



Rendiconti

Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL

*Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*

136° (2018), Vol. XLII, Parte II, Tomo I, pp. 67-75

FERDINANDO BOERO\*

## Dagli oceani all'oceano globale

**Abstract** – The polar cold engines are the motors of the great ocean conveyor that connects all oceans. The Mediterranean Sea is a miniaturized ocean, since three cold engines form, near the surface, the future deep sea waters of the basin. All oceanic waters are connected and form a single global ocean, but they acquire different physical, chemical and geological features in the various geographic regions, determining particular species compositions in the marine biological communities. Marine ecosystems are the result of interactions among species and the physical environment. Connectivity links different portions of the marine environment, both benthic and pelagic, so as to make ecosystem functioning possible through the closure of biological cycles (intraspecific fluxes), the trophic interactions between primary and secondary producers, and decomposers (interspecific fluxes) and the biogeochemical cycles (extraspecific fluxes). The spaces where conditions are functionally homogenous thanks to high connectivity identify the cells of ecosystem functioning: the spatial units of management and conservation. Their definition requires the synthesis of sciences that range from physics to chemistry, geology, biology and ecology. These sciences, so far, have been carried out in a reductionistic fashion, with the creation of sharp compartments dividing the various branches of knowledge (and their sub-branches). The most important challenge for marine science is to evolve from reductionistic to holistic approaches, so as to produce a unitary vision of the oceanic system that will allow for their management and protection based on solid knowledge.

**Keywords:** Marine ecology, Biodiversity and ecosystem functioning, Connectivity, Holistic approach.

**Riassunto** – Il grande nastro trasportatore oceanico, generato dai motori freddi polari, connette tutti gli oceani. Il Mediterraneo è un oceano in miniatura, dove i motori freddi formano in prossimità della superficie le future acque profonde. Tutte le acque oceaniche sono connesse tra loro, a formare l'oceano globale, ma esse assumono diverse caratteristiche chimiche, fisiche e geologiche nelle varie regioni geografiche, determinando comunità di particolari gruppi di specie nelle diverse regioni eco-geografiche. Gli ecosistemi marini sono il risultato delle interazioni tra le specie e l'ambiente fisico. La connettività fa sì che diverse porzioni dell'ambiente

\* Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Biologia; CNR-IAS.  
E.mail: [ferdinando.boero@unina.it](mailto:ferdinando.boero@unina.it)

marino, costituite da habitat sia bentonici sia pelagici, siano collegate più o meno strettamente tra loro e determinino il funzionamento degli ecosistemi attraverso la chiusura di cicli biologici (flussi intraspecifici), interazioni trofiche tra produttori primari, secondari e decompositori (flussi interspecifici) e cicli biogeochimici (flussi extraspecifici). Gli spazi dove si instaurano condizioni funzionalmente omogenee grazie ad alta connettività identificano le celle di funzionamento ecosistemico: le unità spaziali dove mettere in atto processi di gestione e conservazione. La definizione delle celle di funzionamento ecosistemico richiede la sintesi di studi fisici, chimici, geologici, biologici ed ecologici sino ad ora perseguiti in modo riduzionistico, con estrema compartimentazione delle varie branche della scienza (e delle loro sotto-branche). La sfida più importante delle scienze marine consiste nell'evoluzione degli approcci da riduzionistici a olistici per, finalmente, fornire una visione unitaria del sistema oceano e permettere una gestione e una protezione dell'ambiente marino fondata su solide basi conoscitive.

### *Pianeta oceano*

Gli oceani caratterizzano il pianeta terra, ricoprendone il 71% della superficie. L'ambiente marino, a differenza di quello terrestre, è tridimensionale, visto che la profondità media degli oceani è di 3.500 m: a terra gli habitat si misurano con superfici, in mare devono essere misurati con volumi.

Inoltre, mentre a terra gli habitat sono caratterizzati prevalentemente dalla vegetazione, in mare, e soprattutto nella colonna d'acqua, i produttori primari non formano «paesaggio» in quanto hanno dimensioni microscopiche: i principali produttori primari, gli organismi che ridanno vita alla materia, sono prima di tutto organismi unicellulari: il fitoplancton. Le comunità microbiche, incluse quelle batteriche, hanno tassi di rinnovamento velocissimi e la quarta dimensione, il tempo, ha un ruolo molto più importante che a terra, dove le foreste di grandi vegetali sono spesso una costante che può perdurare per secoli o addirittura millenni.

Se i vari continenti sono separati da oceani, questi, a differenza delle terre emerse, sono uniti in un unico oceano globale da un «grande nastro trasportatore oceanico» [1].

Il freddo è il motore che mette in moto il nastro nei siti di formazione di acque profonde: i motori freddi (Fig. 1). Ai poli l'acqua che arriva con correnti superficiali calde (come la Corrente del Golfo) gela e il sale in essa contenuto rimane al di sotto del ghiaccio galleggiante: l'acqua che rimane sotto al ghiaccio aumenta di densità grazie alla bassa temperatura e all'alta salinità, e questo ne causa l'affondamento, con la formazione di correnti profonde che attraversano i vari oceani.

La densa corrente generata al polo Nord scende nelle profondità dell'Atlantico fino a raggiungere il continente antartico, dove il congelamento dell'acqua superficiale genera altre acque che scenderanno in profondità. La corrente circumpolare profonda sale lungo l'Oceano indiano da una parte, e il Pacifico dall'altra, e torna indietro come correnti superficiali che formano la corrente circumpolare superficiale che, a sua volta, si dirama in Atlantico, raggiungendo il Polo Nord attraverso

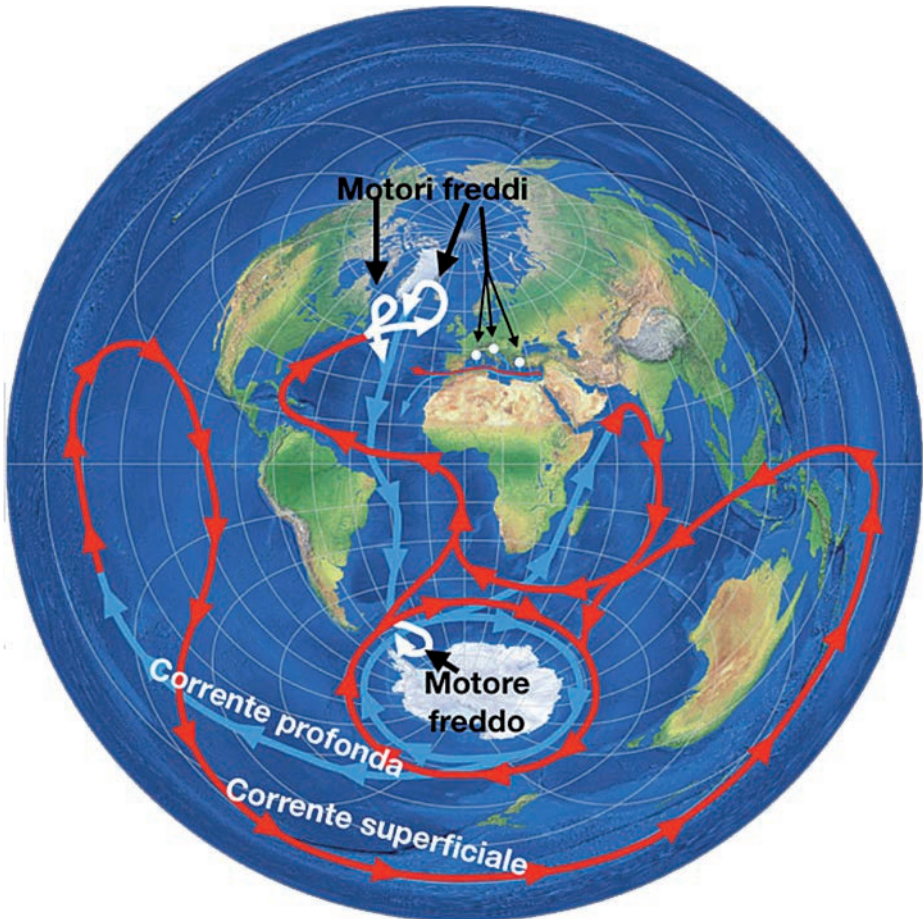


Fig. 1. Il grande nastro trasportatore oceanico.

i tropici, dove assorbe calore che rilascerà a latitudini più alte. Le stime dicono che una molecola d'acqua impieghi circa mille anni per fare il giro del mondo.

#### *Il Mediterraneo è un oceano in miniatura*

La fig. 1 mostra che, oltre ai poli, i siti superficiali dove si formano acque profonde, i motori freddi, sono presenti anche in Mediterraneo, dove le correnti giocano ruoli cruciali per la vita marina [2]. Le acque del Mediterraneo sono soggette ad evaporazione non compensata dagli apporti di acqua dolce da parte dei fiumi. Questo fa sì che la salinità del Mediterraneo sia superiore rispetto a quella dell'Atlantico. Questa differenza di salinità richiama acqua atlantica attraverso lo Stretto di Gibil-

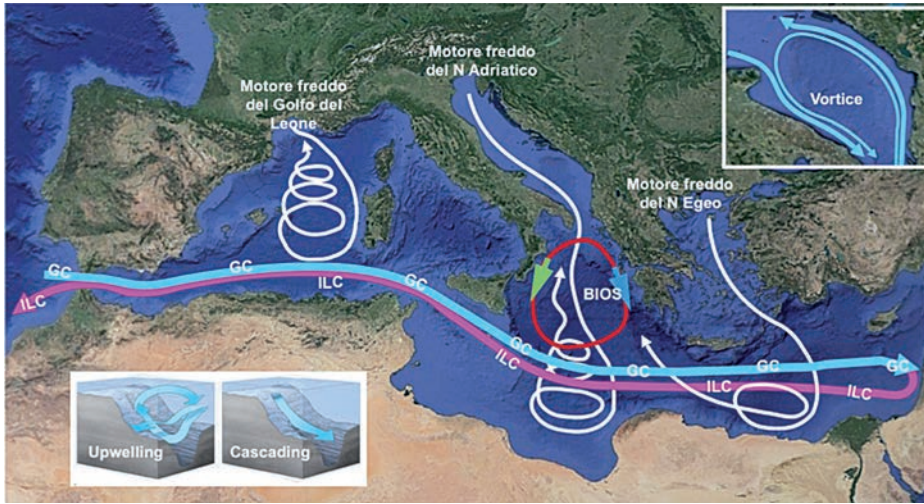


Fig. 2. La circolazione del Mediterraneo (vedi testo).

terra: la Corrente di Gibilterra (GC: Gibraltar Current in Fig. 2). Questa arriva in Mediterraneo Orientale e torna indietro come Corrente Intermedia Levantina (ILC: Intermediate Levantine Current in Fig. 2). Le due correnti, una superficiale in entrata e una profonda in uscita, ricambiano l'acqua del Mediterraneo nei primi 500 m di profondità. La profondità media del Mediterraneo, però, è di 1500 m e, di conseguenza, le acque profonde non sono rinnovate dalle correnti che entrano ed escono da Gibilterra.

In estate il Mediterraneo è stratificato, le acque sono più calde in superficie, a causa dell'insolazione, e più fredde in profondità. In inverno la stratificazione viene meno e si instaurano condizioni di omotermia: la temperatura dell'acqua è identica dalla superficie al fondo. In corrispondenza di tre motori freddi (Fig. 2), però, l'acqua si raffredda ulteriormente a causa di venti freddi, e diventa più densa, affondando attraverso i canyon sottomarini (Cascading, in Fig. 2). Le correnti discendenti causate dai motori freddi portano acqua superficiale, ricca di ossigeno, nelle profondità del Mediterraneo e, di conseguenza, generano correnti ascensionali che rimescolano i bacini occidentale e orientale. Senza i motori freddi, le acque profonde del Mediterraneo diventerebbero anossiche, cioè prive di ossigeno. Le correnti discendenti generate dai motori freddi, quindi, sono di vitale importanza per gli organismi che vivono al di sotto dello strato rinnovato dalle correnti in entrata e uscita da Gibilterra. Il rinnovamento può avvenire anche grazie a correnti ascendenti (Upwelling in Fig. 2) generate dai canyon sottomarini. L'intreccio delle correnti all'interno del bacino genera vortici (Fig. 2) che, di solito, girano o in senso orario o in senso antiorario. Il Bimodal Oscillating System (BIOS in Fig. 2) fa eccezione in quanto il verso «oscilla» tra orario e antiorario, regolando gli scambi tra Adriatico e Ionio [3].

*La connettività tra popolazioni e habitat*

Anche se tutti gli oceani sono connessi tra loro da grandi schemi di circolazione, dal grande nastro trasportatore oceanico alla replica miniaturizzata del Mediterraneo, le varie parti dell'oceano globale, così come i vari mari del Mediterraneo, assumono peculiari caratteristiche locali [4, 5], dovute a connessioni più intense, che definiscono particolari condizioni di funzionamento ecosistemico.

Le correnti marine connettono le varie porzioni del volume oceanico, compresa l'area del fondo. Gli organismi si muovono nella colonna d'acqua oppure, se vivono sul fondo, si nutrono di sostanze e altri organismi trasportati dalle correnti che mettono in movimento la colonna d'acqua. In teoria, ogni porzione oceanica è collegata con ogni altra porzione ma, evidentemente, questo non porta a una distribuzione omogenea delle specie e degli ecosistemi: il grande ecosistema marino globale è un insieme di ecosistemi che funzionano in modo «compatto» al proprio interno, pur essendo in diretto o indiretto collegamento con il resto dell'oceano globale.

Se consideriamo le specie che conosciamo meglio, cioè quelle che vivono nelle prime centinaia di metri di profondità, è evidente che le loro distribuzioni non sono uniformi. Le condizioni abiotiche (soprattutto luce, temperatura e salinità) definiscono le condizioni di esistenza basilari di ogni specie, e ad esse si associano le interazioni con il substrato e le condizioni biotiche definite dai rapporti tra le specie. Questa rete di interazioni definisce la struttura delle comunità che colonizzano le varie porzioni dell'oceano globale in termini di composizione in specie e di dimensioni delle popolazioni di ogni specie. I rapporti tra comunità di specie e condizioni chimico-fisiche determinano sistemi ecologici: gli ecosistemi. Attraverso le correnti che mettono in moto l'ambiente acquatico, gli organismi ottengono risorse e si riproducono, interagendo tra loro. Le correnti connettono in modo più o meno stretto le varie parti dell'ambiente marino e rendono possibili le interazioni tra le specie. La connettività è la possibilità che diverse porzioni di ambiente si scambino «informazioni» sotto forma di propaguli (le varie forme di propagazione tra le specie: gameti, larve, stadi giovanili, adulti, frammenti) e di «nutrimento» (dalle sostanze chimiche necessarie alla produzione primaria, come nitrati e fosfati, alle prede che rendono possibile la produzione secondaria in tutte le sue declinazioni all'interno delle reti trofiche). La connettività non è uguale per tutte le specie e per tutti i processi. La vaglità di ogni specie misura la sua propensione a passare da una porzione di ambiente ad un altro. Non basta che una corrente metta in comunicazione diverse porzioni di ambiente perché queste siano colonizzate da identici contingenti di specie: i vari siti devono offrire condizioni biotiche e abiotiche idonee alla persistenza delle specie che dovessero raggiungerli con i loro propaguli trasportati dalle correnti. Ogni specie colonizza determinati tipi di habitat: alcune possono essere molto specialistiche, come le specie che si insediano solo sulle foglie delle fanerogame marine, mentre altre sono più generaliste e possono colonizzare ampie gamme di habitat. Il concetto di habitat è spesso associato a comunità che abitano il fondo marino, in analogia con quanto avviene negli ambienti terrestri. In mare, però, la colonna d'ac-



di habitat. L'insieme di correnti orizzontali e verticali, e le loro interazioni con la costa e il fondo, costituisce gli habitat e gli ecosistemi marini, con un reticolo di connessioni e relazioni che porta alla determinazione di particolari schemi di distribuzione delle comunità biotiche a seguito di processi ecosistemici.

### *Le celle di funzionamento ecosistemico*

Gli spazi marini caratterizzati da intense connessioni riproduttive (trasporto di propaguli) e trofiche (trasporto di nutrienti) definiscono le celle di funzionamento ecosistemico (CFE) e costituiscono unità elementari di gestione e protezione dell'ambiente marino [3].

La definizione delle celle di funzionamento ecosistemico prevede conoscenze geologiche (caratteristiche del fondo), idrologiche (correnti e biogeochimica), biologiche (composizione della biodiversità e cicli biologici), ecologiche (rapporti tra le specie). Le CFE possono avere diverse estensioni a seconda della profondità, e i processi che le determinano possono avere andamenti fortemente stagionali.

La connettività è la principale misura che definisce una cella di funzionamento ecosistemico e si realizza attraverso flussi (Fig. 4) che hanno diverse estensioni spaziali e temporali [4].

I cicli biologici rappresentano i flussi intraspecifici e includono tutti gli stadi di sviluppo che rappresentano una specie. Una medusa, ad esempio, in alcuni momenti

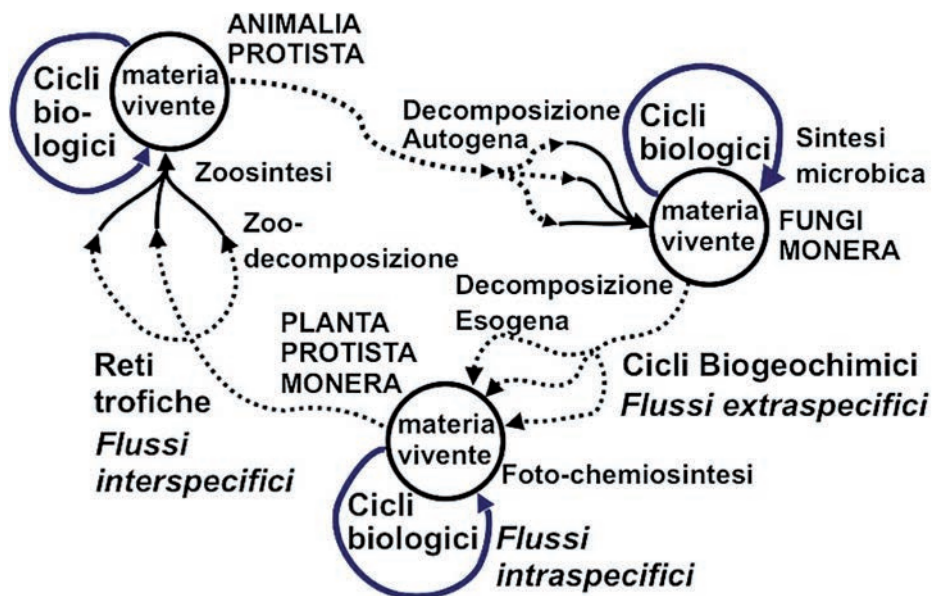


Fig. 4. Il funzionamento di un ecosistema come una serie di flussi.

del suo ciclo è una colonia di polipi attaccata al substrato, per diventare poi una piccola medusa planctonica, e poi una medusa giovanile e infine una medusa adulta, per poi dare origine a una piccola larva (la planula) che da planctonica diventerà bentonica, per dare origine a una nuova colonia di polipi. Un tonno inizia la sua vita come un piccolo uovo pelagico, e poi una larva, uno stadio giovanile, un piccolo adulto fino a un grande adulto, passando dal plancton al necton, e assumendo ruoli trofici differenti nel corso della propria esistenza, essendo anche esposto a diverse pressioni da parte dell'ambiente fisico e di possibili competitori e predatori.

Le reti trofiche si realizzano attraverso flussi di materia che vanno dalle specie preda alle specie predatore (flussi interspecifici). Gli animali ingeriscono le prede, le decompongono all'interno dei loro apparati digerenti (zoodecomposizione) e poi le ricompongono per costruire i propri corpi (zoosintesi) e per farli funzionare. I decompositori decompongono anch'essi le loro prede per costruire i propri corpi (decomposizione autogena) e, così facendo, mineralizzano parte delle sostanze che utilizzano, dando luogo alla decomposizione esogena, liberando nutrienti che entrano nei cicli biogeochimici. In questo modo la materia «esce» dall'organizzazione vivente e viene ridotta alle sue componenti essenziali, dando luogo ai cicli biogeochimici (flussi extraspecifici). Con la fotosintesi o con la chemiosintesi i produttori primari, autotrofi, ridanno vita alla materia.

La definizione spaziale di questi flussi permette di identificare i volumi all'interno dei quali le funzioni ecosistemiche avvengono, e sono questi volumi a costituire le CEF, le unità di gestione e conservazione su cui agire per mitigare l'impatto delle nostre attività sul resto della natura.

### *Conclusioni*

I vari aspetti presi in considerazione nella Fig. 4 sono studiati da discipline diverse che raramente interagiscono. I vari «pezzi» del rompicapo sono stati realizzati negli ultimi decenni grazie a un progresso tecnologico prima impensabile. Alcune branche delle scienze marine, dalla fisica alla geologia alla biogeochimica, sono avanzate in modo prodigioso mentre non si può ancora dire altrettanto della biologia e dell'ecologia che, ancora, restano frammentate e in gran parte incomplete. La sfida del futuro consisterà nel colmare il divario tra le discipline, anche con l'invenzione di nuove tecnologie, e di mettere assieme i vari aspetti per poter finalmente realizzare la sostenibilità [7] in modo coerente. La comunità scientifica ancora non è pronta per questo cambio di paradigma, essendo composta da un insieme di scienziati riduzionisti che oramai hanno sviluppato linguaggi differenti che aumentano l'incomunicabilità tra i diversi attori [6].

Un ruolo delle accademie scientifiche, in futuro, dovrà essere proprio questo: garantire il dialogo tra le varie scienze in vista del passaggio dall'analisi alla sintesi.



### *Ringraziamenti*

Questo lavoro è stato presentato all'incontro di studio «Come affrontare la complessità: gli ecosistemi marini. Verso approcci olistici, integrati, ecosistemici» organizzato dall'Accademia Nazionale della Scienze detta dei XL. Un particolare ringraziamento alla Presidente Emilia Chiancone per aver promosso l'incontro con impagabile entusiasmo.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Boero F., F. Fogliani, S. Frascchetti, P. Goriup, E. Machpherson, S. Planes, T. Soukissian, CoCoNet Consortium, 2016. CoCoNet: towards coast to coast networks of Marine Protected Areas (from the shore to the high and deep sea), coupled with sea-based wind energy potential. *SCI-RES.IT*, 6 (supplement), 1-95.
- [2] Boero F., E. Bonsdorff, 2007. A conceptual framework for marine biodiversity and ecosystem functioning. *Marine Ecology-An evolutionary perspective*, 28 (Suppl. 1), 134-145.
- [3] Broecker W.S., 1991. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4 (5), 79-89.
- [3] Civitarese G., M. Gačić, M. Lipizer, G.L. Eusebi Borzelli, 2010. On the impact of the Bimodal Oscillating System (BiOS) on the biogeochemistry and biology of the Adriatic and Ionian Seas (Eastern Mediterranean). *Biogeosciences*, 7, 3987-3997.
- [4] Danovaro R., F. Boero, 2019. Italian Seas. In: *World Seas: an Environmental evaluation, Second Edition, Volume One: Europe, The Americas and West Africa* (C. Sheppard, ed.) Elsevier Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 283-306.
- [5] Longhurst A.R., 2010. *Ecological geography of the seas* (2nd Edition). Elsevier Academic Press, Burlington, USA, 560 pp.
- [6] Plavén-Sigra P., G.J. Matheson, B.C. Schiffler, W.H. Thompson, 2017. The readability of scientific texts is decreasing over time. *eLife* 2017, 886, e27725.
- [7] Thiede J., D. Aksnes, U. Bathmann, M. Betti, F. Boero, G. Boxshall, P. Cury, M. Dowell, R. Emmerson, M. Estrada, M. Fine, A. Grigelis, P. Herman, G. Herndl, J. Kuparinen, J.T. Martinsohn, O. Prášil, R. Serrão Santos, T. Soomere, C. Synolakis, 2016. *Marine Sustainability in an age of changing oceans and seas. EASAC policy report 28*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 52 pp. <http://www.interacademies.net/File.aspx?id=29455>