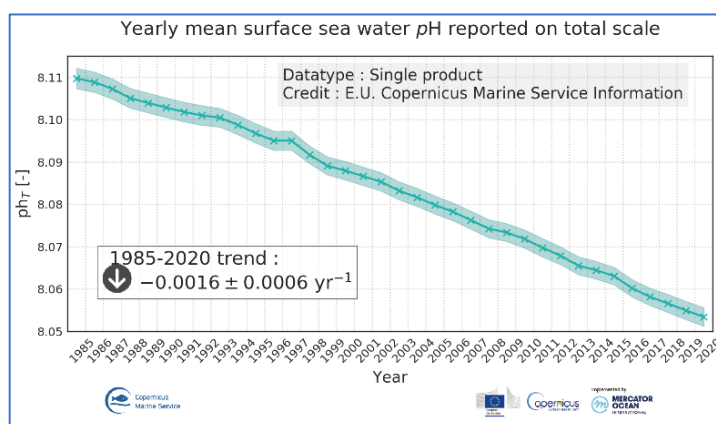


Figura 6 - Variazione globale pH oceanico (marine.copernicus.eu).

Nel momento in cui l'oceano si acidifica, la concentrazione di ioni carbonato diminuisce. Gli organismi calcificanti hanno bisogno proprio di queste molecole per costruire i loro gusci e scheletri. Meno ioni carbonato sono disponibili, più costosa diventa la calcificazione. Anche altri organismi marini che non presentano queste strutture hanno bisogno di spendere più energia per regolare le loro funzioni corporee nelle acque acidificate. L'energia aggiuntiva utilizzata, che diventa necessaria per la sopravvivenza in condizioni di valori di pH inferiori, non sarà più disponibile per la crescita, la riproduzione o la resistenza ad altri stress ambientali. Il processo di acidificazione consta di due fasi fondamentali (*Figura 7*):

- a. La formazione di acido carbonico, che poi dissocia in ioni idrogeno e bicarbonato:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$   
 (anidride carbonica + acqua  $\leftrightarrow$  acido carbonico  $\leftrightarrow$  ioni idrogeno + ioni bicarbonato)

La  $\text{CO}_2$  disciolta reagisce con l'acqua di mare per formare acido carbonico. L'acido carbonico si dissocia per formare ioni bicarbonato e ioni idrogeno. L'aumento della concentrazione di ioni idrogeno da queste reazioni fa sì che l'acqua di mare diventi più acida, da qui il termine "acidificazione dell'oceano".

- b. La reazione tra ioni carbonato,  $\text{CO}_2$  e acqua, con conseguente formazione di ioni bicarbonato:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$   
 (anidride carbonica + acqua + ioni carbonato  $\leftrightarrow$  ioni bicarbonato)

L'aumento degli ioni idrogeno prodotto dall'assorbimento di anidride carbonica reagisce con gli ioni carbonato per formare bicarbonato, rendendo gli ioni carbonato relativamente meno abbondanti.

Questo è il modo in cui gli ioni carbonato aiutano a tamponare l'acqua di mare contro grandi cambiamenti di pH reagendo con alcuni degli ioni idrogeno in eccesso e formando bicarbonato.

Tuttavia, gli ioni carbonato sono una parte importante delle strutture del carbonato di calcio, pertanto, la loro diminuzione nell'acqua di mare può rendere difficile la costruzione e il mantenimento di strutture di carbonato di calcio per la calcificazione di organismi marini come coralli, plancton e crostacei.

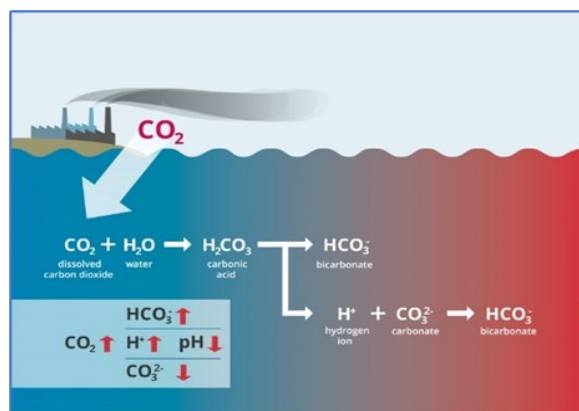


Figura 7 - Processo di acidificazione (BIOACID).

Tali rapidi cambiamenti sono un'ulteriore pressione sui calcificatori marini e gli ecosistemi dei mari. Senza riduzioni sostanziali delle emissioni di CO<sub>2</sub>, il recupero dall'acidificazione indotta dall'uomo richiederà migliaia di anni perché il sistema Terra-Oceano ristabilisca le condizioni chimiche oceaniche ottimali.

## **2. RETI TROFICHE**

### **2.1 STRUTTURA GENERALE**

Il cambiamento climatico sta avendo e continuerà ad avere effetti estremamente forti e imprevedibili sugli ecosistemi marini. Tutte le modificazioni dovute all'alterazione climatica hanno conseguenze drammatiche sulle varie componenti degli ecosistemi. I mammiferi marini subiscono sia effetti diretti, dei quali non si ha una chiara visione delle loro capacità adattative, come l'adattamento a temperature più elevate cambiando la loro distribuzione, che effetti indiretti, ovvero a livello dell'intera rete trofica con conseguenze a cascata.

Le relazioni esistenti tra gli organismi negli ecosistemi sono numerose e per poterle comprendere occorre analizzare la struttura trofica dell'ecosistema, ovvero come viene trasferita l'energia tra i diversi livelli trofici. Quando parliamo di interazioni trofiche tra organismi marini è più corretto utilizzare il termine rete trofica e non catena alimentare, in quanto essa illustra meglio tutte le possibili interazioni tra organismi evidenziando come uno stesso organismo possa essere coinvolto in più livelli trofici. I livelli trofici marini sono di solito in numero elevato, ma possono variare a seconda della trofia e dalle caratteristiche del sistema, esistono infatti diversi modelli di reti trofiche a seconda dell'ambiente considerato, in ogni caso esse comprendono sempre produttori, consumatori e decompositori.

La produzione a carico delle alghe planctoniche, delle macroalghe, delle piante acquatiche e di batteri chemiosintetici autotrofi viene detta produzione primaria, ovvero la quantità di materia organica prodotta nell'unità di tempo. Questa eterogeneità è presente nelle acque costiere, mentre oltre la piattaforma continentale la produzione primaria fotosintetica è appannaggio esclusivo del fitoplancton. Quindi il fitoplancton è alla base di tutte le catene trofiche pelagiche. La produzione primaria è alla base di due catene trofiche: catena del pascolo e catena del detrito. Le prime partono dagli autotrofi fotosintetizzanti, passano attraverso gli erbivori per terminare con i consumatori carnivori, fino al consumatore apicale. I produttori primari sono costituiti da fitobenthos e fitoplancton, di cui si nutrono gli erbivori dello zooplancton. Il secondo livello trofico è costituito da zooplancton carnivoro, a cui succedono i livelli dei consumatori (Biodiversità e funzionamento degli ecosistemi marini. Danovaro R., 2013).

Le catene del detrito invece restituiscono all'ambiente le sostanze inorganiche di base, coinvolgendo i microrganismi e i detritivori.

Ad ogni livello l'energia assorbita viene utilizzata dagli organismi che ne fanno parte, soltanto una porzione, pari a circa il 10%, passa al livello trofico successivo superiore, poiché la restante viene dispersa.

A partire dai microrganismi fino ad arrivare ai grandi mammiferi marini: un'enorme varietà di interrelazioni collega animali e piante nell'oceano. La rete trofica marina non è definita solo dall'immediato consumo della materia, anche lo scambio di nutrienti organici e le funzioni vitali degli organismi che le compongono sono altrettanto cruciali.

## 2.2 RETI TROFICHE OCEANICHE

Osservando le reti trofiche oceaniche si possono evidenziare alcuni gruppi rappresentativi degli organismi marini che rivestono un ruolo fondamentale all'interno di esse e sui quali sono ben osservabili gli effetti dei cambiamenti climatici. Il primo gruppo rappresentativo è costituito dagli pteropodi, piccoli molluschi pelagici dotati di un guscio di carbonato di calcio. Sono un importante collegamento nella rete alimentare tra fitoplancton e altri organismi, tra cui pesci, balene e uccelli. Il secondo gruppo sono i molluschi bivalvi (es. vongole, ostriche e cozze), filtratori invertebrati. Il terzo gruppo di organismi, globalmente significativo, sono i crostacei appartenenti all'ordine *Euphausiacea*, noti anche come krill; sono una fonte di cibo fondamentale per molti organismi marini e quindi un importante legame tra produttori primari e i livelli trofici superiori (es. mammiferi e uccelli marini). L'ordine *Euphausiacea* comprende 10 generi per un totale di 85 specie e quelle più conosciute sono il krill Antartico (*E. superba*), il krill Pacifico (*E. pacifica*) e il krill del Nord (*Meganyctiphanes norvegica*).

Alterazioni nella chimica e nella temperatura dell'acqua stanno già influenzando la capacità degli pteropodi di produrre la loro delicata conchiglia. La dissoluzione dei gusci, ad esempio, è aumentata del 19-26% sia nelle popolazioni nearshore che offshore sin dall'epoca preindustriale (IPCC, 2019). C'è una notevole preoccupazione per questi organismi, soprattutto considerando la loro importanza centrale nelle reti trofiche oceaniche.

Anche gli impatti sui bivalvi adulti sono largamente studiati e documentati, questi effetti includono una diminuzione nella crescita, aumento della respirazione e ridotta calcificazione, mentre gli stadi larvali tendono a mostrare maggiori anomalie dello sviluppo e aumento della mortalità dopo l'esposizione a queste condizioni. Si prevede che con l'aumento sempre maggiore della temperatura queste anomalie possano aggravarsi, con rischi attesi molto elevati a 1,8°C o più di innalzamento termico (IPCC, 2019).

Le condizioni oceanografiche dell'habitat determinano la distribuzione spaziale e il successo demografico degli organismi marini.

Nel caso dei mammiferi marini la disponibilità della preda è la chiave della loro diffusione. Un esempio rappresentativo è quello dei Cetacei, un infraordine di mammiferi marini euteri, tutte le variazioni oceanografiche hanno effetti indiretti su di essi attraverso l'abbondanza e la distribuzione delle loro prede.

Essi non sono in grado di adattarsi ai rapidi cambiamenti di temperatura e le condizioni ambientali, e il cambiamento climatico può rappresentare la più grave minaccia a lungo termine per i Cetacei (MacGarvin & Simmonds, 1996).

### 2.3 MAR MEDITERRANEO

Nel Mar Mediterraneo all'interno della categoria dello zooplancton troviamo gli Eufasiacei, piccoli crostacei appartenenti alla categoria dell'Oloplancton. Essi sono alla base dell'alimentazione di alcuni Cetacei, ma soprattutto dei Mysticeti. La specie preponderante è di origine boreale, *Meganyctiphanes norvegica*, presente in abbondanza al centro del bacino ligure-provenzale. Le altre specie repertorate provengono da zone temperate o boreali: *S. longicorn*, *E. krohnii*, *N. megalops* e *N. couchii*.

Anche il macro-zooplancton gelatinoso, tra cui salpe e meduse, costituisce un elemento importante della rete trofica nella colonna d'acqua. Questa categoria assicura il transito del flusso organico verso i fondali attraverso la produzione del muco; inoltre hanno un ruolo estremamente importante nella catena alimentare, sono predati da numerosi pesci, mammiferi ed uccelli marini, alcuni di essi infatti effettuano migrazioni verticali nella colonna d'acqua, vivono vicino al fondale e risalgono in superficie seguendo le migrazioni delle loro prede. Altre specie restano bentoniche, questi rappresentano un anello importante nel trasporto di energia verso i livelli più profondi, non solo per i cetacei ma anche per le specie bentoniche necrofaghe.

## 3. IMPATTO CLIMATICO SUI MAMMIFERI MARINI PRESENTI NEL MAR MEDITERRANEO

### 3.1 SPECIE DI MAMMIFERI PRESENTI

I mammiferi marini si trovano negli ecosistemi marini di tutto il mondo. Sono un gruppo eterogeneo, con adattamenti fisici unici che consentono loro di prosperare nell'ambiente marino con temperature, profondità, pressione e oscurità estreme. Sono classificati in quattro diversi gruppi tassonomici: cetacei (balene, delfini e focene), pinnipedi (foche, leoni marini e trichechi), sirenidi (lamantini e dugonghi) e fissipedi marini (orsi polari e lontre marine).

Le specie permanenti presenti nel Santuario Pelagos, l'area marina protetta compresa nel territorio francese, monegasco e italiano, sono elencate nella *Figura 8*.

Specie presenti nel Santuario	
NOME COMUNE	NOME LATINO
Balenottera	<i>Balaenoptera physalus</i>
Capodoglio	<i>Physeter macrocephalus</i>
Zifio	<i>Ziphius cavirostris</i>
Globicefalo nero	<i>Globicephala melas</i>
Grampo	<i>Grampus griseus</i>
Tursiope	<i>Tursiops truncatus</i>
Delfino Comune	<i>Delphinus delphis</i>
Stenella	<i>Stenella coeruleoalba</i>

Figura 8- Elenco specie presenti nel Santuario Pelagos

La Stenella, *S. coeruleoalba*, è la specie più comune e presente ovunque nel Santuario dove i fondali sono superiori a 200 metri, soprattutto nella zona corso-liguro-provenzale. Questo delfino è una specie pelagica di circa 2 metri all'età adulta. Opportunista a causa del suo regime alimentare, si nutre di pesce, cefalopodi e di qualche crostaceo in proporzioni variabili.

Il Delfino comune, *D. delphis*, è una specie pelagica che raggiunge più di 2 metri in età adulta. Recentemente è diventato raro nella zona del Santuario. In genere vive a profondità minori di 1000 m. Si nutre di cefalopodi ma anche di crostacei e pesci. Il Tursiope, *T. truncatus*, è un delfino robusto, di circa 3,5 metri in età adulta. È presente intorno alla Corsica, nell'arcipelago toscano, tra la Corsica e la Sardegna e lungo le coste italiane meridionali a sud della Spezia. Questo delfino si alimenta essenzialmente di pesci e di qualche crostaceo e cefalopode.

Il Grampo, *G. griseus*, è una specie pelagica di circa 4 metri in età adulta e vive tra i 500 ed i 1500 m. È abbondante nella regione liguro-provenzale e tirrenica e si nutre preferibilmente di cefalopodi di piccola taglia, ma può cacciare anche altre specie di cefalopodi che si trovano in tutta la colonna d'acqua.

Il Globicefalo nero, *G. melas*, è una specie pelagica di circa 5-6 metri che si immerge fino agli 800 m. È una specie gregaria, si nutre esclusivamente di alcune specie di cefalopodi.

Lo Zifio, *Z. cavirostris*, è un odontocete di circa 6-7 metri, è raramente avvistato vicino alla costa, vive al largo della scarpata nel Mar Ligure e nel Mar Tirreno. Si immerge a volte a profondità di più di 1000 m. Si nutre solo di piccoli cefalopodi meso e batipelagici.

Il Capodoglio, *P. macrocephalus*, è il più grande degli odontoceti. L'adulto maschio misura 18 metri e può immergersi fino a 2500 m. È più frequente nel Mar Tirreno soprattutto nella zona meridionale.

La Balenottera, *B. physalus*, è una specie cosmopolita pelagica di circa 20 metri in età adulta ed è localizzata in genere a 1500 m di profondità. Nel Santuario, questa specie è presente a livello delle zone di upwelling caratterizzate da una forte concentrazione di zooplankton, soprattutto d'estate quando le popolazioni di *Meganyctiphanes norvegica* raggiungono picchi eccezionali. Gli studi genetici hanno dimostrato l'esistenza di una popolazione di balenottere che risiede solo nel Mediterraneo per tutto l'arco dell'anno e che sarebbe geneticamente distinta dalle balenottere presenti nel Nord Atlantico.

### **3.2 BALENOTTERA COMUNE E *Meganyctiphanes norvegica***

Le balenottere comuni si trovano in tutta la regione del Mediterraneo. Nonostante la loro ampia distribuzione in tutta la regione, tuttavia, i documenti pubblicati indicano che la loro presenza è irregolare. Considerando il bacino del Mediterraneo, il Bacino Ligure-Corsico-Provenzale/Golfo dei Leoni (Figura 9, Area B) è di gran lunga il più importante; i bacini Ovest, Tirreno, Adriatico e Ionio/Centro (Aree A, C, D, E) sembrano avere un significato intermedio. Infine, esse sembrano trovarsi

solo raramente nei bacini dell'Egeo e del Levante (Zone F e G) (Mammal Rev. 2003, Volume 33). Sebbene tale squilibrio geografico è in parte dovuto a indagini scientifiche più intense nella porzione nord-occidentale del Mediterraneo, la regione marina tra la Francia meridionale, l'Italia nord-occidentale, la Sardegna settentrionale e la circostante Corsica, è di particolare importanza per le balenottere comuni mediterranee.

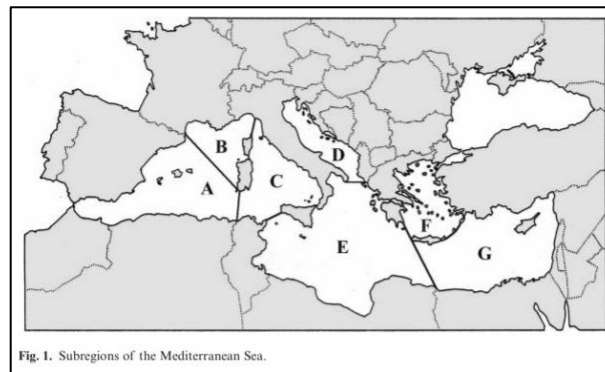


Figura 9 – Distribuzione *Balaenoptera physalus* (Mammal Rev. 2003, Volume 33)

Nella sotto-regione B, dove i rapporti di avvistamento sono abbondanti, *B. physalus* è al secondo posto dopo *S. coeruleoalba* nella frequenza di avvistamento (Notarbartolo di Sciara et al., 1993). L'abbondanza di *B. physalus* nell'area può essere spiegata dalla nota produttività delle acque offshore del Bacino Ligure-Corsico-Provenzale, dove sono presenti le condizioni per un'elevata produzione primaria, questa produttività sostiene una grande biomassa zooplanctonica, in particolare di Eufasiacei, e quindi garantisce la presenza della fonte principale di alimentazione delle balenottere comuni nel bacino.

*B. physalus* è un noto predatore di un ampio spettro di organismi marini, dai copepodi agli Eufasiacei, a piccoli pesci come l'aringa *C. harengus* e l'acciuga *E. encrasicolus*.

Diversi studi hanno evidenziato che per *B. physalus* del Nord Atlantico, il krill costituisce il cibo preferenziale e che sfruttano i pesci solo quando i piccoli crostacei non sono disponibili. Invece la conoscenza delle abitudini alimentari della specie nel Mediterraneo è parziale, essendo basata principalmente sull'ispezione di un piccolo campione di stomaci di balene spiaggiate e un'analisi fecale limitata solo all'area Ligure-Corsica-Provenzale. Comunque tali informazioni indicano *M. norvegica* come unica preda conosciuta in questa porzione del Mediterraneo.

Ci sono molti esempi di come questi cambiamenti climatici influiscano sull'ambiente marino. Secondo Greene & Pershing (2004), nel nord Atlantico gli effetti del riscaldamento globale sull'abbondanza di *C. finmarchicus*, un copepode, influenza fortemente i tassi di parto della balena franca (*E. glacialis*). È probabile che si verificherà una situazione simile nel Mediterraneo.

Come detto in precedenza, *M. norvegica*, costituisce l'unica riserva alimentare conosciuta delle balenottere comuni in questa regione, la sua diffusione è correlata

a specifici parametri fisici. Questi crostacei sono suscettibili all'aumento dell'SST, alla diminuzione del pH e ai cambiamenti nei modelli di circolazione del Mediterraneo, tutti fattori che avranno un impatto sulla demografia, sulla dispersione e sui loro tassi di sopravvivenza, infatti questa specie, essendo situata al limite settentrionale della sua tolleranza ecologica, non sarà in grado di spostarsi verso nord a causa della barriera terrestre fisica.

Secondo i dati raccolti da Einarsson (1945), nel nord Atlantico, l'intervallo di temperatura ottimale di *M. norvegica* è tra 2 e 15°C, con un alto tasso di mortalità quando si superano i 15°C. Questo limite termico è 18°C per la popolazione mediterranea (Fowler et al., 1971). Anche la variazione nella salinità marina danneggia questa specie, che ha una tolleranza limite di 20-24 ppm (Forward & Fyhn, 1983).

Considerando che, il riscaldamento della temperatura nell'Atlantico nord-orientale ha già portato alla migrazione di numerosi organismi marini verso alte latitudini, anche nel Mar Mediterraneo accadrà lo stesso fenomeno, ma nel caso di *M. norvegica* non sarà possibile spostarsi verso nord per la motivazione precedentemente descritta ed è probabile che arriverà a condividere il suo habitat con più specie termofile invasive in futuro, con il rischio di essere soppiantata, come è già accaduto per altre specie. Inoltre, organismi calcificanti tra cui alcuni fito- e zooplancton possono essere colpiti dall'acidificazione marina crescente, comportando un possibile disallineamento temporale tra *M. norvegica* e le fioriture di fitoplancton, la sua riserva di cibo, con potenziali conseguenze per tutta la rete trofica compresi i predatori.

La combustione di combustibili fossili e gli impatti che ne derivano rappresentano uno dei maggiori problemi ambientali. Nel Mar Mediterraneo, i cambiamenti nelle proprietà biochimiche e fisiche dell'acqua di mare derivanti dal riscaldamento possono alterare la biodiversità e la produttività marina, innescare disallineamenti della rete trofica e incrementare la diffusione di malattie, fioriture algali tossiche e la propagazione di specie termofile.

Le balene dal punto di vista ecologico sono una specie chiave per il funzionamento dell'ecosistema. Sono spesso predatori apicali, garantendo stabilità nella rete trofica. Inoltre migrando dalla superficie in profondità per ricercare nutrimento, svolgono un ruolo fondamentale nel trasporto di nutrienti tra questi habitat contribuendo alla produttività degli oceani.

Esse quindi fungono da sentinelle, tramite l'osservazione delle loro condizioni si può valutare lo stato di salute dei nostri mari e oceani.

L'osservazione diretta e le prove fotografiche suggeriscono che le balenottere comuni della popolazione nord-orientale del Nord Atlantico migrano ogni anno nel Mediterraneo, tuttavia, le prove genetiche suggeriscono che la popolazione residente non si mescola con queste balene migranti, rimanendo geneticamente



distinte. È possibile che questa popolazione sia stata isolata abbastanza a lungo da perdere la conoscenza delle rotte migratorie.

Se questo si rivelasse vero e se le specie di krill soccombessero al cambiamento climatico, potrebbero farlo anche le balenottere comuni del Mediterraneo.

### **3.3 VISIONE GENERALE DEGLI IMPATTI SU ALTRI MAMMIFERI MARINI**

Abbiamo visto quindi che il cambiamento nella distribuzione delle prede chiave è il principale fattore che definisce la dispersione geografica e la preferenza dell'habitat in cetacei. Il caso delle balenottere comuni non è isolato, esistono numerose evidenze dei cambiamenti alla struttura della rete alimentare marina su vasta scala. Sono stati rilevati livelli record di perdita di ghiaccio marino in Antartide, questo si traduce in una perdita di habitat e quindi una ridotta abbondanza di krill, con ripercussioni negative sulle specie che se ne nutrono, come le balene e varie specie di pinguini.

Quando il pH scende al di sotto del punto di saturazione per il carbonato di calcio e gli organismi possono avere difficoltà a secernere o mantenere le loro conchiglie e scheletri. Alcune proiezioni future indicano che la sottosaturazione dell'aragonite inizierà a verificarsi entro il 2050 nell'Oceano Meridionale ed entro lo stesso anno anche in tutto l'Artico ed entro il 2095, lo saranno l'Oceano Australe e parti del Pacifico settentrionale (Feely R.A., 2009).

Il pH in diminuzione può anche ridurre il tasso metabolico e l'attività di calamari epipelagici, fenomeno esacerbato dalle temperature più elevate. L'interazione della temperatura e il pH può comportare il collasso di questi calamari, con effetto a cascata sui capodogli che se ne nutrono.

L'aumento della temperatura marina influenza le espansioni verso i poli dell'areale di specie termofile e la contrazione dell'areale di specie di acque più fredde. Le specie possono rispondere direttamente all'aumento della temperatura, o indirettamente attraverso cambiamenti nel rapporto preda/predatore/specie concorrenti. Ad esempio, durante il 1982-1983 nel sud della California, il calamaro da cui i globicefali dipendevano hanno lasciato la zona, probabilmente a causa delle temperature dell'acqua più elevate, determinando la scomparsa anche dei globicefali (Hoffman JR. *et al.*, 2009).

I beluga (*D. leucas*) alle Svalbard continuano a utilizzare i fronti dei ghiacciai come aree di foraggiamento ma, a seguito della recente diminuzione del ghiaccio, hanno iniziato a spendere più tempo nei fiordi dello Spitsbergen occidentale durante l'estate e l'autunno (Vacquié-Garcia *et al.*, 2018). Questo suggerisce un cambiamento nella dieta, poiché iniziano a nutrirsi maggiormente di specie ittiche dell'Atlantico che stanno arrivando nei fiordi (Vacquié-Garcia, *et al.*, 2018). Questa flessibilità comportamentale può aiutare i beluga a adattarsi al cambiamento delle condizioni alle Svalbard.

Un altro caso del bacino Mediterraneo, nel mare Adriatico, si suggerisce che i cambiamenti climatici abbiano alterato la distribuzione delle principali prede dei delfini comuni e tursiopi. L'aumento, indotto dall'aumento delle temperature, dell'abbondanza di specie termofile, come la sardina tonda e la medusa, potrebbe aver causato il declino della popolazione dell'acciuga europea.

I cambiamenti nella disponibilità delle specie predate possono costringere i mammiferi marini a cambiare le loro strategie di alimentazione e dedicare più tempo per il foraggiamento energetico, con conseguenze drastiche sulla loro socialità, successo riproduttivo, salute e sistema immunitario. In particolar modo rappresenta una sfida per le popolazioni di mega fauna che vivono nei mari semi-chiusi e marginali come il Mediterraneo.

## **CONCLUSIONE**

Man mano che gli scienziati acquisiscono preziose informazioni sugli effetti del cambiamento climatico sull'oceano è diventato possibile prevedere la direzione di molte alterazioni all'interno di questo sistema complesso e dinamico. Ma è anche evidente quanto sia difficile definire un'immagine chiara; non c'è dubbio che le comunità marine cambieranno, ma non si è ancora in grado di valutare l'esatta portata dei rischi.

Nel dicembre 2015, si è tenuta la XXI Conferenza delle Parti (COP21) sul cambiamento climatico a Parigi: 195 paesi hanno firmato un accordo con il quale si impegnavano a ridurre le emissioni inquinanti in tutto il mondo. Questo accordo conteneva 4 impegni per gli stati che lo avevano sottoscritto: mantenere l'aumento di temperatura inferiore ai 2°C e compiere sforzi per mantenerlo entro 1,5°C, smettere di incrementare le emissioni di gas serra il prima possibile, controllare i progressi compiuti ogni cinque anni, tramite nuove conferenze, e versare 100 miliardi di dollari ogni anno ai paesi più poveri per aiutarli a sviluppare fonti di energia meno inquinanti.

Nel dicembre 2018, si è tenuta a Katowice in Polonia la COP24. Il limite di 2 gradi imposto dalla COP21 ormai non era ritenuto più sufficiente e per evitare ulteriori danni, nel 2018 hanno definito il mantenimento delle temperature inferiori ai 1,5 gradi e per fare ciò hanno accordato di diminuire del 45% le emissioni di CO<sub>2</sub> nell'aria entro il 2030, percentuale che deve salire al 100% entro il 2050.

Nel 2019, la COP25 è stata rinviata al 2020. Nel 2021 si è tenuta la COP26, definendo alcune linee guida da rispettare che ricordano quelle definite in precedenza: azzerare le emissioni nette a livello globale entro il 2050 e puntare a limitare l'aumento delle temperature a 1,5°C, adattarsi per la salvaguardia delle comunità e degli habitat naturali, mobilitare i finanziamenti per il clima entro 2023, e collaborare, solo lavorando tutti assieme si possono affrontare sfide della crisi climatica.

La questione più spinosa tra tutte era quella della neutralità carbonica, ossia gli impegni presi dai singoli Paesi a raggiungere l'obiettivo di emissioni nette zero. Tutti gli Stati si sono impegnati a rafforzare i propri obiettivi da qui al 2030 e a rivederli ogni anno, anziché ogni cinque. Ma nell'accordo finale gli impegni presi sono stati notevolmente ridimensionati; infatti, la promessa è passata dal "phase out" ossia l'eliminazione dell'uso del carbone, al "phase down" ossia un obiettivo di semplice riduzione. Non lascia ben sperare, in quanto limitare le temperature sotto i 1,5°C diventa sempre più un miraggio (Giusy Massaro, [www.i-com.it/en/2021/11/19/partita-cop26/](http://www.i-com.it/en/2021/11/19/partita-cop26/)).

Nell'ambito delle emissioni inquinanti, un altro impegno preso da oltre 100 Paesi è quello che vede la riduzione del 30% delle emissioni di metano entro il 2030. Ma sono rimasti fuori dall'accordo i tre maggiori emettitori di metano al mondo: Cina, Russia e India.

Secondo un'analisi della IEA (International Energy Agency) del 4 novembre 2021, se saranno rispettati i più recenti impegni sulla riduzione delle emissioni e le altre promesse fatte, si riuscirà a limitare l'aumento delle temperature globali a 1,8° centigradi rispetto ai livelli pre-industriali. Un bilancio non del tutto negativo se si considera l'accordo di Parigi siglato nel 2015 che aveva come obiettivo principale quello di mantenere l'aumento sotto i 2 gradi, ma è ritenuto comunque deludente rispetto alle aspettative per la COP26, in cui l'obiettivo fissato è di 1,5°.

Nel 2022 si terrà in Egitto la COP27.

L'entità degli impatti futuri sugli ecosistemi marini è fortemente dipendente dal futuro scenario delle emissioni (Gattuso *et al.*, 2015), in alcuni casi, potrebbe non esserci ritorno allo stato precedente. In generale, i cambiamenti legati all'ambiente fisico e chimico marino sono meglio documentati rispetto ai cambiamenti biologici. La nostra comprensione sta migliorando, ma sono ancora necessarie ulteriori ricerche per districare le complesse interazioni e i loro effetti sulla biodiversità.

Con la diminuzione del tempo per affrontare la crisi climatica, dobbiamo ridurre l'inquinamento da gas serra in tutti i settori, dall'elettricità, dai trasporti all'edilizia e all'agricoltura. In questo contesto, è importante ricordare che l'oceano non è solo una vittima del cambiamento climatico, ma è anche una parte fondamentale della soluzione.

Quindi, seppur gli effetti a lungo termine siano solo delle proiezioni, abbiamo conoscenze sufficienti sullo stato dell'ambiente per dimostrare che il nostro modo di vivere non è compatibile con il benessere degli ecosistemi. Il Mediterraneo può essere identificato come un oceano miniaturizzato e sta mostrando in modo piuttosto drammatico i risultati delle nostre pressioni dirette e indirette sugli ecosistemi. La situazione sempre più critica sottolinea la necessità emergente di più regolamenti e politiche integrate per la protezione della biodiversità marina, sperando che ciò avvenga nella maniera più veloce e adeguata possibile.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Albouy, C., Delattre, V., Donati, G. *et al.* Global vulnerability of marine mammals to global warming. *Sci Rep* 10, 548 (2020). doi:10.1038/s41598-019-57280-3

BIOACID. “Biological impacts of ocean acidification.”  
<https://www.bioacid.de/reaching-the-paris-climate-target/?lang=en> (ultimo accesso: dicembre 2021)

Blunden, J. and T. Boyer, Eds., 2020: “State of the Climate in 2020”. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102 (8), Si–S475, doi:10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1.

Bowen, William. (1997). Role of marine mammals in aquatic ecosystems. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER. 158. 267-274. 10.3354/meps158267.

CMEMS, <https://marine.copernicus.eu> (ultimo accesso gennaio 2022)

D’Alelio, D., Rampone, S., Cusano, L.M. *et al.* Machine learning identifies a strong association between warming and reduced primary productivity in an oligotrophic ocean gyre. *Sci Rep* 10, 3287 (2020). doi:10.1038/s41598-020-59989-y

Danovaro R., (2013). *Biologia marina-Biodiversità e funzionamento degli ecosistemi marini*. CittàStudi edizioni, Novara.

Data produced by NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI) (formerly the National Oceanographic Data Center (NODC)).

Davidson AD, Boyer AG, Kim H, Pompa-Mansilla S, Hamilton MJ, Costa DP, Ceballos G, Brown JH. Drivers and hotspots of extinction risk in marine mammals. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2012 Feb 28;109(9):3395-400. doi:10.1073/pnas.1121469109.

Einarsson H. (1945) Euphausiacea. 1. North Atlantic species. (citato da: Gambaiani, D., Mayol, P., Isaac, S., & Simmonds, M. (2009). Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans.)

European Environment Agency, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 : an indicator-based report, Publications Office, 2017

European Environment Agency, Reker, J., Carvalho Belchior, C., Christiansen, T., Marine messages : our seas, our future : moving towards a new understanding, Publications Office, 2014, doi:10.2800/1091

Feely, R.A., S.C. Doney, and S.R. Cooley. 2009. Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO<sub>2</sub> world. *Oceanography* 22(4):36–47, doi:10.5670/oceanog.2009.95.

Forward, Richard B. and Hans Jørgen Fyhn. "Osmotic regulation of the krill *Meganyctiphanes norvegica*." *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* 74 (1983): 301-305.

Fowler, S.W.; Small, L.F.; Keckes, S. (1971). Effects of temperature and size on molting of euphausiid crustaceans. *Marine Biology* 11(1): 45-51. doi: 10.1007/bf00348020

Gambaiani, D., Mayol, P., Isaac, S., & Simmonds, M. (2009). Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89(1), 179-201. doi:10.1017/S0025315408002476

Gattuso, J. P., Magnan, A., Bille, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Poertner, H. O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., Sumaila, U. R., Treyer, S. and Turley, C. (2015): Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO2 emissions scenarios, *Science*, 349 (6243), aac4722-1-aac4722-10. doi:10.1126/science.aac4722

Greene, C.H. and Pershing, A.J. (2004), Climate and the conservation biology of North Atlantic right whales: the right whale at the wrong time?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 29-34, doi:10.1890/1540-9295(2004)

Greenpeace in collaborazione con il DiSTAV dell'Università degli Studi di Genova. (2019). Operazione mare caldo - Il cambiamento climatico minaccia i nostri mari.

Grose SO, Pendleton L, Leathers A, Cornish A and Waitai S (2020) "Climate Change Will Re-draw the Map for Marine Megafauna and the People Who Depend on Them", doi:10.3389/fmars.2020.00547

Hobday, Alistair & Arrizabalaga, Haritz & Evans, Karen & Nicol, Simon & Young, Jock & Weng, Kevin. (2015). Impacts of climate change on marine top predators: Advances and future challenges. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 113, doi:10.1016/j.dsr2.2015.01.013.

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In Press.

Hoffman, JR, Fonseca, A, and C Drews (eds). 2009. *Cetaceans and Other Marine Biodiversity of the Eastern Tropical Pacific: Options for Adapting to Climate Change*. Report from a workshop held February 9-11, 2009.

- Icom, “Come ci siamo giocati la partita della Cop26”, [www.icom.it/en/2021/11/19/partita-cop26/](http://www.icom.it/en/2021/11/19/partita-cop26/) (ultimo accesso gennaio 2022)
- Kaschner K, Tittensor DP, Ready J, Gerrodette T, Worm B (2011) Current and Future Patterns of Global Marine Mammal Biodiversity. *PLoS ONE* 6(5): e19653. doi:10.1371/journal.pone.0019653
- Khatiwala, S., Tanhua, T., Mikaloff Fletcher, S., Gerber, M., Doney, S. C., Graven, H. D., Gruber, N., McKinley, G. A., Murata, A., Ríos, A. F., and Sabine, C. L.: Global ocean storage of anthropogenic carbon, *Biogeosciences*, 10, 2169–2191, doi:10.5194/bg-10-2169-2013, 2013.
- MacGarvin, M. & Simmonds, M.P. (1996) Whales and climate change. In *The Conservation of Whales and Dolphins – Science and Practice* (eds M.P. Simmonds & J.D. Hutchinson), pp. 321–332. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for September 2021, published online October 2021, retrieved on February 17, 2022 <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202109>.
- Notarbartolo Di Sciara G. (2003). The fin whale *Balaenoptera physalus* (L. 1758) in the Mediterranean Sea, doi:10.1046/j.1365-2907.2003.00005.x
- Nunny, Laetitia & Simmonds, Mark. (2019). Climate Change and Cetaceans - an update.
- Ocean Conservancy. “Confronting Climate Change” <https://oceanconservancy.org/climate> (ultimo accesso: gennaio 2022)
- O’Connor MI, Piehler MF, Leech DM, Anton A, Bruno JF (2009) Warming and Resource Availability Shift Food Web Structure and Metabolism. *PLoS Biol* 7(8): e1000178. doi:10.1371/journal.pbio.1000178
- Pace, Daniela & Tizzi, Raffaella & Mussi, Barbara. (2015). Cetaceans Value and Conservation in the Mediterranean Sea. *Journal of Biodiversity & Endangered Species*. S1, doi:10.4172/2332-2543-S1-004.
- Piano di Gestione del Santuario per i Mammiferi Marini nel Mediterraneo “Pelagos”. Redatto dalla Dott.ssa Virginie Tilot, traduzione italiana Mikaela Eymes Ferraro (2004)
- Sub-chapter 2.1.1 Climate change impact on planktonic production in the Mediterranean Sea Fabio Benedetti UPMC, CNRS, UMR LOV, France
- Simmonds, M., & Elliott, W. (2009). Climate change and cetaceans: Concerns and recent developments. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89(1), 203-210. doi:10.1017/S0025315408003196
- Sue E. Moore, Marine mammals as ecosystem sentinels, *Journal of Mammalogy*, 89(3):534–540, 2008

Ullah H, Nagelkerken I, Goldenberg SU, Fordham DA (2018) Climate change could drive marine food web collapse through altered trophic flows and cyanobacterial proliferation. *PLoS Biol* 16(1): e2003446. doi:10.1371/journal.pbio.2003446

Vacquié-Garcia, Jade & Lydersen, Christian & Ims, Rolf & Kovacs, Kit. (2018). Vacquié-Garcia et al. 2018. White whale movements. *Movement Ecology*. 6, doi:10.1186/s40462-018-0139-z.