

LA LIGURIA E IL MARE

Accademia Ligure di Scienze e Lettere - Palazzo Ducale
Genova, ottobre - novembre 2025



Con il patrocinio di



**REGIONE
LIGURIA**



COMUNE DI GENOVA



Camera di Commercio
Genova

Genova
Palazzo
Ducale



MSCFOUNDATION



Con il contributo di



**MINISTERO
DELLA
CULTURA**

fondazione
CARIGE



PROGRAMMA DEL CONVEGNO

Sala Conferenze dell'Accademia

2 ottobre 2025

Moderatore: **Mario Pestarino** – Presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Paolo Guidetti – Genoa Marine Centre, Stazione Zoologica di Napoli (SZN)

Andrea Zanini – Accademico, Università di Genova

Dal presente al passato per pianificare il futuro: la piccola pesca e la sua sostenibilità ambientale, socio-culturale ed economica

9 ottobre 2025

Moderatore: **Mario Pestarino** – Presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Giorgio Bavestrello – Accademico, Università di Genova

Monica Montefalcone – Università di Genova

Impatti antropici e riscaldamento globale: effetti sulla biodiversità del Mar Ligure

16 ottobre 2025

Moderatore: **Mario Pestarino** – Presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Carlo Nike Bianchi – Accademico

Carla Morri – Accademica

Il Mar Ligure che cambia 1. Il riscaldamento delle acque e gli ecosistemi costieri

Marzia Bo – Accademica, Università di Genova

Il Mar Ligure che cambia 2. Le pressioni antropiche e gli ecosistemi profondi

27 ottobre 2025

Moderatore: **Mario Pestarino** – Presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Antonio Di Natale – Segretario Generale, Fondazione Acquario di Genova

Tomaso Gaggero – Università di Genova

Le nuove sfide del rumore antropico sottomarino e gli effetti sulle specie pelagiche

Simona Candiani – Accademica, Università di Genova

Valutazione dell'impatto del rumore marittimo su invertebrati marini di rilevanza ecologica

30 ottobre 2025

Moderatrice: **Adriana Saccone** – Presidente della Classe di Scienze dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Emanuele Magi – Accademico, Università di Genova

Paola Rivaro – Accademica, Università di Genova

Paolo Povero – Università di Genova

Monitoraggio ambientale marino, un nuovo paradigma: micro-contaminanti tradizionali ed emergenti e innovazioni tecnologiche avanzate per la raccolta e l'analisi dei dati

6 novembre 2025

Moderatrice: **Maria Stella Rollandi** – Presidente della Classe di Lettere dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Claudio Ferrari – Accademico, Università di Genova

Lorenzo Schiano di Pepe – Università di Genova

Economie portuali: sinergie e difformità in un quadro normativo in evoluzione

11 novembre 2025

Salone del Bergamasco

Camera di Commercio di Genova

Tavola rotonda

La Liguria e il Mare: biodiversità, cambiamento climatico e sostenibilità

Moderatrice: **Dott.ssa Anna Livigni** – Telenord

Accademia Ligure di Scienze e Lettere, Presidente, **Prof. Mario Pestarino**

Camera di Commercio, Consigliere Camerale, **Dott. Paolo Pessina**

Comune di Genova, Assessora all'Ambiente, **Dott.ssa Silvia Pericu**

Università di Genova, Centro del Mare, **Prof. Marco Giovine**

Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale, Presidente, **Avv. Matteo Paroli**

Fondazione CARIGE, Consigliere d'Amministrazione, **Dott. Roberto Timossi**

Fondazione MSC, Direttore Esecutivo, **Dott.ssa Daniela Picco**

Istituto Idrografico della Marina, Direttore, **Contrammiraglio Fabrizio Orengo**

Stazione Zoologica Anton Dohrn, Chair, **Prof. Ferdinando Boero**

Parco Nazionale delle Cinque Terre, Presidente, **Dott. Lorenzo Viviani**

MARIO PESTARINO

Prefazione

L'Accademia Ligure di Scienze e Lettere, ritenendo i temi della sostenibilità ambientale e del cambiamento climatico fondamentali per comprendere cosa succede nell'ambiente naturale e urbano, ha organizzato nel 2022 e nel 2023 due *Seminari sulla Transizione Energetica ed Ecologica*, e nel 2024 un *Forum sul Cambiamento Climatico*. Quest'anno abbiamo voluto focalizzare la nostra attenzione sull'ambiente marino e sul mar Ligure in particolare, organizzando un Convegno dal titolo *La Liguria e il Mare*, articolato in sei sessioni nelle quali si sono alternati quali relatori biologi ed ecologi marini, chimici ambientali, ingegneri navali, economisti e giuristi. Il Convegno si è concluso con una Tavola rotonda alla quale sono stati invitati i rappresentanti di istituzioni liguri e nazionali, pubbliche e private, dell'Autorità portuale, degli enti di ricerca e delle strutture deputate a gestire aree marine protette.

La superficie totale degli oceani è di circa 361 milioni di chilometri quadrati. Essi coprono approssimativamente il 71% della superficie terrestre del pianeta, mentre il restante 29% circa è costituito da terre emerse. Credo sia noto a tutti che nell'oceano primordiale, diversi milioni di anni fa, quando non esistevano terre emerse, si sono formate le molecole essenziali che hanno permesso la nascita della vita. Gli organismi viventi si sono evoluti e diversificati, e oggi i loro discendenti si

* Presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere
presidenza@accademialigurediscienzelettere.it

trovano ad affrontare una sfida importante causata dai mutamenti che colpiscono negativamente tutti gli ecosistemi. Tutto questo è stato ed è opera di una singola specie, quella umana, le cui attività impattano in maniera profonda e continuativa sull'ambiente marino e non solo, determinando alterazioni significative agli ecosistemi e alla biodiversità. Tra i principali effetti antropici troviamo diversi tipi di inquinamento chimico, fisico, acustico e termico.

I cambiamenti climatici determinano il riscaldamento dei mari e la loro acidificazione nonché l'aumento del livello del mare. Lo sfruttamento delle risorse marine e la distruzione di habitat vitali come le praterie di *Posidonia* e le zone umide costiere determinano una significativa riduzione della biodiversità marina.

Questi effetti combinati modificano gli equilibri biologici, geologici e geofisici creatisi in milioni di anni nel nostro pianeta e mettono a serio rischio la salute degli oceani e la loro capacità di fornire servizi ecosistemici essenziali per la vita sul pianeta.

Tocca a noi operare nella maniera migliore possibile e con tempestività per evitare il degrado continuo del nostro ambiente naturale.

La Terra è la nostra unica casa e credo che lo rimarrà ancora per molto. Dobbiamo agire tempestivamente con forza e con coraggio per lasciare alle generazioni future non solo umane, ma a tutti gli organismi viventi, un pianeta vivibile e sostenibile.

PAOLO GUIDETTI* – ANDREA ZANINI**

*Dal presente al passato per pianificare il futuro:
la piccola pesca e la sua sostenibilità ambientale,
socioculturale ed economica*

Sommario: Questo contributo nasce da un dialogo interdisciplinare tra scienze naturali e scienze storiche, con l'obiettivo di mettere in relazione presente e passato per riflettere sulle prospettive future della piccola pesca. L'accostamento di linguaggi e approcci differenti intende far emergere come problemi oggi percepiti come nuovi – quali il sovrasfruttamento delle risorse, l'equità nell'accesso e la necessità di regolamentazione – abbiano radici profonde e possano essere meglio compresi attraverso una lettura dell'esperienza del passato. Muovendo da questa impostazione, la prima parte del contributo affronta la realtà contemporanea della piccola pesca, ponendo le basi concettuali e analitiche per il successivo confronto con la dimensione storica.

Parole chiave: piccola pesca; sostenibilità; risorse ittiche; beni comuni; Mediterraneo.

Abstract: *From the Present to the Past to Plan the Future: Small-scale Fishing and its Environmental, Sociocultural, Economic Sustainability*

This contribution arises from an interdisciplinary dialogue between the natural sciences and the historical sciences, with the aim of bringing present and past into relation in order to reflect on the future prospects of small-scale fisheries. The juxtaposition of different languages and approaches seeks to highlight how issues now perceived as new – such as the overexploitation of resources, equity in access, and the need for regulation – have deep roots and can be better understood through an examination of past experience. Building on this perspective, the first part of the article addresses the contemporary reality of small-scale fisheries, laying the conceptual and analytical foundations for the subsequent comparison with the historical dimension.

Keywords: small-scale fisheries; sustainability; fishery resources; commons; Mediterranean.

* Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre

paolo.guidetti@szn.it

** Accademico

andrea.zanini@unige.it

Introduzione

Il mare è qualcosa che molti di noi amano, visto il mestiere che abbiamo scelto di fare o le passioni che nutriamo. Il mare è un'entità molto particolare, solo apparentemente una "banale massa d'acqua salata". Ogni molecola d'acqua che appartiene al mare è connessa con tutte le molecole che sono presenti in ogni remoto angolo di oceano e in ogni liquido corporeo di ogni essere vivente (anche le nostre lacrime sono "salate"). Non c'è praticamente discontinuità. In questa "non-discontinuità" non ci mettiamo soltanto lo spazio, ma anche il tempo: la nostra cultura del mare è ciò che resta delle culture del mare del passato che i nostri avi hanno vissuto, elaborato e trasmesso.

Fra le componenti storico-culturali legate al mare che apparentemente tutti conoscono perché l'hanno sotto il naso da sempre, c'è la pesca. A livello di definizione, la pesca può essere pensata come un'attività di prelievo di animali acquatici – si parla anche di raccolta di alghe per uso alimentare – attraverso una serie di tecniche e attrezzi. Non è certo sufficiente questa definizione per capire tutto ciò che è girato, gira e girerà intorno alla pesca, in ogni parte del mondo compresa la nostra Liguria.

Il nostro intento è quello di cercare di comunicare l'idea di connessione "nel tempo", che non è soltanto una connessione tra ciò che è avvenuto, sta avvenendo e avverrà, ma ha proprio un "senso" perché il nostro futuro non può non essere tracciato su ciò che è stato e su ciò che è adesso. Cercheremo quindi di esaminare alcuni aspetti per spiegare che cosa sia la pesca, quali siano i suoi effetti e le sue principali implicazioni.

La pesca e il consumo dei prodotti del mare "oggi"

Molto spesso compriamo qualcosa in un supermercato, ma non sappiamo che dietro al prodotto c'è un "mondo": ci sono persone, luoghi, drammi, sentimenti, esseri viventi non-umani e tanto altro. Alcune volte è sconvolgente quanto sia tragico ciò che sta dietro alla pesca, mentre noi mettiamo semplicemente il prodotto anonimo in padella. Questa è la realtà attuale di molta della pesca industriale a scala mondiale. In questo contesto globalizzato, sorprende come molte idee elabora-

te dai nostri predecessori, anche secoli fa, abbiano molto senso oggi, per “pensare” il futuro di una parte della nostra società. Innanzitutto non possiamo non collocare un’attività umana nel contesto storico preciso in cui ci troviamo già da un po’ di tempo, che da alcuni è stato definito Antropocene. Tuttavia, considerando le ripercussioni sull’ambiente naturale e sulle società umane, alcuni propendono per una definizione diversa: Capitalocene. Con questo termine si cerca di evidenziare la relazione tra effetti deleteri su ambiente e società determinati dal modello capitalistico di sviluppo socio-economico, che privilegia profitti a scapito del benessere umano e della conservazione della natura (Haraway 2015). Questo riguarda in particolare le grandi compagnie della pesca industriale che realizzano grandi profitti sovrasfruttando le risorse di pesca, contribuendo alla distruzione di habitat marini. Tali profitti vengono poi distribuiti in modo poco equo o reinvestiti altrove e spesso in altri settori (Clark 2022).

Andando più nel dettaglio, la pesca è sì “prelievo di animali marini con attrezzi”, ma in realtà è un mondo molto complesso. Esistono almeno due macrocategorie: la pesca ricreativa (che è fatta per diletto) e la pesca professionale (l’unica che per legge prevede la commercializzazione del prodotto). La pesca professionale è esercitata sia da grandi navi legate a compagnie strutturate (la pesca industriale o semi-industriale), sia da piccole imbarcazioni (la piccola pesca locale a carattere tradizionale). Esiste poi, purtroppo, anche la pesca illegale, che si stima rappresenti dal 20 al 30% del prelievo totale di biomassa dai mari a livello globale (Liddick 2014).

In tutto il mondo la specie umana sta aumentando il consumo di “pesce”, *trend* solo in parte tamponato dall’acquacoltura (Sharma *et al.* 2025; Szymańska 2020). Si tratta di biomasse enormi sottratte agli ecosistemi naturali per soddisfare una domanda alimentare in costante crescita e soprattutto una sempre più marcata “carnivoria umana”, tipica del modello alimentare occidentale. Se per secoli le popolazioni di Asia, Africa e Sud America hanno basato la loro dieta su risorse vegetali (come riso, mais, quinoa), oggi si stanno “occidentalizzando” e consumano sempre più biomassa animale (in parte proveniente dalla pesca). L’aumento di tale “domanda” viene soddisfatto intensificando sia l’allevamento, sia la pesca, sulla terraferma come in mare, il che determina un drammatico e progressivo deterioramento dello stato di salute del

pianeta, in generale, e degli *stock* ittici, in particolare. Non a caso la maggior parte degli *stock* di pesca è sovrasfruttata, cioè sfruttata oltre i livelli che ne consentirebbero il naturale rinnovo (Sharma *et al.* 2025).

La pesca, insieme ad altri impatti di origine antropica e ai cambiamenti climatici, sta incidendo negativamente sulla produttività degli oceani (Ray *et al.* 2025). Ciò induce a stimare una diminuzione delle risorse di pesca disponibili fino al loro esaurimento, o quasi, non fra secoli, ma fra decenni. Ci può essere un “errore” nelle stime di “quando” ciò avverrà, ma non ci sono dubbi sul fatto “che” avverrà se si continua così. Secoli fa si pensava che le risorse del mare fossero inesauribili (Arkipkin 2025). Oggi, a causa della esplosione demografica di *Homo sapiens sapiens* e dello sviluppo tecnologico, l’intensità di sfruttamento delle risorse alieutiche è elevatissima. Con l’avvento della rivoluzione industriale, infatti, lo sviluppo tecnologico e la potenza-motore delle barche hanno consentito di sfruttare molto a fondo gli *stock* di pesca. Sfruttare a fondo significa produrre profitto nel breve termine. La rimozione di troppi individui dagli *stock* naturali, soprattutto i più grandi riproduttori, causa tuttavia un crollo degli stessi nel medio-lungo termine, con conseguenze non solo sull’ambiente (es. distruzione di habitat), ma anche sociali (es. perdita di posti di lavoro, ricorso ad aiuti pubblici) (Teh *et al.* 2025). Nel caso della pesca industriale i sussidi (*i.e.*, soldi pubblici) tengono in piedi un’industria che non rende, ma che così continua e causare danni ambientali e sociali.

A causa della pesca, quindi, molte popolazioni e *stock* di specie ittiche, soprattutto predatrici e di grandi dimensioni (es. tonno rosso, pesce spada, cernie, squali), collassano. Questo avviene sia per il prelievo numericamente importante sulle popolazioni, sia per la rimozione dei riproduttori e/o per la rimozione di individui di un solo sesso (es. le cernie grandi sono maschi, se si prelevano i pesci più grossi, restano solo le femmine). La pesca può anche causare le cosiddette “cascate trofiche” (Marguin *et al.* 2025): l’eccessivo prelievo di pesci appartenenti alla famiglia degli sparidi (es. saraghi maggiori, saraghi testa nera, orate), che sono predatori molto efficaci dei ricci di mare, può causare l’esplosione delle popolazioni di questi ultimi. I ricci di mare sono dei “simpatici animaletti” che, muovendosi sul fondo coi loro pedicelli, vanno in giro a brucare le alghe. Quando i ricci aumentano a causa della mancanza di predatori naturali sovra-brucano le alghe e i fondali rocciosi diventano

dei veri “deserti” (chiamati *barrens*; Guidetti 2006), con conseguente diminuzione della biodiversità.

Altri problemi legati alla pesca, in generale, sono rappresentati dalla distruzione degli habitat e il prelievo di *by-catch* (scarto) legato a certe tecniche distruttive e non selettive (es. lo strascico). Un ulteriore problema sono gli “attrezzi fantasma” (*ghost fishing*), i quali, persi o abbandonati sul fondo, continuano a “pescare” una quantità enorme di animali che vengono inutilmente uccisi.

Vi sono poi molteplici implicazioni sociali, talvolta tragiche, legate alla pesca in altri continenti: impiego di schiavi, talvolta bambini, che vengono imbarcati senza essere nemmeno registrati. Quando compriamo un prodotto surgelato che viene da altri continenti e da filiere non trasparenti è possibile che stiamo sostenendo “schiavitù e sfruttamento minorile” (Tickler *et al.* 2018).

Nel Mediterraneo, culla di grandi civiltà, la pesca è sempre stata socialmente, culturalmente, storicamente ed economicamente molto importante. L'informazione storica, da questa prospettiva, ci può fornire informazioni preziosissime. Fonti di dati e conoscenza “non convenzionali” possono essere di importanza cruciale per valutare lo stato di salute del mare, nel passato e nel presente. Tali fonti possono essere rappresentate dalla testimonianza ed esperienza personali di vecchi pescatori, antichi documenti, vecchie foto o filmati, reperti zooarcheologici, antiche rappresentazioni artistiche (es. mosaici romani), da cui spesso si ricavano informazioni sulla presenza di specie ormai scomparse (almeno localmente, come la foca monaca) o l'elevata presenza di individui di grandi dimensioni oggi rari (Guidetti e Micheli 2012).

La piccola pesca è una componente della pesca professionale. Viene esercitata impiegando piccole imbarcazioni che hanno di solito un approdo vicino ai punti di pesca. Le tecniche usate sono svariate e tra le più comuni ricordiamo le reti da posta (di molteplici tipi, materiali, dimensioni, maglie), i palamiti (con ami che vengono innescati) e le nasse (una sorta di gabbia in cui il pesce entra e non può più uscire). La piccola pesca ha il potenziale di essere sostenibile, ma non lo è *per sé*. La sostenibilità ha tre componenti: ambientale, sociale ed economica. Per essere ambientalmente sostenibile la piccola pesca deve fare delle scelte in merito alla “selettività per specie e taglia” degli attrezzi, all'impatto sul fondo, al *by-catch* e ai quantitativi estratti in base alla

consistenza e alle potenzialità riproduttive degli *stock*. Senza un *limite* non c'è sostenibilità. Poi ci sono le componenti sociali, molto spesso non tenute in debito conto, tra cui l'equità e la giustizia. È impossibile pensare alla piccola pesca senza occuparsi di "chi" compone le sue comunità e delle relative condizioni di vita: trattamento economico equo e giusto, condizioni di lavoro, relazioni interne alla comunità e con le istituzioni, riconoscimento del ruolo sociale e storico-culturale sono soltanto alcuni degli aspetti (Bennett *et al.* 2024). Fondamentale è poi prendere coscienza di quanto sia importante occuparsi di inclusione sociale nella filiera della pesca, dove, per esempio il ruolo delle "donne" è spesso cruciale, ma poco valorizzato in termini di salario, responsabilità e contribuzioni previdenziali. Lo stesso valga per il riconoscimento e l'inclusione del ruolo di tanti immigrati (i cui diritti sono spesso non rispettati), dei pescatori anziani (che non hanno la capacità di gestire la tecnologia) e, non ultimi, i giovani (che possono essere vettori di novità rilevanti). L'ultima componente della sostenibilità, quella economica, ha senso solo considerando gli altri pilastri, quello ambientale e quello sociale.

Se spesso la piccola pesca viene ancora immaginata come il mondo del "vecchio pescatore che cuce le reti", nella realtà odierna rappresenta un settore imprenditoriale e multisfaccettato molto più complesso. La piccola pesca, oltre alle implicazioni legate alla produzione di reddito, costituisce un patrimonio di storia e cultura il cui valore non è solo fine a sé stesso, ma funzionale alla promozione di altri settori strategici, quali turismo e ristorazione, fondamentali in Italia e in Liguria.

La pesca nel passato con un occhio al futuro

In questo quadro, lo sguardo alla lunga durata consente di relativizzare l'idea di una presunta inconsapevolezza delle società del passato, che può essere colta quando si passa dalla prospettiva contemporanea a quella storica o, meglio, storico-economica. Un primo interrogativo di fondo riguarda l'esistenza, o meno, nei secoli dell'età moderna di un'attività assimilabile alla attuale pesca industriale. Se si esclude la pesca del corallo, tipicamente finalizzata alla lavorazione e alla commercializzazione del prodotto, nel Mediterraneo di età moderna non vi

sono attività ittiche di portata simile a quella delle aringhe nel Mare del Nord o del merluzzo a Terranova. Ciò non significa che la pesca nelle acque del *Mare Nostrum* sia unicamente una pesca di sussistenza destinata all'autoconsumo (Massa 2000; Doneddu 2002; Clemente 2005). L'assenza di uno sfruttamento intensivo non è dovuta allo stereotipo di "mare senza pesci" sovente associato alle acque liguri, o all'impiego di tecniche di pesca "artigianali". Il vincolo maggiore a uno sfruttamento intensivo dello *stock* ittico è rappresentato dai limiti delle tecniche di conservazione del pescato all'epoca utilizzabili (prevalentemente la salagione e lo scabeccio), che condizionano la capacità di trasformazione e dunque i quantitativi di pesce gestibili dai gruppi di pescatori.

Per quanto riguarda il contesto ligure, data anche la conformazione geomorfologica della regione, le risorse del mare sono sempre state molto importanti. L'economia delle comunità costiere nei secoli passati si caratterizza per una spiccata pluriattività (Le Bouëdec 2002): un mix di attività legate alla terra – la coltivazione, la silvicoltura, l'allevamento – e di attività legate al mare, dove però la pesca non è quasi mai l'attività prevalente. È il commercio marittimo l'attività dominante a cui la pesca si affianca con varia intensità a seconda dei luoghi e dei momenti. Vi è inoltre una sensibile differenza fra oriente e occidente: i borghi costieri del Levante sono mediamente più piccoli rispetto a quelli del Ponente. Ne deriva che, in generale, i borghi ponentini si caratterizzano per una più intensa attività mercantile (e quindi una minore partecipazione alla pesca), poiché la loro economia si basa per lo più su altre leve. A Levante, al contrario, vi sono insediamenti mediamente più piccoli; in questo caso può accadere che la pesca rivesta un peso maggiore rispetto al Ponente, almeno in alcune aree o periodi. In generale, però, quella alieutica non è quasi mai l'attività dominante, ma va a completare la fisionomia economica di questi territori: si affianca alla marineria spesso con persone che alternano l'imbarco su una nave mercantile e l'imbarco come pescatore su un battello da pesca (Zanini 2007; 2026).

Per quanto concerne le tipologie di pesca praticate in passato, va sicuramente menzionata quella costiera, tipicamente con la sciabica, una grossa rete tirata da terra; vi è poi la pesca d'altura, spesso in un raggio relativamente limitato poiché occorre rientrare a terra per vendere il pesce fresco o lavorarlo per poterlo conservare e commercializzare anche a lunga distanza. Vi sono poi reti fisse da posta calate in alcune

località della Liguria, tra cui le tonnarelle e le mugginare, presenti essenzialmente a Levante. Fino a qualche tempo fa, a Camogli è stata attiva la tradizionale pesca con la tonnellarella; tra XVI e XVII secolo si hanno notizie di strutture analoghe a Santa Margherita e Monterosso (Redoano Coppedè 1970; Barni 1978; Mariotti 2003). Minore fortuna hanno invece simili iniziative a Ponente, dove la pesca con la tonnellarella, a Vado, Bergeggi, Albenga, è stata meno fruttuosa. Le mugginare sono strutture più piccole, anch'esse presenti per lo più a Levante, in particolare a Bogliasco e a Portofino (Zanini 2026).

A questa pluralità di tecniche corrisponde una altrettanto articolata organizzazione del lavoro e della proprietà dei mezzi di produzione. Pur in assenza di una pesca industriale, nella Liguria di età moderna non vi è soltanto una pesca per autoconsumo, ma vi sono pescatori professionisti, organizzati, con scenari sensibilmente diversi. Si va dal piccolo pescatore, proprietario della barca e delle reti, che imbarca persone, anche estranee al contesto familiare, per armare l'imbarcazione e avventurarsi in mare, sino a semplici marinai o "sciabegotti" (gli addetti alla pesca con la sciabica) che non possiedono i mezzi di produzione e si imbarcano su battelli altrui. Vi è dunque una sorta di parallelismo rispetto al mondo dell'agricoltura tra i piccoli proprietari terrieri e i braccianti. Diversamente da quanto accade però nel settore primario, dove i braccianti ricevono una remunerazione a giornata, nel mondo della pesca la remunerazione si basa sul principio della compartecipazione ai profitti, seguendo uno schema in cui si privilegia il capitale rispetto al lavoro, anche se secondo logiche meno inique rispetto a quelle tutt'oggi praticate nei paesi in via di sviluppo. Concretamente, il ricavato complessivo della pesca viene diviso in "parti" non sempre quantificate in totale perché dipendono da vari elementi. In genere una quota cospicua del ricavato, un certo numero di "parti", viene assegnato al proprietario dell'imbarcazione, partendo dal presupposto che senza il capitale il lavoro poco avrebbe potuto produrre; poi al capo barca, quindi ai marinai imbarcati (in genere una "parte" per ciascuno); quando vi è la pesca da terra con la sciabica partecipano alla suddivisione dei profitti anche coloro che concorrono a tirare la rete. Per quanto concerne le ragioni alla base di questa forma di remunerazione vi sono il principio della condivisione dei rischi e dei benefici tipico del mondo marittimo, oltre che la volontà di motivare i lavoratori perché si impegnino al meglio. Gli unici casi

ad oggi noti di remunerazione a giornata sono quelli dei marinai che operano nelle tonnarelle, mentre il “rais”, cioè il capo della pesca, viene retribuito con una parte fissa e una variabile proprio per incentivarlo a impegnarsi al meglio delle sue capacità (Zanini 2007; 2010).

Con riferimento alla commercializzazione del prodotto, in generale vige una logica di filiera corta: si catturano i pesci, si portano a terra e si vendono. La filiera si allunga quando si tratta di specie ittiche destinate alla conservazione. I dati a oggi disponibili evidenziano un uso limitato di tecniche quali l'essiccazione e l'affumicamento, mentre procedure quali la salagione, soprattutto per le acciughe, o lo scabeccio, vale a dire la frittura e la conservazione sott'aceto assieme ad erbe aromatiche come rosmarino e salvia, per i pesci di minor pregio. Questi trattamenti consentono di conservare nel tempo il pescato e di trasportarlo su lunghe distanze, anche oltre l'Appennino, in Pianura Padana (Zanini 2007).

Laddove l'attività ittica assume carattere più strutturato, accade di frequente, che i “frizedori”, cioè i padroni delle botteghe dove si lavora il pesce, le cosiddette “cuocerie”, anticipino i capitali per l'acquisto dell'imbarcazione e delle reti, dando così vita a meccanismi di dipendenza dal capitale mercantile, in cambio dell'impegno da parte degli equipaggi a consegnare loro l'intero pescato. Dunque, anche se in termini meno prementi rispetto a quanto si verifica in età contemporanea, già in età moderna si intravedono alcune logiche tutt'oggi presenti nel settore ittico (Massa 2000; Zanini 2010).

Per quanto riguarda invece l'attività statale di intervento e regolazione del settore, ambito divenuto in tempi recenti competenza di organismi sovranazionali (l'Unione Europea), in età preindustriale lo Stato genovese interviene a disciplinare alcuni aspetti del settore. Un primo elemento che preoccupa i governanti è assicurare il rifornimento di pesce fresco alla capitale. Proprio come oggi Genova è la metropoli della Liguria, anche in età preindustriale la Superba concentra una quota importante della popolazione. A fine Settecento, quando la Repubblica arriva ad avere 450-460.000 abitanti, Genova ne conta circa 90.000. Poiché il pesce che si pesca nelle spiagge della Dominante – tenuto conto che una parte importante è occupata dal porto – non è sufficiente, si impone alle comunità costiere comprese tra Cogoleto a Ponente e Portofino a Levante di portare in città e vendere giornalmente sul mercato urbano tre quarti del pesce pescato, a prezzo calmierato. Dunque una

riserva importante, che può disincentivare tali comunità dall'impegnarsi nell'attività ittica.

Un secondo ambito di intervento è di natura tributaria. Il fisco genovese ha una fantasia inesauribile e riesce quindi a colpire il consumo o la commercializzazione di molteplici beni, secondo una logica che privilegia le imposte indirette (sui consumi e sugli scambi) rispetto a quelle dirette (sul patrimonio e sul reddito), meno invisibili al contribuente poiché incorporate nel prezzo di vendita e quindi traslate sul consumatore finale, spesso ignaro di tale dinamica (Massa 2000; Zanini 2006). Anche la pesca è colpita da un tributo, una gabella, più volte riformata nella struttura, che deve essere pagata dalle comunità del litorale in proporzione a quanto veniva pescato, agli attrezzi da pesca censiti in ogni realtà locale, il cui gettito va a finanziare l'armamento delle galere della Repubblica, a loro volta impegnate per pattugliare le acque liguri e difendere la costa (e quindi anche i pescatori) dai potenziali attacchi di pirati, corsari e saraceni. Le pesche cosiddette "speciali", cioè con le tonnarelle e le mugginare, devono ottenere l'autorizzazione governativa, che viene assegnata mediante asta pubblica al maggiore offerente. In cambio di un canone annuo, il concessionario ottiene il monopolio della pesca in un determinato tratto di mare, così da garantire la remuneratività della pesca stessa. Ciò dà però origine a una serie di contenziosi tra gli appaltatori e gruppi di pescatori che non rispettano le prescrizioni in termini di distanze.

La pesca nel porto di Genova è soggetta a divieti e restrizioni poiché può risultare d'intralcio all'attività del porto mercantile. Vi sono però documenti che attestano esperienze di acquacoltura, in particolare le licenze per coltivare ostriche all'interno dello specchio acqueo dello scalo. Agli inizi del Settecento, inoltre, la Repubblica prova a emanare una normativa uniforme per tutti i gruppi di pescatori presenti lungo le coste liguri, ma di fatto tale intervento sortisce poco effetto (Massa 2003; Calcagno 2017).

Vi sono poi norme a tutela della fauna ittica e della riproduzione degli *stock* ittici, come quelle che vietano l'uso di reti a strascico a maglie troppo fitte perché raschiano il fondale e asportano il novellame. Tali misure non sono suffragate da studi di biologia marina, ma da una pragmatica consapevolezza delle dinamiche legate al mondo della pesca e da un principio di uso responsabile delle risorse. Alla cultura

dell'istantaneità tipica del mondo di oggi si contrappone dunque una logica della perpetuità, che non è soltanto frutto di una visione cristiana ispirata alla custodia del creato, ma riflette la consapevolezza che occorre preservare la ricchezza del mare a beneficio delle generazioni future. Alle prescrizioni legislative si affiancano pratiche di autolimitazioni frutto dell'esperienza e dell'osservazione delle dinamiche naturali. Dunque, pur in assenza di studi scientifici matura la consapevolezza che talune specie non devono essere pescate in determinati periodi dell'anno, quando l'attività riproduttiva è più rilevante, oppure che, per pescare in specifiche aree, può essere necessaria una particolare autorizzazione. Una delle motivazioni che inducono lo Stato a tentare di normare il settore già agli inizi del Settecento sono le ripetute denunce circa il minore ricavato dall'attività di pesca, l'impoverimento del Mar Ligure, oppure per porre rimedio ai conflitti nell'uso delle risorse e degli spazi marittimi. Sono infatti frequenti i contrasti fra comunità costiere, fra gruppi di pescatori, fra appaltatori di tonnarelle e pescatori del luogo, che sottendono conflitti di varia natura legati al fatto che le risorse del mare sono sovente risorse contese. Più specificamente si generano tensioni fra chi ritiene che il mare debba essere libero e dunque tutti devono poter pescare senza restrizioni di sorta (con la sola eccezione di quei tratti di mare in cui vige il monopolio di tonnarelle e mugginare) e chi invece rivendica diritti di esclusiva veri o presunti su una determinata area, frutto di consuetudini plurisecolari. Le testimonianze di tensioni e contenziosi sono molteplici e per avallare la fondatezza delle pretese rivendicate si asserisce che in assenza di tutele si assisterebbe a un ulteriore impoverimento di una classe di lavoratori già condannata alla miseria (Massa 2003; Zanini 2006).

Lo stereotipo del pescatore povero è, non casualmente, un altro degli elementi che accompagnano la narrazione del settore nelle fonti coeve. La scarsità di documenti che permettano di esaminare i profitti delle imprese ittiche – vi sono alcune informazioni discontinue per le tonnarelle e ancor meno per le mugginare – non consente né di comprovare né di negare lo stereotipo. Alcuni episodi, però, svelano un settore non sempre scarsamente remunerativo. Nel 1780 un gruppo di pescatori di Portofino si associa per reinvestire “mezza parte”, quindi metà di quella che sarebbe la retribuzione giornaliera di un marinaio per un certo numero di anni al fine di acquistare una serie di apparati tessili

preziosi, damaschi e velluti per adornare l'abside della Chiesa parrocchiale in determinate festività religiose. La contabilità relativa a questo accordo rivela che in un anno il gruppo riesce mediamente ad accantonare una somma superiore alle 500 lire, corrispondenti al salario di due manovali edili dell'epoca. Quindi la retribuzione del marinaio risulta di tutto rispetto. Questa vicenda richiama, peraltro, un altro aspetto che caratterizza tutt'oggi il rapporto dell'uomo con il mare: le pratiche devozionali, legate anche al timore dei rischi connessi a tali attività e al desiderio di propiziare una pesca fruttuosa (Zanini 2026).

Anche le riforme fiscali generano malcontento e tumulti. Quando, negli anni dieci del Settecento, la Repubblica riforma la struttura del tributo e addossa la responsabilità della riscossione ai consoli, cioè ai rappresentanti dei gruppi di pescatori locali, allo scopo di rendere più agevole l'esazione del balzello, finisce per ottenere l'effetto opposto. È emblematica la vicenda di Spotorno dove i funzionari governativi, recatisi sul posto per incarcerare il console dei pescatori per inadempienza, vengono prima accerchiati e poi messi in fuga da una folla inferocita che non esita a rivolgere loro minacce di morte. È un chiaro segnale che la riforma, non concertata, ma calata dall'alto, non è andata nella direzione auspicata dalle autorità genovesi (Zanini 2025).

Conclusioni

Volendo tracciare un bilancio d'insieme, si può affermare che nella Liguria di età preindustriale la risorsa ittica, pur al centro di tensioni e conflitti, viene generalmente concepita e gestita come un bene al servizio della comunità e dello Stato, nel presente come nel futuro. Non si può parlare di una vera e propria sostenibilità ambientale *ante litteram* in senso moderno; emerge tuttavia una diffusa consapevolezza della finitezza della risorsa alieutica e del rischio di un suo progressivo depauperamento in assenza di forme di regolamentazione e di uso responsabile. Tale consapevolezza si riflette sia nei provvedimenti normativi emanati dalla Repubblica di Genova – che tuttavia non sempre raggiungono gli obiettivi prefissati – sia nelle pratiche di autoregolazione messe in atto dalle comunità costiere e dai gruppi di pescatori, frutto dell'esperienza e dell'osservazione diretta delle dinamiche naturali.

Il quadro che ne emerge è quello di una gestione della pesca fondata su un equilibrio instabile tra sfruttamento, conservazione e conflitto, tipico di una risorsa comune e condivisa. Proprio questa natura collettiva induce, allora come oggi, a tentativi di appropriazione e a rivalità nell'accesso agli spazi e ai rendimenti della pesca, rendendo necessaria l'emanazione di norme e la fissazione di limiti al prelievo. Allo stesso tempo, le scelte condivise di autolimitazione, documentate anche in età moderna, mostrano come la ricerca di un punto di equilibrio tra interessi individuali e bene comune non fosse estranea alle società del passato. In questa prospettiva il confronto con la realtà contemporanea consente di cogliere significative continuità nelle sfide che interessano la piccola pesca, settore composto da una pluralità di imprese familiari che, ieri come oggi, rappresentano un elemento centrale dell'identità economica, sociale e culturale del Mediterraneo e una componente essenziale per una gestione sostenibile delle risorse del mare nel lungo periodo. È questo un elemento importante da tenere presente anche attualmente, relativamente alle dinamiche di conservazione e gestione del mare. Oggi, molto più che in passato, le risorse marine (*sensu lato*: risorse viventi, lo spazio superficiale marino, i fondali) sono contese da molteplici usi che includono non solo la pesca, ma anche il turismo, l'estrazione di gas e minerali, la navigazione (*shipping*, crociere, diporto), impianti eolici flottanti e tanto altro. Questo impone una particolare attenzione, alla luce del modello di sviluppo socio-economico imperante, per conciliare gli usi umani con la conservazione, senza dimenticare che, prima di tutto, il rispetto del mare dovrebbe essere fondato sulla consapevolezza dei limiti e su valori basati su *imperativi etici*.

Bibliografia

- Arkhipkin A.I. *History of two abundant finfish trawl fisheries in the Falkland Islands with possible innovative way to rebuild depleted stocks*. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture (2025) 33(4): 598-608.
- Barni G.L. *Il contrasto Portofino-S. Margherita per la concessione della tonnara nel Seicento*. Bollettino Ligustico per la Storia e la Cultura Regionale (1978) 30: 49-58.

- Bennett N.J., Calò A., Guidetti P., Milazzo M., Prato G., Ben Lamine E., Scianna C., Di Franco A. *Access and well-being in small-scale fisheries*. Marine Policy (2024) 169: 106328.
- Calcagno P. *La pesca ligure in età moderna, tra pratiche degli operatori specializzati e fiscalità applicata dallo Stato*. Archivio Storico Italiano (2017) 175: 547-564.
- Clark T.P. *Racial capitalism and the sea: Development and change in Black maritime labour, and what it means for fisheries and a blue economy*. Fish and Fisheries (2022) 23: 648-662.
- Clemente A. *Il mestiere dell'incertezza. La pesca nel Golfo di Napoli tra XVIII e XX secolo*. Napoli: Guida; 2005.
- Doneddu G. *La pesca nelle acque del Tirreno (secoli XVII-XVIII)*. Sassari: Editrice Democratica Sarda; 2002.
- Guidetti P. *Marine reserves reestablish lost predatory interactions and cause Community changes in rocky reefs*. Ecological Applications (2006) 16: 963-976.
- Guidetti P., Micheli F. *Art serving marine conservation*. Frontiers in Ecology and the Environment (2012) 9: 374-375.
- Haraway D.J. *Anthropocene, Capitalocene, Plantationocene, Chthulucene: Making Kin*. Environmental Humanities (2015) 6(1): 159-165.
- Le Bouëdec G. *La pluriactivité dans les sociétés littorales XVII^e-XIX^e siècle*. Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest (2002) 109(1): 61-90.
- Liddick D. *The dimensions of a transnational crime problem: The case of IUU fishing*. Trends in Organized Crime (2014) 17: 290-312.
- Marguin A., Bussotti S., Guidetti P., Rossi F. *A systematic review of fishing impacts on the trophic level of fish populations and assemblages in the Mediterranean Sea*. Frontiers in Marine Science (2025) 12: 1489965.
- Mariotti A. *La tonnarella di Camogli e la pesca nel Golfo Paradiso tra Ottocento e Novecento*. In: Doneddu G., Fiori A. (eds.). *La pesca in Italia tra età moderna e contemporanea. Produzione, mercato, consumo*. Sassari: Editrice Democratica Sarda; 2003. 63-76.
- Massa P. *L'economia della Repubblica di Genova e la pesca*. In: Doneddu G., Gangemi M. (eds.). *La pesca nel Mediterraneo occidentale*. Bari: Puglia Grafica Sud; 2000. 87-105.
- Massa P. *Governo centrale e pescatori delle Riviere liguri: controllo e fiscalità (secolo XVIII)*. In: Doneddu G., Fiori A. (eds.). *La pesca in Italia tra età moderna e contemporanea. Produzione, mercato, consumo*. Sassari: Edes; 2003. 15-41.
- Ray N.E., Bonaglia S., Cavan E.L., Sampaio F.G., Gephart J.A., Hillman J.R., Hornborg S., Paradis S., Petrik C.M., Tiano J., Yuan J. *Biogeochemical*

- consequences of marine fisheries and aquaculture*. Nature Reviews Earth & Environment (2025) 6: 163-177.
- Redoano Coppedè G. *La pesca nelle Cinque Terre e l'esercizio della tonnara di Monterosso dal secolo XVI al secolo XIX*. Giornale Storico della Lunigiana e del Territorio Lucense (1970) n.s. 21: 110-116.
- Sharma R., Barange M., Agostini V., Barros P., Gutierrez N.L., Vasconcellos M., Fernandez Reguera D., Tiffay C., Levontin P. (eds.). *Review of the State of World Marine Fishery Resources – 2025*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 721. Rome: FAO; 2025.
- Szymańska J. *Analysis of Changes in the Volume of Fish Production and Consumption in the World – Selected Problems*. In: *Education Excellence and Innovation Management: A 2025 Vision to Sustain Economic Development during Global Challenges*. International Business Information Management Association (IBIMA); 2020. 197-218.
- Teh L., Teh L.C.L., McLennan A., Santana-Garcon J., Sumaila U.R. *Global Fisheries: Socio-economic Impacts of Overfishing*. SSRN; 2025. <https://ssrn.com/abstract=5946504> (consultato il 3 ottobre 2025).
- Tickler D., Meeuwig J.J., Bryant K., David F., Forrest J.A.H., Gordon E., Joudo Larsen J., Oh B., Pauly D., Sumaila U.R., Zeller D. *Modern slavery and the race to fish*. Nature Communications (2018) 9: 4643.
- Zanini A. *Un difficile equilibrio. Stato, pescatori e comunità in Liguria tra Sei e Settecento*. In: Cavaciocchi S. (ed.). *Ricchezza del mare, ricchezza dal mare, secc. XIII-XVIII*. Firenze: Le Monnier; 2006. 1091-1102.
- Zanini A. *La pesca e l'economia del Ponente ligure tra Sei e Settecento*. In: Palermo L., Strangio D., Vaquero Piñeiro M. (eds.). *La pesca nel Lazio. Storia, economia, problemi regionali a confronto*. Napoli: Editoriale Scientifica; 2007. 389-407.
- Zanini A. *La pesca in Liguria tra Sette e Ottocento: tecniche, uomini, capitali*. In: D'Arienzo V., Di Salvia B. (eds.). *Pesci, barche, pescatori nell'area mediterranea dal Medioevo all'età contemporanea*. Milano: FrancoAngeli; 2010. 225-237.
- Zanini A. *Finanza pubblica e fiscalità a Genova in età moderna (1528-1797)*. In: Olgiati G. (ed.). *Fisco e debito pubblico a Genova (secoli X-XVIII)*. Genova: Sagep; 2025. 67-83.
- Zanini A. *Fra terra e mare: l'economia portofinese in età moderna*. In: Giosso A. (ed.). *Portofino prima del mito: territorio, società, economia. La Caratata del 1665*. Genova: Sagep; 2026. 279-303.

GIORGIO BAVESTRELLO* – MONICA MONTEFALCONE**

*Impatti antropici e riscaldamento globale:
effetti sulla biodiversità marina bentonica*

Sommario: Il Mediterraneo sta subendo profonde trasformazioni della biodiversità bentonica dovute all'interazione tra riscaldamento climatico e pressioni antropiche locali. L'aumento della temperatura delle acque e la crescente frequenza delle onde di calore marine causano mortalità di massa, regressione di specie sensibili, diffusione di specie termofile e semplificazione delle comunità. A questi effetti si sommano perdita di habitat, sovrapesca e disturbo diretto dei fondali. Il monitoraggio a lungo termine emerge come strumento essenziale per comprendere tali cambiamenti e orientare efficaci strategie di conservazione.

Parole chiave: cambiamento climatico; pressioni locali; mortalità di massa; biodiversità marina; benthos.

Abstract: *Anthropogenic Impacts and Global Warming: Effects on Benthic Marine Biodiversity* Mediterranean benthic biodiversity is undergoing major changes driven by the interaction between climate warming and local human pressures. Rising seawater temperatures and the increasing frequency of marine heatwaves cause mass mortality events, decline of sensitive species, spread of thermophilic taxa, and simplification of benthic communities. These impacts are compounded by habitat loss, fishing pressure, and direct disturbance of the seafloor. Long-term monitoring is therefore essential to understand ongoing changes and to support effective conservation and management strategies.

Keywords: climate change; local pressures; mass mortalities; marine biodiversity; benthos.

* Accademico

** Università di Genova

giorgio.bavestrello@unige.it

monica.montefalcone@unige.it

Introduzione

Negli ultimi decenni gli ecosistemi marini del Mediterraneo hanno evidenziato trasformazioni di grande rilievo in termini di biodiversità. Si è assistito all'introduzione e alla progressiva diffusione di specie alloctone, a episodi di mortalità di massa che hanno colpito numerose specie autoctone, nonché a variazioni significative nella distribuzione batimetrica e stagionale degli organismi e nelle loro strategie riproduttive. In questo contesto, è importante sottolineare che i cambiamenti osservati nel Mediterraneo si inseriscono in una più ampia tendenza globale di incremento degli impatti cumulativi sugli oceani dovuti alla sovrapposizione di pressioni climatiche e antropiche. Le analisi più recenti mostrano infatti che gli ecosistemi marini costieri e offshore sono esposti a livelli di pressione sempre più elevati e che, nei prossimi decenni, tali impatti sono destinati ad aumentare ulteriormente. Il Mediterraneo rappresenta un caso particolarmente critico: si tratta di un bacino semi-chiuso, tra i più sfruttati al mondo, riconosciuto come hotspot di biodiversità ma anche come area soggetta a pressioni intense e persistenti, tra cui sviluppo costiero, traffico marittimo, eutrofizzazione, pesca, produzione di energia e introduzione di specie aliene.

Tuttavia, l'effettiva portata di tali cambiamenti e le potenziali ripercussioni sull'equilibrio complessivo dell'ecosistema risultano difficili da quantificare. Questa difficoltà è dovuta principalmente all'assenza di una *baseline* di riferimento e di serie storiche sufficientemente lunghe e affidabili che consentano confronti accurati nel tempo. Nei pochi casi in cui tali dati sono disponibili, le analisi forniscono indicazioni piuttosto nette sull'andamento delle trasformazioni in atto.

Un esempio emblematico è rappresentato dallo studio delle comunità bentoniche di Punta Mesco, avviato da Tortonese negli anni cinquanta del secolo scorso e proseguito fino a oggi, che ha permesso di documentare in modo dettagliato l'evoluzione degli ecosistemi locali (Bianchi *et al.* 2019a). I risultati mostrano come, almeno per il Mar Ligure, i cambiamenti più marcati si siano concentrati negli anni novanta del secolo scorso (Bianchi *et al.* 2019b). Per quanto riguarda in particolare le comunità coralligene, le alterazioni osservate sembrano essere riconducibili a una combinazione di fattori, tra cui l'aumento della temperatura delle acque e le pressioni antropiche a scala locale. Queste

ultime si sono manifestate soprattutto attraverso un incremento della torbidità, con conseguenze dirette sulle condizioni ambientali. L'azione congiunta e cumulativa di tali stress potrebbe inoltre aver favorito l'insediamento e la proliferazione di specie aliene (Gatti *et al.* 2015).

Riscaldamento delle acque

Le informazioni attualmente disponibili indicano che, all'interno di una tendenza generale al riscaldamento avviatasi al termine dell'ultima glaciazione, le acque del Mar Ligure hanno attraversato una fase di raffreddamento compresa tra il 1948 e i primi anni ottanta. A partire da quel periodo, la temperatura ha ripreso a crescere in modo progressivo fino ai giorni nostri. Questo andamento si inserisce in un contesto climatico globale particolarmente critico. Secondo i dati della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) il 2024 è stato l'anno più caldo dall'inizio delle registrazioni moderne (1850), con una temperatura media combinata della superficie terrestre e oceanica pari a 1,29 °C sopra la media del XX secolo. In tale quadro, il Mediterraneo conferma la propria eccezionale vulnerabilità, essendo indicato come uno dei mari che si stanno riscaldando più rapidamente, con un tasso di incremento termico superiore di circa il 20% rispetto alla media globale. Il quadro recente conferma un'ulteriore accelerazione di questa tendenza, che si riflette nell'aumento della frequenza, dell'intensità e della durata delle anomalie termiche estreme. Una conseguenza diretta del cambiamento climatico è infatti la crescente occorrenza di onde di calore marine (*marine heatwaves*, MHWs), ossia periodi prolungati in cui la temperatura dell'acqua supera in modo anomalo i valori climatologici di riferimento. Tali eventi rappresentano uno dei principali fattori di stress per le comunità bentoniche, poiché possono agire rapidamente su organismi sessili o poco mobili, riducendone la capacità di acclimatazione e aumentando la probabilità di mortalità, necrosi tissutale e alterazioni fisiologiche (Garrahou *et al.* 2022).

I primi segnali evidenti degli effetti legati all'aumento termico si sono manifestati tra la fine degli anni ottanta e l'inizio degli anni novanta, con episodi di mortalità localizzata che hanno interessato gorgonie quali *Eunicella cavolini* (Koch, 1887) e *Paramuricea clavata* (Risso, 1827)

(Bavestrello *et al.* 1994). Nello stesso intervallo temporale, diverse specie di poriferi, in particolare appartenenti al genere *Spongia*, hanno mostrato fenomeni di mortalità diffusa; in questi casi è stato ipotizzato il coinvolgimento di batteri sponginitici come possibile causa scatenante (Gaino e Pronzato 1989).

Un momento particolarmente critico si è verificato nel 1999, quando il Mar Ligure e il Golfo del Leone furono interessati da un evento di moria su vasta scala che coinvolse gorgonie, poriferi e numerosi altri taxa fino a profondità superiori ai 30 m. In quell'occasione, i dati oceanografici permisero di stabilire con chiarezza la correlazione tra l'evento e il passaggio di un'onda di acqua eccezionalmente calda che, nell'arco di pochi giorni, lambì le coste liguri. Episodi di mortalità massiva si sono poi ripetuti più volte negli anni successivi, lasciando un'impronta profonda e duratura sulla struttura delle comunità bentoniche mediterranee (Cerrano *et al.* 2000).

Gli effetti del riscaldamento non si esauriscono negli episodi di mortalità di massa, ma comprendono anche un aumento dell'incidenza di malattie e di altre condizioni di stress subletale. Un caso emblematico è quello del bivalve *Pinna nobilis*, per il quale l'evento di collasso registrato nel Mediterraneo nel 2017-2018 è stato associato a patologie di origine infettiva. Anche nelle comunità coralligene e precoralligene sono stati osservati fenomeni di sofferenza diffusa collegati a condizioni anomale della colonna d'acqua. Nell'Area Marina Protetta di Portofino, ad esempio, durante le estati del 2018 e del 2023 si sono verificati eventi mucillaginosi che hanno provocato necrosi e mortalità in numerose colonie di *Paramuricea clavata* (Azzola *et al.* 2023; Montalbetti *et al.* 2023). Questi episodi suggeriscono come gli effetti del cambiamento climatico possano manifestarsi anche indirettamente, favorendo condizioni ambientali che amplificano il danno biologico.

Parallelamente, il Mediterraneo è stato interessato dall'espansione verso nord di specie tipicamente meridionali e dall'ingresso, seguito dalla diffusione, di specie tropicali alloctone. Tali dinamiche hanno condotto a fenomeni noti come meridionalizzazione e tropicalizzazione delle comunità mediterranee (Zenetos *et al.* 2010). A questi processi si accompagna l'espansione di specie termofile, autoctone o aliene, che in molti casi trovano nelle nuove condizioni ambientali opportunità favorevoli di insediamento e diffusione (Azzola *et al.* 2022; 2025). Tra gli esempi

riportati negli ultimi anni nel Mediterraneo figurano macroalghe (Montefalcone *et al.* 2010), invertebrati e pesci termofili o non indigeni (Azzola *et al.* 2024), la cui presenza contribuisce a ridefinire la composizione e il funzionamento delle comunità bentoniche e nectobentoniche. In parallelo, specie più sensibili allo stress termico risultano in regressione, determinando una dinamica di specie avvantaggiate (*winner*) e di specie penalizzate (*loser*) che altera profondamente la struttura originaria degli habitat (Gatti *et al.* 2017). Il risultato non è soltanto una variazione della ricchezza specifica, ma una ristrutturazione complessiva del paesaggio bentonico, spesso caratterizzata dalla sostituzione di specie strutturanti con organismi opportunisti e più tolleranti.

In alcuni casi tali dinamiche risultano chiaramente leggibili anche a scala locale. Nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara, ad esempio, è stato osservato un aumento del numero di individui della specie termofila *Hermodice carunculata*, accompagnato da una riduzione della copertura di *Parazoanthus axinellae* (Azzola *et al.* 2025). Simili associazioni suggeriscono che la diffusione di specie favorite dalle nuove condizioni termiche possa accompagnarsi alla regressione di taxa sensibili, contribuendo alla riorganizzazione funzionale delle comunità bentoniche.

Questi processi risultano ben documentati poiché coinvolgono organismi di dimensioni relativamente grandi e facilmente osservabili, anche da subacquei ricreativi o dai gestori delle aree marine protette. Tuttavia, la componente predominante della biodiversità marina è costituita da specie macrobentoniche appartenenti a gruppi tassonomicamente complessi, il cui riconoscimento richiede competenze specialistiche (Boero *et al.* 2003). Le trasformazioni che interessano queste specie, così come il loro ruolo funzionale negli ecosistemi, restano in gran parte poco conosciute, pur essendo fondamentali per ottenere una visione realmente completa dei cambiamenti in corso.

Uno dei rarissimi casi di studio in questo ambito deriva dal confronto pluridecennale della biodiversità di poriferi e idrozoi lungo un transetto compreso tra 0 e 25 m di profondità, situato sulle falesie rocciose del Promontorio di Portofino e monitorato a partire dalla metà degli anni ottanta. In circa quarant'anni, il numero di specie di idrozoi si è quasi dimezzato e la comunità attuale risulta dominata da specie euriecie, capaci di occupare l'intero gradiente dalla superficie al fondo per gran parte dell'anno. Anche i poriferi hanno mostrato una marcata

riduzione del numero di specie nelle porzioni più superficiali del transetto, mentre nelle aree più profonde la ricchezza specifica è rimasta sostanzialmente stabile. Nonostante le differenze eco-fisiologiche tra i due gruppi, tali andamenti risultano chiaramente correlabili all'aumento della temperatura delle acque (Bandi *et al.* 2025; Moglia *et al.* 2025).

L'evidenza di questi cambiamenti non è limitata a singoli casi di studio, ma emerge da confronti temporali condotti in diverse aree del Mediterraneo, che documentano la perdita di specie sensibili e la sostituzione di comunità complesse con comunità più semplificate e omogenee (Morri *et al.* 2019). Nelle scogliere di Portofino, ad esempio, la storica dominanza di foreste algali costituite da macroalghe erette come *Sargassum vulgare* e *Dictyopteris polypodioides* è stata progressivamente sostituita da tappeti algali (*turf*) e, più recentemente, da specie invasive come *Caulerpa cylindracea*. Cambiamenti analoghi sono stati documentati anche in altre aree del Mediterraneo, dove foreste animali a gorgonie o popolamenti bentonici ricchi e tridimensionali hanno lasciato spazio a comunità meno diversificate e più uniformi. Questo processo di omogeneizzazione biotica rappresenta uno degli esiti più insidiosi del cambiamento globale, poiché riduce la complessità ecologica dei sistemi e ne indebolisce la resilienza. Un caso emblematico è rappresentato dalla Secca del Papa, nell'Area Marina Protetta di Tavolara, dove comunità che negli anni novanta erano caratterizzate da foreste animali di *Eunicella singularis* risultavano, poco più di un decennio dopo, completamente prive di gorgonie. Analisi temporali condotte in aree come Portofino, Isola d'Elba, Plemmirio e Capo Carbonara mostrano inoltre traiettorie di cambiamento nette nella composizione delle comunità bentoniche, confermando che la ristrutturazione degli habitat di scogliera rappresenta un fenomeno diffuso e non episodico.

La perdita di biodiversità e le modificazioni strutturali delle comunità non hanno riguardato esclusivamente aree relativamente poco influenzate da attività umane, ma anche ambienti fortemente antropizzati, come le zone portuali. Nel porto di Genova, studi pionieristici condotti negli anni sessanta mediante pannelli sospesi a diverse profondità avevano fornito un primo quadro della biodiversità locale. L'applicazione recente dello stesso approccio metodologico nella medesima stazione ha evidenziato una netta diminuzione sia della ricchezza specifica sia dell'abbondanza delle specie dominanti (Abate *et al.* 2025).

Segnali analoghi di impatto, riconducibili agli effetti combinati del riscaldamento globale e dell'incremento delle pressioni antropiche locali, sono stati rilevati anche in praterie di fanerogame marine localizzate in contesti urbani (Montefalcone *et al.* 2007), nelle comunità di scogliera coralligena nelle vicinanze di porti industriali (Gatti *et al.* 2012), nelle comunità di grotte marine sommerse limitrofe a porti turistici e industriali (Nepote *et al.* 2017; Montefalcone *et al.* 2018).

Sebbene il riscaldamento delle acque mostri a vari livelli segnali evidenti di impoverimento della biodiversità marina, alcune specie sembrano invece trarre vantaggio dalle nuove condizioni ambientali. Un esempio emblematico è rappresentato dal gorgonocefalo *Astrospartus mediterraneus* (Risso, 1826), che da specie rara e tipicamente associata a maggiori profondità è divenuta progressivamente più superficiale e oggi così abbondante da costituire, in alcuni contesti, un problema per le attività di pesca. L'incremento di questo iconico sospensivoro sembra essere collegato a un parallelo aumento dei solidi sospesi in acqua (Canessa *et al.* 2023).

Nel loro complesso, questi processi mostrano come il riscaldamento climatico non agisca in modo isolato, ma si sovrapponga frequentemente a pressioni locali di origine antropica, amplificandone gli effetti sulle comunità bentoniche.

Pressioni antropiche locali

In una recente intervista, il biologo marino Enric Ballesteros ha sottolineato come le principali criticità che interessano il Mediterraneo non siano da attribuire prioritariamente all'inquinamento chimico, il cui impatto, a suo avviso, si manifesta soprattutto su scala locale, bensì alla progressiva perdita di habitat e alla sovrapesca, entrambi fattori in grado di incidere profondamente sulla biodiversità marina (Blanfuné *et al.* 2017).

Solo negli ultimi anni è emersa con chiarezza la consapevolezza che i rifiuti marini, di diversa natura, costituiscono una presenza capillare in tutti gli ambienti finora indagati, con una diminuzione graduale della loro densità man mano che ci si allontana dalla costa (Enrichetti *et al.* 2020). In particolare, le reti abbandonate sui fondali coralligeni possono ricoprire estese porzioni di substrato, intrappolando sedimenti che

soffocano gli organismi bentonici e danneggiano gravemente le foreste di antozoi arborescenti (Enrichetti *et al.* 2019).

Anche i palamiti smarriti esercitano un impatto rilevante, soprattutto sulle foreste di gorgonie. Una singola lenza abbandonata può impigliarsi in decine di colonie; trascinata dalle correnti, sfrega ripetutamente contro il cenenchima, provocando la perdita di ampie porzioni di tessuto. Privati della protezione chimica fornita dal cenenchima, gli scheletri proteici delle gorgonie diventano rapidamente substrato per comunità epibionti abbondanti. Questo processo aumenta la resistenza idrodinamica delle colonie, favorendone la rottura (Bavestrello *et al.* 1997). A ciò si aggiunge l'elevata persistenza del nylon in ambiente marino, che può mantenere questi effetti dannosi per diversi decenni (Enrichetti *et al.* 2021).

È opinione diffusa che la piccola pesca costiera con attrezzi da posta sia relativamente sostenibile. Tuttavia, già Salvatore Lo Bianco, celebre preparatore della Stazione Zoologica Anton Dohrn, osservava come il tramaglio rappresentasse uno degli strumenti più efficienti per la raccolta di invertebrati bentonici. Questa considerazione è stata confermata in un sito coralligeno profondo del Mar Ligure occidentale, sfruttato da pescatori artigianali per la cattura dell'aragosta. L'analisi delle catture ha mostrato che il tramaglio preleva una quantità di scarti non commerciali 9 e 12 volte superiore rispetto al pescato vendibile, rispettivamente in termini di diversità specifica e numero di individui, con una biomassa complessiva comparabile. Ciò evidenzia una perdita significativa a tre livelli: diversità, abbondanza e biomassa. Inoltre, questo attrezzo asporta notevoli quantità di substrato coralligeno, alterando l'integrità del fondale, uno dei descrittori chiave della Strategia Marina dell'Unione Europea (Enrichetti *et al.* 2019).

Non meno impattante è la pesca a strascico, che in determinate circostanze può risultare particolarmente distruttiva. Nel Mar Ligure, tra le principali specie target figurano i gamberi rossi e viola, e le stesse cale vengono ripetute quotidianamente per intere stagioni. Oltre alla pressione esercitata sulle specie bersaglio, questa pratica compromette gravemente le comunità bentoniche. Nei primi decenni del Novecento, Raffaele Issel descriveva estese comunità a *Isidella elongata* (Esper, 1788), associate a gamberi rossi e potassoli. Oggi tali praterie sopravvivono solo in aree marginali e accidentate, non accessibili alle reti. Una situazione analoga interessa i reef a coralli bianchi: sebbene le imbarca-

zioni tendano a evitare il contatto diretto con queste strutture per non danneggiare gli attrezzi, l'attività lungo i margini provoca la distruzione progressiva delle colonie periferiche e il sollevamento di grandi quantità di sedimento che finiscono per ricoprire i coralli (Bo *et al.* 2023).

Anche la pesca ricreativa offshore può determinare effetti estremamente severi. Un caso emblematico riguarda l'uso di palamiti da fondo sulle sommità dei monti sottomarini. Nei primi anni settanta, un gruppo di pescatori dilettanti individuò con l'ecoscandaglio il monte Ulisse, situato a circa 30 miglia dal porto di Genova. La prima battuta di pesca, condotta su un fondale di circa 400 m con un palamito di 70 ami, produsse risultati straordinari: 20 cernie di fondo (450 kg), 3 pesci vacca (260 kg) e 70 kg di gronchi. Nel giro di due anni furono catturate complessivamente 120 cernie, fino alla loro completa scomparsa nel 1975. Le sommità dei monti sottomarini sono probabilmente hotspot di biodiversità che richiedono tempi molto lunghi per essere colonizzati; la pesca inizialmente abbondante può quindi tradursi in un rapido collasso delle popolazioni di predatori apicali, la cui ricostituzione potrebbe richiedere tempi estremamente prolungati.

Per quanto riguarda il corallo rosso, *Corallium rubrum* (Linnaeus, 1758), oggi la pesca è consentita esclusivamente a subacquei professionisti ed è regolamentata da normative stringenti relative a profondità di prelievo, dimensioni minime delle colonie e quantitativi consentiti. In passato, tuttavia, la specie veniva raccolta mediante attrezzi trainati di vario tipo. Lungo le coste italiane, i fondi duri fino a 100-120 m di profondità sono stati per secoli sfruttati attraverso l'"ingegno" (Cattaneo-Vietti *et al.* 2016). È significativo che già nel XVIII secolo i pescatori locali riconoscessero i danni provocati da tali pratiche: una legge della Repubblica di Genova del 1757 vietava l'uso di una draga detta "bronzino", ritenuta eccessivamente distruttiva. Analogamente, nel 1770 i cittadini di Portofino denunciarono alle autorità di Rapallo l'attività di quattro imbarcazioni catalane che, pescando corallo con attrezzi a traino, stavano devastando i fondali e compromettendo l'economia locale (Bavestrello *et al.* 2015).

Attualmente le popolazioni di corallo rosso nel Mar Ligure sono soggette anche all'impatto involontario delle immersioni ricreative, che nell'Area Marina Protetta di Portofino superano le 30.000 presenze annue. L'impatto è stato valutato analizzando la biomassa degli organismi target e la presenza di frammenti di corallo nei sedimenti alla base delle

scogliere: nei siti ad alta frequentazione, la quantità di frammenti risultava fino a dieci volte superiore rispetto a quella rilevata in aree non disturbate (Betti *et al.* 2019).

Monitoraggio, conservazione e prospettive gestionali

Alla luce di questi cambiamenti, il monitoraggio a lungo termine assume un ruolo cruciale per comprendere l'evoluzione degli ecosistemi bentonici e per orientare misure efficaci di gestione. In questa prospettiva si colloca il progetto Mare Caldo (Greenpeace Italia - DiSTAV) finalizzato a valutare gli effetti del riscaldamento globale sulle comunità bentoniche di scogliera attraverso una rete di stazioni distribuite in diverse Aree Marine Protette italiane. La rete comprende stazioni distribuite lungo un ampio gradiente geografico del Mediterraneo occidentale e centrale, tra cui Portofino, Cinque Terre, Tavolara, Capo Carbonara, Plemmirio, Torre Guaceto, Isole Tremiti, Ventotene e Santo Stefano, Miramare, Capo Milazzo, Tor Paterno, Ustica, Isola dell'Asinara e Isola d'Elba. L'impostazione del progetto consente quindi di confrontare aree con differente storia termica, livello di protezione e stato ecologico, offrendo una base comparativa particolarmente utile per distinguere gli effetti del riscaldamento da quelli dovuti ad altre pressioni locali. Il progetto prevede l'installazione di temperature data logger lungo la scogliera rocciosa, dalla superficie fino a 40 m di profondità con intervalli regolari di 5 m, associata al rilievo dello stato ecologico delle comunità, al monitoraggio degli eventi di mortalità di massa e all'osservazione della diffusione di specie termofile indicatrici del cambiamento climatico. Un simile approccio integrato consente di collegare le anomalie termiche registrate strumentalmente con le modificazioni ecologiche osservate sul campo, migliorando la capacità di interpretare le traiettorie di cambiamento degli habitat di scogliera.

I dati raccolti mostrano che molte delle aree considerate sono già state interessate da ripetute onde di calore marine, con anomalie termiche significative, e confermano la necessità di rafforzare sia le attività di osservazione sia le misure di conservazione. I dati relativi al 2024 indicano, infatti, che tutte le aree incluse nel progetto sono state interessate da numerose MHWs, sia nella stagione estiva sia in quella invernale. Nella maggior parte dei casi, i picchi termici hanno superato di circa 0,5-1 °C

la media climatologica, mentre in alcune aree – come Cinque Terre, Isola d'Elba, Torre Guaceto e Isole Tremiti – sono state registrate anomalie superiori a 2,5 °C. Particolarmente significativo è il caso dell'Isola dell'Asinara, dove nel solo 2024 sono stati rilevati quattordici eventi di MHWs, distribuiti in diversi periodi dell'anno e con durate comprese tra 5 e 22 giorni. Questi dati mostrano con chiarezza come il riscaldamento non si manifesti soltanto come incremento medio della temperatura, ma anche come aumento della persistenza e della ricorrenza degli estremi termici, con implicazioni ecologiche potenzialmente molto rilevanti per gli organismi bentonici sessili.

Le prime analisi comparative svolte nell'ambito del progetto mostrano inoltre differenze apprezzabili nello stato ecologico delle comunità monitorate lungo il gradiente batimetrico e tra aree diverse, confermando che la risposta degli habitat di scogliera al riscaldamento dipende non solo dall'intensità dello stress termico, ma anche dalle condizioni locali e dalla storia ecologica dei siti. In tale quadro, risultano prioritari la riduzione delle pressioni locali, il ripristino degli ecosistemi degradati, il potenziamento delle Aree Marine Protette e l'adozione di strategie di gestione sostenibile supportate da una cooperazione su scala mediterranea. Accanto alla riduzione delle pressioni, appare sempre più importante sostenere anche interventi di restauro ecologico attivo, come nel caso del ripristino di praterie di fanerogame già avviato in alcuni tratti della Liguria (Robello *et al.* 2024), nella prospettiva di rafforzare la resilienza degli ecosistemi costieri. In questo senso, anche qualora le Aree Marine Protette non siano da sole sufficienti a mitigare l'insieme degli impatti locali e globali, la loro assenza renderebbe lo scenario conservazionistico complessivo ancora più fragile (Bianchi *et al.* 2018).

Conclusioni

Nel 1883 il celebre biologo evoluzionista Thomas Henry Huxley, tra i più autorevoli sostenitori e divulgatori delle teorie darwiniane – tanto da essere soprannominato *The Darwin Bulldog* – pronunciò il discorso inaugurale alla Fisheries Exhibition di Londra. In quell'occasione affermò che “Probably all the great sea fisheries are inexhaustible; that is to say, that nothing we do seriously affects the numbers of fish. Any at-

tempt to regulate these fisheries seems consequently, from the nature of the case, to be useless”. Tale posizione rifletteva una visione dell’ambiente marino come serbatoio virtualmente inesauribile di risorse.

A distanza di circa quarant’anni, in un intervento presso l’Accademia delle Scienze degli Stati Uniti, il principe Alberto I di Monaco esprime una visione diametralmente opposta, mettendo in guardia contro la crescente potenza dei mezzi di pesca moderni, in particolare i pescherecci a vapore dotati di reti a strascico. Egli denunciava come questi strumenti “labourant le sol même des plateaux continentaux”, arando i fondali, sradicando le fanerogame marine e compromettendo habitat fondamentali per la riproduzione e la conservazione di numerose specie. Prevedeva inoltre che, nel volgere di pochi anni, il sostentamento di centinaia di migliaia di pescatori europei avrebbe potuto subire un drastico ridimensionamento.

In realtà, dubbi sulla selettività e sull’impatto della pesca a strascico erano già stati sollevati in precedenza. Lazzaro Spallanzani, durante i suoi soggiorni di studio a Porto Venere, osservava criticamente come le “bilancelle” catturassero, insieme ai pesci di taglia commerciale, grandi quantità di individui di piccole dimensioni poi rigettati in mare, anticipando una riflessione sulla scarsa selettività degli attrezzi e sugli sprechi associati a determinate pratiche di pesca.

A oltre un secolo di distanza dalle considerazioni, per molti aspetti profetiche, del Principe di Monaco, appare ormai evidente quanto l’ambiente marino sia vulnerabile agli impatti antropici, soprattutto in un’epoca in cui tali pressioni si sommano e interagiscono con cambiamenti di scala globale, come il riscaldamento climatico. Questa consapevolezza, tuttavia, non sembra ancora tradursi pienamente in decisioni politiche coerenti, come dimostrano i ricorrenti dibattiti sulla regolamentazione della pesca in seno alla Commissione Europea.

Oggi appare chiaro che molti habitat profondi risultano gravemente alterati prima ancora di essere stati adeguatamente studiati. In tale contesto assume particolare rilievo la raccomandazione della General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM/29/2005/1), che limita la pesca a strascico nel Mediterraneo a profondità non superiori ai 1000 m e rappresenta un importante tentativo di contenere i danni sugli ecosistemi di profondità.

Per quanto riguarda le acque costiere, le politiche di tutela presentano ancora evidenti elementi di contraddizione. L’istituzione delle

Aree Marine Protette ha rappresentato senza dubbio un passo avanti significativo: numerosi studi hanno evidenziato, almeno per la fauna ittica, un chiaro “effetto riserva”, con incrementi della biomassa e delle dimensioni medie degli individui. Tuttavia, se può apparire coerente consentire in tali aree forme di piccola pesca professionale ritenute relativamente sostenibili, risulta più difficile giustificare il rilascio di autorizzazioni alla pesca ricreativa, se non come espressione di compromessi politici legati alla pressione di specifici gruppi di interesse.

In questo senso, il monitoraggio continuativo rappresenta un passaggio indispensabile: senza serie temporali estese e confrontabili, il riconoscimento degli effetti del cambiamento climatico e delle pressioni locali resta inevitabilmente parziale. La disponibilità di dati ecologici e termici raccolti su ampia scala, come nel caso delle reti osservative attive nel Mediterraneo, costituisce quindi uno strumento essenziale non solo per descrivere il cambiamento, ma anche per anticiparlo e orientare le scelte di conservazione. Le osservazioni più recenti mostrano inoltre che gli estremi termici non possono più essere considerati eventi rari o eccezionali, ma stanno assumendo un carattere ricorrente in molte aree del Mediterraneo. Di conseguenza, la conservazione non può più limitarsi alla sola protezione passiva degli habitat, ma deve includere reti di monitoraggio, capacità di diagnosi precoce degli eventi di crisi e strategie di gestione adattativa fondate su dati aggiornati. In assenza di misure tempestive e integrate, il Mediterraneo rischia di perdere non soltanto specie e habitat, ma anche una parte rilevante della propria complessità ecologica e della propria capacità di risposta ai cambiamenti futuri.

È inoltre importante ricordare che gli effetti della pesca non si limitano alle specie bersaglio, ma coinvolgono in modo sostanziale anche gli organismi bentonici, elementi chiave del paesaggio sottomarino e della funzionalità ecosistemica. In questo scenario, il sistema delle aree protette appare oggi una delle poche strategie realmente efficaci per la conservazione di un ambiente tanto delicato. I decisori politici dovrebbero pertanto considerare con estrema attenzione gli obiettivi delle Nazioni Unite nell’ambito dell’Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, che prevedono la protezione di almeno il 30% dei mari europei, con una quota minima del 10% sottoposta a tutela rigorosa, quale condizione imprescindibile per la salvaguardia della biodiversità marina.

Bibliografia

- Abate A., Bavestrello G., Bianchi C.N., Canessa M., Garaventa F., Enrichetti F., Ridella B. *Cambiamenti della biodiversità nel benthos sessile del porto di Genova su scala pluridecennale*. Biol. Mar. Medit. (2025) 29 (1): 59-62.
- Azzola A., Bianchi C.N., Merotto L., Nota A., Tiralongo F., Morri C., Oprandi A. *The changing biogeography of the Ligurian Sea: Seawater warming and further records of southern species*. Diversity(2024) 16 (3): 159.
- Azzola A., Furfaro G., Trainito E., Doneddu M., Montefalcone M. *Sea water warming favours the northward range expansion of Lessepsian species in the Mediterranean Sea: The cephalaspidean Lamprohaminoea ovalis*. J. Mar. Biol. Ass. UK (2022): 1-7.
- Azzola A., Merotto L., Solca M., Trainito E., Enrichetti F., Montefalcone M., Furfaro G. *Conquering the North: the recent expansion of a Lessepsian sea slug in the north-western Mediterranean Sea as a mirror of seawater warming*. Biol. Inv. (2025): 27:37.
- Azzola A., Montefalcone M., Righi S., Cenni E., Robello C., Atzori F., Simonini R. *Cascading effects of global warming: Hermodice carunculata predation on Parazoanthus axinellae*. Biol. Inv. (2025) 27: 37.
- Azzola A., Picchio V., Bianchi C.N., Morri C., Oprandi A., Montefalcone M. *Troubles never come alone: multiple pressures on a temperate rocky reef*. Water (2023) 15 (4): 825.
- Bandi A., Reboa A., Norbiato G., Silipigni E., Bavestrello G., Bertolino M. *Changes in sponge fauna over a half-century from a rocky cliff of the Portofino Promontory (Ligurian Sea; Western Mediterranean)*. Eur. Zool. J. (2025) 92 (1): 1208-1223.
- Bavestrello G., Bertone S., Cattaneo-Vietti R., Cerrano C., Gaino E., Zanzi D. *Mass mortality of Paramuricea clavata (Anthozoa, Cnidaria) on Portofino promontory cliffs, Ligurian Sea, Mediterranean Sea*. Mar. Life (1994) 4 (1): 15-19.
- Bavestrello G., Bo M., Bertolino M., Betti F., Cattaneo-Vietti R. *Long-term comparison of structure and dynamics of the red coral metapopulation of the Portofino Promontory (Ligurian Sea): A case-study for a Marine Protected Area in the Mediterranean Sea*. Mar. Ecol. (2015) 36 (4): 1354-1363.
- Bavestrello G., Cerrano C., Zanzi D., Cattaneo-Vietti R. *Damage by fishing activities to the Gorgonian coral Paramuricea clavata in the Ligurian Sea*. Aq. Conserv. Mar. Fresh. Ecosyst. (1997) 7 (3): 253-262.
- Betti F., Bavestrello G., Fravega L., Bo M., Coppari M., Enrichetti F., Cattaneo-Vietti R. *On the effects of recreational SCUBA diving on fragile benthic*

- species: The Portofino MPA (NW Mediterranean Sea) case study.* Ocean Coast. Manag. (2019) 182: 104926.
- Bianchi C.N., Azzola A., Bertolino M., Betti F., Bo M., Cattaneo-Vietti R., Cocito S., Montefalcone M., Morri C., Oprandi A., Peirano A., Bavestrello G. *Consequences of the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s on the Ligurian Sea biodiversity (NW Mediterranean).* Eur. J. Zool. (2019) 86 (1): 458-487.
- Bianchi C.N., Azzola A., Parravicini V., Peirano A., Morri C., Montefalcone M. *Abrupt change in a subtidal rocky reef community coincided with a rapid acceleration of sea water warming.* Diversity (2019) 11: 215.
- Bianchi C.N., Cocito S., Diviacco G., Dondi N., Fratangeli F., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A., Sgorbini S., Vacchi M., Morri C. *The park never born: Outcome of a quarter of century 1 of inaction on the seafloor integrity of a proposed but never established Marine Protected Area.* Aq. Conserv. Mar. Fresh. Ecosyst. (2018) 28: 1209-1228.
- Blanfuné A., Thibaut T., Boudouresque C.F., Mačić V., Markovic L., Palomba L., Verlaque M., Boissery P. *The CARLIT method for the assessment of the ecological quality of European Mediterranean waters: Relevance, robustness and possible improvements.* Ecol. Ind. (2017) 72: 249-259.
- Bo M., Enrichetti F., Betti F., Gay G., Quarta G., Calcagnile L., Bavestrello G. *The cold-water coral province of the eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea): Historical and novel evidences.* Frontiers Mar. Sci. (2023) 10: 1114417.
- Boero F., Bouillon J., Gravili C., Piraino S. *Who cares about the Hydrozoa of the Mediterranean Sea? An essay on the zoogeography of inconspicuous groups.* Biogeographia – J. Integr. Biogeogr. (2003) 24 (1): 101-113.
- Canessa M., Betti F., Bo M., Enrichetti F., Toma M., Bavestrello G. *Possible population growth of *Astrospartus mediterraneus* (Risso, 1826) (Ophiuroidea, Gorgonocephalidae) in the Mediterranean Sea.* Diversity (2023) 15 (1): 122.
- Cattaneo-Vietti R., Bo M., Cannas R., Cau A., Follesa C., Meliadori E., Bavestrello G. *An overexploited Italian treasure: past and present distribution and exploitation of the precious red coral *Corallium rubrum* (L., 1758) (Cnidaria: Anthozoa).* It. J. Zool. (2016) 83 (4): 443-455.
- Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C.N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C., Sponga F. *A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999.* Ecol. Let. (2000) 3 (4): 284-293.
- Enrichetti F., Bava S., Bavestrello G., Betti F., Lanteri L., Bo M. *Artisanal fishing impact on deep coralligenous animal forests: A Mediterranean case study of marine vulnerability.* Oc. Coast. Manag. (2019) 177: 112-126.

- Enrichetti F., Bavestrello G., Betti F., Rindi F., Tregrosso A., Bo M. *Fate of lost fishing gears: Experimental evidence of biofouling colonization patterns from the northwestern Mediterranean Sea*. Environ. Poll. (2021) 268: 115746.
- Enrichetti F., Dominguez-Carrió C., Toma M., Bavestrello G., Canese S., Bo M. *Assessment and distribution of seafloor litter on the deep Ligurian continental shelf and shelf break (NW Mediterranean Sea)*. Mar. Pollut. Bull. (2020) 151: 110872.
- Gaino E., Pronzato R. *Ultrastructural evidence of bacterial damage to Spongia officinalis fibres (Porifera, Demospongiae)*. Disease Aq. Organ. (1989) 6: 67-74.
- Garrabou J., Gómez-Gras D., Medrano A., Cerrano C., Ponti M., Schlegel R., Bensoussan N., Turicchia E., Sini M., Gerovasileiou V., Teixeira N., Mirasole A., Tamburello L., Cebrian E., Rilov G., Ledoux J.B., Ben Souissi J., Khamassi F., Ghanem R., Benabdi M., Grimes S., Ocaña O., Bazairi H., Hereu B., Linares C., Kersting D.K., Rovira G., Ortega J., Casals D., Pagès-Escalà M., Margarit N., Capdevila P., Verdura J., Ramos A., Izquierdo A., Barbera C., Rubio-Portillo E., Anton I., López-Sendino P., Díaz D., Vázquez-Luis M., Duarte C., Marbà N., Aspillaga E., Espinosa F., Grech D., Guala I., Azzurro E., Farina S., Gambi M.C., Chimienti G., Montefalcone M., Azzola A., Pulido Mantas T., Fraschetti S., Ceccherelli G., Kipson S., Bakran-Petricioli T., Petricioli D., Jimenez C., Katsanevakis S., Tuney Kizilkaya I., Kizilkaya Z., Sartoretto S., Rouanet E., Ruitton S., Comeau S., Gattuso J., Harmelin J.G. *Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea*. Global Ch. Biol. (2022): 1-18.
- Gatti G., Bianchi C.N., Montefalcone M., Venturini S., Diviacco G., Morri C. *Observational information on a temperate reef community helps understanding the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s*. Mar. Pollut. Bull. (2017) 114: 528-538.
- Gatti G., Bianchi C.N., Parravicini V., Rovere A., Peirano A., Montefalcone M., Morri C. *Ecological change, sliding baselines and the importance of historical data: lessons from combining observational and quantitative data on a temperate reef over 70 years*. PLoS ONE (2015) 10 (2): e0118581.
- Gatti G., Montefalcone M., Rovere A., Parravicini V., Morri C., Albertelli G., Bianchi C.N. *Seafloor integrity down the harbour waterfront: first characterisation and quality evaluation of the coralligenous rocky shoals of Vado Ligure (NW Mediterranean Sea)*. Adv. Oceanogr. Limnol. (2012) 3: 51-67.
- Moglia S., Betti F., Boero F., Canessa M., Di Camillo C.G., Enrichetti F., Bavestrello G. *Climate-driven shifts in a Mediterranean hydrozoan assemblage over 44 years*. ICES J. Mar. Sci. (2025) 82 (7): fsaf113.

- Montalbetti E., Cavallo S., Azzola A., Montano S., Galli P., Montefalcone M., Seveso D. *Mucilage-induced necrosis reveals cellular oxidative stress in the Mediterranean gorgonian Paramuricea clavata*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. (2023) 559: 151839.
- Montefalcone M., Albertelli G., Morri C., Bianchi C.N. *Urban seagrass: Status of Posidonia oceanica facing the Genoa city waterfront (Italy) and implications for management*. Mar. Pollut. Bull. (2007) 54: 206-213.
- Montefalcone M., Albertelli G., Morri C., Bianchi C.N. *Pattern of wide-scale substitution within Posidonia oceanica meadows of NW Mediterranean Sea: Invaders are stronger than natives*. Aq. Conserv. Mar. Fresh. Ecosyst. (2010) 20: 507-515.
- Montefalcone M., De Falco G., Nepote E., Canessa M., Bertolino M., Bavestrello G., Morri C., Bianchi C.N. *Thirty year ecosystem trajectories in a submerged marine cave under changing pressure regime*. Mar. Environ. Res. (2018) 137: 98-110.
- Morri C., Montefalcone M., Gatti G., Vassallo P., Paoli C., Bianchi C.N. *An alien invader is the cause of homogenization in the recipient ecosystem: A simulation-like approach*. Diversity (2019) 11: 146.
- Nepote E., Bianchi C.N., Morri C., Ferrari M., Montefalcone M. *Impact of a harbour construction on the benthic community of two shallow marine caves*. Mar. Pollut. Bull. (2017) 114: 35-45.
- Robello C., Acunto S., Leone L., Mancini I., Oprandi A., Montefalcone M. *Large-scale re-implantation efforts for Posidonia oceanica restoration in the Ligurian Sea: Progress and challenges*. Diversity (2024) 16: 226.
- Zenetos A., Gofas S., Verlaque M., Çinar M.E., García Raso J.E., Bianchi C.N., Morri C., Azzurro E., Bilecenoglu M., Frogia C., Siokou I., Violanti D., Sfriso A., San Martin G., Giangrande A., Katagan T., Ballesteros E., Ramos-Esplà A., Mastrototaro F., Ocana O., Zingone A., Gambi M.C., Streftaris N. *Alien species in the Mediterranean Sea by 2010. A contribution to the application of European Union's Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Part I. Spatial distribution*. Medit. Mar. Sci. (2010) 11 (2): 381-493.

CARLO NIKE BIANCHI* – CARLA MORRI**

*A Century of Changes in the Biodiversity
of the Ligurian Sea:
A Tale of Two Coastal Ecosystems*

Abstract: Historical data are essential for a proper evaluation of the ongoing changes in marine ecosystems, due to the combined action of local anthropogenic pressures and seawater warming. The Ligurian Sea offers about a century of information on two important coastal marine ecosystems: seagrass meadows and rocky reefs. Both have undergone significant alterations, but while the former has been mainly affected by direct anthropogenic impacts, the latter has especially suffered the climate shift of the 1990s. Regional management practices, including the establishment of marine protected areas, can help reduce local threats and make ecosystems more resilient to global change.

Keywords: anthropogenic impacts; seawater warming; *Posidonia oceanica*; rocky reefs; Mediterranean Sea.

Sommario: *Un secolo di cambiamenti nella biodiversità del Mar Ligure: storia di due ecosistemi costieri*

I dati storici sono essenziali per valutare i cambiamenti in atto negli ecosistemi marini, dovuti alle pressioni antropiche locali e al riscaldamento del mare. Il Mar Ligure offre circa un secolo di informazioni su due importanti ecosistemi marini costieri: le praterie di posidonie e le scogliere rocciose. Entrambe hanno subito alterazioni, ma mentre le prime sono state influenzate principalmente dagli impatti antropici diretti, le seconde hanno sofferto soprattutto del cambiamento climatico degli anni novanta. Le pratiche gestionali, compresa l'istituzione di aree marine protette, possono contribuire a ridurre le pressioni locali e a rendere gli ecosistemi più resilienti ai cambiamenti globali.

Parole chiave: impatti antropici; riscaldamento del mare; *Posidonia oceanica*; scogliere rocciose; Mar Mediterraneo.

* Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre carlonike.bianchi@szn.it

** Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre carla.morri@szn.it

Introduction

Marine ecosystems in the world's oceans are facing an escalating crisis driven by cumulative local yet widespread pressures (such as pollution, overfishing, and habitat degradation) and global stressors resulting from anthropogenic climate change (Ahmed and Tamim 2025). The impact of all these factors on the marine biota is expected to alter the composition and structure of communities in unprecedented and therefore unpredictable ways.

A proper evaluation of patterns and magnitude of marine ecosystem change requires the availability of long-term time series, which are unfortunately rare worldwide (Bianchi and Morri 2004). The Italian part of the Ligurian Sea, off the coast of Liguria, an administrative region in NW Italy (Figure 1), represents a partial exception, as historical data are available for a number of ecosystems (Bianchi *et al.* 2019a).

This brief review aims to describe the changes undergone by two marine coastal ecosystems in Liguria, for which extensive data are available spanning approximately a century. The narrative will obviously address the case history of a science (marine biology, in particular), but it will also consider the history of the people who made that science. The two ecosystems are the *Posidonia oceanica* meadows and the reefs. Both are included in the European Union's list of marine habitats of conservation interest.



Figure 1. Geographical position of Liguria in Italy, with the locations of the sites mentioned in the text.

Posidonia oceanica meadows (EU Habitat #1120)

Posidonia oceanica is a seagrass, endemic to the Mediterranean Sea, which forms extensive meadows from the sea surface to depths of 40 m or more. These meadows are of enormous importance for the functioning of the entire coastal marine environment: the value of the ecosystem services they provide has been calculated at € 1.72 million per hectare per year (Vassallo *et al.* 2013).

The first available information on the presence of *Posidonia oceanica* in Liguria is due to Raffaele Issel (Figure 2a), who began studying it more than 110 years ago.



Figure 2. *The beginning of studies on Posidonia oceanica in Liguria: a) Raffaele Issel (1878-1936); b) the cover of his marine biology textbook of 1918; c) his original drawing of a bundle of Posidonia oceanica with an inflorescence and epiphytes on the rhizome; d) the exterior and e) the interior of the Marine Laboratory of Quarto.*

Son of the famous geologist Arturo, Raffaele was a marine biologist (Morri and Bianchi 1988). In 1912, he founded the Marine Biology Laboratory of Quarto (Figure 2d,e), where he conducted numerous studies of fishery, plankton, benthos and, especially, *Posidonia oceanica* (Figure 2c). In particular, he documented the distribution of the shallow meadows along the eastern coast of the Portofino Promontory (Figure 3b), which he described as luxuriant (Issel 1912).



Figure 3. *Revisitation after 70 years of the Posidonia oceanica meadows along the eastern side of the Portofino Promontory first studied by Raffaele Issel: a) Giorgio Bavestrello (GB) and Riccardo Cattaneo Vietti (RCV); b) the Issel's map of 1912; c) results of Bavestrello's investigations in 1982.*

A few years later, Issel published *Biologia Marina* (Figure 2b), the first university textbook on marine biology in Italian (Issel 1918). Today, this text might be considered outdated, but reading it is still a pleasure because it conveys all the passion that this man had for the study of nature. At page 409, Issel writes, “It would be interesting to know the distribution of the posidonias, which draw a green belt along the shores of Liguria”.

Issel's suggestion remained unimplemented for a long time: for over 60 years, the only information available on the presence of *Posidonia oceanica* meadows in Liguria were the fishing maps, which often provide rough information on the type of seabed where fishermen cast their gear (Canessa *et al.* 2017, and references therein). In these fishing maps, *Posidonia oceanica* was typically referred to as “algae” or by other names,

which therefore require some interpretation. Things began to change in the 1980s, when Riccardo Cattaneo Vietti wrote *Sea of Liguria*, the first book entirely dedicated to the marine habitats of Liguria (Cattaneo Vietti *et al.* 1982). This book included a series of maps of benthic habitats, on a scale 1:100,000, which collated all the available information. It was not, therefore, a true mapping exercise, but rather a compendium of the knowledge existing at that time. Although still inaccurate, these maps provided the first scientific information on the distribution of *Posidonia oceanica* meadows in Liguria. Cattaneo also undertook another important initiative: in 1982, he suggested Giorgio Bavestrello (Figure 3a) to revisit the meadows of the Portofino Promontory described by Issel seventy years earlier. Bavestrello (1983) reported that all the meadows listed in 1912 still existed in 1982, but most were more or less severely degraded (Figure 3c).

Thanks to technological advances (aerial photography, acoustic surveys, remotely operated vehicles, scientific scuba diving, underwater scooters), Issel's wish to map the *Posidonia oceanica* meadows of Liguria was finally achieved in the 1990s, when the first maps specifically dedicated to them were published in the form of a set of 1:25,000 scale plates in an atlas (Bianchi and Peirano 1995). The atlas showed that the degradation of the meadows, already observed in a number of locations (Bianchi 1988), was widespread along the entire Ligurian coast, with only a few still in healthy conditions. This awareness gave rise to the need to start monitoring *Posidonia oceanica* meadows (Peirano *et al.* 1995) and to investigate the possible causes of their degradation, such as terrigenous inputs, beach nourishment, land reclamation, anchoring, and trawling (Peirano and Bianchi 1997). Following a 1998 Italian law that assigns, at least in part, the administration of maritime state property to the regions, the Regione Liguria has begun to take charge of the management of coastal marine ecosystems, including *Posidonia oceanica* meadows. In 2003, the Regione Liguria passed a law to protect *Posidonia oceanica*, establishing rules for beach nourishment and regulating anchoring. Thanks to the vision of Giovanni Diviacco and Stefano Coppo, an atlas of *Posidonia oceanica* meadows and other benthic marine habitats was produced with maps on a scale of 1:10,000 (Diviacco and Coppo 2006), which has since been updated regularly (Coppo *et al.* 2020).

Of course, recognising that the *Posidonia oceanica* meadows of Liguria were degraded was not enough: it soon became clear that it was necessary to quantify the level of degradation. In the 2000s, Monica Montefalcone initiated a line of research that proved fruitful and is still being pursued by her co-workers: she developed and applied ecological indicators and indices to assess the state of the meadows. For example, she observed that, when environmental conditions were not optimal due to coastal works, *Posidonia oceanica* tended to be replaced by the more resistant seagrass *Cymodocea nodosa* in the meadow of Sanremo (Montefalcone *et al.* 2006). The availability of maps created at different periods also allowed her - with the help of Valeriano Parravicini and Alessio Rovere, who possessed the necessary statistical knowledge - to make comparisons over time to verify whether the conditions of the meadows were stable, improving or worsening (Montefalcone *et al.* 2013). However, it was necessary to establish reference conditions against which changes could be measured. To this end, Matteo Vacchi developed a theoretical morphodynamic model - based on coastal features, sedimentology and wave regime - to predict the extent of *Posidonia oceanica* meadows under natural conditions, i.e., without anthropogenic impacts (Vacchi *et al.* 2017, and reference therein). The model has been validated both in Liguria and throughout the Mediterranean Sea (Montefalcone *et al.* 2019).

By combining the Vacchi's model with historical information, it has been possible to reckon that more than half of the original extent, in terms of hectares, of the *Posidonia oceanica* meadows of Liguria has been lost (Burgos-Juan *et al.* 2016). However, there are also signs to suggest that the decline has slowed down or even stopped in the very last few decades; and it is possible that there has been some recovery since the enforcement of the 2003 law of the Liguria Region. Evidence of recovery was provided by Alice Oprandi, who was able to use data collected in the 1990s to retrospectively calculate a set of nine ecological indices measuring the past conditions of three Ligurian meadows (Bergeggi, Monterosso, Prelo), and compared them with the same indices illustrating the situation in 2017. Most indices showed an improvement over time (Oprandi *et al.* 2022). In 1987, Daniela Pessani positioned a transect, perpendicular to the shoreline, across the *Posidonia oceanica* meadow of Bergeggi, where a Marine Protected Area was

later established in 2007. The transect has been surveyed again over the years: the extent of the meadow remained smaller than that predicted by Vacchi's model until around 2012, but then returned to the value expected (Oprandi *et al.* 2014). Initiatives are currently underway to restore several meadows of Liguria (Robello *et al.* 2024).

Reefs (EU Habitat #1170)

The European Union Nature Information System (EUNIS) for habitat classification (<https://eunis.eea.europa.eu/habitats>) has been developed to provide European administrators and scientists with a consensus framework for management and conservation; it has also been adopted for impact assessment. The EUNIS habitat classification scheme brings the uniformity required for sharing experiences and seeking common solutions. According to EUNIS, reefs are defined as “submarine, or exposed at low tide, rocky substrates and biogenic concretions, which arise from the sea floor in the sublittoral zone but may extend into the littoral zone where there is an uninterrupted zonation of plant and animal communities”. The Ligurian coast is essentially rocky, and therefore home to numerous reefs. Only a small number of them have been investigated, but the reef of the rocky shoal off Punta Mesco, in eastern Liguria, has been studied – albeit irregularly – for nearly 90 years, since the pioneer work of Enrico Tortonese (Figure 4a).

A native of Turin, Tortonese spent some years of his youth in Genova, where he attended the Natural History Museum “Giacomo Doria”. After graduating in Natural Sciences in 1932, he went to Levanto to study the marine biology of the area, also analysing the discard from the trammel nets cast by fishermen on the Mesco reef. In this way, he was able to provide the first Ligurian record of the purple gorgonian *Paramuricea chamaeleon* (now *P. clavata*), at Mesco Reef (Tortonese and Faraggiana 1937). During World War II, Tortonese was stationed in Rhodes, then an Italian colony, where he had the opportunity to attend the Hydrobiological Station that the Italians had built there in the 1930s. He was thus able to publish a series of papers on the marine biology of the Eastern Mediterranean, which earned him international renown and credibility. In 1955, Tortonese became Director of the

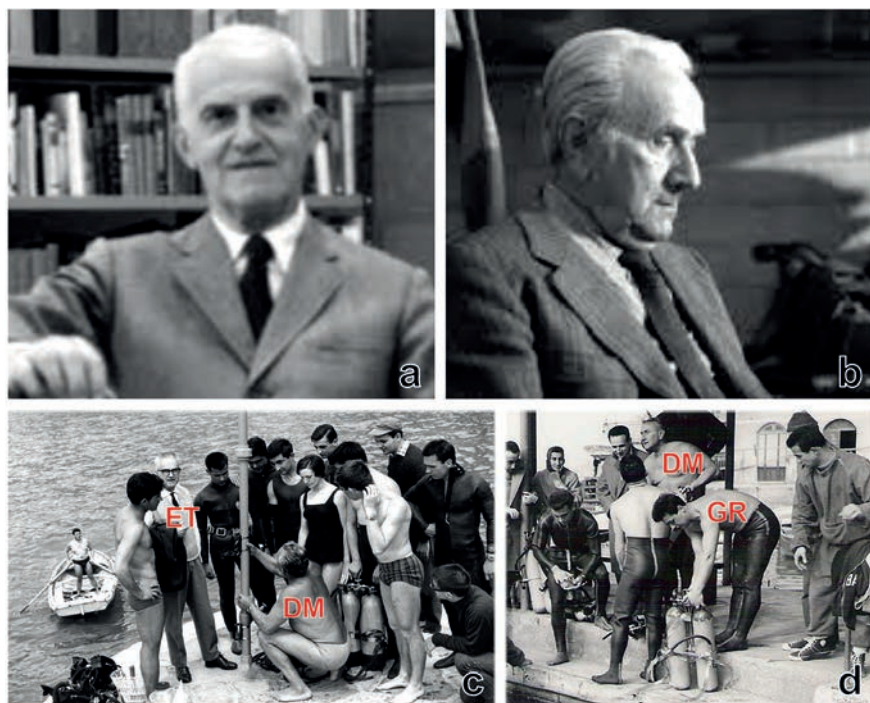


Figure 4. *The protagonists of an ante litteram citizen science approach to studying the marine biology of the Ligurian Sea in the late 1950s - early 1960s: a) Enrico Tortonese (1911-1987); b) Duilio Marcante (1914-1985); c) Tortonese (ET) giving instructions to the divers of Marcante (DM) on a pier; d) Marcante (DM) and Gianni Roghi (GR) among other divers at the Centro Subacqueo Mediterraneo di Nervi.*

Natural History Museum of Genova. In this position he set out to promote research on the marine biology of the Ligurian Sea (Tortonese 1962), which had been rather neglected since Issel's time. Like most marine biologists of his time, Tortonese was not a diver, but he had a winning idea: he contacted Duilio Marcante (Figure 4b), the father of Italian scuba diving who had just founded, in 1954, the *Centro Subacqueo Mediterraneo* in Nervi, where diving instructors, and even the divers of the armed forces, were trained (Bianchi and Morri 2000). Tortonese and Marcante themselves worked together at Portofino: Tortonese instructed Marcante and his divers about how to make observations and take samples in order to describe the benthic assemblages of rocky reefs (Figure 4c).

But Tortonese did not forget his youthful studies on Mesco: among Marcante's divers was Gianni Roghi (Figure 4d), and Tortonese entrusted him with the study of Mesco Reef, in collaboration with Lucia Rossi (Figure 5b), a gorgonian specialist of the University of Turin.



Figure 5. Quantitative survey of Mesco Reef assemblages in 1961-62 and in 1996: a) Gianni Roghi (1927-1967); b) Lucia Rossi (1913-2006); c) a Roghi's photoquadrat with a square metallic frame; d,e) Andrea Peirano taking photographs with a spacer and a U-shaped frame marked in centimetres; f) a Peirano's photoquadrat.

Roghi was an experienced underwater photographer (Figure 5a) and thus used photographs, along with detailed observations and physical samples, to describe what he called the "purple forest" of Mesco Reef, namely a benthic assemblage dominated by *Paramuricea clavata* (Roghi 1963). Between 1960 and 1962, Roghi carried out 21 dives (which he called "operations") on the Mesco Reef, keeping a meticulous diary full of descriptions, sketches, and drawings of the shoal topography, with the names he gave to the sites where he made observations and took samples and hundreds of photographs (Figure 6a-d).

Some of the Roghi's photographs used 1 m² square frames placed on the substrate to allow quantitative data to be extracted from their analysis (Figure 5c). Rossi was thus able to publish not only on the

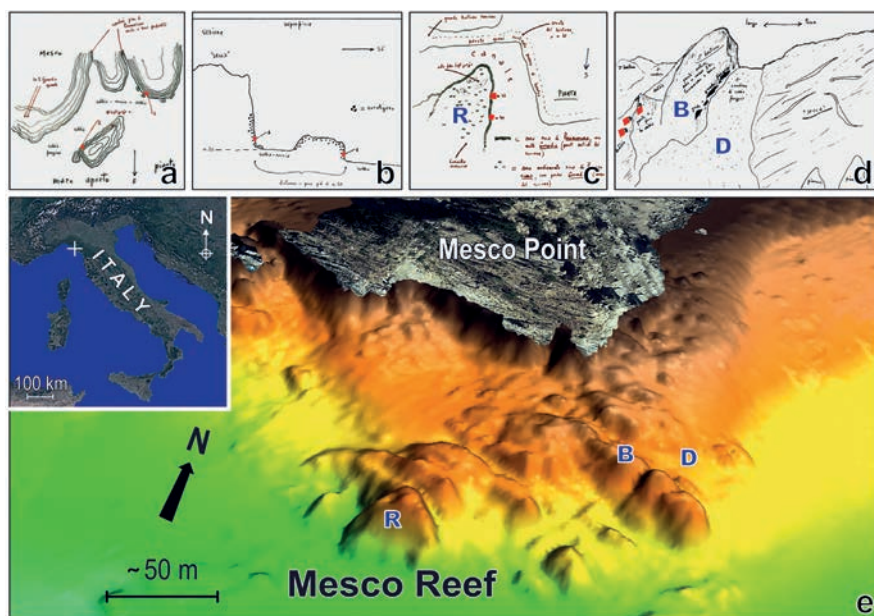


Figure 6. Topography of the Mesco Reef in the Roghi's sketches of 1961-62 and in a recent rendering: a) schematic plan; b) section; c) detail of the southern end of the reef; d) perspective view of the south-eastern part; e) digital elevation model obtained from a multibeam survey. Inset: location of Mesco in Italy. R = rock, B = bastion, D = defile. The red spots individuate the exact points where Roghi took his photographic samples.

gorgonian fauna, but also on the entire “purple forest” (Rossi 1965). She recognised eight communities, distinguished primarily by substrate depth and slope (Guidetti *et al.* 2014).

Unfortunately, Roghi died young, at the age of 40, killed by an elephant in Africa while taking part in a scientific expedition as a photographer, and was therefore never able to dive at Mesco Reefs again. Investigations in the 1970s and 1980s yielded only qualitative data, as Roghi's intuition for using quadrats was never further pursued (Gatti *et al.* 2015, and references therein). Things changed in the 1990s, when Andrea Peirano (Figure 5d, 5e), an experienced diving scientist, thanks to his personal knowledge of Mesco Reef, Roghi's sketches, and the availability of a detailed bathymetric map and a digital elevation model (Figure 6e), was able to reposition Roghi's stations and take again photoquadrats, replacing the cumbersome 1 m² squares used by Roghi with

a more practical system of spacer and frame (Figure 5f). Peirano's research led to the publication of the first papers on ecological change in Mesco Reef, compared with the descriptions that Tortonese and Rossi had left (Peirano *et al.* 2000; Bianchi *et al.* 2001).

In 2008, Fiorenza Roghi (the granddaughter of Gianni!) continued the studies at Mesco Reef as part of her degree thesis, confirming the changes already observed by Peirano (Roghi *et al.* 2010). At this point, it was becoming possible to take stock of all the information available on Mesco Reefs over the years. Apparently, little change occurred between the 1930s and the early 1990s, then an abrupt shift took place in the mid-1990s, after which the assemblage remained stable, in a new configuration, until 2017 (Azzola *et al.* 2019). Coincidentally, at the turn of the 1990s, sea water temperature rose sharply, increasing by about one degree in just a few years (Bianchi *et al.* 2019b). Renewed investigation conducted in 2022 by Annalisa Azzola, and still unpublished, confirms that the assemblage of Mesco Reef persists in an altered state: many previously abundant species have disappeared or greatly diminished, other species have arrived or increased. Among the species that have declined is *P. clavata*, while those on the rise are mainly turf algae, which certainly do not have the same landscape and ecosystem value as the purple gorgonian.

Final remarks

Approximately a century of history of two important coastal marine ecosystems in the Ligurian Sea illustrates the enormous changes that have taken place under the combined action of local – but widespread – anthropogenic impacts and sea water warming. It is often difficult to distinguish between anthropogenic and climatic impacts, as they may also act synergistically (Bianchi and Morri 2004).

For *Posidonia oceanica* meadows, direct anthropogenic impacts are certainly the main cause of their degradation (Peirano and Bianchi 1997; Montefalcone *et al.* 2019), while the role of climate is less clear. Ongoing research indicates that the impact of seawater warming on the plant is twofold: on the one hand, it causes a reduction in vegetative growth and an increase in mortality, while on the other hand, it stimulates flowering, which evokes hormesis (i.e., enhanced reproduc-

tive output under pre-lethal stress conditions). On the contrary, the impact of seawater warming on the meadow ecosystem is unequivocal, as it alters the epiphytic community and boosts herbivory. In the case of Mesco Reef, climate has played a major role (Bianchi *et al.* 2019b), although local human impacts may have contributed, particularly in terms of increased turbidity (Gatti *et al.* 2015).

The ongoing changes of the coastal ecosystems of Liguria will not halt if seawater temperatures continue to rise (Azzola *et al.* 2024). Seawater warming is a global issue that cannot be addressed at a local scale but requires international actions. However, local anthropogenic pressures can exacerbate the effects of rising temperatures. Regional management practices can help reduce local threats, thereby indirectly making ecosystems more resilient to global change. Establishing additional marine protected areas and more effectively enforcing the existing ones may be key to increasing the chances of maintaining the integrity of Liguria's marine habitats.

Acknowledgements

Special thanks to Andrea Tenca (Verona) and Giorgio Bavestrello and Franco Martini (Genova) for the information provided and the historical material made available to us. This paper is dedicated to Riccardo Cattaneo-Vietti (1949-2001), an esteemed colleague and beloved friend, whom COVID took away before his time.

References

- Ahmed R., Tamim M.T.R. *Marine and coastal environments: challenges, impacts, and strategies for a sustainable future*. Int. J. Sci. Educ. Sci. (2025) 2 (1): 53-60.
- Azzola A., Bianchi C.N., Merotto L., Nota A., Tiralongo F., Morri C., Oprandi A. *The changing biogeography of the Ligurian Sea: Seawater warming and further records of southern species*. Diversity (2024) 16: 159.
- Azzola A., Bianchi C.N., Morri C., Montefalcone M. *Evoluzione delle scogliere coralligene di Punta Mesco: 60 anni di storia*. Biol. Mar. Medit. (2019) 26 (1): 220-223.

- Bavestrello G. *Nuove osservazioni sulle praterie di Posidonia oceanica (L.) De-
dile del versante occidentale del Golfo Marconi (Riviera ligure di Levante)*.
Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova (1983) 50-51: 99-104.
- Bianchi C.N. *L'inquinamento in Mar Ligure*. In: Consulta Ligure (ed.). *Li-
guria Viva. La Consulta Ligure e l'ambiente*. Genova, Italy: Sagep S.p.A.
Editrice; 1988. 61-65.
- Bianchi C.N., Azzola A., Bertolino M., Betti F., Bo M., Cattaneo-Vietti R.,
Cocito S., Montefalcone M., Morri C., Oprandi A., Peirano A., Bave-
strello G. *Consequences of the marine climate and ecosystem shift of the
1980-90s on the Ligurian Sea biodiversity (NW Mediterranean)*. Eur. Zool.
J. (2019a) 86 (1): 458-487.
- Bianchi C.N., Azzola A., Parravicini V., Peirano A., Morri C., Montefal-
cone M. *Abrupt change in a subtidal rocky reef community coincided with
a rapid acceleration of sea water warming*. Diversity (2019b) 11 (11): 215.
- Bianchi C.N., Morri C. *Training scientific divers - Italian style*. Ocean Chall.
(2000) 10 (1): 25-29.
- Bianchi C.N., Morri C. *Climate change and biological response in Mediterra-
nean Sea ecosystems – a need for broad-scale and long-term research*. Ocean
Chall. (2004) 13: 32-36.
- Bianchi C.N., Peirano A. *Atlante delle fanerogame marine della Liguria: Po-
sidonia oceanica e Cymodocea nodosa*. La Spezia, Italy: ENEA, Centro
Ricerche Ambiente Marino; 1995.
- Bianchi C.N., Peirano A., Salvati E., Morri C. *Assessing interannual and
decadal changes in marine epibenthic assemblages through UW photography:
An example from Punta Mesco, Ligurian Sea*. Archo Oceanogr. Limnol.
(2001) 22: 83-86.
- Burgos-Juan E., Montefalcone M., Ferrari M., Morri C., Bianchi C.N. *A cen-
tury of change in seagrass meadows of Liguria*. Biol. Mar. Medit. (2016) 23
(1): 78-81.
- Canessa M., Montefalcone M., Bavestrello G., Povero P., Coppo S., Morri C.,
Bianchi C.N. *Fishery maps contain approximate but useful information for
inferring the distribution of marine habitats of conservation interest*. Estuar.
Coast. Shelf Sci. (2017) 187: 74-83.
- Cattaneo-Vietti R., Sirigu A.P., Tommei A. *Sea of Liguria*. Genova, Italy: Re-
search Centre of the Union of Ligurian Chambers of Commerce; 1982.
- Coppo S., Diviacco G., Montepagano E. *Nuovo atlante degli habitat marini
della Liguria: descrizione e cartografia delle praterie di Posidonia oceanica
e dei principali popolamenti marini costieri*. Genova, Italy: Regione Li-
guria; 2020.

- Diviacco G., Coppo S. *Atlante degli habitat marini della Liguria: descrizione e cartografia delle praterie di Posidonia oceanica e dei principali popolamenti marini costieri*. Genova, Italy: Regione Liguria; 2006.
- Gatti G., Bianchi C.N., Parravicini V., Rovere A., Peirano A., Montefalcone M., Massa F., Morri C. *Ecological change, sliding baselines and the importance of historical data: Lessons from combining observational and quantitative data on a temperate reef over 70 years*. PLoS ONE (2015) 10 (2): e0118581.
- Guidetti P., Parravicini V., Morri C., Bianchi C.N. *Against nature? Why ecologists should not diverge from natural history*. Vie Milieu (2014) 64 (1): 1-8.
- Issel R. *Il bentos animale delle foglie di Posidonia studiato dal punto di vista bionomico*. Zool. Jahrb. (1912) 33: 379-420.
- Issel R. *Biologia marina*. Milano, Italy: Hoepli; 1918.
- Montefalcone M., Albertelli G., Bianchi C.N., Mariani M., Morri C. *A new synthetic index and a protocol for monitoring the status of Posidonia oceanica meadows: A case study at Sanremo (Ligurian Sea, NW Mediterranean)*. Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst. (2006) 16 (1): 29-42.
- Montefalcone M., Rovere A., Parravicini V., Albertelli G., Morri C., Bianchi C.N. *Evaluating change in seagrass meadows: A time-framed comparison of side-scan sonar maps*. Aquat. Bot. (2013) 104: 204-212.
- Montefalcone M., Vacchi M., Archetti R., Ardizzone G., Astruch P., Bianchi C.N., Calvo S., Criscoli A., Fernandez-Torquemada Y., Luzzu F., Misson G., Morri C., Pergent G., Tomasello A., Ferrari M. *Geospatial modelling and map analysis allowed measuring regression of the upper limit of Posidonia oceanica seagrass meadows under human pressure*. Estuar. Coast. Shelf Sci. (2019) 217: 148-157.
- Morri C., Bianchi C.N. *Biologia marina a Quarto*. Il Poggio di Quartoalto (1988) 2 (4): 2-3.
- Oprandi A., Mancini I., Bianchi C.N., Morri C., Azzola A., Montefalcone M. *Indices from the past: relevance in the status assessment of Posidonia oceanica meadows*. In: Bouafif C., Ouerghi A. (eds.). *Proceedings of the 7th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*. Tunis, Tunisia: UNEP-MAP/RAC-SPA; 2022. 72-77.
- Oprandi A., Montefalcone M., Vacchi M., Coppo S., Diviacco G., Morri C., Ferrari M., Bianchi C.N. *Combining modelling and historical data to define the status of Posidonia oceanica meadows*. In: Langar H., Bouafif C., Ouerghi A., (eds.). *Proceedings of the 5th Mediterranean symposium on marine vegetation*. Tunis, Tunisia: UNEP-MAP/RAC-SPA; 2014. 119-124.
- Peirano A., Bianchi C.N. *Decline of the seagrass Posidonia oceanica in response to environmental disturbance: A simulation-like approach off Liguria (NW*

- Mediterranean Sea*). In: Hawkins L.E., Hutchinson S. (eds.). *The Response of Marine Organisms to their Environments*. Southampton, UK: University of Southampton; 1997. 87-95.
- Peirano A., Salvati E., Bianchi C.N., Morri C. *Long-term change in the subtidal assemblages of Punta Mesco (Ligurian Sea, Italy) as assessed through underwater photography*. Porcupine Mar. Nat. Hist. Soc. Newsl. (2000) 5: 9-12.
- Peirano A., Stoppelli N., Bianchi C.N. *Tecniche di sorveglianza e studio delle praterie di Posidonia oceanica e Cymodocea nodosa in Liguria*. Riv. Marit. (1995) 12: 84-91.
- Robello C., Acunto S., Leone L.M., Mancini I., Oprandi A., Montefalcone M. *Large-scale re-implantation efforts for Posidonia oceanica restoration in the Ligurian Sea: Progress and challenges*. Diversity (2024) 16 (4): 226.
- Roghi F., Parravicini V., Montefalcone M., Rovere A., Morri C., Peirano A., Firpo M., Bianchi C.N. *Decadal evolution of a coralligenous ecosystem under the influence of human impacts and climate change*. Biol. Mar. Medit. (2010) 17 (1): 59-62.
- Roghi G. *La foresta viola. Tre anni di ricerche biologiche a 50 m di profondità sulla secca del Mesco*. Mondo Sommerso (1963) 5 (3): 110-115.
- Rossi L. *Il coralligeno di Punta Mesco (La Spezia)*. Ann. Mus. Civ. Stor. Nat. Genova (1965) 75: 144-180.
- Tortonese E. *Recenti ricerche in ambienti litorali del mare Ligure*. Pubbl. Staz. Zool. Napoli (1962) 32 suppl.: 99-116.
- Tortonese E., Faraggiana R. *Osservazioni biologiche nell'insenatura di Levante (Riviera Ligure)*. Natura (1937) 28: 50-72.
- Vacchi M., De Falco G., Simeone S., Montefalcone M., Morri C., Ferrari M., Bianchi C.N. *Biogeomorphology of the Mediterranean Posidonia oceanica seagrass meadows*. Earth Surf. Proc. Land. (2017) 42: 42-54.
- Vassallo P., Paoli C., Rovere A., Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N. *The value of the seagrass Posidonia oceanica: A natural capital assessment*. Mar. Pollut. Bull. (2013) 75: 157-167.

MARZIA BO*

*Il Mar Ligure che cambia:
vulnerabilità degli ecosistemi profondi*

Sommario: Il Mar Ligure profondo, che si estende dal gradino continentale fino a circa 2.850 metri, include una ricca varietà di strutture geologiche connesse da vaste estensioni di fondale incoerente. Questi habitat ospitano complessi ecosistemi dominati da specie strutturali in grado di attrarre una ricca fauna associata. Lo sfruttamento intensivo delle risorse profonde negli ultimi cento anni ha profondamente intaccato l'integrità dei rilievi sottomarini e delle piane adiacenti, portando all'impoverimento delle biocenosi bentoniche e delle risorse che gravitano su di esse, con ricadute profonde anche in termini commerciali e sociali. Di seguito verranno trattate le principali pressioni antropiche che incidono sulle comunità bentoniche profonde del bacino ligure e i relativi effetti, nonché le possibili azioni di mitigazione.

Parole chiave: Mar Ligure; ecosistemi marini vulnerabili; ROV; impatto pesca; conservazione.

Abstract: *The Changing Ligurian Sea: Vulnerability of Deep-Sea Ecosystems*

The deep Ligurian Sea, which extends from the lower portion of the continental shelf to a depth of approximately 2,850 meters, includes a wide variety of geological structures connected by vast plains of unconsolidated sediments. These habitats support complex ecosystems dominated by structuring species that attract a rich associated fauna. The intensive exploitation of deep-sea resources over the last hundred years has profoundly affected the integrity of the reliefs and adjacent plains, leading to the depletion of benthic biocoenoses and the resources that gravitate around them, with profound commercial and social consequences. We will shed light on the main anthropogenic pressures affecting the deep-sea benthic communities of the Ligurian Sea, their impacts, and potential mitigation measures.

Keywords: Ligurian Sea; vulnerable marine ecosystems; ROV; fishing impact; conservation.

* Accademica

marzia.bo@unige.it

1. *Il Mar Ligure profondo: una visione in prospettiva*

Le pressioni antropiche che incidono sul tratto più costiero del Mar Ligure sono ampiamente studiate e monitorate da decenni, mentre quanto accade in profondità è ancora largamente sconosciuto. Per contestualizzare il motivo di tale differenza, è necessario mettere in prospettiva i due domini: quello costiero e quello profondo. Tradizionalmente si fa coincidere l'inizio del mare profondo, o *deep sea*, con la batimetrica dei 200 m, corrispondente approssimativamente al gradino continentale, il che significa che oltre l'80% dei fondali su scala globale appartiene al sistema profondo. Vi è poi un'ulteriore considerazione. Da un punto di vista fisico, operativo, di ricerca e di monitoraggio storici, i 40 m (limite dell'infralitorale e della subacquea scientifica ricreativa) sono, *de facto*, il limite più convenzionale delle nostre conoscenze. Inoltre, potremmo dire che il mare profondo abbraccia certamente le zone disfotica e afotica al di sotto dei 200 m, ma anche che alcuni tratti ecosistemici affini al *deep sea* si osservano già a partire dal circolitorale, ovvero dalla zona mesofotica. Questo dato amplia ulteriormente l'estensione del mare profondo.

L'ovvia differenza di superficie e volume tra il dominio costiero e quello profondo non va in alcun modo a sminuire le pressioni costiere, poiché è proprio in questo tratto di mare che si concentra la pressione antropica più elevata, sia nello spazio sia nel tempo. È però importante rimarcare tale differenza per contestualizzare, da una parte, l'importante *gap* informativo che ancora abbiamo sul vasto ambiente profondo e, dall'altra, per interpretare al meglio le fonti di impatto e l'enorme sfida che rappresentano la tutela e la gestione degli ecosistemi *offshore*.

Il Mar Ligure è un bacino di circa 400 km², abbracciato a nord dall'arco Ligure, un tratto di costa lungo oltre 300 km. Il bacino ha una profondità massima di 2.850 m nella cosiddetta piana batiale ligure ed è caratterizzato da una piattaforma continentale molto stretta, con la scarpata che scende in profondità in alcuni punti già attorno agli 80 m di profondità, rispetto ai 120-150 m canonici del Mediterraneo.¹ La scarpata continentale è incisa da numerosi canyon e l'intera zona batiale è molto eterogenea, con numerosi rilievi geologici rocciosi, soprattutto di natura vulcanica.

Il bacino è mediamente oligotrofico; tuttavia, dal punto di vista faunistico e floristico, è riconosciuto come un importante *hotspot* di diversità sia in superficie sia in profondità.¹ Vi sono certamente diverse ragioni

biogeografiche che spiegano, su scala geologica, questa elevata diversità,² alle quali oggi si uniscono anche diverse caratteristiche oceanografiche e climatiche, responsabili dei significativi picchi stagionali di produttività osservati nel bacino e che sostengono tale ricchezza. In primo luogo, la biomassa marina superficiale è fortemente influenzata stagionalmente da fenomeni atmosferici importanti che riversano in mare ingenti quantità di sedimento terrestre proveniente da una fitta rete fluviale. L'accumulo di sedimenti sulla piattaforma continentale può dar luogo a frane che scorrono lungo canyon sottomarini veicolando materia organica in profondità. Allo stesso tempo, lungo i canyon, risale periodicamente acqua profonda che, a sua volta, stimola elevati livelli di produttività. In secondo luogo, la massa d'acqua superficiale, carica di materia organica e raffreddata dai potenti venti da nord che spirano dall'arco alpino, scende in profondità d'inverno, alimentando anche le zone più profonde.³ Infine, il bacino è attraversato dall'Acqua Intermedia Levantina, una massa d'acqua che proviene dall'affondamento di acque superficiali ricche di materia organica nel bacino levantino, che viaggia tra 300 e 700 m di profondità e investe la scarpata continentale e i canyon settentrionali con acqua fredda, ricca di nutrienti, ossigeno e carbonati.³

I rilievi effettuati negli ultimi 15 anni nel Mar Ligure hanno individuato numerosi ecosistemi marini vulnerabili tra 40 e 2.000 m di profondità. Questi ecosistemi sono definiti fragili poiché rispondono ai parametri biologici ed ecologici di vulnerabilità definiti dalla FAO, riconosciuti a livello internazionale, quali la presenza di specie rare, di specie con un ruolo strutturante per l'ambiente e di specie con cicli vitali lunghi e capacità di recupero molto limitata dopo un disturbo meccanico. Rispondono a questi criteri i grandi antozoi arborescenti che dominano le foreste marine in profondità.

2. *Principali pressioni antropiche nel deep sea*

Le pressioni antropiche nel *deep sea* hanno marcati effetti sulle comunità bentoniche altamente strutturate, come le foreste di corallo. Da un punto di vista generale, si riconoscono quattro categorie trasversali di pressioni nel mare profondo, presenti in tutti i bacini del mondo (figura 1).

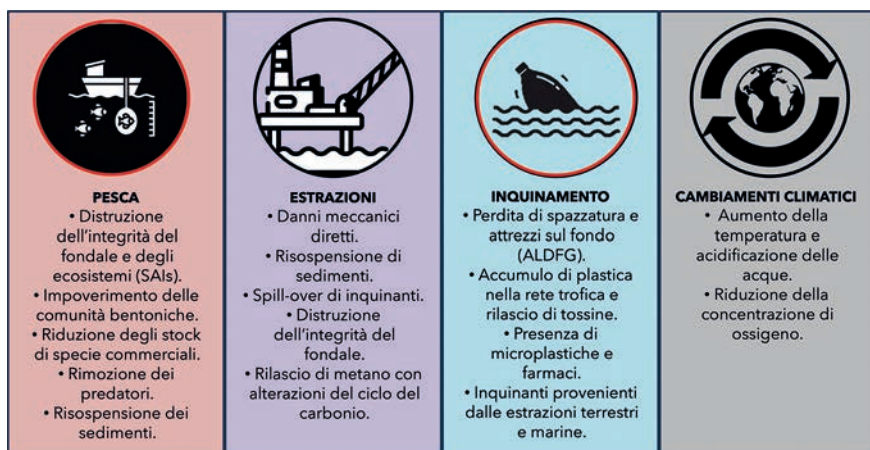


Figura 1. *Principali pressioni antropiche nel deep sea.*

- La *pesca*, in particolare quella attuata attraverso l'impiego di attrezzi demersali che lavorano sul fondale o in sua prossimità, ha l'impatto più significativo, diffuso su scala globale e su ampia scala batimetrica. Le attività di pesca a strascico commerciale, di solito svolte entro i 1.000 m, ma anche più in profondità in ambiente oceanico, provocano impatti avversi significativi (SAIs) come la distruzione del fondale, su scala locale o di bacino, la risospensione dei sedimenti, con relativo soffocamento delle comunità dominate da organismi filtratori, e l'alterazione delle reti trofiche, con importanti ricadute anche in ambito socio-economico.⁴ Inoltre, ad oggi, tutte le attività di pesca profonda sono considerate non sostenibili in termini di resilienza degli *stock ittici*. A dispetto di quanto si potrebbe pensare, infine, non è solo la pesca a strascico a incidere sulle comunità bentoniche profonde, ma anche la pesca artigianale e ricreativa, con risvolti gestionali importanti sia costieri sia *offshore*.
- Le *estrazioni* di idrocarburi e le estrazioni minerarie (in particolare quelle di noduli di ferro-manganese) provocano impatti per certi aspetti simili a quelli della pesca a strascico. Queste attività antropiche possono agire su scale molto vaste e possono essere accentuate da fenomeni di inquinamento diffuso, con ripercussioni importanti per gli ecosistemi.⁵

- L'inquinamento nel *deep sea* può derivare indirettamente dalle prime due pressioni oppure dalle attività antropiche terrestri, non necessariamente costiere, ma veicolate dalla rete fluviale o dal traffico marittimo. Senza ombra di dubbio, la presenza di macro e microplastiche è stata documentata alle massime profondità e gli effetti sulla rete trofica sono oggetto di un'attenta indagine.^{6,7} Nel *deep sea* si parla più spesso di inquinamento legato alla perdita di spazzatura proveniente dall'attività di pesca (ALDFG, *Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear*). Questo acronimo indica attrezzi da pesca, accidentalmente perduti durante le operazioni di pesca o deliberatamente abbandonati.⁸
- Infine, vi sono i *cambiamenti climatici*. Nonostante si tenda ad associare i cambiamenti climatici soltanto agli ambienti terrestri e marini costieri superficiali, vi è un numero crescente di evidenze dirette legate anche a profondità maggiori.⁹ I cambiamenti climatici globali possono avere ripercussioni dirette o indirette anche nel *deep sea*, attraverso innalzamenti della temperatura, variazioni del pH, della circolazione oceanica, del trofismo e dell'ossigenazione. Buona parte degli studi sui cambiamenti climatici nel mare profondo consiste in proiezioni e modelli, ma le evidenze dirette si stanno accumulando.¹⁰

La pesca demersale e l'inquinamento da macroplastiche rappresentano due pressioni particolarmente studiate nel *deep sea*, di cui si conoscono numerosi studi nel Mar Mediterraneo, in particolare nel Mar Ligure in virtù della significativa urbanizzazione costiera, elevata pressione da pesca e intenso traffico marittimo.¹¹

3. *Le foreste delle rocce del largo e la pesca artigianale*

Nella zona più profonda della piattaforma continentale, nota anche come zona mesofotica, tra i 40 e i 200 m di profondità, il fondale detritico è costellato di piccole emergenze rocciose che, a causa della progressiva diminuzione della luce, sono via via sempre più dominate da comunità di grandi filtratori arborescenti. Perés e Picard le avevano citate nel loro manuale,¹² senza però fornire una caratterizzazione approfondita, poiché le poche informazioni disponibili derivavano da raccolte legate alla pesca e da brevi esplorazioni con batiscafo. Da una

ventina di anni, tuttavia, nel Mar Mediterraneo operano i veicoli filoguidati operati da remoto (ROV), con i quali è stato possibile portare avanti progetti di esplorazione e monitoraggio nel *deep sea*, partendo proprio dalla zona crepuscolare.¹³ Nel Mar Ligure, in particolare, grazie al progetto europeo di monitoraggio della *Marine Strategy*, avviato nel 2015, oggi disponiamo di una delle panoramiche più complete a livello italiano, comprensiva di mappature multibeam acustiche del fondale e di caratterizzazioni biologiche dei popolamenti.¹¹ I rilievi e le successive analisi di comunità hanno identificato 12 comunità megabentoniche, costituite principalmente da foreste di gorgonie e aggregazioni di spugne, di alto valore naturalistico, che offrono rifugi, aree di alimentazione e di *nursery* a un gran numero di specie bentoniche e demersali, incluse quelle commerciali, in tutti gli stadi del loro ciclo vitale.¹¹

Considerate la vicinanza alla costa e la scarsa profondità, queste zone sono pertanto aree di pesca ambite e le foreste animali che popolano questi ambienti sono diventate, talvolta in modo inconsapevole, bersaglio della piccola pesca artigianale e ricreativa costiera. La pesca artigianale sulle secche mesofotiche ha un impatto che può variare da moderato a molto significativo, come nel caso dell'ormai tristemente famosa Secca dei Maledetti, nel Savonese. Si tratta di un gradone roccioso verticale che si estende tra 60 e 90 m, caratterizzato da dense foreste di gorgonie arborescenti e di corallo rosso, le più estese della Liguria mesofotica.¹⁴ Tuttavia, la maggior parte della secca presenta un impatto antropico diffuso senza pari. Qui, infatti, si rileva il dato più alto di densità di oggetti perduti di tutta la Liguria (e del Mediterraneo mesofotico), pari a circa 0,5 oggetti per metro quadro, attribuibili al 98% alle attività di pesca artigianale e ricreativa. Il 40% delle gorgonie è impattato da reti da posta, lenze, nasse, cime e ancore.

Il monitoraggio dello scarto della pesca dell'aragostara, una rete da posta che rimane in sede per alcuni giorni a ridosso delle secche rocciose, ha mostrato che l'attrezzo, quando viene salpato, spesso viene spostato dalla corrente, rimanendo impigliato sul fondale o sulle specie più arborescenti, raccogliendo e/o rompendo un numero molto elevato di taxa.¹⁴ A fronte di un 10% di taxa commerciali, il rimanente è *bycatch* (ovvero specie teoricamente commerciabili ma non vendibili perché sotto taglia o rovinata) o scarto (specie non commerciabili), pari alla quasi totalità della biomassa portata a bordo. Si tratta di 104 specie, di cui 13 protette

e altre incluse nell'Annesso II della Convenzione di Barcellona. Inoltre, è stato calcolato che ogni pannello da 200 m di rete raccoglie fino a 10 kg di coralligeno, distruggendo così in modo sistematico un habitat protetto dalla Direttiva Europea (92/43/CEE) (Reef 1170). Il guadagno a pesca, calcolato sulla base dei prezzi di vendita delle specie commerciali vendibili in questo sito, si aggira intorno ai 200 euro, ai quali, però, vanno teoricamente sottratti i costi del gasolio e della manutenzione della rete.

Un'esperienza del tutto simile è stata condotta sulla secca mesofotica di Punta del Faro a Portofino.¹⁵ La secca è un rilievo roccioso di circa 800 m di lunghezza, sviluppato tra 60 e 100 m di profondità. Se si considera un punto di vista biologico, non vi sono dubbi sull'impatto che il *métier* ha sulle comunità bentoniche e sull'habitat coralligeno (76 taxa raccolti, di cui 13 specie protette, 80% dei taxa e 93% degli individui raccolti come scarto, 15 kg di coralligeno raccolti per 200 m di rete). Tuttavia, anche dal punto di vista della rendita commerciale (66 euro a pesca), il guadagno non sembra giustificare la perdita di biodiversità e di complessità ambientale.

Nel 2023, la FAO ha individuato nella piccola pesca artigianale (che utilizza piccole unità dotate di reti da posta, trappole o palangari di dimensioni ridotte) la porzione principale della flotta mediterranea, che conta circa 73.000 imbarcazioni. Tale numero, moltiplicato per i decenni nei quali è stata portata avanti questa attività, sembrerebbe delineare un quadro particolarmente difficile per le aree mesofotiche. Vale la pena ricordare, tuttavia, che allo stato attuale è difficile generalizzare la situazione globale a partire da pochi casi di studio. Le situazioni sono estremamente sito-specifiche e l'entità dell'impatto dipende da molteplici fattori, tra cui quelli topografici e meteorologici, ma anche da caratteristiche biologiche delle singole specie strutturanti, che influiscono sulla loro resistenza e resilienza. Unitamente a ciò, vi è la difficoltà a stimare lo sforzo di pesca che pesa nei vari siti, dipendente da un numero molto ampio di variabili, alcune delle quali poco standardizzabili, come l'esperienza dei pescatori. Infine, a ciò si aggiunge la grande difficoltà di valutare, in termini di sforzo e impatto, il contributo della pesca ricreativa costiera. Infatti, seppur ampiamente presenti nel territorio ligure, con migliaia di imbarcazioni, i dati sulla pesca ricreativa non sono facilmente recuperabili né monitorabili.

4. I canyon del Mar Ligure orientale e la pesca a strascico

Recentemente, in Mar Ligure, è stato possibile valutare l'impatto della pesca demersale anche in zone batiali di grande rilievo naturalistico, come i canyon, con particolare attenzione al Canyon del Levante. Sulla base di rilievi puntiformi condotti negli anni cinquanta e sessanta, in quest'area è stata recentemente caratterizzata una vasta provincia di biocostruzioni a coralli bianchi, specie di antozoi a scheletro carbonatico molto vulnerabili agli impatti meccanici e alla risospensione dei sedimenti.^{16,17,18} La provincia, estesa tra 300 e 700 m di profondità, copre circa 9 km² ed è costituita sia da tanatocenosi di epoca glaciale (Portofino) sia da reef vivi (Levante e Deiva) (figura 2). Le indagini condotte nell'ambito del progetto *Curiosity* (UniGe) e, più recentemente, per i monitoraggi MS Deep, hanno definito un'estensione di circa 0,9 km² di madrepora vive nella porzione centrale del Canyon del Levante.

Queste zone, data la loro estensione orizzontale e verticale, fungono da rifugi per una ricchissima fauna associata, attraendo inevitabilmente

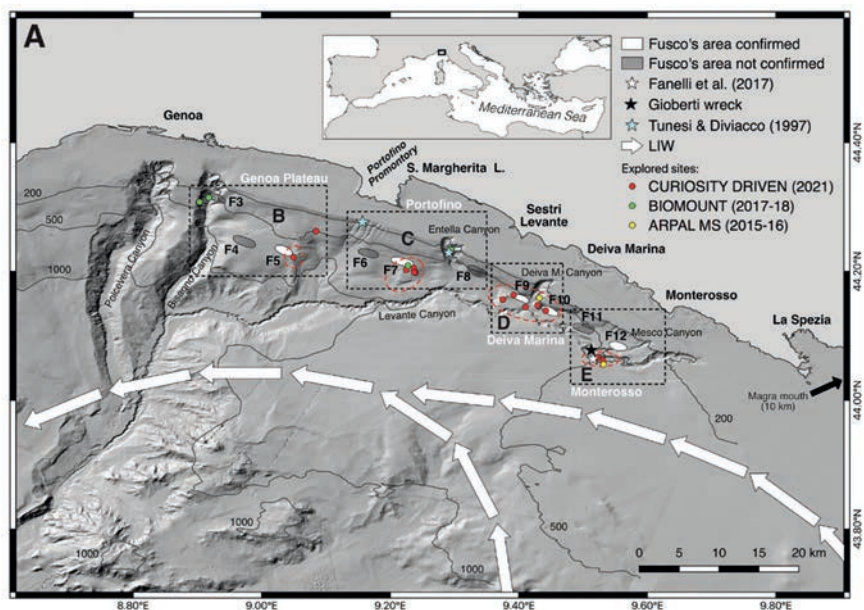


Figura 2. Aree a coralli bianchi del Levante ligure.¹⁸

la piccola pesca a palangari profondi, prevalentemente focalizzata su pagelli e cernia di fondale, come dimostrato dal fatto che il 54% della spazzatura osservata è attribuita alle lenze (fino a 525 attrezzi perduti per ettaro), in gran parte impigliate nella matrice corallina. È presente anche un'elevata percentuale di spazzatura generica (fino a 1.180 oggetti per ettaro, principalmente in plastica) poiché i canyon, con un'inclinazione molto spiccata e soggetti a forti correnti discendenti, veicolano la spazzatura proveniente dal sistema terrestre direttamente in profondità. A questa si aggiunge poi la spazzatura generica proveniente dal traffico marittimo *offshore*, inclusa quella persa dalle barche da pesca. Il Canyon di Levante e il suo tributario minore, il Canyon di Deiva Marina, diventano così densi accumuli di spazzatura.

Queste aree sono interessate anche dalla pesca a strascico batiale. Uno studio annuale dei tracciati di navigazione di 73 motopescherecci ha permesso di individuare 23 aree di pesca principali in tutto l'arco ligure, sfruttate da 14 marinerie per quattro tipologie principali di pesca: strascico costiero, batiale, palangari d'altura e lampare.¹⁹ Lo strascico batiale è oggi portato avanti da circa 40 barche che operano su 13 cale (di cui alcune storiche, lavorate da più di 100 anni), molto ampie nella zona di Levante, dove si trovano estese aree di nursery di target commerciali (come gambero rosa, moscardino, triglia, merluzzo). Le aree di pesca individuate si sovrappongono bene alle aree storiche note, sebbene siano molto più ampie di quanto si conoscesse.²⁰

Le aree strascicate, ad oggi, non ospitano più foreste di organismi strutturanti del fango, come i coralli bamboo, completamente rimossi da decenni di attività, come peraltro già noto fin dagli anni settanta.²⁰ Per avere un'idea di come dovevano essere le piane batiali liguri prima dello strascico, è necessario individuare aree pristiniche che, in virtù di condizioni topografiche particolari, risultano ostiche al passaggio delle reti e, pertanto, vengono evitate. Una di queste aree è una piana fangosa di circa 5,4 km², situata nei pressi del Canyon di Deiva, in prossimità di gradoni rocciosi verticali. Qui è stata rilevata una popolazione stimata del corallo bamboo *Acanella* cf. *arbuscula*, considerata a rischio critico di estinzione nel bacino, superiore a 800.000 colonie.¹⁸ Recentemente, nelle sezioni più esterne del Canyon di Levante, sempre in aree non strascicate, sono stati individuati ulteriori 1,4 km² di questa specie, con densità massime di 3 colonie m⁻².

Una situazione simile è quella relativa alla gorgonia gialla *Placogorgia coronata*.²¹ Nel 2018, il monitoraggio dello scarto dello strascico della Cala di Terra le Rame, davanti a Santa Margherita Ligure, ha messo in luce la presenza di questa gorgonia nell'area. Considerata a lungo rara, questa specie si è rivelata in realtà piuttosto comune, con diverse centinaia di colonie catturate ogni anno dai pescatori locali che effettuano 60-120 cale all'anno nel sito. Nello scarto della pesca si trovano soprattutto piccole colonie che vivono sui frammenti corallini adiacenti alla tanatocenosi. Le indagini ROV hanno poi permesso di individuare foreste molto estese di questa gorgonia (e di numerose altre), con esemplari alti fino a un metro, che trovano rifugio sulla biocostruzione stessa, evitata dai pescatori.²²

Alcune recenti indagini archeologiche condotte nel Mar Ligure hanno inoltre consentito di valutare l'impatto dello strascico profondo su antichi relitti di epoca romana, che si presentano come cumuli di anfore, e su relitti più recenti in ferro.²³ Nel caso dei relitti romani, i cumuli bassi non costituiscono un ostacolo al passaggio delle reti che arano completamente il fondale, portando alla perdita non solo di siti archeologici ma anche degli *hotspot* biologici che essi ospitano. I relitti in ferro, invece, vengono generalmente coperti dalle reti, rendendo il sito più inaccessibile sia alla fauna vagile sia alle esplorazioni.

5. *Le montagne sottomarine del Mar Ligure e la pesca ricreativa*

Indagini recenti hanno anche permesso di caratterizzare le comunità megabentoniche e demersali di sei vette sottomarine del Mar Ligure e di valutarne la vulnerabilità agli impatti meccanici della pesca (figura 3).^{24,25,26} Le montagne sottomarine (o *seamount*) sono imponenti rilievi geologici, generalmente di origine vulcanica, ricchi di vita grazie alle straordinarie condizioni idrodinamiche che si verificano sulle cime e lungo i versanti, che favoriscono la presenza di ricche foreste di coralli e spugne e con esse, numerose specie associate, inclusi pesci di interesse commerciale.

I rilievi ROV, in particolare, hanno consentito di approfondire l'effetto della pesca ricreativa *offshore* con filaccioni. Nel 1973 una barca di pescatori ricreativi di Chiavari scopre il Monte Ulisse, situato a

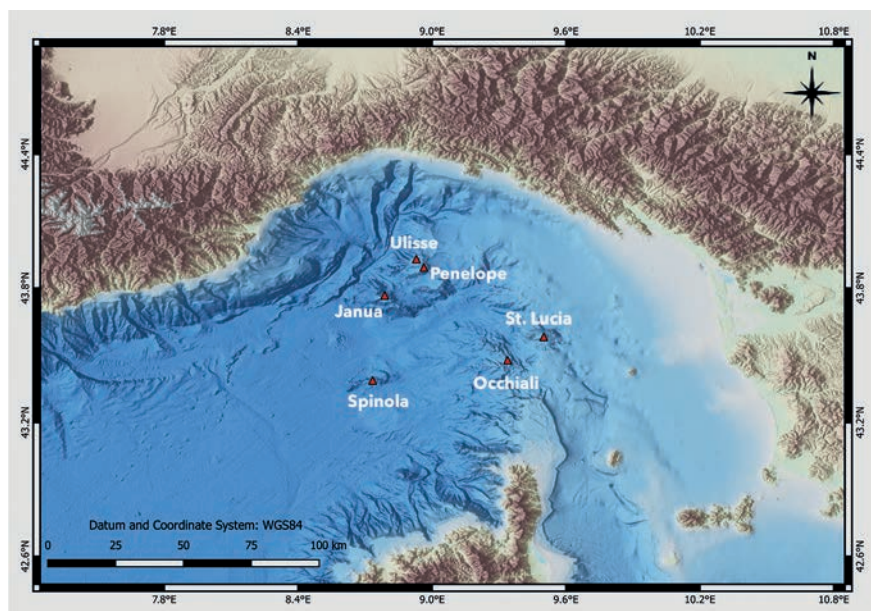


Figura 3. *I monti sottomarini della Liguria.*

30 miglia nautiche da Genova. La prima pescata effettuata con 70 ami è straordinaria: oltre 700 kg di pescato, principalmente cernie di fondale. Nell'arco di due stagioni estive di pesca l'abbondanza esaurisce. Si ritiene che la popolazione di cernie di fondale, oggi localmente estinta, ammontasse a 120 esemplari. A distanza di 50 anni, le esplorazioni non hanno rilevato alcun nuovo esemplare, a testimonianza del fatto che tale predatore, dal ciclo vitale estremamente lento, è particolarmente vulnerabile.

Oggi la pesca artigianale e ricreativa effettuata sul Monte Ulisse, a 400-500 m di profondità, si focalizza su pagelli occhialoni, moroni e pesci lama, ma anche su pesci castagna, naselli e schedofili pescati con palamiti, generalmente nel periodo estivo e primaverile. Il substrato accidentato e le specie arboreescenti presenti sono la ragione per cui gli attrezzi si impigliano, come dimostrato dalle alte percentuali di spazzatura sul fondo (1800-3500 oggetti per ettaro, dei quali il 94% è attribuito ad attrezzi da pesca) e dalle colonie impattate (15%), alcune delle quali hanno subito un cambiamento nella struttura di popolazione, con colonie decisamente più piccole. Anche in questo caso, la scarsità di dati disponibili rende difficile trarre conclusioni generali. I dati supportano

un decremento dello sforzo di pesca e, quindi, dell'impatto su monti più lontani e più profondi, sebbene tracce antropiche siano state rinvenute sia sul Vercelli (centro Tirreno), a 70 miglia dalla costa, sia sullo Spinola (Mar Ligure), a oltre 2000 m di profondità.²⁶ Questi monti sono interessati dalla pesca occasionale o sperimentale e dalla presenza di spazzatura riconducibile al traffico marittimo *offshore*.

6. *Uno sguardo d'insieme sull'impatto della pesca e sulla conservazione*

La fotografia completa della zona mesofotica ligure conferma, su scala più ampia, quanto suggeriscono gli studi puntiformi.²⁷ Tutti i siti sono interessati da spazzatura riconducibile, per l'83%, ad attrezzi da pesca perduti o abbandonati, in particolare lenze e reti da posta, con picchi di quasi 8.000 oggetti per ettaro, come sulla Secca dei Maledetti. La plastica generica è molto diffusa, con rinvenimenti nel 74% dei siti indagati. Le condizioni ambientali accidentate e la vicinanza ai porti esacerbano tali abbondanze.

La situazione ligure, nel quadro complessivo italiano, sia in termini di densità di spazzatura legata alla pesca sia di percentuale di impigliamenti su specie strutturanti, è particolarmente critica.²⁸ Ciò potrebbe dipendere da situazioni socio-economiche specifiche e dall'elevato sforzo di pesca, sia professionale sia ricreativo, che incide su questa regione. Peraltro, la Liguria registra anche livelli medi di spazzatura generica significativamente elevati, attribuibili all'elevata densità di popolazione, alla ricca rete fluviale e all'intenso traffico marittimo.

A parte la pesca, vi sono diverse altre fonti di potenziale impatto antropico sulle biocenosi profonde del Mar Ligure, sebbene qui non siano ancora considerate rilevanti (come la problematica della posa dei cavi sottomarini), da valutare *ex novo* (come le estrazioni minerarie o petrolifere) o da monitorare meglio nel prossimo futuro (come l'inquinamento da microplastiche, le ondate di calore profonde o la comparsa di specie non indigene di profondità). È auspicabile, in futuro, introdurre anche per il *deep sea* la dimensione temporale storica per valutare al meglio i cambiamenti, come avviene nella zona costiera. A questo proposito, lo sviluppo di *baseline* conoscitive per alcuni siti chiave, sia nella zona mesofotica che in quella batiale, così come la definizione di

indici ecologici multiparametrici di stato ambientale,^{29,30,31} rappresentano senza dubbio un passo importante per il monitoraggio e la conservazione di questi ambienti.

Ad oggi non esistono iniziative concrete di tutela degli ecosistemi fragili del Mar Ligure profondo, anche in considerazione della difficoltà oggettiva di monitorare un territorio così vasto. Fa eccezione la zona di chiusura alle attività di pesca a strascico (FRA) al di sotto dei 1.000 m, istituita per l'intero bacino mediterraneo e per il Mar Nero dalla *General Fisheries Commission for the Mediterranean* nel 2005, unitamente ad alcune altre realtà di tutela integrale più limitate del batiale superiore (es. Bari, Santa Maria di Leuca, Golfo del Leone). Nel 2025 è iniziato un progetto di mappatura batimorfologica e di caratterizzazione biocenotica di 79 monti sottomarini distribuiti lungo i mari italiani, con lo scopo di includerli nella Rete Natura 2000 in virtù della presenza di habitat vulnerabili *sensu* Direttiva Europea (Progetto MER Seamount, ISPRA). Ciò per far fronte alla necessità, entro il 2030, di rispondere alle direttive europee di protezione restrittiva di almeno il 10% dei territori marini italiani che rientrano nella zona di protezione ecologica. La speranza è che tale protezione possa davvero essere messa in atto e si estenda anche ad aree profonde, più costiere e maggiormente impattate.

Ringraziamenti

Prof. Giorgio Bavestrello e tutto il gruppo di lavoro *Deep Sea* dell'Università degli Studi di Genova (Francesco Enrichetti, Margherita Toma, Martina Coppari, Federico Betti, Marco Bertolino, Gabriele Costa, Martina Canessa, Alessandra Cosma, Tommaso delli Carri, Andrea Rivela). A questi si aggiungono anche Simonepietro Canese, i colleghi di ISPRA, ARPAL, Ramoge, l'ing. Guido Gay (Fondazione AzioneMare).

Bibliografia

- [1] Cattaneo-Vietti R., Albertelli G., Aliani S., Bava S., Bavestrello G., Benedetti Cecchi L., *et al.* *The Ligurian Sea: present status, problems and perspectives*. Chemistry & Ecology (2010) 26: 319-340.
- [2] Bianchi C.N., Morri C., Chiantore M., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A. *Mediterranean Sea biodiversity between the legacy from the past and a future of change*, in *Life in the Mediterranean Sea: A Look at Habitat Changes*, ed. Stambler N., New York: Nova Science Publisher; 2012. 1-55.
- [3] Boero F., De Leo F., Frascchetti S., Ingrosso G. *The cells of ecosystem functioning: Towards a holistic vision of marine space*. Advances in Marine Biology (2019) 82: 129-153.
- [4] Kenny A.J., Pepin P., Bell J., Downie A., Kenchington E., Koen-Alonso M., *et al.* *Reference points for assessing significant adverse impacts on deep sea vulnerable marine ecosystems*. Ecological Indicators (2025) 172: 113296.
- [5] Glover A.G., Smith C.R. *The deep-sea floor ecosystem: Current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025*. Environmental Conservation (2003) 30: 219-241.
- [6] Danovaro R. *Pollution threats in the Mediterranean Sea: An overview*. Chemistry and Ecology (2003) 19: 15-32.
- [7] Esposito G., Prearo M., Renzi M., Anselmi S., Cesarani A., Barcelò D., *et al.* *Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of benthic by-catches from an eastern Mediterranean deep-sea environment*. Marine Pollution Bulletin (2022) 174: 113231.
- [8] Angiolillo M., Fortibuoni T. *Impacts of marine litter on Mediterranean reef systems: From shallow to deep waters*. Frontiers in Marine Science (2020) 7: 581966.
- [9] Danovaro R., Dell'Anno A., Fabiano M., Pusceddu A., Tselepides A. *Deep-sea ecosystem response to climate changes: The Eastern Mediterranean case study*. Trends in Ecology & Evolution (2001) 16: 505-510.
- [10] Sweetman A.K., Thurber A.R., Smith C.R., Levin L.A., Mora C., Wei C.L., *et al.* *Major impacts of climate change on deep-sea benthic ecosystems*. Elementa: Science of the Anthropocene (2017) 5: 4.
- [11] Enrichetti F., Dominguez-Carrió C., Toma M., Bavestrello G., Betti F., Canese S., *et al.* *Assessment and distribution of seafloor litter on the deep Ligurian continental shelf and shelf break (NW Mediterranean Sea)*. Marine Pollution Bulletin (2020) 151:110872.
- [12] Perés J., Picard M. *Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Médi-*

- terranée*. Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume-Marseille (1964) 31: 47.
- [13] Gori A., Bavestrello G., Grinyó J., Dominguez-Carrió C., Ambroso S., Bo M. *Animal forests in deep coastal bottoms and continental shelf of the Mediterranean Sea*. Marine Animal Forests: The ecology of benthic biodiversity hotspots (2017): 1-27.
- [14] Enrichetti F., Bava S., Bavestrello G., Betti F., Lanteri L., Bo M. *Artisanal fishing impact on deep coralligenous animal forests: A Mediterranean case study of marine vulnerability*. Ocean and Coastal Management (2019) 177: 112-126.
- [15] Enrichetti F., Bavestrello G., Betti F., Cappanera V., Massa F., Merotto L., *et al.* *High megabenthic complexity and vulnerability of a mesophotic rocky shoal support the enlargement of a NW Mediterranean MPA*. Diversity (2023) 15: 933.
- [16] Fusco N. *Il fondo del mare da Sestri Levante alla foce dell'Arno, da Capo di Noli a Sestri Levante, dal confine francese a Capo di Noli con annesse carte di pesca n. 6, n. 7 e n. 8*, a cura di Ministero Marina Mercantile, Direzione Generale della Pesca Marittima. Roma; 1967, 1968, 1972.
- [17] Fanelli E., Delbono I., Ivaldi R., Pratellesi M., Cocito S., Peirano A. *Cold-water coral *Madrepora oculata* in the eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean): Historical and recent findings*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems (2017) 27: 965-975.
- [18] Bo M., Enrichetti F., Betti F., Gay G., Quarta G., Calcagnile L., *et al.* *The cold-water coral province of the eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea): Historical and novel evidences*. Frontiers in Marine Science (2023) 10: 1114417.
- [19] Enrichetti F., Bo M. *Studio propedeutico all'individuazione delle aree di esclusione per l'immersione in mare dei materiali di escavo dei fondali marini ai sensi del D.M. 173 del 2016*. Rapporto tecnico DISTAV-ARPAL. 2020: pp. 26.
- [20] Relini G. *La pesca batiale in Liguria*. Biologia Marina Mediterranea, (2007) 14: 190-244.
- [21] Enrichetti F., Bavestrello G., Coppari M., Betti F., Bo M. *Placogorgia coronata first documented record in Italian waters: Use of trawl bycatch to unveil vulnerable deep-sea ecosystems*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems (2018) 28: 1123-1138.
- [22] Enrichetti F., Bavestrello G., Bo M. *Deep-sea octocorals from bathyal canyons and seamounts of the Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea)*. Coral Reefs (2026): 1-33.

-
- [23] Bo M., Bavestrello G., Gay G., Candido M., Cattaneo-Vietti R. *Relitti profondi del Mar Ligure: storie di inaspettata biodiversità*. Atti della Giornata di Studi - Relitti subacquei di matrice bellica. Associazione "Nicolo-so da Recco" ASD APS., in pubblicazione.
- [24] Bo M., Coppari M., Betti F., Enrichetti, F., Bertolino M., Massa F., *et al.* *The high biodiversity and vulnerability of two Mediterranean bathyal seamounts support the need for creating offshore protected areas*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems (2021) 31: 737-747.
- [25] Bo M., Coppari M., Betti F., Massa F., Gay G., Cattaneo-Vietti R., *et al.* *Unveiling the deep biodiversity of the Janua Seamount (Ligurian Sea): First Mediterranean sighting of the rare Atlantic bamboo coral *Chelidonisis aurantiaca* Studer, 1890*. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers (2020) 156: 103186.
- [26] Bo M., Bava S., Canese S., Angiolillo M., Cattaneo-Vietti R., Bavestrello G. *Fishing impact on deep Mediterranean rocky habitats as revealed by ROV investigation*. Biological Conservation (2014) 171: 167-176.
- [27] Enrichetti F., Dominguez-Carrió C., Toma M., Bavestrello G., Canese S., Bo M. *Assessment and distribution of seafloor litter on the deep Ligurian continental shelf and shelf break (NW Mediterranean Sea)*. Marine Pollution Bulletin (2020) 151: 110872.
- [28] Angiolillo M., Di Lorenzo B., Bo M., Fortibuoni T., Bavestrello G., Canese S. *From shallow to deep water: A large-scale assessment of seafloor marine macrolitter in the Italian seas by ROV-imaging*. Environmental Pollution, in pubblicazione.
- [29] Enrichetti F., Bo M., Morri C., Montefalcone M., Toma M., Bavestrello G., *et al.* *Assessing the environmental status of temperate mesophotic reefs: A new, integrated methodological approach*. Ecological Indicators (2019) 102: 218-229.
- [30] Angiolillo M., Bo M., Toma M., Giusti M., Salvati E., Giova A., *et al.* *A baseline for the monitoring of Mediterranean upper bathyal biogenic reefs within the marine strategy framework directive objectives*. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers (2023) 194: 103963.
- [31] Enrichetti F., Toma M., Bo M., Bavestrello G., Bianchi C.N., Di Lorenzo B., *et al.* *Assessing the environmental status of cold-water coral reefs: BARCS, a novel multi-parametric index*. Ecological Indicators (2025) 181: 114466.

ANTONIO DI NATALE* – TOMASO GAGGERO**

*Le nuove sfide del rumore antropico sottomarino
e gli effetti sulle specie pelagiche*

Sommario: L'aumento continuo del rumore sottomarino sta ponendo nuove minacce per l'ambiente marino e particolarmente per le specie pelagiche. Mentre nell'Oceano ci sono comunque molti suoni di origine naturale, da anni se ne sono aggiunti molti altri di origine antropica, generati da svariate attività. Questo lavoro analizza numerosi aspetti del rumore subacqueo e delle conoscenze limitate riguardo i vari effetti sulle specie pelagiche. Un'attenzione particolare è stata dedicata agli impatti noti, distinti in base alle diverse fonti di rumore che caratterizzano il panorama acustico marino. Vengono anche discussi i problemi relativi alla complessità delle procedure di misurazione e gli aspetti della cornice regolatoria, insieme alle possibili soluzioni per limitare il rumore alla fonte.

Parole chiave: rumore sottomarino; specie pelagiche; impatti; misure; sistemi regolatori.

Abstract: *The New Challenges of Underwater Anthropogenic Noise and its Effects on Pelagic Species*

The continuous increase of underwater noise is posing new threats for the marine environment and particularly on the pelagic species. While there are many natural sounds already in the ocean, for years there are many other additional ones generated by various human activities. This paper reports about several different aspects of the underwater noise and the limited knowledge we have about the various effects on pelagic species. A particular attention is given to the few known impacts according to the multiple anthropogenic sources characterizing the oceans' soundscape. The problems related to the complexity of the measurement procedures are also discussed, along with views on the regulatory framework and possible solutions to reduce noise at source.

Keywords: underwater noise; pelagic species; impacts; measures; regulatory framework.

* Segretario Generale Fondazione Acquario di Genova onlus adinatale@costaeditainment.com

** Università di Genova

tomaso.gaggero@unige.it

1. *Introduzione*

Questo lavoro rappresenta una visione a due mani del tema complesso del rumore antropico sottomarino e dei suoi effetti sulle specie pelagiche, sviluppata durante il Convegno “La Liguria e il Mare” nella giornata del 27 ottobre 2025.

La complessità del tema trattato, i tanti aspetti correlati e la necessità di affrontare le varie parti in modo organico, hanno suggerito di presentare in due sezioni il testo, rispecchiando le presentazioni al pubblico, consentendo così lo sviluppo di fili logici connessi che trattano aspetti diversi del problema.

2. *Il mondo del silenzio*

Nel 1953, Jacques-Yves Cousteau e Frédéric Dumas scrissero e pubblicarono il famosissimo volume *Le Monde du Silence* (Cousteau e Dumas 1953) (figura 1), per descrivere il fascino del mondo subacqueo, che veniva esplorato con le nuove attrezzature per l'immersione subacquea ad aria. Di fatto si trattava di una visione assolutamente errata, perché il mondo marino è pieno di rumori naturali, che sono emessi dalle tante specie viventi per varie necessità vitali o che provengono dalla parte fisica dei fondali e delle acque.

L'uomo ha poi introdotto i rumori artificiali nel mare a partire dall'uso del motore nella navigazione ma anche molto prima con la costruzione dei porti e altre attività. Le guerre e poi i sonar e altre tecnologie hanno riempito l'Oceano di rumore antropico.

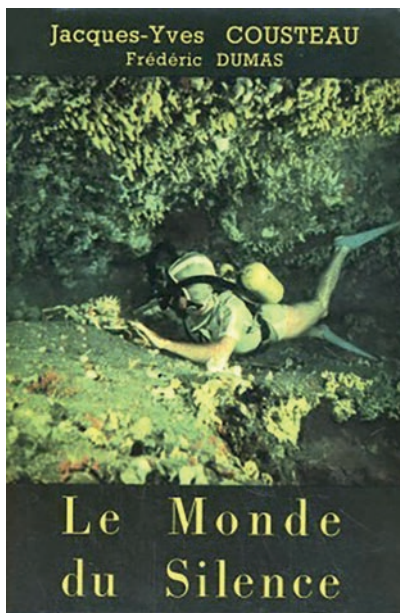


Figura 1. *La copertina della prima edizione del volume Le Monde du Silence.*

Man mano si scoprì come le varie specie marine avessero ovviamente la capacità e la necessità di comunicare tra loro, anche a grandissime distanze.

Solo da un paio di decenni si sono iniziati a valutare gli impatti della rumorosità antropica sottomarina sui vari ecosistemi e sulle tante specie (in particolare sui cetacei: Tyack 2009; Weilgart 2007), per poi tentare di mitigarli o eliminarli, ove possibile, per non interferire troppo con la vita marina. Tuttavia la questione non è di facile gestione, sia per le implicite difficoltà tecniche, sia perché molti decisori politici e tecnici non mostrano una piena sensibilità nei confronti del problema e della sua estrema complessità.

Nel frattempo emerse con chiarezza la necessità di adottare una visione più ampia dell'Oceano, fondata sul presupposto che le sue componenti fisiche, chimiche e biologiche sono strettamente interconnesse. L'Oceano, che copre circa il 71% della superficie terrestre, rappresenta inoltre oltre il 90% del volume della crosta superficiale. Tutte le acque marine del pianeta costituiscono un unico sistema integrato, l'Oceano mondiale, che per convenzione viene distinto in diverse denominazioni in base alle aree geografiche. La visione d'insieme, grazie alla proiezione di Spilhaus ottenuta nel 1942 (Spilhaus 1991) (figura 2), diede finalmente la possibilità di comprendere meglio la totale interconnessione delle acque oceaniche.

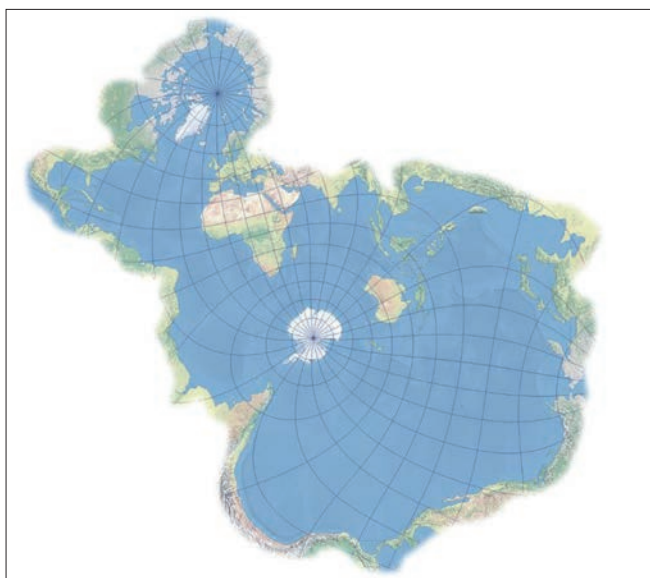


Figura 2.
*Visione
d'insieme
delle acque
oceaniche
che mostra
l'assoluta
interconnessione
in qualunque
parte del pianeta,
ottenuta con la
connessione di
Spilhaus del 1942
(Spilhaus 1991).*

In questa enorme massa liquida avvengono tantissimi fenomeni fisici e geologici che generano vari tipi di suoni sottomarini, anche di enorme intensità: i più imponenti derivano dai movimenti delle placche tettoniche che formano la crosta terrestre, che sono in grado, durante i propri periodici scorrimenti, di generare terremoti e rumorosità di grande portata; analogamente, i molti vulcani sottomarini sono una fonte continua di suoni, più violenti durante le eruzioni; le fonti idrotermali e i geyser sottomarini generano un'altra miriade di suoni, anche a profondità elevate, mentre le onde ne generano altri nella parte più superficiale dell'Oceano, particolarmente durante le tempeste e in misura maggiore in prossimità delle coste.

Nell'Oceano ci sono anche miliardi di esseri viventi, appartenenti a milioni di specie (di cui moltissime ancora ignote alla scienza) che generano altri rumori ambientali. Sono i suoni della componente biologica delle acque oceaniche, che vengono studiati da alcune discipline particolari, evolute negli anni parallelamente allo sviluppo delle tecnologie: la *bioacustica*, disciplina nata praticamente dopo le osservazioni di Spallanzani (1794), l'*ecoacustica*, le cui origini scientifiche fanno riferimento a Krause (2012) e Sueur e Farina (2015) e l'*ecotremologia*, che studia le vibrazioni di origine biologica che hanno una quantità di funzioni (Šturm *et al.* 2018) e che è principalmente sviluppata nel settore terrestre con il nome di biotremologia. In Italia tutte queste discipline sono state sviluppate, soprattutto in ambito marino e, a partire dagli anni novanta, dall'amico prof. Gianni Pavan (Pavan 2015).

Di fatto, tutti gli esseri viventi marini (come ovviamente anche quelli terrestri) comunicano, ma solo per alcune specie conosciamo questi aspetti del loro comportamento. Per i pesci gli studi sono iniziati solo negli ultimi decenni, scoprendo, spesso in modo casuale, modalità comunicative veramente sorprendenti, in termini sia di struttura dei suoni che di meccanismi fisiologici e fisici di emissione degli stessi.

Per vari motivi, i suoni dei Cetacei sono i più studiati da molti decenni e non dimentichiamo che il nome con il quale storicamente i pescatori della costa ionica siciliana chiamano il capodoglio (*Physeter macrocephalus*) è proprio "organante", per via del suono prodotto dallo sfiato quando emerge.

I campioni della comunicazione sono i Mysticeti, che hanno capacità comunicative formidabili, grazie all'uso di suoni a bassissima

frequenza (da 10 a 50 Hz e 168 dB) che permettono loro comunicazioni a distanze di diverse migliaia di km (anche qui, la serendipità ha aiutato diverse di queste scoperte). Alcune specie, come la megattera (*Megaptera novaeangliae*), sviluppano “canti” che variano da anno ad anno, con importanti aspetti sociali ed etologici, altre, come la balenottera azzurra (*Balaenoptera musculus*) emettono suoni diversi in base alle aree geografiche ove si trovano. Al di là delle funzioni sociali, non è chiaro se esistano componenti sonore che permettano ai Mysticeti di avere dei riscontri ambientali.

La situazione dei Cetacei Odontoceti, da un punto di vista acustico, è completamente differente. Emettono suoni diversi da specie a specie che usano a distanze minori per comunicazioni sofisticate, ma anche per esplorazione, ricerca e persino come arma. Da quel che si suppone, tutti dispongono di biosonar e, quei pochi che conosciamo (Busnel 1966; Nachtigall e Moore 1988), sono anche sofisticatissimi. Le madri sono in grado di insegnare ai piccoli come firmare sonoramente le proprie comunicazioni (Gnone *et al.* 2001) e ogni individuo ha un suono che lo distingue.

Il tursiope (*Tursiops truncatus*) solitamente usa suoni fra 300 e 2000 Kz; il capodoglio (*Physeter macrocephalus*) emette click per comunicazione ed esplorazione che vanno da 5000 a 25.000 Hz ma, in alcuni casi, è in grado di emettere suoni formidabili, una sorta di sorda cannonata misurata sino a 190 dB, cioè con un suono superiore ai rumori emessi dai jet (circa 140 dB). È un suono poco studiato perché estremamente occasionale, che viene emesso insieme a imponenti onde del biosonar a intensità variabile. Questo suono di straordinaria intensità, che si ipotizza essere talvolta utilizzato per scioccare i calamari giganti, fu casualmente registrato per la prima volta dal compianto amico Ken Norris in prossimità dell'Atlantic Ridge nel 1968, ed è stato rilevato anche in occasione di un intervento di liberazione di un grande capodoglio dalle reti al largo dell'isola di Vulcano (Arcipelago delle Eolie) nel 1988, dove è stato possibile notare anche i suoi effetti sul corpo umano in immersione (Di Natale 2010).

Ci sono altre specie marine che emettono suoni importanti e impensabili: i crostacei. Tra loro, i campioni sono certamente nell'ordine degli Stomatopodi e, in particolare, nella famiglia degli Squillidae. Esiste una Cannocchia Indo-Pacifica (*Odontodactylus scyllarus*) che, pur

emettendo suoni intorno a 167 Hz, è in grado di produrre impulsi acustici che superano di molto il clang del Capodoglio: schioccando violentemente le chele può raggiungere intensità fino a 218 dB, sufficienti a incrinare i vetri degli acquari. È anche in grado di dare colpi violenti con le chele, con una velocità superiore a 97 km/h, generando anche un calore di oltre 700 °C e frantumando le conchiglie dei molluschi.

Gli Alfeidi sono altri crostacei molto possenti. Nel Mediterraneo vive il piccolo gamberetto schioccatore o gambero pistola (*Alpheus glaber*) che schioccando la chela maggiore emette un suono fortissimo (tra 190 e 206 dB, da 10 a >200.000 Hz), che stordisce o uccide le prede; quando si trova su fondali di centinaia di metri, il suono è chiaramente udibile anche dalla superficie.

Quindi, se siamo in grado di identificare i suoni emessi dalle varie specie, possiamo anche comprendere quale sia l'ambito acustico nel quale i suoni antropici possono interferire con i loro sistemi di comunicazione ed esplorazione e, di conseguenza, tentare di comprendere le possibilità di impatto delle diverse emissioni non naturali di origine antropica.

3. *Una brevissima storia del suono antropico in mare*

L'uomo ha iniziato a provocare rumorosità in mare fin dai primi momenti in cui si è avvicinato alle coste, ossia dalle fasi più remote della sua esistenza.

Certamente, i primi suoni saranno stati molto limitati, probabilmente in gran parte assimilabili a quelli prodotti da altre specie che si muovevano nelle acque più prossime alla riva. È ipotizzabile che i primi rumori antropici, secchi e netti, che abbiano raggiunto il mondo subacqueo siano stati provocati dalla navigazione con piroghe monosili, per via dell'urto del legno del remo sullo scafo, anch'esso di legno. La prima piroga monosile di cui si ha traccia e datazione certa è stata trovata a Pesse, in Olanda, e risale al 6315 a.C. (De Laet 1958).

Nei secoli a seguire, i rumori antropici in mare sono progressivamente aumentati, seguendo l'evoluzione delle tecniche e quindi delle tecnologie. Con l'uso delle prime navi, dapprima a remi e poi a vela, è stato necessario sviluppare le ancore, che aggiungevano ai rumori provenienti dalla superficie anche quelli sul fondo. Ma si trattava ancora di

rumori puntuali e localizzati, probabilmente accolti con curiosità (più che con timore) soprattutto dai mammiferi marini.

Ma l'uso delle navi ha subito comportato la necessità di costruire i porti e, in questo caso, la tipologia, l'intensità e la durata dei lavori costieri diveniva decisamente più importante. Il più antico porto sembra essere quello di Byblos, nell'attuale Libano, che dovrebbe essere stato realizzato circa 3.000 anni a.C., mentre il più antico bacino per le navi sembra essere quello di Lothal, nell'attuale Gujarat in India, risalente a circa 2.400 anni a.C. È possibile che queste imponenti attività di costruzione costiere impattassero non solo sugli ecosistemi direttamente interessati, ma anche, da un punto di vista acustico, con le specie che vivevano nelle acque circostanti, interferendo con le loro necessità di comunicazione.

Certamente impattanti furono le guerre navali. Le collisioni tra le navi e gli affondamenti iniziarono a diffondere rumorosità sottomarine nuove. La più antica di cui si abbia traccia è la battaglia del Delta, avvenuta in Egitto intorno al 1175-1178 a.C. Quando si iniziarono ad utilizzare le polveri da sparo, le rumorosità si ingigantirono per via delle esplosioni, che certamente impattarono fortemente sulle varie specie pelagiche che frequentavano le zone delle battaglie.

L'uso del motore sulle navi fu una vera rivoluzione in termini di funzionalità, velocità e rumorosità. La prima nave a motore di cui si abbia traccia è stata costruita da James Ramsey nel 1787, seguita da quella costruita da John Fitch nel 1790; entrambe navigarono solo in aree fluviali degli Stati Uniti. La prima nave marina a motore è stata la *Charlotte Dundas*, realizzata nel 1802 da William Symington (Fry 1896). Si può affermare che, a partire da quel momento, la rumorosità antropica subacquea iniziò a diffondersi pesantemente, con un impatto ignoto sulle specie pelagiche.

Nel Mediterraneo, la prima nave a motore fu il piroscafo *Real Ferdinando* (poi rinominato *Ferdinando I*), realizzato a Napoli dal cantiere Filosa, che entrò in linea nel 1818 (Formicola e Romano 1992) (figura 3A).

Il motore si diffuse velocemente nelle flotte da guerra. La prima nave da guerra a motore fu l'americana *Delogos*, varata nel 1815, seguita dalla nave greca *Karteria* costruita in Inghilterra nel 1825, prima nave da guerra motorizzata del Mediterraneo (figura 3B); il Giappone ebbe

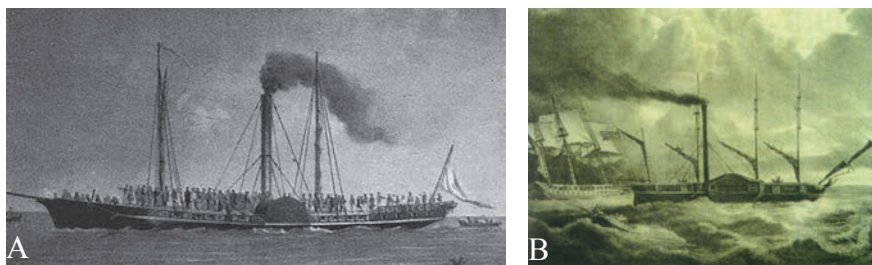


Figura 3. A) *Piroscapo Real Ferdinando* (poi *Ferdinando I*, 1818); B) *Nave da battaglia a motore Karteia*, 1825.

la *Kankō Maru*, varata in Olanda nel 1855 e l'Italia la pirofregata *Re d'Italia* nel 1863.

La diffusione dei motori nelle unità navali a scopi balenieri, la grande industria marina dell'epoca, iniziò nel 1857, con la baleniera scozzese *Tay*, seguita nel 1858 dalla baleniera inglese *Diana*, dalla norvegese *Spes et Fides* del famoso industriale Sven Foyn e dalla prima baleniera motorizzata americana, la *Pioneer* (1866). Nel 1879 la baleniera a motore americana *Mary and Helen* cacciò le balene nelle zone dell'Artico; nel 1892 la *Active*, esplorò, prima baleniera a motore, le zone antartiche. Questo significò raggiungere praticamente tutte le varie zone dell'Oceano, diffondendo i rumori antropici in acque dove mai c'erano stati rumori diversi da quelli di origine naturale.

Ma fu l'uso dei motori nelle attività di pesca che diffuse in modo capillare il suono antropico sottomarino. Il primo peschereccio a strascico motorizzato sembra essere stato costruito nel 1854 a Granton, nei pressi di Edimburgo, e questo aggiunse al rumore del motore anche quello prodotto dalle catene che reggevano la rete trainata. Nel Mediterraneo, il primo peschereccio motorizzato fu il *San Marco*, varato nel 1912 a San Benedetto del Tronto.

A tutto ciò si aggiunse progressivamente anche la diffusione diretta dei suoni dei motori dei mezzi subacquei: il primo sottomarino motorizzato (ma ad aria compressa) fu nel 1863 il francese *Plongeur*, seguito nel 1867 dal sottomarino spagnolo *Ictineo II* con motore a combustione, quindi, nel 1880, dallo svedese *Nordernfält I* con motore a vapore (ma che non poteva lavorare in immersione), dal francese *Goubet I*, nel 1885, alimentato elettricamente ma con gravi problemi di stabilità, dal-

lo spagnolo *Peral*, nel 1888, con alimentazione elettrica e dall'italiano *Delfino*, nel 1892, anch'esso con alimentazione elettrica.

4. *La nave come sorgente di rumore sottomarino*

La nave è un'importante sorgente di rumore sottomarino. Le principali sorgenti di rumore sono i sistemi propulsivi, in particolare l'elica, i macchinari di bordo e il rumore idrodinamico generato dal movimento della carena in acqua. L'elica genera rumore direttamente in acqua sia in condizioni di funzionamento non cavitanti che in condizioni cavitanti.

I livelli più elevati di rumore sono associati a questa seconda condizione. In condizioni cavitanti, infatti, le condizioni di pressione e temperatura sono tali da generare bolle di vapore che durante il giro della singola pala nascono, crescono e implodono repentinamente quando la pressione aumenta nuovamente. Un esempio di visualizzazione della cavitazione in scala modello è riportato nella figura 4.

Questo comportamento genera alti livelli di rumore su una larga banda di frequenze. L'innescio di tali fenomeni dipende dalla geometria dell'elica, dalle caratteristiche idrodinamiche dello scafo e dalle condizioni operative, ad esempio la velocità. I macchinari di bordo

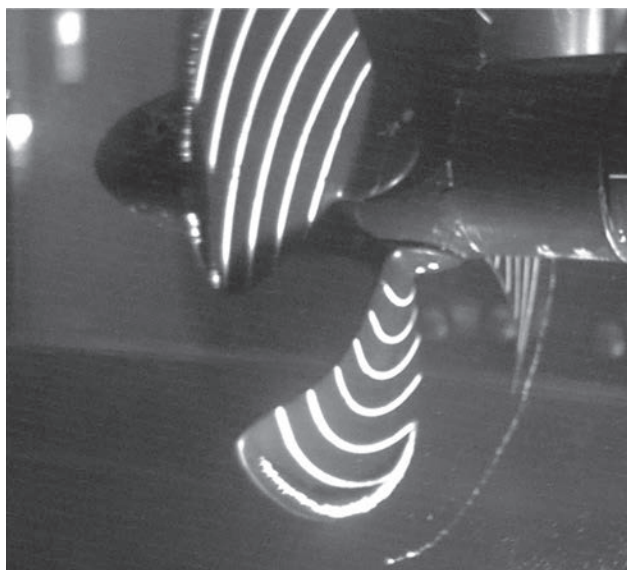


Figura 4.
*Visualizzazione
di cavitazione
in scala modello
(Traverso et al.
2017).*

non generano rumore direttamente in acqua ma inducono vibrazioni che vengono trasmesse allo scafo a cui essi sono collegati, che a loro volta irradiano rumore sottomarino. Il rumore dei macchinari è caratterizzato da componenti tonali la cui frequenza dipende dal regime di rotazione dei motori e dal numero di cilindri. Il rumore del flusso diventa significativo esclusivamente ad elevate velocità e ha un contributo a banda larga.

4.1. *Metodologie di misura del rumore irradiato da navi*

Esistono diversi standard applicabili per la misura del rumore irradiato in acqua da unità navali. Il primo ad essere pubblicato fu lo standard ANSI/ASA S12-64-2009. Successivamente molte società di classifica hanno emesso linee guida per l'ottenimento di notazioni addizionali di classe riguardanti il rumore irradiato. Tali notazioni contengono tutte una procedura di misura standardizzata ispirata allo standard ANSI/ASA (2009). Più recentemente sono stati pubblicati diversi standard dalla International Organisation for Standardisation (ISO) per misure di rumore sia in acqua profonda sia in acqua poco profonda (ISO17208-1-2016, ISO17208-2-2019, ISO17208-3-2025). Praticamente la totalità degli standard citati prevede uno schema di misura in cui una cortina di idrofoni (tipicamente tre) viene calata in acqua da una barca appoggio in modo da formare angoli specifici tra la superficie libera e la nave che deve essere testata, come mostrato in figura 5.

Lo scopo di tale configurazione è di mitigare da una parte gli effetti di direttività verticale della sorgente e dall'altra gli effetti dovuti alle riflessioni del suono sulla superficie libera. Con la configurazione riportata in figura 5 la nave passa a velocità e distanza costante dalla cortina idrofonica, come mostrato in figura 6. Durante il passaggio, all'interno di una finestra specifica, evidenziata in figura come *dwl*, viene misurato il rumore ricevuto agli idrofoni.

Una visualizzazione tipica del contenuto spettrale del segnale nel tempo è rappresentata dallo spettrogramma. Un esempio è riportato in figura 7, dove sull'asse delle ascisse è riportato il tempo e su quella delle ordinate la frequenza, mentre la scala di colore rappresenta i livelli di pressione sonora in dB re $1\mu\text{Pa}$. I pittogrammi della nave rappresentano le diverse fasi del passaggio: blu avvicinamento; rosso punto di minor distanza; verde allontanamento. Guardando la figura 7 si può notare

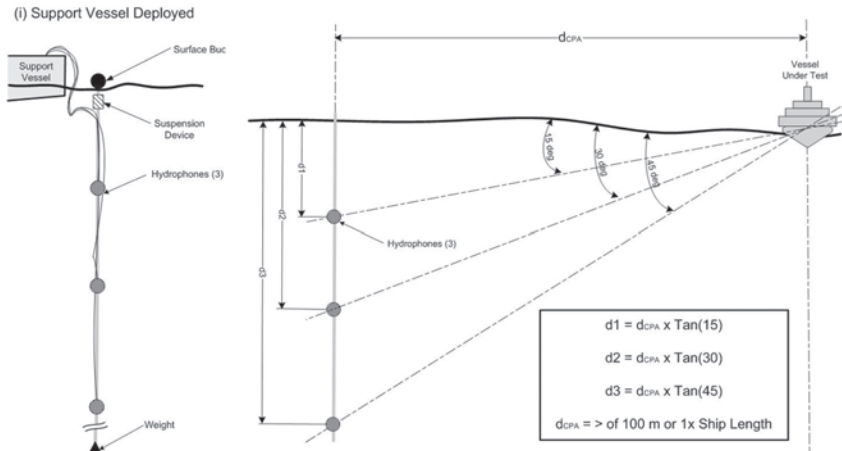


Figura 5. *Cortina idrofonica calata da barca appoggio (ANSI/ASA, “ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1).*

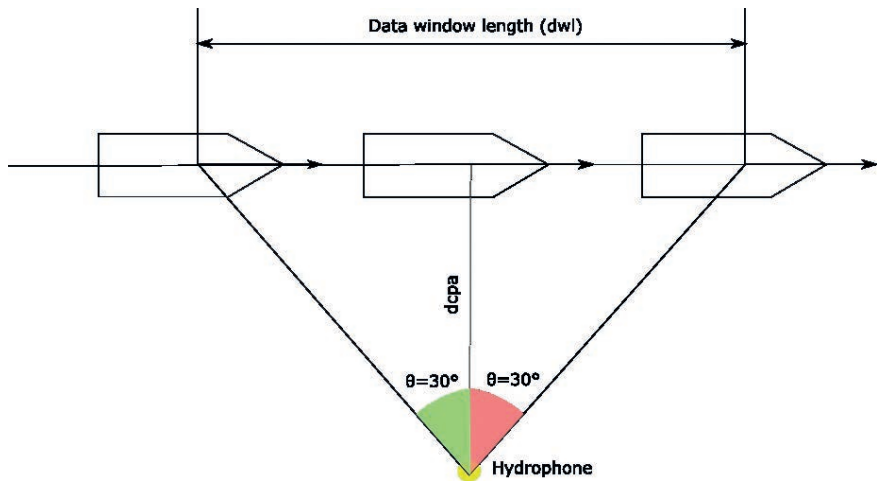


Figura 6. *Vista dall'alto dello schema di misura per rumore irradiato.*

come in generale il contributo maggiore avvenga alle basse frequenze. Il tipo di pattern costruttivo/distruttivo che si nota è dovuto al così detto “Lloyd’s mirror effect”. Tale effetto è dovuto alla sovrapposizione del campo acustico diretto a quello riflesso dalla superficie libera che, in prima approssimazione, può essere considerata una superficie perfettamen-

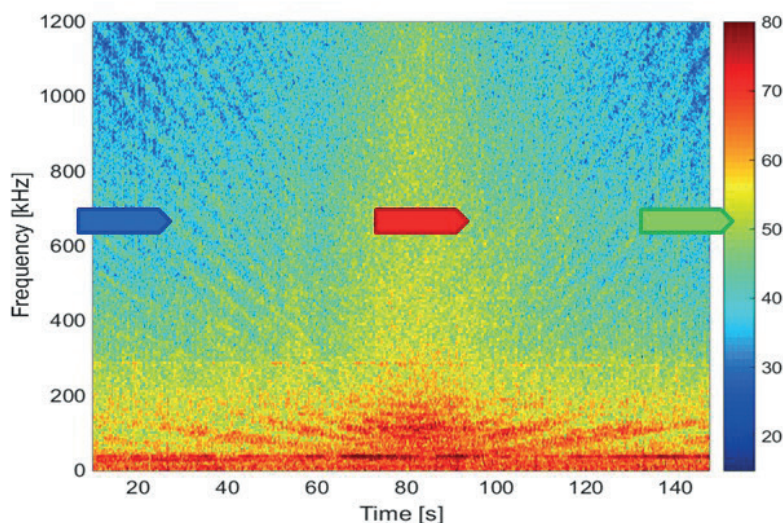


Figura 7. Esempio di spettrogramma di rumore irradiato per un passaggio nave.

te riflettente. Il segnale così acquisito viene quindi elaborato estraendo lo spettro ricevuto e correggendolo per la distanza in modo da riportare i livelli di rumore alla misura standard di un metro dalla sorgente.

Un esempio di spettro in banda stretta (che altro non è che la media di diversi tagli a tempo costante dello spettrogramma in figura 7) è riportato nella figura 8: si possono notare le componenti energetiche dovute al passaggio di pala dell'elica (cerchio rosso) e le componenti dovute ai motori, sia quelli principali dedicati alla propulsione sia quelli ausiliari dedicati alla generazione di energia elettrica (croce rossa e rombo azzurro). A tali componenti tonali si aggiunge il rumore a banda larga dovuto principalmente a fenomeni di cavitazione dell'elica.

Lo spettro riportato in figura 8 rappresenta una sorta di valore medio durante il passaggio della nave. La nave è una sorgente di rumore direttivo, in quanto l'elica, che rappresenta la sorgente di maggior rilievo del rumore irradiato, è posizionata all'estrema poppa. Anche i macchinari di bordo sono solitamente posizionati nella metà poppiera della nave, mentre la metà prodiera non è usualmente interessata da importanti sorgenti di rumore. Tale direttività può essere visualizzata nel piano orizzontale alle varie frequenze con un diagramma polare come

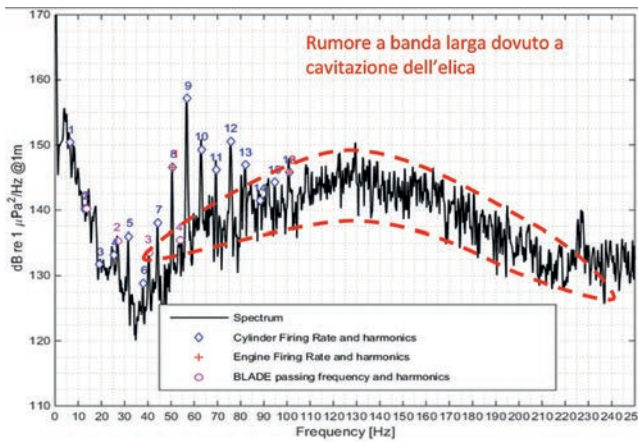


Figura 8.
Esempio
di densità
spettrale
di potenza
del rumore
sottomarino
irradiato
da una nave.

quello riportato nella figura 9. Come si può notare dalla figura 9 i livelli più alti per ciascuna banda di frequenza si riscontrano nella zona di poppa spostati di circa 15 gradi verso dritta e sinistra rispetto alla pura poppa (180°). Ciò è dovuto alla composizione del campo diretto di rumore irradiato dall'elica e quello riflesso sulla volta di poppa dell'imbarcazione. Si noti come i livelli al traverso siano circa 20 dB più bassi e come verso poppa il rumore irradiato sia minimo. In aggiunta, non tutte le bande di frequenza hanno la stessa direttività. Questo è dovuto

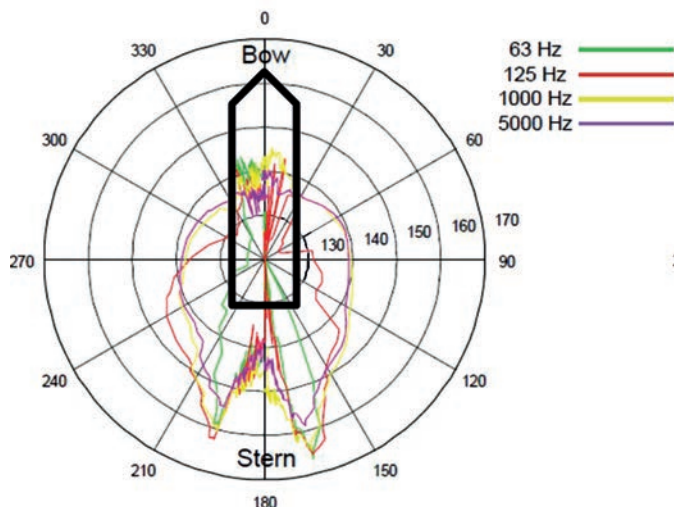


Figura 9. Diagramma di direttività orizzontale del rumore irradiato da una imbarcazione da pesca.

al fatto che le sorgenti che contribuiscono alle varie bande sono differenti e posizionate in zone diverse della nave.

5. *Come regolamentare l'impatto del rumore navale*

Il quadro normativo riguardante l'impatto del rumore navale sulla fauna non è ancora molto sviluppato, anche se vi sono già stati numerosi sforzi per iniziare a regolamentare la materia. A livello europeo l'immissione di energia in acqua (rumore) viene considerata nel descrittore 11 della *Marine Strategy Framework Directive* (2008). In particolare, nella direttiva riguardante il rumore continuo, viene suggerito di monitorare il rumore nelle bande in terzi d'ottava dei 63 e 125 Hz dato che sono quelle maggiormente affette dal rumore sottomarino generato dal traffico navale.

A livello internazionale, di particolare rilevanza è stata l'emanazione da parte dell'International Maritime Organisation (IMO) delle *Revised Guidelines for the Reduction of Underwater Radiated Noise from Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life* (2023). Le linee guida forniscono una panoramica degli approcci applicabili a progettisti, costruttori navali e operatori navali per ridurre il rumore irradiato dalla nave sia a livello progettuale sia di refit che operativo. Inoltre, con l'emanazione delle linee guida è stata lanciata la cosiddetta "Experience Building Phase", durante la quale tutti i protagonisti del settore sono chiamati a condividere esperienze sul controllo del rumore irradiato. A livello regionale sono molte le iniziative che hanno affrontato il problema cercandone una regolamentazione, ad esempio "The Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area" (ACCOBAMS) oppure l'"Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Seas" (ASCOBANS) oppure con l'istituzione da parte dell'IMO delle Particularly Sensitive Sea Areas (PSSA). Di particolare rilievo è l'iniziativa intrapresa dal porto di Vancouver che ha messo in pratica una serie di incentivi economici per gli armatori che mettono in atto strategie per la riduzione del rumore irradiato.

A livello di società di classifica, la maggior parte ha elaborato notazioni aggiuntive di classe che prevedono dei limiti per il rumore irradiato. Un esempio è riportato nella figura 10, in cui si possono notare due

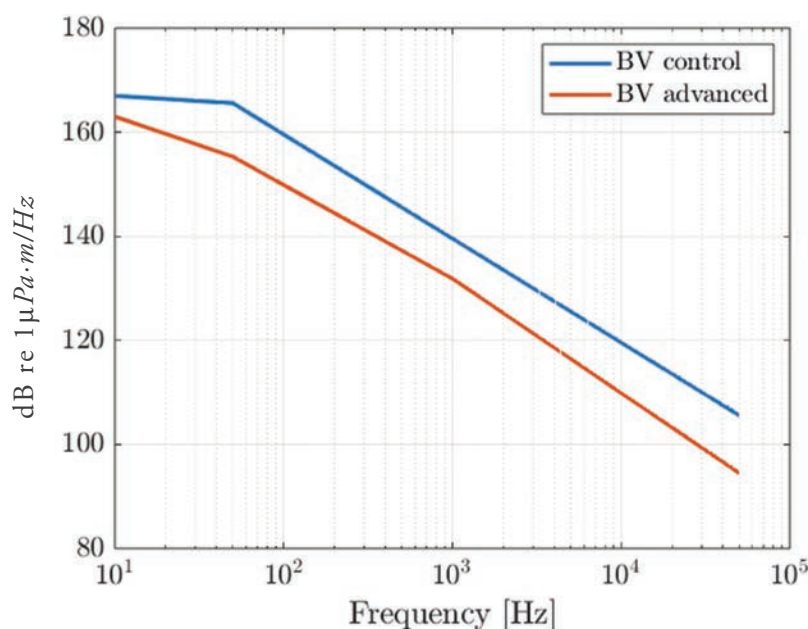


Figura 10. Curve limite per il rumore irradiato suggerite dal Bureau Veritas.

curve limite come suggerite dal Bureau Veritas. Le curve si riferiscono a due condizioni operative diverse. Le curve limite suggerite dalle società di classifica sono curve basate sulla tecnologia attuale, ovvero rappresentano obiettivi di rumorosità ragionevolmente raggiungibili dalle navi in base alla tecnologia esistente. Sebbene ciò rappresenti un ragionevole primo approccio al problema, tali limiti non tengono in considerazione l'effettiva sensibilità delle specie al rumore e il potenziale impatto che il rumore può avere. Superare questo limite però non è facile, in quanto vi è una grande diversità di sensibilità tra le specie e per molte, spesso, non è nota.

5.1. Strategie di riduzione del rumore delle navi

Esistono diverse possibilità per la riduzione del rumore delle navi: può essere affrontata direttamente a livello progettuale e tecnico oppure a livello operativo. Per quanto riguarda il livello operativo, possibili strategie comprendono la manutenzione dello scafo, la riduzione della velocità e l'ottimizzazione della rotta. La manutenzione dello scafo per evitare il *fouling* ha un doppio impatto: riduzione dei consumi e riduzione del rumore irradiato in quanto carena ed elica pulite hanno un

funzionamento migliore. La riduzione della velocità, così come l'ottimizzazione della rotta, può diminuire il rumore irradiato in prossimità di aree di particolare interesse faunistico per limitare l'impatto su specie a rischio.

A livello tecnico le principali strategie di riduzione del rumore sono la riprogettazione dello scafo, l'ottimizzazione delle eliche, l'isolamento dei macchinari, il miglioramento del flusso incidente sull'elica e l'utilizzo di cortine di bolle. Tali soluzioni possono in alcuni casi essere applicate anche su navi esistenti, mentre alcune sono possibili solo su nuove costruzioni.

Un esempio di ottimizzazione dell'elica su nave esistente è stato affrontato dall'Università di Genova nell'ambito del progetto europeo LIFE-PIAQUO. L'attività ha riguardato la riprogettazione delle eliche del traghetto *Primero VII* (figura 11) che fa servizio di trasporto passeggeri nell'area marina protetta di Portofino.

L'ottimizzazione dell'elica ha portato a costruire una nuova coppia di eliche con le stesse prestazioni in termini di spinta ed efficienza ma con livelli di rumore irradiato inferiori a quelli dell'elica originale. L'elica è stata progettata con simulazioni numeriche i cui risultati sono stati validati con prove in scala modello presso il tunnel di cavitazione del dipartimento DITEN dell'Università di Genova. Successivamente le nuove eliche sono state costruite e montate sull'imbarcazione in sostituzione di quelle esistenti. Per verificare l'effettivo miglioramento delle eliche ottimizzate sono state effettuate due campagne di misure del rumore irradiato dalla imbarcazione: la prima con le eliche originali e la seconda con le eliche ottimizzate, mantenendo in entrambe le prove le stesse condizioni operative in termini di velocità. Nella figura 12 viene riportato il confronto tra i valori di rumore emesso con eliche



Figura 11.
*Il Primero VII
in navigazione.*

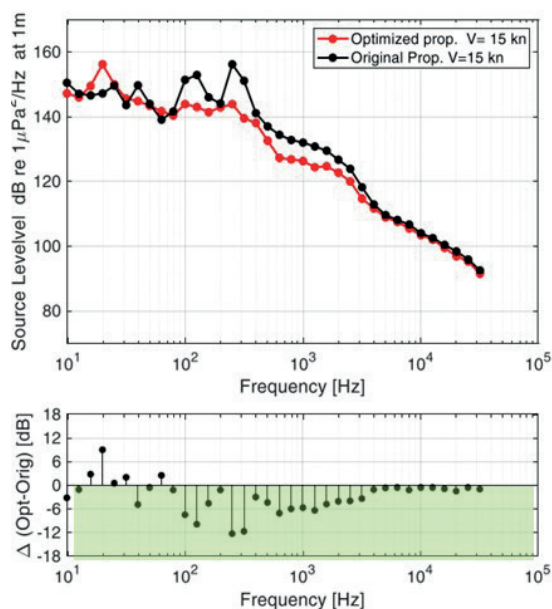


Figura 12. *Confronto della rumorosità di Primero VII con eliche originali ed eliche ottimizzate (Gaggero et al. 2025).*

originali e i valori di rumore emessi con eliche ottimizzate per la velocità di 15 nodi. Come si può vedere, l'ottimizzazione dell'elica ha permesso una riduzione del rumore per un ampio range di frequenze e con valori significativi mediamente attorno ai 6 dB. Seppur tale risultato rappresenti solo un esempio riguardante una specifica imbarcazione, la metodologia utilizzata risulta promettente e potenzialmente applicabile su larga scala per una riduzione sistematica del rumore.

6. *I sonar a bassa frequenza (LFAS)*

Lo sviluppo della guerra in mare e soprattutto della guerra sottomarina fece da propulsore allo sviluppo tecnologico a partire dalla Seconda guerra mondiale. In particolare, l'evoluzione dei sonar subacquei fu enorme. Il grande oceanografo Walter Munk ne capì subito le potenzialità anche per lo studio su larga scala, esplorando le diverse densità stratigrafiche delle acque (Munk 1974; Munk e Williamson 1976). Nel

1978 furono studiate le onde acustiche lunghe e coerenti, basate su frequenze bassissime (Munk e Wunsch 1979). Nel 1991 (Munk 1991) realizzò uno studio di fattibilità (HIFT) per utilizzare queste onde a scopi oceanografici, dato che possono attraversare l'Oceano. Successivamente (Munk *et al.* 1995) realizzò con lo stesso strumento uno studio sulla termica dell'Oceano (ATOC) e quindi contribuì a sviluppare il "Low Frequency Active Sonar", in grado di scoprire i sottomarini a distanze superiori ai 350 km. In una nota riflessione, nel 1995 lo stesso Munk scrisse: "We wish we could enumerate the great things we have done for oceanography; in fact, till now we have learned more about acoustics than about oceanography".

Munk si rese conto che i suoi esperimenti Heard Island Feasibility Test (HIFT) (Munk *et al.* 1991; 1994) e Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC), confluiti nel più grande progetto di ricerca oceanografica al mondo, coordinato dalla US Navy e dalla Scripps Oceanographic Institution, avrebbero potuto potenzialmente causare un gravissimo impatto sulle trasmissioni dei Cetacei e dei Misticieti in particolare (Au *et al.* 1997). Nonostante ATOC fosse stato inizialmente approvato, ottenendo tutti i relativi permessi, il progetto subì gli effetti di notevoli controversie pubbliche proprio per i rischi potenziali delle onde acustiche sottomarine sui mammiferi marini. Malgrado le fonti di suoni trasmessi seguissero i protocolli per gli aspetti correlati ai mammiferi marini, le incertezze e la continua attenzione negativa dei media indussero i finanziatori del progetto a ritirare il proprio supporto. ATOC¹ vide una progressiva riduzione dei fondi e, quindi, nel 2006, anche in considerazione di alcuni aspetti del US Marine Mammal Protection Act,² lo studio fu definitivamente cancellato e mai più ripreso, malgrado non esistessero alternative.

Si può sottolineare che il sonar a bassa frequenza (da 24 kHz a 83 kHz) veniva e viene ampiamente usato dalle Marine Militari di molti paesi, a scopi di scoperta e difensivi.

Purtroppo, dopo alcune esercitazioni militari con LFAS, vennero trovati diversi cetacei morti, tutti delle specie *Ziphius cavirostris* (Frantzis 1998; Fernandez *et al.* 2005; Cox *et al.* 2006; D'Amico *et al.*

¹ <https://oac.cdlib.org/findaid/ark:/13030/c80g3pd4>

² <https://www.mmc.gov/about-the-commission/our-mission/marine-mammal-protection-act/>

2009; Filadelfo *et al.* 2009). Sempre per il Marine Mammal Act, un giudice federale sollevò il problema e la US Navy dovette affrontarlo. In ambito NATO si attivò un grande progetto di ricerca, chiamato prima SOLMAR e poi SIRENA, che fu condotto dal 1999 al 2008 (Ryan 2008) e vide coinvolta soprattutto *RV Alliance* (figure 13 e 14).

Il progetto, con tecniche più innovative e meno impattanti e con il lavoro di decine di scienziati, studiò sia la “sensibilità” dei cetacei, sia le loro reazioni, scoprendo anche varie peculiarità etologiche prima sconosciute. In particolare, molte indagini acustiche vennero effettuate sul capodoglio (*Physeter macrocephalus*), anche per la maggiore facilità di impiantare marche elettroniche estremamente sofisticate con sistemi non invasivi.



Figura 13. *RV Alliance, prima della NATO ora della Marina Militare Italiana.*

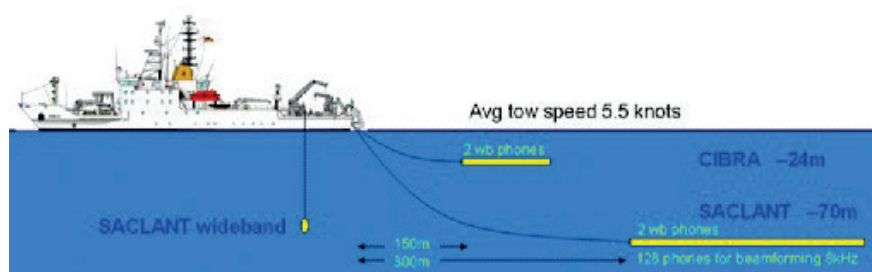


Figura 14. *Rappresentazione schematica delle attrezzature acustiche subacquee passive utilizzate per valutare i comportamenti dei cetacei durante le campagne NATO SOLMAR e SIRENA.*



Figura 15. *I ricercatori partecipanti a una delle campagne annuali NATO dei progetti SOLMAR e poi SIRENA.*

Si scoprì così che lo Zifio moriva principalmente a causa della struttura delle ossa craniali, che entravano in risonanza per gli effetti delle onde del LFAS, trasformando il cranio in una sorta di forno a micro-onde che uccideva gli individui coinvolti.

Al termine della lunga ricerca, che coinvolse oltre 40 ricercatori di nove Paesi nelle attività in mare (figura 15) e 175 studiosi provenienti da 11 Paesi durante le due successive conferenze intergovernative, venne adottato un protocollo operativo NATO, obbligatorio in tutte le esercitazioni con LFAS, per salvaguardare al massimo i Cetacei prima di ogni esercitazione NATO (Ryan 2008).

7. Altre fonti di suoni sottomarini di origine antropica

Ai rumori della navigazione, dei sonar a bassa frequenza e delle esplosioni di superficie nei periodi bellici si aggiunsero, a partire dal XIX secolo, i rumori delle esplosioni subacquee, causati da vari tipi di mine, che impattarono fortemente sull'ambiente marino, creando non solo morti dirette ed indirette, ma anche forti danni all'apparato udi-

tivo e sensoriale delle varie specie. Mancano dati scientifici certi, ma le aree dove avvennero serie di esplosioni subacquee furono evitate dai cetacei per anni.

La situazione divenne assolutamente catastrofica quando, negli anni cinquanta e sessanta del secolo scorso, si produssero esplosioni nucleari in mare, che provocarono non solo contaminazioni radioattive persistenti e disastri nell'ambiente fisico e delle comunità bentoniche nelle aree coinvolte, ma ebbero anche effetti devastanti per le specie pelagiche che, se sopravvissute, hanno certamente evitato quelle aree per molti anni.

Gli effetti ambientali marini non furono assolutamente considerati prima di effettuare questi test nucleari; furono comunque evidenti nei decenni successivi e tuttora sono ancora oggetto di continuo monitoraggio in alcune zone del Pacifico.

Negli anni novanta e duemila fu proprio la Marina Militare Italiana, grazie alla sensibilità ambientale dell'amm. Dino Nascetti, a mettere in piedi una serie di esperimenti e poi un protocollo obbligatorio, che imponevano l'uso di cariche cave e cortine d'aria per ridurre in modo considerevole l'impatto delle esplosioni subacquee per salvaguardare le specie marine pelagiche e i mammiferi marini in particolare.

Altre fonti di disturbo acustico dell'ambiente sottomarino sono causate dall'uso di "airgun" durante le esplorazioni petrolifere o rilievi sismici, il cui rumore solitamente varia tra 215 e 260 dB.

In questo caso sono stati effettuati moltissimi studi, soprattutto in relazione all'impatto negativo sui mammiferi marini e sui cetacei in particolare. Il documento italiano di sintesi più aggiornato è un rapporto del Ministero dell'Ambiente (ISPRA 2023), ma la problematica sussiste.

Durante il progetto NATO SOLMAR (poi SIRENA), si scoprì casualmente che i pile-hammer o pile-driver dei porti emettevano un suono di elevata intensità, udibile a oltre 64 miglia nautiche di distanza dalla fonte, in grado di coprire l'intero range acustico degli idrofoni, il cui impatto sulle specie marine e in particolare su quelle pelagiche resta indeterminato ma è certamente preoccupante. Attualmente, anche queste fonti di disturbo acustico sono oggetto di studi al fine di mitigarne gli effetti (MacGillivray 2014; Lipert *et al.* 2017).

8. *Le nuove sfide*

8.1. *Le piattaforme eoliche flottanti*

C'è l'assoluta necessità di usare sempre più fonti di energia rinnovabile, ma occorre farlo in modo sostenibile. L'energia eolica è tra quelli maggiormente perseguiti, tuttavia, nello sviluppo delle strutture c'è spesso troppa improvvisazione, volontà speculativa e mancanza di trasparenza, insieme a norme che considerano solo parzialmente gli impatti, soprattutto quelli acustici subacquei e gli effetti sulle specie pelagiche marine.

Le piattaforme eoliche flottanti off-shore sono certamente un business molto proficuo, ma presentano una quantità di problemi che si tenta di occultare o di non considerare, soprattutto nella fase di studio preliminare d'impatto. I campi eolici off-shore possono coprire talvolta molte decine di ettari. I lunghi cavi di tensione che collegano la piattaforma di ogni torre eolica agli ancoraggi (spesso sei o otto per torre) creano continue vibrazioni e schiocchi improvvisi e potenti, che saturano financo gli idrofoni più ampi. Ciò provoca zone di esclusione per molte specie pelagiche (tra cui tinnidi, pesci spada e tutti i Cetacei), che si allontanano dai siti interessati.

A questi rumori si aggiungono quelli iniziali connessi alle trivellazioni per gli ancoraggi e quelli periodici relativi alle manutenzioni.

Quando le strutture vengono poste lungo i corridoi di migrazione i problemi possono essere gravi, con risvolti spesso imprevedibili (Hendon *et al.* 2024), tanto che il problema inizia a essere affrontato anche dalle Regional Management Fishery Organisations come l'ICCAT.

Purtroppo, anche in questo caso, occorre affrontare la limitatezza delle conoscenze scientifiche sugli effetti di emissioni acustiche sui pesci (Popper 2003; Popper *et al.* 2004; Popper *et al.* 2022). Le nuove norme internazionali ora considerano anche questi aspetti, in coerenza con gli accordi vigenti, come la Convenzione sulle Specie Animali Selvatiche Migratrici (CMS o Convenzione di Bonn), che stabilisce una chiara tutela per i "corridoi" migratori.

8.2. *Le attività estrattive sottomarine*

Le attività minerarie ed estrattive sottomarine sono considerate uno dei pericoli crescenti per gli ecosistemi acquatici, soprattutto

quelli profondi, dove gli equilibri sono più delicati.³ In base ai pochi dati disponibili le attività minerarie subacquee sono in grado di creare disturbi acustici sino a circa 500 km dalla fonte, con suoni variabili tra 185 e 195 dB. La rumorosità è provocata dalle unità di superficie, dai sistemi di pompaggio, dalle attività di scavo e raccolta e dai mezzi di trasporto. L'impatto, che può essere molto considerevole, agisce su tutte le specie, comprese quelle pelagiche, che possono andare incontro a numerosi problemi fisici e fisiologici, ma che possono, come risposta a stimoli negativi, anche allontanarsi dalle zone, alterando percorsi migratori e talvolta interferendo negativamente su attività di pesca preesistenti.

Anche in questo caso esiste una organizzazione internazionale, la International Seabed Authority,⁴ che regola le attività minerarie sottomarine, seppure tra rilevanti difficoltà.

9. Conclusioni

Il quadro regolatorio internazionale per i problemi sopra elencati, in relazione alle specie pelagiche, si basa principalmente sulla Convenzione delle Nazioni Unite per la Legge del Mare (UNCLOS), sull'accordo della Convenzione per la Conservazione e Gestione degli Stock Condivisi e Altamente Migratori (UNSCFA), sul recente accordo per la salvaguardia della Biodiversità fuori dalle Acque di Giurisdizione Nazionale (BBNJ), sull'accordo di Kunming-Montreal sulla Biodiversità Globale, sulla Convenzione di Bonn sulla Conservazione delle Specie Migratrici, sui recenti Principi dei Diritti dell'Oceano e sui mandati per la gestione sostenibile delle specie marine che caratterizzano le RFMO, oltre che le norme specifiche che salvaguardano i Cetacei, discendenti dai regolamenti della IWC.

Il rumore antropico sottomarino rappresenta una sfida emergente per la tutela degli ecosistemi marini, in particolare in un contesto di continua crescita del traffico navale globale e di numerose altre attività.

³ <https://www.pew.org/en/research-and-analysis/articles/2022/07/07/underwater-noise-from-deep-seabed-mining-could-travel-hundreds-of-miles-study-finds>

⁴ <https://isa.org.jm/>

Il rumore irradiato dalle navi può avere effetti significativi sulla fauna marina, influenzando comportamenti vitali delle specie pelagiche e contribuendo alla degradazione del paesaggio acustico oceanico. La nave è una sorgente di rumore complessa e la sua caratterizzazione richiede misure articolate che però sono state già standardizzate offrendo metodologie di misura applicabili per molte tipologie di imbarcazioni. Dal punto di vista normativo, sebbene siano stati compiuti importanti passi avanti, il quadro regolatorio risulta ancora in fase di consolidamento. Le linee guida internazionali e le iniziative regionali rappresentano un primo tentativo di armonizzare le strategie di mitigazione, ma rimane aperta la questione dell'integrazione fra limiti tecnologicamente raggiungibili e reali soglie di impatto biologico sulle diverse specie, spesso ancora poco conosciute.

Le strategie di riduzione del rumore, sia operative sia tecniche, mostrano tuttavia un elevato potenziale. In particolare, se il rumore viene considerato come una variabile già nelle fasi preliminari del progetto, si possono ottenere risultati significativi nella riduzione del rumore irradiato senza un aumento eccessivo dei costi. La fase di raccolta delle esperienze lanciata dall'IMO rappresenta una opportunità fondamentale per avere un avanzamento significativo nella regolamentazione del rumore sottomarino da unità navali.

Le altre fonti di disturbi acustici sono di gestione certamente più complessa, ma anch'esse sono oggetto di un progressivo percorso di analisi e regolamentazione.

È una continua rincorsa tra lo sviluppo tecnico e tecnologico che crea potenziali impatti marini e le tecniche e metodologie che sono rivolte a mitigarli.

Dobbiamo essere consapevoli che conosciamo pochissimo dei sistemi di comunicazione della gran parte delle specie dei grandi pesci pelagici. Sappiamo solo che la loro linea laterale è il principale sistema di percezione dei suoni e delle vibrazioni. Ma, ad esempio, il pesce spada e gli Istioforidi la perdono una volta raggiunta la maturità sessuale e forse le funzioni vengono incluse nel sofisticatissimo rostro. Le ricerche sono difficilissime e richiedono tempi lunghi.

È inoltre noto che tutte queste specie, insieme agli altri grandi migratori marini, che sono predatori di vertice, hanno caratteristiche evolutive molto elevate e sensibilità estreme, seppure non del tutto a noi

chiare. Noi non abbiamo il diritto di intaccare la loro memoria collettiva, un patrimonio ereditario.

L'entrata in vigore, il 19 settembre 2025, dell'accordo ONU BBNJ prevede la valutazione d'impatto obbligatoria per qualunque attività antropica in acque oceaniche. L'applicazione della Convenzione di Bonn (CMS) alle specie marine comporta la necessità di salvaguardare i corridoi di migrazione. Sino a oggi, le valutazioni preliminari d'impatto per le attività marine che hanno anche solo potenziali problemi in campo acustico sono state pochissime, spesso raffazzonate. Ora bisognerà cambiare finalmente approccio e farle seriamente, per salvaguardare l'ambiente e la biodiversità marina.

Abbiamo un solo Oceano e dobbiamo proteggerlo, anche nel nostro interesse.

Bibliografia

- ANSI/ASA, "ANSI /ASA S12.64-2009/Part 1. *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements*. 2009.
- Au W.W.L., Nachtigall P.E., Pawloski J.L. *Acoustic effects of the ATOC signal (75 Hz, 195 dB) on dolphins and whales*. J. Acoust. Soc. Am., (1997) 101: 2973-2977.
- Busnel R.G. (ed.). *Animal Sonar Systems*, voll. I e II. INRA CNRZ: France Laboratoire de Physiologie Acoustique; 1966.
- Cousteau J.Y, Dumas F. *Le monde du silence*. Paris: Éditions de Paris; 1953. 1-237.
- Cox T.M., Ragen T.J., Read A.J., Vos E., Baird R.W., Balcomb K., Barlow J., Caldwell J., Cranford T., Crum L., D'Amico A., D'Spain G., Fernandez A., Finneran J., Gentry R., Gerth W., Gulland F., Hildebrand J., Houser D., Hullar T., Jepson P.D., Ketten D., MacLeod C.D., Miller P., Moore S., Mountain D.C., Palka D., Ponganis P., Rommel S., Rowles T., Taylor B., Tyack P., Wartzok D., Gisiner R., Mead J., Benner L. *Understanding the impacts of anthropogenic sound on Beaked whales*. Journal of Cetacean Research and Management (2006) 7: 177-187.
- D'Amico A., Gisiner R.C., Ketten D.R., Hammock J.A., Johnson C., Tyack P.L. *Beaked whale strandings and naval exercises*. Aquatic Mammals (2009) 35: 452-472.

- De Laet S.J. *The Low Countries. Ancient People and Places*. London: Thames and Hudson; 1958. 1-240.
- Di Natale A. *Il soffio dell'Organante. Storie intorno a un capodoglio*. Parma: Diabasis Editore; 2010. 1-143.
- Fernandez A., Edwards J.F., Rodriguez F., Espinosa de los Monteros A., Herraiz P., Castro P., Jaber J.R., Martin V., Arbelo M. *Gas and fat embolic syndrome involving a mass stranding of beaked whales (family Ziphiidae) exposed to anthropogenic sonar signals*. Vet. Pathology (2005) 42: 446-457.
- Filadelfo R., Mintz J., Michlovich E., D'Amico A., Tyack P.L., Ketten D. *Correlating military sonar use with beaked whale mass strandings: What do the historical data show?* Aquatic Mammals (2009) 35: 435-444.
- Formicola A., Romano C. *Barche e bastimenti tirrenici*. Roma: Stato Maggiore della Marina. Rivista Marittima (1992) 11 Supplemento: 28.
- Frantzis A. *Does acoustic testing strand whales?* Nature (1998) 5: 392.
- Fry H. *The History of North Atlantic Steam Navigation: With Some Account of Early Ships and Shipowners*. London, Sampson Low: Marston & Co.; 1896. 1-324.
- Gaggero S., Gaggero T., Tani G., Villa D., Rizzuto E., Pinto O., Becchi P., De Angelis E., Viviani M. *Propeller design by optimisation for underwater radiated noise reduction: A full scale application*. Ocean Engineering (2025) 333: 121412. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2025.121412
- Gnone G., Pavan G., Manca S., Benoldi C., Bonsignori B., Manghi M. *Fischio firma, imprinting acustico e riconoscimento individuale in una coppia madre-piccolo di tursiope in cattività*. Natura (2001) 90, 2: 47-56.
- International Maritime Organisation (IMO). *Revised Guidelines for the Reduction of Underwater Radiated Noise from Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life*. Mepc.1/Circ. 906, 22 August 2023.
- ISO17208-1-2016. *BSI Standards Publication Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships Part 1 : Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes*. 2016.
- ISO17208-2-2019. *BSI Standards Publication Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships Part 2: Determination of source levels from deep-water measurements*. 2019.
- ISO17208-3-2025. *BSI Standards Publication Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships Part 3: Requirements for measurements in shallow water*. 2025.
- ISPRA. *VII rapporto sugli effetti per l'ecosistema marino della tecnica dell'airgun*. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica; 2023. 1-41. https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/vii_rapporto_airgun-pdf

- Hendon R., Serafy J., Walter J., Lipsky A., Curtis T., Di Natale A., Rouyer T., Hanke A., Alvarez-Berastegui D., Orbesen E., Lauretta M., Stelzenmülle V. *Offshore wind energy development and highly migratory species: Ecological, fishery and management implications*. SCRS/2024/092, Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT (2024) 81, 4: 1-21. https://www.iccat.int/Documents/CVSP/CV081_2024/n_4/CV08104092.pdf
- Krause B. *The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places*. Boston: Little, Brown and Co., Hachette Book Group; 2012. 1-288.
- Lippert T., Ruhnau M., Lippert S., von Estorff O., Ainslie M.A., Nijhof M. *COMPILE II: A real-life benchmark scenario for pile driving noise estimations*. 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE 2017). 2-8 Sep 2017. Skiathos, Greece. http://www.uaconferences.org/docs/UACE2017_Papers/829_UACE2017.pdf
- MacGillivray A.O. *A model for underwater sound levels generated by marine impact pile driving*. Proceedings of Meetings on Acoustics (2014) 20: 1. <https://doi.org/10.1121/2.0000030>
- Marine Strategy Framework Directive. *EU 2008 Directive 2008/56/EC of the European Parliament and the Council on 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy*. Official Journal of the European Union 26.06.2008: L164/19-L164/40.
- Munk W.H. *Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR*. Journal of the Acoustical Society of America (1974) 55: 220-226.
- Munk W. *Refraction of sound waves at polar latitude*. Oceans, Journal of Geophys. Res. (1991) 94 (C4): 7015-7022. <https://doi.org/10.1029/91JC00187>
- Munk W., Wunsch C. *Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring*. Deep Sea Research (1979) 26A: 123-161.
- Munk W.H., Williams G.O., *Acoustic oceanography*. Nature (1976) 267: 774-778.
- Munk W., Bowles A., Forbes A. *The Heard Island Science Daily*, vols. 1-20, published by daily installment, the R/Vs *Cory Chouest* and *Amy Chouest*. Southern Ocean: 5 January 1991 - 1 February 1991.
- Munk W.H., Spindel R.C., Baggeroer A., Birdsall T.G. *The Heard Island feasibility test*. Journal of the Acoustical Society of America (1994) 96: 2330-2342.
- Munk, W., Worcester P., Wunsch C.. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge: Cambridge University Press; 1995. 1-450.
- Nachtigall P.E., Moore P.W.B. (eds.). *Animal Sonar. Processes and Performance*. NATO ASI Series. New York, London: Plenum Press; 1998.

- Pavan G. *Bioacustica ed ecologia acustica*. In: Leoni S.A.F. e Rossi P.A. (eds.): *Manuale di Acustica e di Teoria del suono*. Milano: Rugginenti; 2015. 803-828.
- Popper A.N. *Effects of anthropogenic sound on fishes*. Fisheries Res. (2003) 28: 24-31.
- Popper A.N., Fewtrell J., Smith M.E., McCauley R.D. *Anthropogenic sound: Effects on the behavior and physiology of fishes*. J. Marine Sci. Tech. (2004) 37: 35-40.
- Popper A.N., Hawkins A.D., Sisneros J.A. *Fish hearing "specialization" a re-evaluation*. Hearing Research (2022) 425: 108393. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378595521002276>; <https://doi.org/10.1016/j.heares.2021.108393>
- Ryan K. *The interaction of marine mammals and active sonar*. Oceanography (2008) 21, 2: 38-43. https://tos.org/oceanography/assets/docs/21-2_ryan.pdf
- Spallanzani L. *Lettere sopra il sospetto di un nuovo senso dei pipistrelli*. Torino: Stamperia Reale; 1794. 1-64.
- Spilhaus A. *Atlas of the World with Geophysical Boundaries: Showing Oceans, Continents and Tectonic Plates in Their Entirety*. Philadelphia: American Philosophical Society; 1991. 1-92.
- Šturm R., López Díez J.J., Sueur J., Polajnar J., Virant-Doberlet M. *Is it time for ecotremology?* Biotremology Conference, Riva del Garda. Book of abstracts (2018): 52.
- Sueur J., Farina A. *Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound*. Biosemiotics (2015) 8, 3: 493-502.
- Tyack P.L. *Human-generated sound and marine mammals*. Phys. Today (2009) November: 39-44.
- Traverso T., Gaggero T., Tani G., Rizzuto E., Trucco A., Viviani M. *Parametric Analysis of Ship Noise Spectra*. IEEE Journal of Oceanic Engineering (2017) 42, 2: 1-15. doi: 10.1109/JOE.2016.2583798
- Weilgart L.S. *The impacts of anthropogenic noise on cetaceans and implications for management*. Can. J. Zool. (2007) 85: 1091-1116.

SIMONA CANDIANI*

*Valutazione dell'impatto del rumore marittimo
su invertebrati marini di rilevanza ecologica*

Sommario: Il rumore subacqueo di origine antropica è un inquinante emergente che rappresenta una minaccia crescente per la fauna marina, ma i suoi effetti sugli invertebrati restano poco esplorati. Nell'ambito di due progetti abbiamo studiato l'impatto del rumore su diverse specie di organismi invertebrati deuterostomi. In laboratorio gli animali sono stati esposti a suoni di traffico marittimo artificiali e reali, valutando parametri biochimici, la capacità di filtrazione, il comportamento e gli effetti sull'espressione genica. I risultati mostrano effetti nocivi, variabili tra specie, evidenziando la vulnerabilità degli invertebrati all'inquinamento acustico e l'urgenza di ulteriori studi per prevedere le conseguenze sugli ecosistemi marini.

Parole chiave: rumore subacqueo; invertebrati deuterostomi; stress ossidativo; analisi biochimiche; test comportamentali; cellule sensoriali.

Abstract: *Assessment of the Impact of Maritime Noise on Ecologically Relevant Marine Invertebrates*

Anthropogenic underwater noise is an emerging pollutant that poses an increasing threat to marine fauna, yet its effects on invertebrates remain poorly understood. Within the framework of two research projects, we investigated the impact of noise on several species of deuterostome invertebrates. In laboratory experiments, animals were exposed to artificial and real ship traffic sounds, and biochemical parameters, filtration capacity, behavior, and effects on gene expression were assessed. The results reveal harmful effects that vary among species, highlighting the vulnerability of invertebrates to acoustic pollution and the urgent need for further studies to predict consequences for marine ecosystems.

Keywords: underwater noise; invertebrate deuterostomes; oxidative stress; biochemical analysis; behaviour tests; sensory cells.

* Accademia

candiani@unige.it

Sebbene la comunicazione e la percezione acustica siano importanti per numerosi animali terrestri, esse assumono un ruolo ancora più rilevante negli ambienti marini. In acqua, infatti, il suono si propaga in modo particolarmente efficiente e la sua velocità aumenta con la salinità, rendendo l'oceano un mezzo altamente favorevole alla trasmissione dei segnali acustici.

Gli invertebrati non possiedono orecchie come le nostre, ma questo non li ha certo fermati. Nel corso dell'evoluzione hanno sviluppato una straordinaria varietà di organi sensoriali capaci di percepire vibrazioni e onde sonore. Tra questi si trovano le statocisti, piccole vescicole piene di liquido e corpuscoli minerali che rilevano i movimenti e le vibrazioni, e gli organi cordotonali dei crostacei, meccanorecettori presenti nelle zampe. Anche nei vertebrati l'evoluzione ha dato vita a strutture uditive sempre più complesse: si passa dalla linea laterale dei pesci al sofisticato sistema di ecolocalizzazione (o biosonar) dei delfini, fino ad arrivare all'orecchio altamente specializzato dei vertebrati superiori, compreso l'uomo.

Il rumore subacqueo causato dalle attività umane è diventato una delle principali forme di inquinamento acustico negli oceani. Le fonti più rilevanti includono il traffico navale, la costruzione di infrastrutture marine, l'esplorazione sismica e l'utilizzo di sonar militari o civili. Tra queste, il trasporto marittimo è considerato la principale causa, poiché le grandi navi commerciali generano suoni a bassa frequenza che possono propagarsi per centinaia di chilometri.

Le prime ricerche si sono concentrate sui mammiferi marini, particolarmente sensibili al suono, ma studi recenti hanno evidenziato impatti anche su pesci, rettili marini e alcuni invertebrati. Gli effetti del rumore possono includere traumi fisici, aumento della mortalità, malformazioni, interferenze con la comunicazione e il comportamento, oltre a modificazioni fisiologiche come stress e alterazioni nella frequenza cardiaca, nell'alimentazione e nella riproduzione (Popper, Hawkins e Thomsen 2020).

In risposta a questa crescente preoccupazione sono state introdotte diverse misure legislative a livello globale, come la Direttiva Quadro sulla Strategia Marina 2008 Descrittore 11, e la IMO MEPC.1/Circ. 833, mirate a mitigare il rumore subacqueo e a migliorare la comprensione dei suoi effetti sugli organismi marini. Questa parte della direttiva impone infatti agli Stati membri dell'Unione Europea di valutare e moni-

torare il livello di rumore subacqueo, identificando le fonti e gli effetti negativi sulla vita marina.

In quest'ottica si inserisce il lavoro del nostro gruppo di ricerca e di numerosi colleghi coinvolti in due progetti di ricerca, uno internazionale e uno nazionale.

Il progetto europeo DeuteroNoise, sviluppato nell'ambito del programma JPI Oceans, analizza l'inquinamento acustico generato dal traffico marittimo in diversi siti europei e ne valuta l'impatto su organismi invertebrati deuterostomi, contribuendo al raggiungimento del Buono Stato Ambientale (GES) previsto dalla Direttiva Quadro sulla Strategia Marina. Il progetto Node, finanziato dal programma PRIN 2022, studia anch'esso gli effetti del rumore antropico su questi organismi, con particolare attenzione ai meccanismi di resilienza e recupero dagli impatti acustici.

All'interno di questi progetti abbiamo valutato in un ambiente controllato (laboratorio), gli effetti del rumore (a bassa frequenza) di origine marittima su diverse specie di deuterostomi marini con l'obiettivo di contribuire al raggiungimento di un Buono Stato Ambientale (GES) dei mari e degli oceani europei.

In particolare, il progetto DeuteroNoise studia il rumore generato dal traffico marittimo in diversi siti europei, tra cui il Nord Adriatico, la Laguna di Venezia, la costa di Barcellona, il Mare del Nord e il Mar Nero. Durante le campagne di monitoraggio sono stati utilizzati idrofoni per registrare il passaggio delle imbarcazioni in zone a diversa intensità di traffico marittimo (più rumorose e meno rumorose) integrando i dati con quelli dei sistemi AIS (*Automatic Identification System*) e VMS (*Vessel Monitoring System*), con l'obiettivo di sviluppare una tassonomia del rumore navale.

In ciascun sito sono state raccolte più registrazioni audio della durata di 10 minuti, nell'arco di periodi compresi tra due giorni e una settimana, utilizzando un idrofono URec384k. Il monitoraggio è stato effettuato anche in diverse stagioni dell'anno.

Le analisi spettrali hanno individuato eventi rappresentativi, portando alla selezione del DeuteroBoatSignal (DBS) – una registrazione di una motovedetta costiera nel porto di Costanza (Mar Nero), utilizzata come stimolo acustico standardizzato.

Nei mari europei sono presenti numerose specie di deuterostomi, prevalentemente organismi filtratori sessili o sedentari, fondamentali

per l'equilibrio degli ecosistemi bentonici con forme larvali planctoniche durante almeno una parte del loro ciclo vitale (figura 1). Nonostante la loro importanza ecologica, gli effetti del rumore subacqueo antropico su questi organismi sono ancora poco conosciuti. Lo studio ha selezionato otto specie di deuterostomi ben rappresentati nei cinque siti studiati, tra cui tunicati e cefalocordati, gruppi filogeneticamente vicini ai vertebrati e dotati di cellule sensoriali capaci di percepire le vibrazioni indotte dai suoni (simili a quelle dell'orecchio umano).

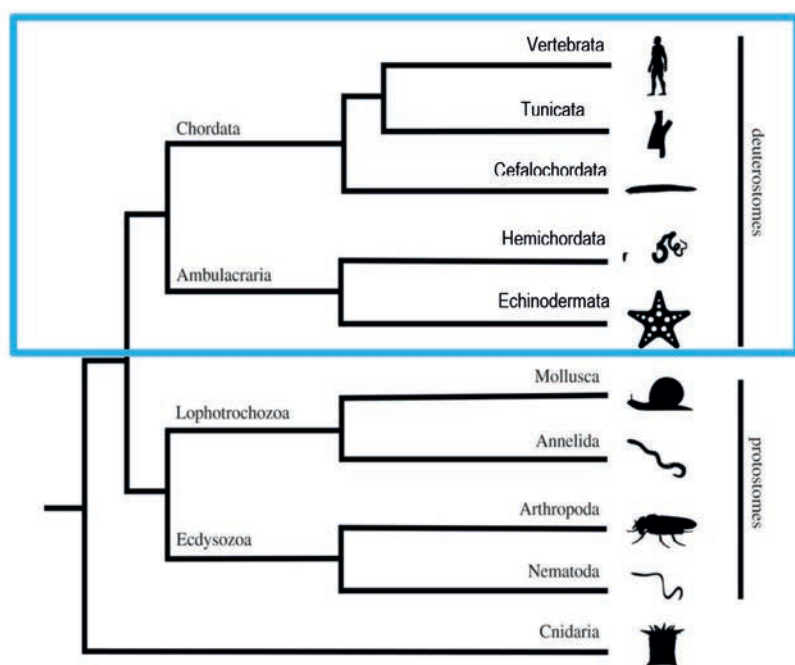


Figura 1. Albero filogenetico rappresentativo degli organismi protostomi e deuterostomi oggetto del nostro studio.

In particolare, più avanti descriverò alcuni degli effetti indotti dal rumore marittimo sul cefalocordato anfiosso *Branchiostoma lanceolatum* e l'ascidia coloniale (tunicato) *Clavelina lepadiformis*. Per ciascuna specie è stata analizzata una serie di risposte comportamentali/fisiologiche in diversi stadi del ciclo vitale.

Per indagare gli effetti del rumore subacqueo antropico, sono stati sviluppati set up in laboratorio per replicare il rumore navale in vasche controllate. Sono state utilizzate vasche di plastica contenenti circa 100 litri di acqua di mare poste al di sopra di un tavolo dotato di una superficie isolante. A una delle estremità della vasca è stata immersa una cassa subacquea collegata a un amplificatore in grado di trasmettere la traccia di suono desiderata. Una seconda vasca, con le medesime condizioni e lo stesso materiale della precedente, è stata utilizzata come controllo, risultando priva di esposizione al rumore subacqueo. Utilizzando un idrofono collegato a un computer, sono stati anche caratterizzati i livelli di rumore presenti nella vasca a diverse profondità e nei diversi punti.

Prima di avere la traccia sonora relativa ai siti europei abbiamo eseguito degli esperimenti pilota utilizzando una traccia sonora nota come rumore rosa (*pink noise*), con picchi dominanti a 63 e 125 Hz basata su indicazioni della Direttiva Quadro della Marine Strategy per replicare il rumore persistente derivante dal traffico marittimo che genera rumori a basse frequenze.

Il nostro studio si è concentrato sui cefalocordati comunemente noti come anfiossi, organismi deuterostomi mai studiati nell'ambito dell'inquinamento acustico. Questi invertebrati cordati alla base del clade dei Vertebrati e Tunicati hanno un ciclo vitale bifasico: una fase larvale planctonica lunga e uno stadio adulto bentonico (figura 2).

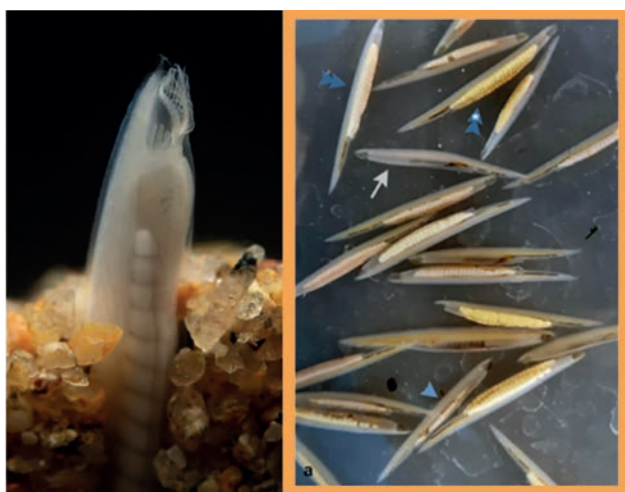


Figura 2.
Sulla sinistra
immagine
di un anfiosso
adulto
infossato
nella sabbia;
sulla destra
individui maschi
e femmine fertili
con gonadi
gialle/biancastre.

Abbiamo studiato in laboratorio l'impatto del rumore sia sulle larve sia sugli adulti dell'anfiosso della specie *Branchiostoma lanceolatum*, simulando condizioni sonore sottomarine realistiche. Sono stati impiegati test fisiologici e comportamentali per valutare effetti acuti e potenzialmente cronici.

L'anfiosso è stato studiato in quanto deuterostoma altamente rappresentato nell'Adriatico del Nord. Recentemente abbiamo infatti caratterizzato la popolazione dell'Adriatico e individuato un sito ad alta densità di anfiossi al largo di Lignano Sabbiadoro a circa 10 miglia dalla costa (Guarneri *et al.* 2025).

In figura 3 vengono rappresentate le vasche utilizzate nei nostri esperimenti dove abbiamo posto gli animali sottoposti o meno alla traccia di rumore. Abbiamo applicato un rumore continuo per 1 ora o 24 ore ed effettuato analisi comportamentali e biochimiche volte a studiare lo stress indotto dal rumore a basse frequenze.

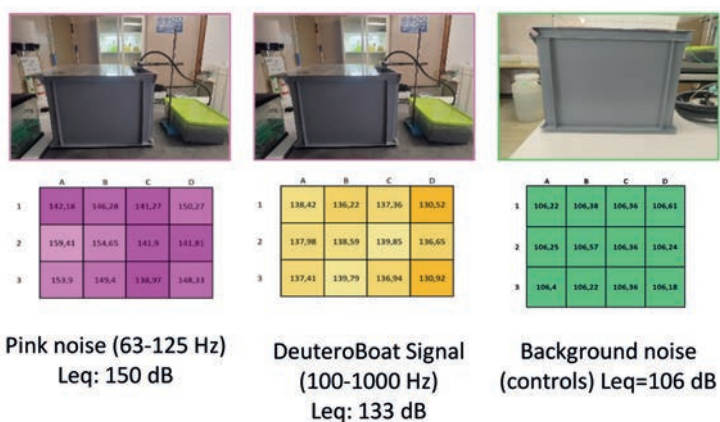


Figura 3. Set up sperimentale delle vasche utilizzate e tracce sonore applicate con i dB percepiti nelle tre vasche e nei diversi punti. Leq = media dei dB.

Per gli studi comportamentali abbiamo verificato in animali esposti o meno al rumore la risposta al tocco dei cirri boccali. Ricordiamo infatti che l'anfiosso possiede cellule sensoriali di vario tipo. In particolare, cellule sensoriali meccanorecettoriali a livello dei tentacoli orali (cirri) e dell'apertura orale (Lacalli e Shufen 1999). Abbiamo pertanto analizzato la risposta dei cirri al tocco sia negli animali di controllo sia in quelli esposti al rumore per un'ora. Dai risultati è emerso che gli animali sottoposti al rumore mostrano una risposta al tocco ridotta o assente, a differenza dei controlli (figura 4).

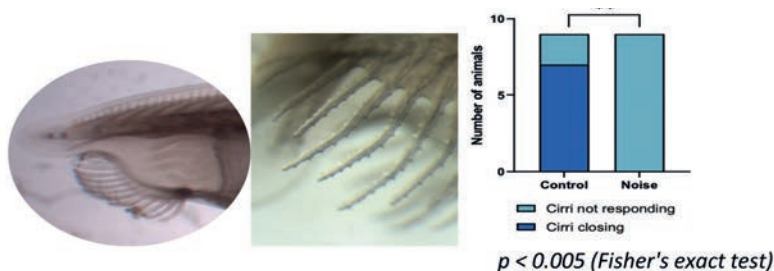


Figura 4. Parte anteriore di un adulto di anfiosso mostrante la parte orale circondata da tentacoli, con un'immagine ingrandita che mostra delle estroflessioni corrispondenti ai cirri boccali dove si ritrovano le cellule sensoriali. A destra un istogramma mostrante l'effetto del rumore sulla risposta al tocco dei cirri.

L'anfiosso è un organismo filtratore e, per questo motivo, abbiamo ritenuto interessante valutare come la sua capacità di filtrazione venga influenzata da un'esposizione al rumore della durata di un'ora. A tal fine, abbiamo misurato con uno spettrofotometro l'assorbanza di aliquote di soluzioni algali della specie *Tetraselmis* (di cui gli anfiossi si nutrono), prelevate dai contenitori a intervalli di un'ora per un totale di sei ore, sia nelle vasche contenenti animali esposti al rumore sia in quelle con animali di controllo.

L'osservazione visiva delle coppette riportate in figura 5 evidenzia che quelle contenenti animali esposti al rumore presentano un

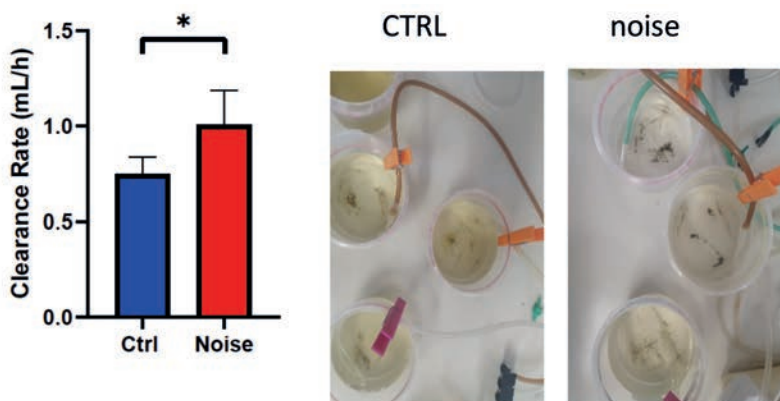


Figura 5. Capacità di filtrazione (clearance rate espressa come mL/h) negli animali di controllo ed esposti al rumore.

liquido più limpido, indicativo di una maggiore attività di filtrazione. La quantificazione del tasso di filtrazione (clearance rate) conferma infatti che gli anfossi sottoposti a rumore filtrano di più dei controlli.

Poiché gli animali vivono generalmente infossati nella sabbia e ne emergono solo per filtrare o rilasciare i gameti, il suono potrebbe indurli a trascorrere più tempo fuori dal substrato per aumentare l'attività di filtrazione, rendendoli così maggiormente esposti ai predatori.

Sono state quindi condotte analisi biochimiche finalizzate alla valutazione dello stress ossidativo negli animali esposti al rumore in confronto ai soggetti di controllo. In questo caso, al fine di consentire una risposta fisiologica allo stimolo, gli animali sono stati analizzati dopo un periodo di 24 ore. L'esposizione al rumore per 1 ora evidenzia un aumento dell'attività di enzimi proossidanti, come la catalasi e la NADPH ossidasi, e di enzimi antiossidanti, come il glutathione reduttasi. In questo caso sono stati analizzati i risultati ottenuti sia in seguito all'esposizione alla traccia DBS sia alla traccia pink noise (Bar) (figura 6). Tuttavia, è necessario attendere 24 ore per osservare una risposta significativa.

Nonostante l'animale cerchi di mettere in atto delle difese antiossidanti, lo stress ossidativo causa perossidazione lipidica e ossidazione proteica danneggiando i componenti cellulari come lipidi e proteine, mentre non si osservano danni al DNA (figura 6b).

Per comprendere meglio la causa dello stress ossidativo siamo andati a studiare la sintesi di ATP, il consumo di ossigeno e l'efficienza della fosforilazione ossidativa, osservando che gli animali esposti al suono presentano una diminuzione nella sintesi di ATP e una diminuita attività di fosforilazione ossidativa (figura 6c).

La diminuzione nella sintesi di ATP con ridotta efficienza della fosforilazione ossidativa può essere dovuta a un'incapacità della catena di trasporto degli elettroni di funzionare correttamente, portando a una maggiore produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) e allo stress ossidativo. L'esposizione al suono potrebbe indurre stress, il quale può aumentare la produzione di radicali liberi, competere con il processo di fosforilazione ossidativa e danneggiare i mitocondri, compromettendo la produzione di energia.

Nel progetto è stata anche studiata un'ascidia coloniale, la *Clavelina lepadiformis* appartenente al clade aplousobranchia, comune

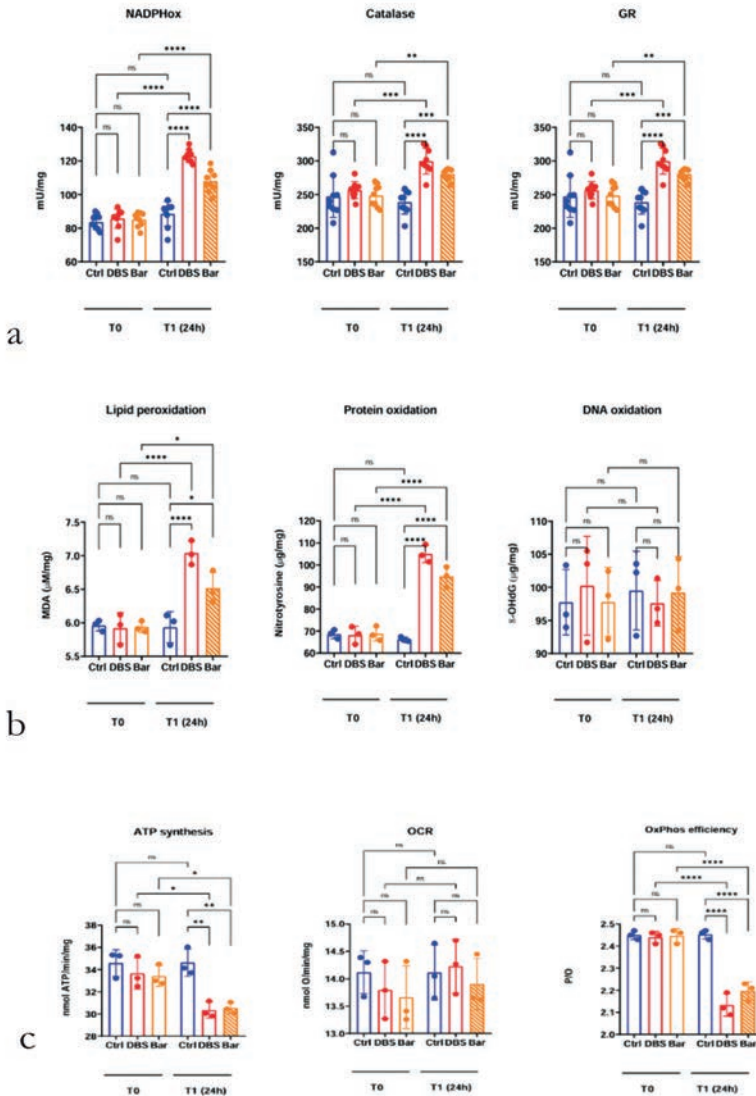


Figura 6. (a) analisi biochimiche per enzimi ossidanti (NADPH e catalase) e proossidanti (GR, glutazione reductasi); (b) perossidazione lipidica, ossidazione proteica e danno al DNA; (c) sintesi di ATP, consumo di ossigeno (OCR), ed efficienza della fosforilazione ossidativa (OxPhos).

nelle acque poco profonde del Mar Mediterraneo, come nei porti dove il traffico marittimo e l'inquinamento acustico sono particolarmente intensi.

È una tipica ascidia coloniale che forma colonie costituite da 3 a 300 e più zoidi, trasparenti, lunghi fino a 6 centimetri, legati a un unico stolone comune. I singoli zooidi hanno una tipica forma a clava, con un sifone inalante apicale e uno cloacale laterale, e sono trasparenti, al punto da consentire l'osservazione degli organi interni. Gli embrioni si sviluppano all'interno degli zooidi e le larve vengono poi rilasciate e andranno a aderire a un substrato differenziandosi nel giovanile e poi nell'adulto. Possono avere sia riproduzione sessuata che asessuata.



Figura 7. *Esemplari adulti di Clavelina lepadiformis; a destra un particolare di uno zoide.*

Contrariamente a quanto visto per l'anfiosso la *Clavelina* sottoposta al rumore presenta una capacità di filtrazione inferiore rispetto al controllo.

Grazie alla possibilità di osservare gli embrioni all'interno degli zooidi, gli adulti gravidi di *Clavelina* sono stati esposti alla traccia sonora pink noise per 24 ore. Successivamente, è stato valutato l'effetto di tale esposizione sulla selezione del sito di insediamento da parte delle larve.

Gli effetti sul comportamento di scelta del sito di insediamento delle larve sviluppate sono stati quindi analizzati esaminando la distribuzione spaziale dei giovani individui fissati al fondo delle vasche, mediante un

sistema di mattonelle disposte all'interno di una griglia dove da un lato viene posta anche una sorgente luminosa. È infatti noto che gli animali tendano a insediarsi in prossimità della sorgente luminosa. Tuttavia, il trattamento acustico induce le larve a insediarsi a maggiore distanza sia dalla sorgente luminosa sia dalla sorgente sonora.

Analogamente a quanto precedentemente osservato nell'anfiosso, *Clavelina* mostra una condizione di stress ossidativo e una risposta fisiologica sovrapponibile, caratterizzata da un'alterazione della fosforilazione ossidativa e da meccanismi antiossidanti insufficienti a contrastare e ripristinare lo stato di stress ossidativo.

Gli animali trattati con il rumore sono stati inoltre osservati al SEM al fine di individuare alterazioni a livello delle cellule sensoriali.

È infatti noto che i tunicati, come *Clavelina*, possiedono due tipologie di cellule sensoriali: cellule primarie localizzate attorno al sifone orale e cellule secondarie situate nell'organo coronale (Rigon *et al.* 2017). In particolare, i nostri esperimenti evidenziano che un'esposizione al rumore della durata di 24 ore determina una perdita delle ciglia nelle cellule sensoriali sia dell'organo coronale sia del sifone orale.

Inoltre, il test di stimolazione con l'aghetto del sifone orale mette in evidenza che gli animali sottoposti al rumore risultano insensibili al tocco rispetto agli animali di controllo, così come precedentemente mostrato nell'anfiosso.

In conclusione, il nostro studio, sebbene preliminare, mostra quanto sia fondamentale capire come il rumore prodotto dalle attività umane influenzi gli invertebrati marini, organismi spesso trascurati ma essenziali per il funzionamento degli ecosistemi. Queste conoscenze sono cruciali anche per orientare politiche europee di tutela dell'ambiente marino e per una gestione più sostenibile dei nostri mari.

Bibliografia

Guarneri I., Bozzo M., Perez Criado N., Serafini E., Manfè G., Tagliapietra D., Fiorin R., Scapin L., Povero P., Bellitto D., Ferrando S., Amaroli A., Castellano L., Pestarino M., Schubert M., Candiani S. *Amphioxus (Branchiostoma lanceolatum) in the North Adriatic Sea: ecological observations and spawning behavior*. Integr Zool. (2025) 20(2): 331-343.

- Lacalli T.C., Shufen H. *A reexamination of the epithelial sensory cells of amphioxus (Branchiostoma)*. Acta Zoologica (1999) 80: 125-134.
- Popper A.N., Hawkins A.D., Thomsen F. *Taking the animals' perspective regarding anthropogenic underwater sound*. Trends Ecol Evol. (2020) 35(9): 787-794.
- Rigon F., Gasparini F., Shimeld S.M., Candiani S., Manni L. *Developmental signature, synaptic connectivity and neurotransmission are conserved between vertebrate hair cells and tunicate coronal cells*. J Comp Neurol. (2017) 526(6): 957-971.

*Monitoraggio ambientale marino, un nuovo paradigma:
micro-contaminanti tradizionali ed emergenti e innovazioni
tecnologiche avanzate per la raccolta e l'analisi dei dati*

Sommario: L'urbanizzazione costiera in Liguria, caratterizzata da elevati livelli di attività umana e dalla presenza di settori industriali ad alto impatto, esercita una pressione significativa sull'ecosistema marino costiero. Tuttavia, le quattro aree marine protette testimoniano la loro ricca biodiversità. In un momento di rapidi e improvvisi cambiamenti che richiedono analisi tempestive e la capacità di gestire grandi volumi di dati, il sistema di monitoraggio marino si sta evolvendo grazie allo sviluppo di un nuovo approccio che integra misurazioni *in situ*, tecniche di campionamento automatizzate e metodi analitici avanzati. In questo contesto, verranno presentati alcuni casi studio e i dati più significativi di diversi progetti di ricerca condotti dall'Università di Genova riguardanti il Mar Ligure e le aree limitrofe del Mediterraneo.

Parole chiave: monitoraggio marino costiero; contaminanti emergenti; Direttiva Quadro Strategia Marina; organismi bioindicatori; campionatori passive.

Abstract: *Marine Environmental Monitoring, a New Paradigm: Traditional and Emerging Micro-contaminants and Advanced Technological Innovations for Data Collection and Analysis*
Coastal urbanization in Liguria, characterized by high levels of human activity and the presence of high-impact industrial sectors, exerts significant pressure on the coastal marine ecosystem. However, the four marine protected areas bear witness to their rich biodiversity. In a moment of rapid and sudden change that demands swift analysis and the ability to manage large volumes of data, the marine monitoring system is evolving thanks to the development of a new approach that integrates *in situ* measurements, automated sampling techniques and advanced analytical methods. In this context, several case studies and the most significant data from several research projects conducted by the University of Genoa concerning the Ligurian Sea and neighbouring areas of the Mediterranean will be presented.

Keywords: coastal marine monitoring; emerging contaminants; Marine Strategy Framework Directive; bioindicator organisms; passive samplers.

* Accademica

paola.rivaro@unige.it

** Accademico

emanuele.magi@unige.it

Nel 2008 è stata promulgata la Direttiva Europea 2008/56/CE, conosciuta come Direttiva Quadro sulla Strategia per l'Ambiente Marino (Marine Strategy Framework Directive, MSFD), che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di politica ambientale marina. Questa Direttiva rappresenta uno strumento innovativo per la protezione dei mari, considerando l'ambiente marino in un'ottica ecosistemica e ampliando l'area di indagine della Direttiva Acque (2000/60/CE) fino alle 12 miglia nautiche di distanza dalla costa¹.

Per buono stato ecologico delle acque marine si intende la capacità di preservare la diversità ecologica e la vitalità dei mari e degli oceani in modo che siano puliti, sani e produttivi, mantenendo al contempo l'uso dell'ambiente marino a un livello sostenibile e salvaguardando il suo potenziale per gli usi e le attività delle generazioni presenti e future.

Per consentire agli Stati membri di raggiungere i propri obiettivi, la Direttiva ha sviluppato 11 descrittori (D) che descrivono l'ecosistema e che includono: D1 Biodiversità, D2 Specie non autoctone, D3 Pesci e molluschi commerciali, D4 Reti alimentari, D5 Eutrofizzazione, D6 Integrità dei fondali marini, D7 Condizioni idrografiche, D8 Contaminanti ambientali, D9 Contaminanti nei prodotti ittici, D10 Rifiuti marini e D11 Introduzione di energia, compreso il rumore.

Uno dei descrittori (D8), quindi, riguarda specificatamente la valutazione della presenza di contaminanti chimici e dei loro effetti sugli organismi. La valutazione dello stato di qualità dell'ambiente marino basata sul descrittore D8 tiene conto non solo delle concentrazioni dei contaminanti, ma anche degli effetti che la loro presenza ha prodotto sugli organismi in termini di bioaccumulo e di risposte biologiche (biomarker), rispetto ai valori di controllo e alle soglie.

I parametri chimici monitorati sono metalli (ad esempio il mercurio), sostanze o gruppi di sostanze (ad esempio idrocarburi policiclici aromatici IPA o composti organostannici – organotin compounds OTC) presenti nell'elenco prioritario (Regolamento n. 2455/2001 e successivamente disciplinati dalla Direttiva 2013/39/UE) riconosciuti come nocivi per la salute umana e/o per l'ambiente. Al descrittore D8 si aggiunge il D9, che prevede la valutazione del livello di contaminanti nei prodotti commestibili della pesca rispetto ai limiti stabiliti dal regolamento UE 2023/915.

Accanto ai contaminanti ormai monitorati da tempo stanno suscitando grande interesse nella comunità scientifica i contaminanti definiti emergenti; essi comprendono un vasto numero di sostanze chimiche, tra cui prodotti farmaceutici, prodotti per la cura personale, plastificanti, ritardanti di fiamma e altri prodotti di sintesi come le sostanze per- e poli-fluoroalchiliche (PFAS), nonché microplastiche e nanomateriali².

Questi composti entrano nell'ambiente marino attraverso processi simili a quelli degli inquinanti tradizionali, ma la differenza sta nel fatto che la nostra conoscenza del loro impatto a lungo termine rimane limitata. Diversi test suggeriscono che possano indurre tossicità subletale, alterare i sistemi endocrini, compromettere la riproduzione e interagire sinergicamente con altri fattori di stress amplificando il danno ecologico².

Le problematiche connesse al monitoraggio chimico sono numerose e possono essere riassunte nei seguenti punti:

1. conoscenza delle sorgenti e delle modalità di immissione;
2. conoscenze delle condizioni biogeochimiche dell'area;
3. conoscenze degli eventuali livelli naturali;
4. difficoltà analitiche nella determinazione dei composti per le basse concentrazioni e la variabilità spazio-temporale della matrice;
5. difficile valutazione dell'impatto sugli organismi;
6. difficoltà a stabilire la relazione inquinante specifico - cambiamento ambientale.

La misura delle concentrazioni degli inquinanti nell'acqua di mare è a volte poco significativa, poiché esse possono essere molto variabili nello spazio e nel tempo, in dipendenza della presenza delle sorgenti di immissione, della distanza da costa e della profondità del fondale, dello schema della circolazione marina e della stagione. Tutto ciò implica che per avere un quadro completo occorran studi condotti per lunghi periodi e con dense reti di punti di misura che comportano un elevato numero di campioni da analizzare e alti costi analitici.

Inoltre, la misura dei contaminanti in acqua non permette di rilevare i loro effetti sugli organismi e sugli ecosistemi e di stabilire la relazione "contaminante specifico - cambiamento ambientale". Queste considerazioni hanno pertanto portato all'utilizzo sistematico di organismi per valutare cambiamenti nella qualità ambientale³.

Il biomonitoraggio offre dei vantaggi rispetto al monitoraggio chimico tradizionale, con gli organismi bioindicatori che assumono il ruolo di organismi sentinella. *In primis*, consente la valutazione di parametri non misurabili strumentalmente e la registrazione dei loro effetti, fornendo la stima della biodisponibilità degli inquinanti e documentando gli effetti reali delle alterazioni ambientali, mentre le analisi strumentali forniscono una misura del possibile rischio. In secondo luogo, i bioindicatori sono “registratori naturali e permanenti”, quindi possono essere considerati una sorta di memoria storica e spaziale dell’area, a differenza delle analisi chimiche che forniscono risultati puntiformi e relativi al momento del campionamento. Infine, l’impiego di organismi bioindicatori rende possibile la redazione di carte tematiche, utili per confrontare nello spazio e nel tempo i parametri monitorati, con tempi e costi minori.

Tuttavia, il biomonitoraggio non può sostituirsi *in toto* al monitoraggio chimico marino, poiché fornisce stime indirette e spesso non selettive a differenza degli strumenti che misurano i singoli analiti. Inoltre, risente dei cicli biologici degli organismi che dipendono dalla stagione e di possibili fenomeni di adattamento al contaminante che si sta monitorando, che falsano il risultato.

La scelta della specie sentinella o bioindicatore gioca un ruolo centrale nell’affidabilità dei risultati del biomonitoraggio. Può essere considerato un buon organismo sentinella una specie che è grado di bioaccumulare elevate concentrazioni di inquinanti nei propri tessuti dimostrandosi resistente alla loro presenza. L’organismo dovrebbe inoltre occupare una posizione di rilievo all’interno dell’ecosistema in modo da integrare gli effetti di un contaminante su quell’ecosistema. Nel monitoraggio biologico trovano quindi ampio utilizzo, come organismi bioindicatori, molluschi e pesci.

I bivalvi, in generale, si sono dimostrati utili come bioindicatori nel monitoraggio marino costiero in quanto:

- hanno un’ampia distribuzione geografica con un elevato numero di individui che permettono di ottenere dati per valutazioni sia a breve sia a lungo termine;
- sono organismi sessili e filtratori capaci di accumulare gli inquinanti nei loro tessuti;
- mostrano risposte all’inquinamento ambientale ben caratterizzate;
- hanno importanza economica come cibo per l’uomo.

Inoltre, possono essere trapiantati (*transplanted*) e mantenuti in gabbie (*caged*) nei siti da monitorare in cui eventualmente non fossero presenti.

Il “Mussel Watch” (Mitilo Sentinella) della sezione “National Status and Trends” (NS&T) dell’Amministrazione Nazionale Oceanica e Atmosferica degli Stati Uniti (NOAA) è un programma di biomonitoraggio degli inquinanti presenti nelle acque marine costiere avviato nel 1986 impiegando mitili come organismi bioindicatori⁴. A questo primo programma di biomonitoraggio si sono rifatti quelli tuttora in corso anche in Italia.

Il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale in collaborazione con altri Dipartimenti dell’Università di Genova, l’ARPAL e IST ha preso attivamente parte a uno dei primi progetti Mussel Watch della Regione Liguria negli anni novanta. Mitili provenienti dagli allevamenti spezzini furono posizionati in diversi siti della costa ligure, consentendo di valutare i diversi impatti prodotti dall’introduzione di metalli (figura 1).



Figura 1. Mappa dei siti di campionamento del progetto “Mussel Watch” a cui ha preso parte il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale e variazione della concentrazione dello zinco (Zn) in diversi mesi in tre siti di riferimento (Sp = La Spezia; Pa = Paraggi; Da = Genova darsena).

Un altro studio condotto dal Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale ha visto l’impiego dei mitili come bioindicatori per valutare l’impatto dei composti organostannici (OTCs) nelle acque del porto petroli di Genova⁵.

Nei composti organostannici, di cui in figura 2 è rappresentata la generica formula, un atomo di Sn è legato covalentemente a uno o più

sostituenti organici. Chimicamente questi composti sono rappresentati dalle seguenti formule: RSnX_3 , R_2SnX_2 , R_3SnX e R_4Sn , in cui R indica un gruppo alchilico o arilico e X una specie anionica (es. alogenuro, ossido, ossidril, acetato ecc.)⁶.

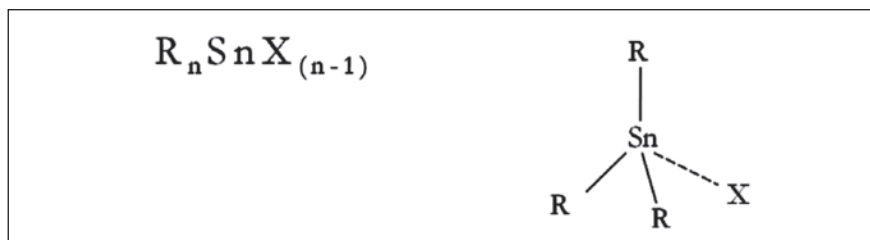


Figura 2. Formula generale e di struttura dei composti organostannici. R: gruppo alchilico (es. metil-, butil-, cicloesil-) o arilico (es. fenil-); X: gruppo anionico (es. cloruro, fluoruro, ossido, ossidril, acetato, carbonato ecc.) (da Blunden e Evans 1990⁶).

Il tributilstagno (TBT) nel passato è stato utilizzato in numerose applicazioni commerciali, tra cui come additivo biocida nelle formulazioni di vernici antivegetative per navi.

In ambiente marino, il dibutilstagno (DBT) e il monobutilstagno (MBT), meno tossici del TBT per gli organismi acquatici, sono presenti anche come risultato dei processi di degradazione del TBT, insieme al trifenilstagno (TPT), impiegato come co-tossico con il TBT in alcune vernici antivegetative a lunga durata. Il destino del TBT nella colonna d'acqua è il risultato di diversi processi: tasso di immissione, miscelazione e diluizione, biodegradazione, fotodegradazione, adsorbimento su materiale particellato sospeso.

Nel 2001 l'International Maritime Organization (IMO) adottò la Convention on the Control of Harmful Anti-fouling System on Ships (Convenzione AFS) che proibiva nuove applicazioni di vernici antivegetative a base di TBT a partire dal 1° gennaio 2003, la presenza di vernici antivegetative a base di TBT sulla superficie degli scafi e delle strutture sommerse a partire dal 1° gennaio 2008 e la necessità di ratifica da parte di 25 Stati, la cui stazza complessiva coprisse almeno il 25% del tonnellaggio lordo mondiale. Queste prescrizioni non entrarono in vigore immediatamente e data la persistenza degli OTC, questi composti sono ancora oggi oggetto di monitoraggio.

Anche in questo studio i tessuti dei mitili, in particolare le branchie, riflettevano le variazioni dei composti organostannici riscontrate nell'acqua di mare durante il periodo di campionamento, dimostrando la validità del loro impiego come bioindicatori (figura 3).

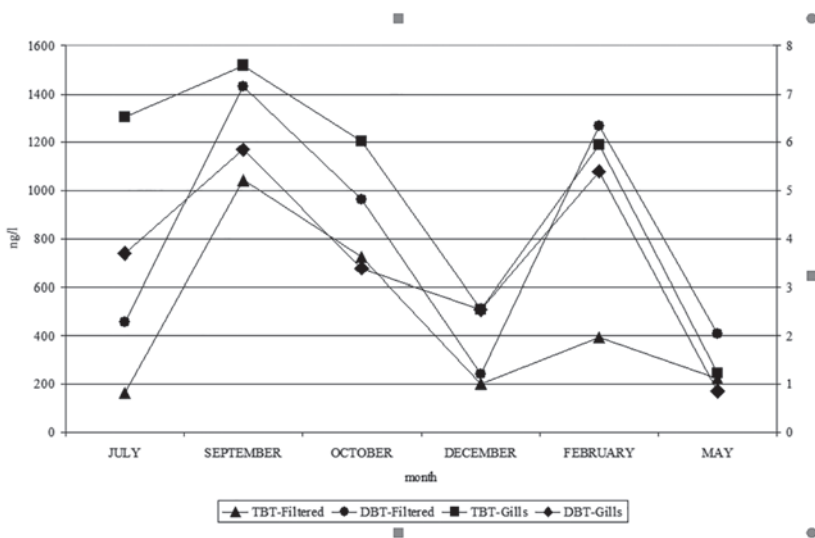


Figura 3. Confronto tra l'andamento dei livelli di tributilstagno e dibutilstagno nei campioni di acqua di mare filtrata (TBT filtered e DBT filtered) e l'andamento dei livelli di tributilstagno e dibutilstagno (TBT gills e DBT gills) riscontrato nelle branchie dei mitili stabulati nel porto petroli di Genova (da Rivaro et al. 1999).

Come si accennava nell'introduzione, tra i parametri chimico-fisici presi in considerazione per monitorare la qualità dell'ambiente acquatico, ormai da diversi anni si parla anche di contaminanti emergenti benché, ad oggi, non esista una normativa specifica.

Nel 2015 l'Unione Europea ha emesso la Decisione di esecuzione 2015/495, elencando dieci contaminanti emergenti per i quali "devono essere raccolti dati di monitoraggio a livello dell'Unione, allo scopo di facilitare i futuri esercizi di definizione delle priorità d'intervento"⁷. L'Unione Europea incoraggia poi i Paesi membri a condurre ricerche sistematiche sui contaminanti emergenti cercando di integrare dati di monitoraggio con dati provenienti da studi tossicologici. L'obiettivo consiste nel cercare di comprendere fino a che punto i contaminanti ambientali

possano alterare o incidere negativamente sulla regolazione dei processi biologici. Si tratta di studi ampi e ambiziosi che rappresentano una nuova frontiera, di importanza paragonabile a ciò che è stato fatto negli ultimi due decenni per studio del genoma. Ovviamente sono richieste competenze multidisciplinari (medicina, chimica, biologia...) e strumentazioni d'avanguardia come la spettrometria di massa ad altissima risoluzione associate a efficienti tecniche di campionamento e preparazione del campione. Uno studio recente⁸ evidenzia l'importanza di sviluppare tecniche di campionamento innovative per svariate matrici, dall'acqua ai tessuti biologici, e di condurre anche analisi non mirate (*un-targeted*) per identificare contaminanti sconosciuti (*unknown*), nonché di utilizzare saggi biologici in vitro per valutare la tossicità di miscele complesse, anche senza conoscere esattamente la composizione chimica.

Il gruppo di ricerca CroMasS del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Genova ha competenze ultradecennali in questo ambito. Nel presente articolo vengono portati come esempio due casi studio nei quali la tecnica della spettrometria di massa viene impiegata congiuntamente ad approcci innovativi nelle fasi di prelievo e trattamento del campione acquoso.

Il primo caso studio propone una metodologia innovativa per il campionamento integrativo delle acque costiere, mirata alla rivelazione e determinazione di contaminanti emergenti derivanti da reflui urbani. La metodologia è basata sull'approccio innovativo che utilizza i campionatori passivi di tipo POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Samplers). Come dimostrato da vari studi del gruppo di ricerca⁹⁻¹², si tratta di una strategia versatile che può essere impiegata in svariate tipologie di matrici acquose (acque superficiali, acque nei diversi stadi della depurazione, acque destinate al riuso ecc.). Infatti, in base alla tipologia prescelta, i campionatori passivi sono in grado di accumulare i contaminanti *in situ* in modo selettivo, consentendone al tempo stesso la pre-concentrazione; quindi, la successiva determinazione dei contaminanti è resa possibile anche quando le concentrazioni ambientali sono molto basse (ultra-tracce).

Sono stati selezionati gli analiti "target", in modo da essere rappresentativi di diverse classi di composti considerati "emergenti": Paraxantina (PARAX), caffeina (CAFF), acido perfluorooottanoico (PFOA), carbamazepina (CARB), acido perfluorooottansulfonico (PFOS), ketoprofene (KETO), naprossene (NAPR), diclofenac (DIC), ibuprofene (IBU),

benzofenone-3 (BP-3), gemfibrozil (GEM), octil-dimetil-p-aminobenzoato (OD-PABA), etil-esil-metossi-cinnamato (EHMC), ottocrilene (OC), bisfenolo A (BPA), beta-estradiolo (E2), 17-alfa-etinil-estradiolo (EE2), estrone (E1), triclosan (TCS).

La strumentazione analitica per la misura degli analiti, basata su cromatografia liquida accoppiata alla spettrometria di massa (LC-MS), consiste in un cromatografo HPLC 1200 accoppiato mediante sorgente elettrospray a uno spettrometro di massa a triplo quadrupolo 6430 (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA).

Sono stati utilizzati due diversi tipi di campionatori passivi: POCIS di tipo tradizionale (fase HLB e membrane in PES di porosità 0,1 micron) e campionatori “simil-POCIS”, recentemente ideati nel nostro laboratorio, in cui la membrana di PES è sostituita da un tessuto di poliestere. La comparazione tra le due tipologie ha mostrato che i campionatori “simil-POCIS” riescono a campionare un range più ampio di analiti, con una cinetica di accumulo più elevata per alcuni tipi di contaminanti; in questa sede non approfondiremo questo aspetto analitico. Negli ultimi anni sono stati studiati diversi siti costieri liguri, esponendo sempre i campionatori in doppio o in triplo: area del Porto Antico di Genova, area costiera di Santa Margherita Ligure, area marina protetta di Portofino.

A titolo d'esempio, si riportano i risultati ottenuti nel campionamento svolto nel dicembre 2021 nel Porto Antico di Genova. Come è possibile osservare in tabella 1, sono stati rivelati e quantificati 14 contaminanti emergenti (sui 19 target del metodo analitico), a conferma del forte impatto antropico nell'area considerata). Le due tipologie di campionario passivo (POCIS tradizionale e innovativo) hanno mostrato un comportamento sostanzialmente confrontabile. I valori di concentrazione ottenuti mediante il campionamento passivo con i “simil-POCIS” sono generalmente più elevati e hanno consentito anche la determinazione di BP-3 e OC (rispettivamente 6 e 12 ng/g) che risultavano inferiori al limite di rilevabilità (LOD) nei POCIS tradizionali. Vale la pena commentare i risultati ottenuti per la caffeina, il cui livello di concentrazione è particolarmente elevato (930 e 1176 ng/g, rispettivamente per POCIS e “simil-POCIS”); questo composto è stato inserito nel metodo analitico in quanto può essere considerato un tracciante della contaminazione urbana.

Tabella 1. *Concentrazioni nei campionatori nel Porto Antico di Genova (ng/g fase ricevente POCIS).*

Analita	POCIS	“Simil-POCIS”
PARAX	115 ± 2	93 ± 5
CAFF	930 ± 31	1176 ± 18
PFOA	7.1 ± 0.3	11 ± 1
CARB	28 ± 2	49 ± 1
PFOS	14 ± 1	11 ± 1
KETO	125 ± 17 (*)	18 ± 1 (*)
NAPR	25 ± 1	42 ± 1
DIC	52 ± 1	82 ± 6
IBU	121 ± 7	230 ± 1
BP-3	<LOD	5.6 ± 1.5
GEM	11 ± 1	17 ± 2
OC	<LOD	12 ± 7
BPA	137 ± 41	172 ± 11
E1	37 ± 1	49 ± 1

LOD: limite di rilevabilità

(*): dato non affidabile

Il secondo caso studio riguarda la determinazione di alcune molecole in grado di assorbire le radiazioni UV del sole, impiegate soprattutto nelle creme solari, note con il nome di UV filters; si tratta anche in questo caso di contaminanti emergenti che potremmo annoverare tra i prodotti per la cura della persona.

Come analiti “target” sono stati scelti sei UV filters tra i più diffusi nelle formulazioni delle creme solari presenti sul mercato italiano, alcuni dei quali hanno mostrato un potenziale effetto estrogenico¹³: Benzophenone-3 (BP-3), Octocrylene (OC), Ethylhexyl dimethyl p-aminobenzoate (OD-PABA), Ethylhexyl methoxycinnamate (EHMC), Ethylhexyl salicylate (EHS), Homosalate (HMS).

La tecnica analitica utilizzata è anche in questo studio la cromatografia liquida accoppiata alla spettrometria di massa, ma la preparazione del campione acquoso prevede l'impiego di una tecnica di estrazione-pre-concentrazione degli analiti innovativa, la "stir bar sorptive extraction" (SBSE). Si tratta di una tecnica che utilizza una piccola barretta magnetica (ancoretta) rivestita da un film di polidimetilsilossano (PDMS). Questo materiale risulta efficace per estrarre composti organici dall'acqua, in particolare quelli con caratteristiche di bassa polarità; la procedura di estrazione viene eseguita facendo ruotare vorticosamente (500-900 rpm) l'ancoretta magnetica in un volume noto di campione acquoso (10-100 ml) per un periodo di tempo variabile a seconda dei casi (1-4 ore).

Terminata l'estrazione, gli analiti posso essere recuperati mediante termo-desorbimento (se l'analisi viene svolta in gascromatografia) o mediante retro-estrazione con un idoneo solvente (per analisi in cromatografia liquida). Quest'ultima è la metodica impiegata nel presente caso studio; infatti, per la successiva analisi, è stato sviluppato e ottimizzato un metodo strumentale LC-MS. Si tratta di un metodo rapido (separazione degli analiti in meno di 5 minuti) e molto sensibile (LOD: 8-31 ng/L); tale risultato è stato ottenuto anche grazie all'impiego di una sorgente APCI che, per alcuni analiti, è risultata 10-16 volte più sensibile rispetto alla sorgente elettrospray utilizzata nel precedente studio.

Sono stato studiati quattro siti di balneazione in Liguria: le spiagge di Santa Margherita, San Fruttuoso, Camogli e una piscina con acqua di mare, situata nella costa di ponente. I campioni di acqua sono stati prelevati con idonei contenitori e trasferiti in laboratorio per i trattamenti di preparazione all'analisi; il campionamento è stato ripetuto per tre volte durante la stagione estiva.

La tabella 2 riassume i risultati ottenuti per i quattro siti considerati in questo caso studio [8]. Sono stati misurati due analiti, BP-3 e EHMC, mentre gli altri quattro sono risultati sempre sotto il limite di quantificazione (LOQ). I valori di BP-3 sembrano abbastanza costanti e inaspettatamente alti a San Fruttuoso, località balneare relativamente piccola. La piscina riempita con acqua di mare, come ci si poteva attendere visto che si tratta di un ambiente marino confinato, ha mostrato i valori più alti di entrambi i composti, in particolare 216 ng/L di BP-3 nel mese di luglio. Si tratta comunque livelli di contaminazione comparabili a quelli riportati da uno studio precedente¹⁴.

Tabella 2. *Concentrazioni dei due UV filters misurate nelle quattro località balneari studiate.*

	BP-3 (ng/L)			EHMC (ng/L)		
	giugno	luglio	agosto	giugno	luglio	agosto
Santa Margherita	<LOQ	<LOQ	33 ± 2	<LOQ	27 ± 3	<LOQ
San Fruttuoso	101 ± 5	118 ± 6	88 ± 5	<LOQ	28 ± 2	83 ± 2
Camogli	<LOQ	<LOQ	<LOQ	28 ± 3	25 ± 2	47 ± 4
Swimming pool	25 ± 1	216 ± 4	112 ± 6	71 ± 2	53 ± 2	86 ± 7

LOQ = Limite di Quantificazione

Bibliografia

- [1] https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/direttiva_2000_60_ce-pdf
- [2] Qadeer A., Liu M., Mohapatra S., Lai R.W.S. *Editorial: Legacy & emerging contaminants in the aquatic environment – Bridging knowledge, policy, and future.* Front. Toxicol. 2025; 7:1611852. doi: 10.3389/ftox.2025.1611852
- [3] Gallo S., Leonetti F.L., Reinero F.R., Micarelli P., Passarelli L., Giglio G., Milazzo C., Imbrogno S., Barca D., Bottaro M., Sperone E. *Bioaccumulation Patterns in Different Tissues of Twelve Species of Elasmobranchs from the Tyrrhenian and Ionian Sea (Calabria, Southern Italy).* Environments 2025; 12(1): 12. <https://doi.org/10.3390/environments12010012>
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Mussel_Watch_Program
- [5] Rivaro P., Pensiero G., Frache R. *Occurrence of butyltin compounds in water and mussel samples collected in an oil port.* Appl. Organom. Chem. 1999; 13: 727-732. doi: 10.1016/S0045-6535(96)00370-0
- [6] Blunden S.J., Evans C.J. *Organotin compounds.* In: Hutzinger O. (Ed.), *The Handbook of Environmental Chemistry.* Vol. 3, Part E, *Anthropogenic Compounds.* Springer, Berlin. 1990; 1-44.
- [7] Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, Decisione di Esecuzione (Ue) 2015/495 della Commissione, Off. J. Eur. Union. 2015 (2015): 40-42.
- [8] Escher B.I., Stapleton H.M., Schymanski E.L. *Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment.* Science 2020; 367: 388-392. <https://doi.org/10.1126/science.aay6636>

-
- [9] Liscio C., Magi E., Di Carro M., Suter M.J.F., Vermeirssen E.L.M. *Combining passive samplers and biomonitors to evaluate endocrine disrupting compounds in a wastewater treatment plant by LC/MS/MS and bioassay analyses*. Environ. Pollut. 1999; 157: 2716-2721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.034>
- [10] Magi E., Di Carro M., Mirasole C., Benedetti B. *Combining passive sampling and tandem mass spectrometry for the determination of pharmaceuticals and other emerging pollutants in drinking water*. Microchem. J. 2018; 136: 56-60. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.10.029>
- [11] Di Carro M., Magi E., Massa F., Castellano M., Mirasole C., Tanwar S., Olivari E., Povero P. *Untargeted approach for the evaluation of anthropic impact on the sheltered marine area of Portofino (Italy)*. Mar. Pollut. Bull. 2018; 131: 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.059>
- [12] Mackeown H., Benedetti B., Di Carro M., Magi E. *The study of polar emerging contaminants in seawater by passive sampling: A review*. Chemosphere 2022; 299: 134448. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134448>
- [13] Schmitt C., Oetken M., Dittberner O., Wagner M., Oehlmann J. *Endocrine modulation and toxic effects of two commonly used UV screens on the aquatic invertebrates Potamopyrgus antipodarum and Lumbriculus variegatus*. Environ. Poll. 2008; 152: 322. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.031>
- [14] Rodil R., Quintana J.B., Mahía P.L., Lorenzo S.M., Rodriguez D.P., *Multiclass determination of sunscreen chemicals in water samples by liquid chromatography–tandem mass spectrometry*. Anal. Chem. 2008; 80: 1307-1315. <https://doi.org/10.1021/ac702240u>

Comitato scientifico:

Mario Pestarino (Presidente), Adriana Saccone, Maria Stella Rollandi,
Giulio Manuzio, Maria Linda Falcidieno, Augusta Giolito, Nicola Corradi,
Antonio Garzilli.

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

ISSN 1122-651X

Autorizzazione del Tribunale di Genova n. 340 del 20 aprile 1955

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

Stampato in Italia / Printed in Italy

La pubblicazione del presente volume è stata resa possibile grazie al contributo
del MiC - Direzione generale Biblioteche e istituti culturali.