# ATTI

DELLA

# ACCADEMIA LIGURE

## DI SCIENZE E LETTERE

In continuazione degli
Atti della Reale accademia ligure di scienze e lettere
Atti Società di scienze e lettere di Genova
Atti Società ligustica di scienze e lettere
Atti Società ligustica di scienze naturali e geografiche
e delle
Memorie dell'Accademia delle scienze, lettere ed arti di Genova
Memorie dell'Accademia imperiale delle scienze e belle arti di Genova
Memorie dell'Istituto ligure di Genova

**Serie VII – Volume VII/1 – 2025**

*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@accademialigurediscienzeelettere.it
www.accademialigurediscienzeelettere.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.



# INDICE

## Tomo 1


Composizione dell'Accademia – Anno 2025 XI

Inaugurazione dell'anno accademico 2026

Relazione consuntiva del Presidente 3

Tornate pubbliche, conferenze e incontri culturali 15

Beppe Manzitti
*In occasione della nomina ad Accademico Onorario* 22

***Commemorazione di Vincenzo Lorenzelli***

Mario Pestarino
*Ricordo di Vincenzo Lorenzelli* 27

Marcella Trombetta
*Il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli* 33

Guido Busca
*"Come andiamo, giovane Busca?". La mia vita accademica con Vincenzo Lorenzelli* 45

Andrea Baldini
*Vincenzo Lorenzelli ritrova le radici pontremolesi* 51

Giuseppe Benelli
*Le radici pontremolesi di Vincenzo Lorenzelli* 55

Roby Carletta
*Vincenzo Lorenzelli, un ragazzo della via Pál* 61

***Commemorazione di Enrico Beltrametti***

Mario Pestarino
*Enrico Beltrametti accademico e scienziato* 65

Federico Delfino
*Ricordo del prof. Enrico Beltrametti* 67

Gianni Cassinelli
*L'attività di ricerca di Enrico Beltrametti* 71

Alberto Blasi
*Ricordo di Enrico Beltrametti nel periodo dal 1964 al 1970* 75

Giorgio L. Olcese
*Ricordo di Enrico Beltrametti* 79

## SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE, NATURALI E MEDICHE

### Incontri di studio

***La Liguria e il Mare***

Mario Pestarino
*Prefazione* 93

Paolo Guidetti – Andrea Zanini
*Dal presente al passato per pianificare il futuro: la piccola pesca e la sua sostenibilità ambientale, socioculturale ed economica* 95

Giorgio Bavestrello – Monica Montefalcone
*Impatti antropici e riscaldamento globale: effetti sulla biodiversità marina bentonica* 111

Carlo Nike Bianchi – Carla Morri
*A Century of Changes in the Biodiversity of the Ligurian Sea. A Tale of Two Coastal Ecosystems* 129

Marzia Bo
*Il Mar Ligure che cambia: vulnerabilità degli ecosistemi profondi* 145

Antonio Di Natale – Tomaso Gaggero
*Le nuove sfide del rumore antropico sottomarino e gli effetti sulle specie pelagiche* 161

Simona Candiani
*Valutazione dell'impatto del rumore marittimo su invertebrati marini di rilevanza ecologica* 189

Paola Rivaro – Emanuele Magi
*Monitoraggio ambientale marino, un nuovo paradigma: micro-contaminanti tradizionali ed emergenti e innovazioni tecnologiche avanzate per la raccolta e l'analisi dei dati* 201

Relazioni e contributi

Andrea Bacigalupo
*Terapie cellulari avanzate in ematologia e oltre* 217

Tiziano Bandiera
*Dal laboratorio alla farmacia: il lungo viaggio per arrivare a un nuovo farmaco* 223

Alberto Birga
*Energia e ambiente, fonti rinnovabili e innovazione tecnologica per la transizione energetica* 235

Maria Bolla – Emanuela Drago – Patrizia Perego
*Sustainable Technologies for the Valorization of Agri-Food Residues: From Waste to Resources* 249

Alessandro Bonsignore
*Consenso informato e disposizioni anticipate di trattamento* 257

Maurizio Canepa
*Dalle stelle alle (nano)piramidi* 267

Daniela Caracciolo – Mariachiara Chiantore
*Un meraviglioso viaggio tra sfide e opportunità* 295

Georgia Cesarone
*Protecting the Digital Future: Everyday Cybersecurity Challenges for Citizens, Public Bodies and Enterprises* 309

Michela Chiappalone
*Neuroingegneria per lo sviluppo di terapie elettroceutiche, la nuova frontiera della medicina personalizzata* 321

Laura Cornara – Gabriele Ambu
*La riscoperta del manoscritto "Selva Botanica" di padre Vincenzo Celesia, Cappuccino* 343

Marco De Montis
*La Regia Aeronautica nel decennio 1933-1943: dall'eccellenza mondiale alla tragedia della guerra. Le ragioni del declino e il confronto con gli Alleati* 365

Patrizia Ginesi
*Intrecci fra gli esseri umani e gli altri animali* 395

Paolo Guidetti
*The Mediterranean Sea: Ecology, Biodiversity Conservation, and Sustainability* 415

Mario Petrillo
*Dall'uomo all'uomo, storie di plastiche e microplastiche* 423

Walter Riva
*La cometa dei Magi. Indagine astronomica su un mistero lungo duemila anni* 441

Giuseppe Rosolini
*Una passeggiata tra gli infiniti* 459

Stefano Vanin
*Insetti: dalle teche dei musei alle aule dei tribunali, dai laboratori ai libri di scuola* 473

**Tomo 2**

## SCIENZE MORALI, LETTERARIE, STORICHE, ECONOMICHE E GIURIDICHE

### Incontri di studio e anniversari

***Pasquale Paoli a trecento anni dalla nascita. Un bilancio storiografico***


Carlo Bitossi
*Pasquale Paoli, nel tricentenario della nascita* 489

Antoine-Marie Graziani
*1793: l'année de la rupture entre la Convention nationale et Pasquale Paoli* 501

Erick Miceli
*Da una "Terza Riviera" alla nascita di una Nazione* 521


***Nel centenario della nascita di Marcello Venturi. La letteratura e la storia: dai racconti neorealisti al romanzo su Cefalonia***


Aldo A. Mola
*La resa senza condizioni del 3 settembre 1943 e le sue conseguenze* 545

Francesco De Nicola
*Marcello Venturi e il neorealismo: dai racconti di terza pagina al libro d'esordio* 571

Pino Boero
*Salpare con l'ultimo veliero: Marcello Venturi scrittore anche per ragazzi?* 581

Carlo Prosperi
*La generazione degli ex:* Sdraiati sulla linea *di Marcello Venturi* 595

Renato Venturelli
*Cefalonia, il cinema e Marcello Venturi* 605

Carlo Sburlati
*Da Cefalonia al Premio Acqui Storia* 619

***Munificenza e arte a Genova e in Liguria nell'Ottocento e nel Novecento***

Piero Boccardo
*Palazzo Rosso: più donatori per un museo* 627

Farida Simonetti
*La donazione di Paolo e Franco Spinola e la nascita della Galleria Nazionale di Palazzo Spinola a Genova* 649

Gianluca Zanelli
*La collezione della Galleria Nazionale della Liguria a Palazzo Spinola. Evoluzione, criteri e nuove prospettive (1958-2025)* 665

Matteo Fochessati – Mitchell Wolfson, Jr.
*La Wolfsoniana. Non una collezione di arte per l'arte, ma di arte in funzione delle idee* 687

Anna d'Albertis
*Marinaio-gentiluomo: la vita avventurosa di Enrico d'Albertis* 707

Maria Camilla De Palma
*Il museo dimora di Enrico d'Albertis, oggi Castello D'Albertis Museo delle culture del mondo* 719

Roberto Poggi – Giuliano Doria
*Dalle foreste di Borneo alla digitalizzazione delle collezioni* 749

Gian Luca Porcile
*Mario Labò e il Museo d'Arte Orientale "Edoardo Chiossone"* 761

Andrea Marmori
*Il Museo Civico "Amedeo Lia" della Spezia. L'elogio della bellezza* 785

Relazioni e contributi

Gabriella Airaldi
*Marco Polo, il mercante e il suo libro* 797

Filippo Biolé
*Dalle pietre d'inciampo al contenzioso nazionale e internazionale sui crimini di guerra e contro l'umanità: quali forme di Memoria?* 807

Matteo Capurro
*L'impresario delle Madonne. Frate Ginepro da Pompeiana e lo sfruttamento delle immagini sacre durante la campagna d'Etiopia (1935-1936)* 815

Franca Carboni
*Il restauro: equilibrio fra storia, tecnica e metodo. Evoluzione nella conservazione delle opere d'arte* 837

Maria Antonietta Falchi
*Teologia e politica nell'Europa del Cinquecento: Martin Bucer (1491-1551)* 861

Nicola Ferrari
Der Unsichtbar. *Elias Canetti, o la tragedia dell'ascolto* 879

Lucia Leporatti – Marcello Montefiori
*Innovazione digitale e intelligenza artificiale in sanità: verso un nuovo paradigma* 895

Roberto Limonta
*Genova,* ianua *violata del Mediterraneo. La teologia cartografica di Opicino de Canistris* 913

Raffaele Mellace
*Una fiaba boschereccia al lume delle stelle:* Falstaff*, l'ultima, imprevedibile avventura verdiana* 935

Piera Melli
*La diffusione in Occidente della ceramica greca, veicolo di cultura e civiltà (VIII-IV secolo a.C.)* 955

Guido Milanese
*Una nuova immagine del latino nell'educazione generale* 983

Federico Montaldo
*Ivo Saglietti. Un fotografo in cammino* 993

Francesca Pino
*Raffaele Mattioli: banca, cultura e impegno civile* 999

Sergio Vinciguerra
*I problemi attuali in Italia dell'aiuto a morire al malato affetto da patologia irreversibile che lo chiede* 1015

Note sulle raccolte librarie dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere

Maria Bibolini – Maria Stella Rollandi
*La Biblioteca dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere. Il fondo Oscar de Beaux e alcune recenti donazioni* 1035

## COMPOSIZIONE DELL'ACCADEMIA

**Anno 2025**[*]

### Consiglio Direttivo

| | | |
|---|---|---|
| Prof. Mario Pestarino | - | *Presidente* |
| Prof.ssa Adriana Saccone | - | *Vice Presidente e Presidente della Classe di Scienze* |
| Prof.ssa Maria Stella Rollandi | - | *Vice Presidente e Presidente della Classe di Lettere* |
| Prof. Giulio Manuzio | - | *Segretario della Classe di Scienze* |
| Prof.ssa Maria Linda Falcidieno | - | *Segretario della Classe di Lettere* |
| Prof.ssa Augusta Giolito | - | *Bibliotecario* |
| Prof. Nicola Corradi | - | *Segretario Generale* |
| Dott. Antonio Garzilli | - | *Amministratore* |

[*] al 31 dicembre

# INAUGURAZIONE DELL'ANNO ACCADEMICO 2026

## 18 DICEMBRE 2025



# RELAZIONE CONSUNTIVA DEL PRESIDENTE

Prof. Mario Pestarino

Care Accademiche e cari Accademici, gentili Ospiti,

vi rivolgo il mio più cordiale benvenuto a questa cerimonia di inaugurazione del 229° anno accademico.

Sono trascorsi 228 anni da quel lontano 1798 quando nello spirito illuministico alcuni docenti dell'Università di Genova, assieme ad alcuni rappresentanti della cultura scientifica e umanistica genovese, il 4 ottobre diedero vita all'Istituto Nazionale che rappresentò il motore della ricerca scientifica e umanistica in ambito locale con lo scopo di trasmettere e organizzare territorialmente il sapere. Negli anni successivi l'Istituto Nazionale cambiò più volte denominazione, tuttavia mantenne inalterato lo scopo di contribuire con studi, pubblicazioni, conferenze e con il conferimento di premi e borse di studio al progresso delle conoscenze scientifiche e umanistiche.

A oggi l'Accademia ha un organico costituito da 205 Accademici:

- 13 Accademici Onorari;
- 99 Soci Effettivi: 49 della Classe di Scienze e 50 della Classe di Lettere;
- 93 Soci Corrispondenti: 45 della Classe di Scienze e 48 della Classe di Lettere.

Sulla base di questo organico è stato predisposto l'Annuario 2025 che riporterà tutti i dati aggiornati al 1° gennaio 2026 e sarà inviato per posta a tutti gli Accademici nel mese di gennaio 2026.

Il Consiglio Direttivo e l'Assemblea degli Accademici effettivi hanno approvato le proposte di nomina di 1 nuovo Accademico Onorario,

3 nuovi Accademici Effettivi e 7 nuovi Accademici Corrispondenti che entreranno in carica il 1° gennaio 2026.

Purtroppo, nel corso dell'anno sono mancati gli Accademici:

- Vincenzo Lorenzelli, Presidente Emerito dell'Accademia (6 marzo 2025). A lui va la nostra più sincera riconoscenza per averne potenziato le strutture e dato un notevole impulso alle attività culturali dell'Accademia;
- Guido Alpa, Accademico Onorario, giurista (7 marzo 2025);
- Giorgio De Piaggi, Accademico Effettivo della Classe di Lettere, Professore Emerito, già professore ordinario di Lingua e Letteratura francese dell'Università di Genova (2 luglio 2025);
- Carlo Maria Becchi, Accademico Effettivo della Classe di Scienze, Professore Emerito, già professore ordinario di Fisica teorica dell'Università di Genova (15 settembre 2025);
- Franco Ajmar, Accademico Effettivo della Classe di Scienze, già professore ordinario di Genetica medica dell'Università di Genova (16 novembre 2025).

A questi cari amici e colleghi va il nostro ricordo affettuoso e riconoscente e alle loro famiglie il rinnovo delle più sentite condoglianze.

In questo anno accademico siamo riusciti ad attuare un consistente numero di attività culturali grazie all'impegno del Consiglio Direttivo e di tutti gli Accademici, e ai contributi economici ottenuti dal Ministero della Cultura, dal Ministero dell'Università e della Ricerca (5xmille) e dalla Fondazione Carige ai quali esprimiamo il nostro doveroso ringraziamento.

*Conferenze e convegni*

La nostra consolidata tradizione, ben nota anche agli amici dell'Accademia che si avvalgono delle nostre attività di diffusione culturale, prevede che ogni lunedì e giovedì si svolga un incontro accademico fondato su una conferenza tenuta da un Accademico o da Colleghi invitati. In questo anno 2025 abbiamo realizzato un totale di 66 conferenze.

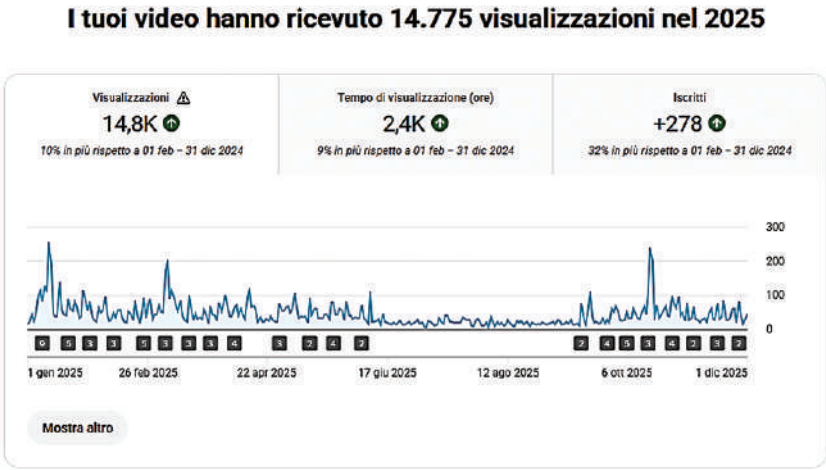
Nel corso di quest'anno (5 maggio) è stato organizzato dall'Accademico Francesco De Nicola anche il convegno intitolato "Nel cente-

nario della nascita di Marcello Venturi. La letteratura e la storia: dai racconti neorealisti al romanzo su Cefalonia".

Dal 2 ottobre all'11 novembre abbiamo organizzato il convegno "La Liguria e il Mare", articolato in sei sessioni che hanno visto come relatori numerosi nostri Accademici oltre a specialisti di biologia ed ecologia marina, di chimica ambientale, di economisti e giuristi. Al termine è stata organizzata una Tavola rotonda, presso il salone del Bergamasco della Camera di Commercio di Genova, gentilmente concesso dal Presidente dott. Luigi Attanasio al quale vanno i nostri più sentiti ringraziamenti. Alla Tavola rotonda hanno partecipato rappresentanti delle Istituzioni pubbliche e private, degli Enti maggiormente coinvolti nello studio e nel mantenimento della biodiversità del Mar Ligure.

Tutti gli eventi sono stati trasmessi in streaming attraverso la piattaforma YouTube e la registrazione audiovisiva è stata inserita nel canale YouTube dell'Accademia (https://www.youtube.com/@ALSL1798), dopo un opportuno lavoro di editing. A questo proposito un sentito ringraziamento va ai nostri tecnici e collaboratori Marc Sirito Virtus e Nicolò Metti.

Esaminando i dati forniti da YouTube risulta che nel 2025 i nostri video hanno raggiunto un totale di 14.775 visualizzazioni corrispondenti a circa 2.400 ore di tempo di visualizzazione. Anche gli iscritti sono aumentati in maniera proporzionale.



Questa invece la classifica con **i soli contenuti prodotti nel 2025**:



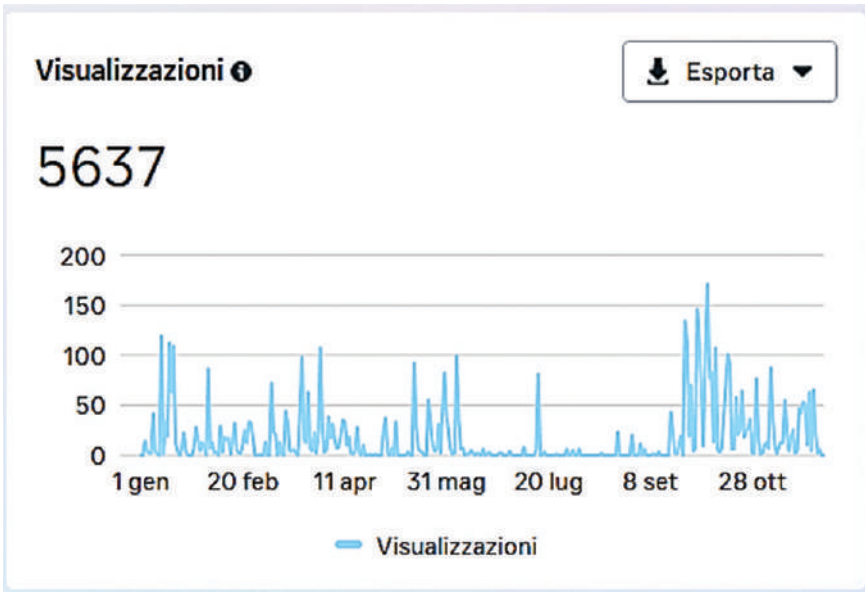

Queste sono le principali **sorgenti di traffico** che portano ai nostri video:



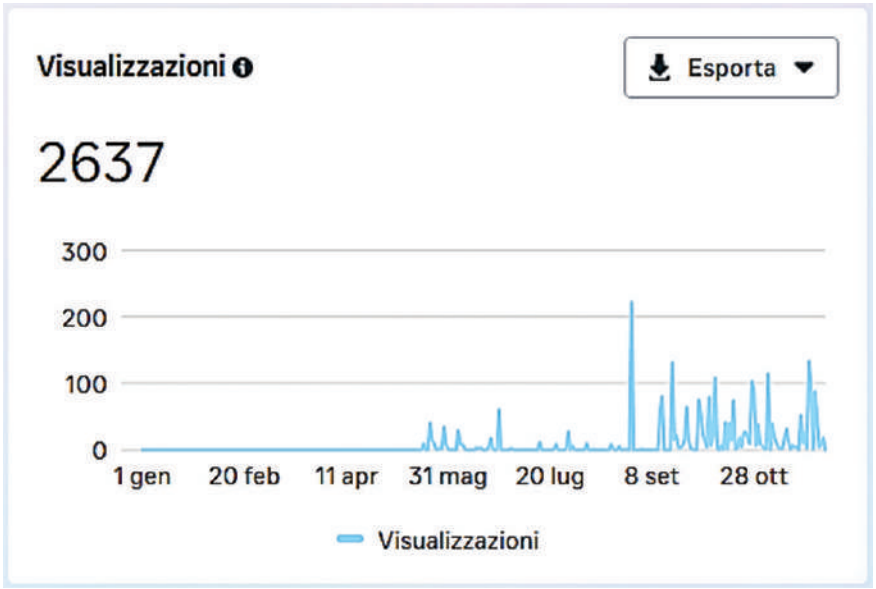

Restringendo il campo agli ultimi 90 giorni per analizzare le abitudini dei nostri spettatori recenti, notiamo che la maggior parte delle visualizzazioni arriva dallo streaming, con 43 utenti che si sono collegati più volte nell'ultimo trimestre e oltre 1.300 "passanti".



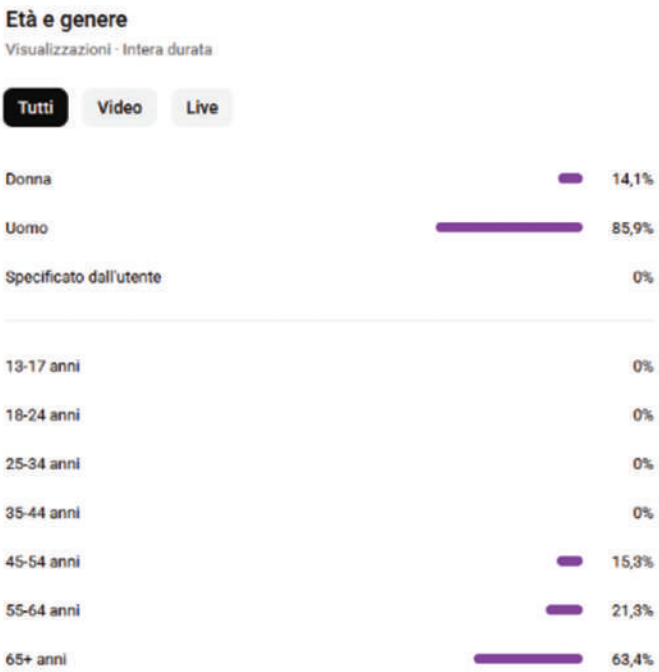

Le visualizzazioni di quest'anno su **Facebook** sono più che quadruplicate grazie a una maggiore regolarità e frequenza nella condivisione e all'utilizzo di post con 3-4 scatti delle conferenze in corso.



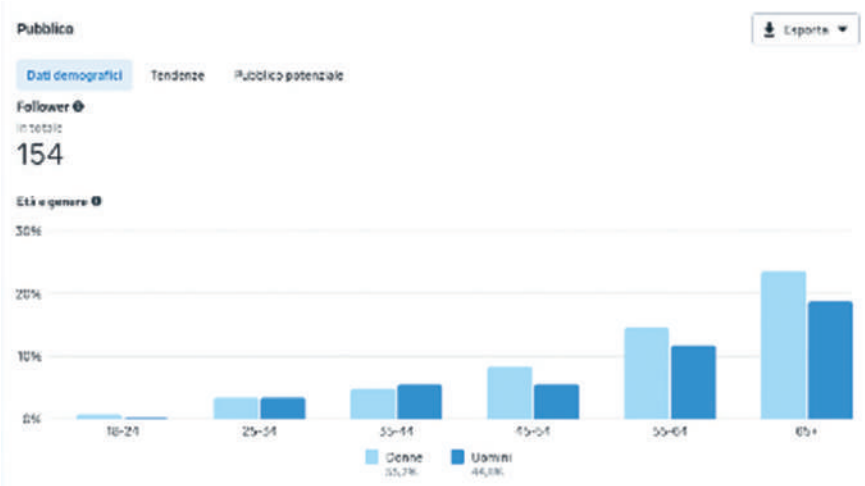

Per lo stesso motivo vediamo impennare le visualizzazioni su **Instagram**, che è un social che funziona molto bene con le immagini, poco con contenuti testuali.



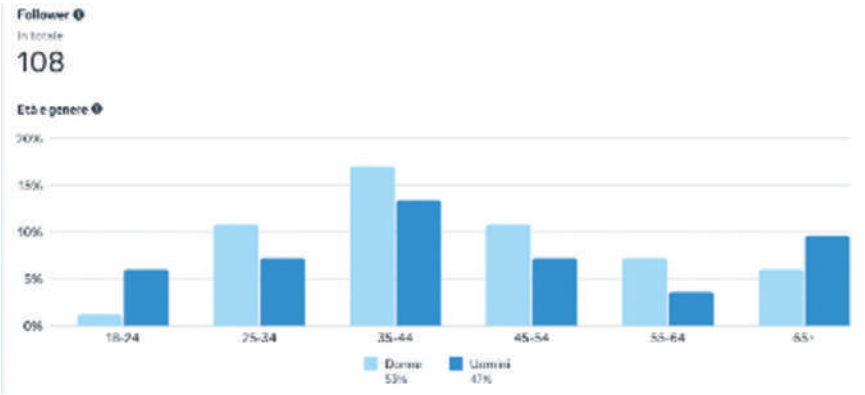

Chi ci segue su **Youtube**?



Chi ci segue su **Facebook**?




Chi ci segue su **Instagram**?




*Conclusioni sul pubblico*

I dati confermano che abbiamo audience diverse in base alle piattaforme. Mentre YouTube e Facebook mostrano dati demografici simili (prevalenza di maschi over 60), Instagram ci mostra il potenziale pubblico, che risulta più giovane e prevalentemente femminile.

Questi dati sono per noi una preziosa documentazione sul complesso dei nostri eventi culturali che rimarranno fruibili anche nel tempo da parte di studiosi, studenti e altre persone interessate.

*Eventi patrocinati*

Nel corso dell'anno l'Accademia ha patrocinato numerosi eventi:

- Arcidiocesi di Genova: "Le religioni aiutano i processi di pace", una giornata rivolta agli studenti liceali (25 febbraio).
- Presentazione del volume *I Teatri di Finale*, organizzata da Roberto Iovino (5 marzo).
- "Giornata dell'acqua", organizzata dall'IC Molassana-Prato, con la partecipazione di Adriana Saccone e del sottoscritto (31 marzo).
- Presentazione del volume di Maria Stella Rollandi, Presidente della Classe di Lettere della nostra Accademia, *Nobili, borghesi e imprenditori a Genova (secoli XVI-XIX). Saggi di storia economica*, a cura di Luisa Piccinno e Andrea Zanini (2 aprile).
- Convegno *Ricciotti Garibaldi. Il più versatile dei figli dell'Eroe dei due mondi*, organizzato dalla Fondazione Carige e coordinato da Raffaella Ponte con l'intervento di Enzo Baldini (8 aprile).
- Presentazione del volume *La lingua bruciata. N.Y. 1911*, conversazione di Massimo Mordiglia con l'autrice Laura Sicignano (21 maggio).
- Convegno *Liguria: terra di emigrazione e di arte. Contributi in memoria di Maria Clotilde Giuliani-Balestrino*, organizzato dal Soroptimist Club Genova (1° ottobre).
- Presentazione del volume *Strauss. Una dinastia a tempo di valzer*, organizzata da Roberto Iovino (8 ottobre).
- Convegno *Borghesia e Aristocrazia a Genova nell'Ottocento: Immobilismo o Innovazione?*, organizzato dalla Società Ligure di Storia Patria nell'ambito del Progetto "Genova e l'Ottocento", a cui hanno partecipato gli Accademici Franco Arato, Raffaella Ponte, Maria Stella Rollandi e il sottoscritto (22 ottobre).
- Nell'ambito del Festival della Scienza sono stati ospitati quattro eventi (24, 28, 29, 31 ottobre).
- L'Accademia ha ospitato e ospiterà anche in futuro le conferenze mensili dell'Associazione Amici del Museo di Storia Naturale "Giacomo Doria" a seguito della chiusura del Museo stesso, che si protrarrà per tutto il 2026 e forse oltre.

Sono stati consolidati i rapporti di collaborazione con varie associazioni culturali della Liguria, con alcune delle quali sono stati attuati protocolli di collaborazione:

- Accademia Culturale di Rapallo;
- Associazione Amici dei Musei;
- Associazione Amici del Museo di Storia Naturale "Giacomo Doria" di Genova;
- Centro Paganini e Associazione Amici di Paganini;
- Società Economica di Chiavari.

*Corsi e attività didattiche*

È continuata la collaborazione con UNIAUSER (Università popolare dell'età libera) per ospitare, nella nostra sala conferenze, corsi tenuti sia da nostri Accademici sia da studiosi scelti concordemente.

*Atti e pubblicazioni*

Nel corso dell'anno è stato pubblicato il VI Volume, in due tomi, della VII Serie degli Atti dell'Accademia, che raccoglie l'attività svolta nel 2024. Il volume contiene altresì gli Atti del "Forum sul cambiamento climatico" tenutosi nei mesi di ottobre e novembre del 2024.

Da tre anni tutte le nostre pubblicazioni sono messe online sul sito web dell'Accademia e rese così disponibili a tutti gli studiosi interessati. Inoltre, dal 2024 a tutti gli articoli pubblicati negli Atti è stato attribuito un codice DOI (Digital Object Identifier) che consiste in un identificatore univoco e permanente che garantisce che la risorsa possa essere trovata e citata in modo affidabile nel tempo ed è rappresentato da una stringa alfanumerica persistente, simile a un "codice fiscale digitale", che associa metadati (autore, titolo ecc.) all'oggetto, permettendo l'accesso diretto. Allo stesso tempo abbiamo iniziato le procedure per richiedere il riconoscimento delle nostre pubblicazioni da parte dell'ANVUR. Tutto questo è reso possibile dall'attento e continuo lavoro del Segretario Generale Nicola Corradi.

Questo lavoro di digitalizzazione ha altresì permesso di ridurre la tiratura cartacea a un livello minimo, indispensabile per rispettare i doverosi omaggi agli Autori e Curatori e gli accordi di scambio esistenti con altre Accademie nazionali e internazionali e diversi Enti culturali.

È in fase di preparazione il VII Volume della VII Serie degli Atti che raccoglierà i contributi delle conferenze e degli incontri svolti nel 2025.

*Biblioteca*

La Biblioteca dell'Accademia è stata ulteriormente potenziata e ha continuato a rendere disponibile la consultazione al pubblico costituito prevalentemente da studenti, dottorandi e ricercatori. Con i contributi assegnati dal MiC è stato possibile acquistare uno scanner professionale per procedere alla digitalizzazione del patrimonio librario. Inoltre, con la recente assegnazione di fondi del MiC verrà incrementato il patrimonio librario acquistando nuove opere, molte delle quali proposte dai nostri Accademici.

*Premi di Laurea e di Ricerca*

L'attività istituzionale di erogazione di Premi di Laurea e di Ricerca è stata resa possibile tradizionalmente dal reddito dei donativi e dei lasciti.

In particolare, il Consiglio Direttivo ha assegnato un Premio di Laurea grazie al reddito dell'apposito lascito istituito per volontà del Prof. Luigi Brian, già Presidente della nostra Accademia. La Commissione di valutazione, dopo attento esame delle domande, ha dichiarato vincitrice del Premio di Laurea la Dott.ssa Ilenia Merati per la tesi dal titolo "Analisi dei cambiamenti dello scheletro facciale umano legati all'età: un approccio combinato mediante morfometria geometrica e istologia di superficie".

La stessa Commissione di valutazione ha dichiarato vincitrice del Premio di Ricerca la Dott.ssa Ludovica Pescarolo per il progetto "Archivio Ligure della Scrittura Popolare (ALSP) – Unige e Accademia Ligustica di Belle Arti".

Nel corso di quest'anno è stata anche assegnato alla Dott.ssa Valeria Bertini il Premio di Ricerca "Aldo Rollero", nel settore della Geometria algebrica, finanziato con il lascito testamentario della Sig.ra Angelberga Ferreri moglie del nostro Accademico Aldo Rollero.

*Riconoscimenti agli Accademici*

Anche quest'anno associamo alla presentazione dei premi da noi dedicati ai giovani la segnalazione dei riconoscimenti, dei premi e delle onorificenze ottenuti dai membri dell'Accademia nel corso dell'anno accademico. L'elenco che segue attesta il prestigio e l'impegno culturale, professionale e sociale dei nostri Accademici ai quali esprimiamo

le nostre più sentite felicitazioni, con i migliori auguri di un proficuo proseguimento delle loro attività.

| | |
|---|---|
| Gabriella Airaldi | Conferimento del XXIX Premio internazionale Ascoli Piceno. |
| Paolo Luca Bernardini | Conferimento del Premio Internazionale di Letteratura Città di Como 2025, per la sezione "Giornalismo", per un articolo pubblicato sul "Corriere della Sera" dedicato al genocidio armeno. |
| Carlo Nike Bianchi | Annoverato nella lista mondiale dei Top 2% Scientists da Elsevier e Stanford University. |
| Andrea Fusaro | Nominato componente effettivo della Commissione Studi Civilistici del Consiglio Nazionale del Notariato. |
| Antonio Guerci | Nominato Chevalier des Palmes Académiques da parte dello Stato francese. |
| Giancarlo Icardi | Nomina a Cavaliere della Repubblica. |
| Simona Langella | Conferimento del Premio Extraordinario de Doctorado de la Universidad de Salamanca in Filosofia per la tesi di dottorato "Topologia del alma en San Juan de la Cruz" discussa il 27 settembre 2024. Supervisor: Prof. Dr. Pablo García Castillo. |
| Franco Montanari | Nominato Membre correspondant étranger dell'Académie des Inscriptions et Belles Lettres de France. |
| Ugo Valbusa | Nominato Socio Onorario dell'Associazione Italiana di Scienza & Tecnologia, in precedenza denominata Associazione Italiana del Vuoto (AIV). |
| Stefania Zanardi | Conferimento del Terzo premio nell'ambito della XVII Edizione del Premio Filosofico Internazionale Prof. Paolo Michele Erede per lo studio "Intelligenza Artificiale. Il nostro 'presente futuro' tra vantaggi e rischi". |

Al termine di questa mia relazione desidero ringraziare tutto il Consiglio Direttivo che mi ha validamente e costantemente sostenuto durante questo anno accademico, il Revisore dei Conti prof. Giuseppe Lombardo per la puntuale verifica dei rendiconti amministrativi e ovviamente tutto il corpo accademico.

Vorrei altresì ringraziare la dott.ssa Maria Bibolini per il suo costante e valido impegno nella gestione della Biblioteca, la dott.ssa Laura Fantino per il continuo e insostituibile supporto nella gestione delle attività di Segreteria e il nostro storico collaboratore volontario sig. Bruno Settembrini.

Nella certezza che la nostra Accademia attraverso i propri componenti saprà sempre onorare il motto che compare nel suo simbolo "Nil volentibus arduum", dichiaro aperto l'anno accademico 2026, 229° dalla fondazione.

# TORNATE PUBBLICHE, CONFERENZE E INCONTRI CULTURALI

Sono aperte non solo agli Accademici ma anche a tutti gli interessati, grazie a una capillare opera di comunicazione.

***Gennaio***

**Giovedì 16** Domenico Lovascio, Università di Genova, *John Fletcher (1579-1625) e i classici: contaminazione e irriverenza*.

**Lunedì 20** Francesca Faravelli, Genetista medica, *Il codice segreto del DNA e la Medicina di Precisione*.

**Giovedì 23** Francesca Odone, Università di Genova, MaLGa, *Visione computazionale e apprendimento da esempi*.

**Lunedì 27** Matteo Capurro, Università di Genova, Università di Torino, *Tra fede, devozione e propaganda: le immagini sacre in A.O.I.*

**Giovedì 30** Roberto Limonta, Università di Salerno, Università di Parma, *Genova porta violata del Mediterraneo. La cartografia immaginistica di Opicino de Canistris*.

***Febbraio***

**Lunedì 3** Mario Petrillo, già Professore nell'Università di Genova, *Dall'uomo all'uomo: storie di plastiche e microplastiche*.

**Giovedì 6** Silvia Villa, Università di Genova, MaLGa, *Fondamenti computazionali e statistici dell'apprendimento da esempi*.

**Lunedì 10** Marcello Montefiori, Accademico, Università di Genova, *Innovazione digitale e intelligenza artificiale in medicina: verso un nuovo paradigma sanitario*.

**Giovedì 13** Sergio Vinciguerra, Accademico Onorario, *Gli attuali problemi in Italia dell'aiuto a morire prestato al malato affetto da patologia irreversibile che lo richiede*.

**Lunedì 17** Tiziano Bandiera, IIT - Istituto Italiano di Tecnologia, *Dal laboratorio alla farmacia: il lungo viaggio per arrivare a un nuovo farmaco*.

**Giovedì 20** Georgia Cesarone, Ingegnere elettronico, START4.0, *Proteggere il futuro digitale: le sfide quotidiane della cybersecurity per cittadini, enti e imprese*.

**Lunedì 24** Raffaele Mellace, Accademico, Università di Genova, *Una favola boschereccia al lume delle stelle:* Falstaff*, l'ultima, imprevedibile avventura verdiana*.

**Giovedì 27** Maria Antonietta Falchi, Accademica, *Teologia e politica nell'Europa del Cinquecento: Martin Bucer (1491-1551)*.

*Marzo*

**Lunedì 3** Patrizia Perego, Accademica, Università di Genova, *Tecnologie sostenibili e innovative per la valorizzazione dei residui agroalimentari: da rifiuti a risorse*.

**Giovedì 6** Matteo Santacesaria, Università di Genova, MaLGa, *Analisi armonica computazionale e apprendimento da esempi*.

**Lunedì 10** Filippo Biolé, Avvocato, *Arte e memoria: le Pietre d'inciampo a Genova*.

**Giovedì 13** Francesca Pino, Archivista, *Raffaele Mattioli: banca, cultura e impegno civile*.

**Lunedì 17** Stefano Vanin, Università di Genova, *Insetti: dalle teche dei musei alle aule dei tribunali, dai laboratori ai libri di storia*.

**Giovedì 20** Paolo Guidetti, Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre, *Il Mar Mediterraneo, tra politiche di conservazione della biodiversità ed economia della sostenibilità*.

**Lunedì 24** Raffaella Besta, Musei di Strada Nuova e Piero Boccardo, Storico dell'arte, *La Famiglia Brignole-Sale De Ferrari e i Musei di Strada Nuova*.

**Giovedì 27** Gabriella Airaldi, Accademica, *Marco Polo, il mercante e il suo libro*.

**Lunedì 31** Marco Pallavicini, Università di Genova, INFN, *Esplorare l'universo con le onde gravitazionali: il progetto Einstein Telescope*.

*Aprile*

**Giovedì 3** Luca Calatroni, Università di Genova, MaLGa, *Imaging computazionale e apprendimento da esempi*.

**Lunedì 7** Nicola Ferrari, Università di Genova, "*Der Unsichtbar" (L'invisibile) – le voci di Elias Canetti*.

**Giovedì 10** Carlo Bitossi, Accademico, Antoine-Marie Graziani, Università di Corte e Erick Miceli, Università di Corte, *Pasquale Paoli a trecento anni dalla nascita. Un bilancio storiografico*.

**Lunedì 14** Laura Cornara, Università di Genova e Gabriele Ambu, Frate cappuccino, Biologo, *La riscoperta del manoscritto* Selva botanica *di Padre Celesia, Cappuccino*.

**Lunedì 28** Alberto Birga, Accademico, *La transizione energetica, stato dell'arte e prospettive*.

*Maggio*

**Lunedì 5** Convegno *Nel centenario della nascita di Marcello Venturi*, con interventi di: Francesco De Nicola, Aldo A. Mola, Pino Boero, Carlo Prosperi, Renato Venturelli, Carlo Sburlati.

**Giovedì 8** Adriana Saccone, Accademica, *Materiali critici per la transizione ecologica*.

**Lunedì 12** Farida Simonetti, Storica dell'arte e Gianluca Zanelli, Direttore Palazzo Spinola, *Franco e Paolo Spinola. L'Eredità donata alla prova del nuovo millennio*.

**Giovedì 15** Maurizio Canepa, Università di Genova, *Dalle stelle alle (nano)piramidi*.

**Lunedì 19** "Premio Montale fuori di Casa per la Sezione Critica Letteraria 2025", con interventi di: Adriana Beverini, Barbara Sussi, Pino Boero, Beppe Manzitti.

**Giovedì 22** Micky Wolfson Jr., Founder della Wolfsoniana e Matteo Fochessati, Curatore Wolfsoniana, *La Wolfsoniana: arte in funzione delle idee*.

**Lunedì 26** Paolo Piccardo, Università di Genova, *Il colore dei bronzi: dalla lega ai Bronzi di Riace*.

**Giovedì 29** Carlo Tacchetti, Università San Raffaele, Milano, *Intelligenza artificiale in medicina: dal cloud al letto del paziente*.

***Giugno***

**Giovedì 5** Anna d'Albertis e Maria Camilla De Palma, Conservatore responsabile Castello D'Albertis, *Marinaio gentiluomo: Enrico d'Albertis e il suo museo-dimora*.

**Lunedì 9** Laura Stagno, Università di Genova, *"Imago Alexandri": rappresentazioni di Alessandro Magno tra Medioevo e prima età moderna*.

***Settembre***

**Lunedì 15** Giuseppe Rosolini, Accademico, Università di Genova, *Una passeggiata tra gli infiniti*.

**Giovedì 18** Silvia Vicini, Università di Genova, *La Chimica incontra l'Arte: lo studio dei materiali nella conservazione dei Beni Culturali*.

**Giovedì 25** Federico Montaldo, Accademico, Avvocato, Fotografo, *L'archivio fotografico Ivo Saglietti*.

**Lunedì 29** Michela Chiappalone, Università di Genova, *Neuroingegneria per lo sviluppo di terapie elettroceutiche: la nuova frontiera della medicina personalizzata*.

***Ottobre***

**Giovedì 2** Convegno *La Liguria e il Mare*: Paolo Guidetti, Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre e 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*.

**Lunedì 6** Dario Gattiglia, Italianista, *Italia, o i cinquant'anni di Sodoma*.

**Giovedì 9** Convegno *La Liguria e il Mare*: Giorgio Bavestrello, Accademico, Università di Genova e Monica Montefalcone, Università di Genova, *Impatti antropici e riscaldamento globale: effetti sulla biodiversità del Mar Ligure*.

**Lunedì 13** Andrea Bacigalupo, Accademico, Policlinico Gemelli, Università Cattolica, Roma, *Cellule modificate geneticamente per curare i tumori e non solo*.

**Martedì 14** Giuliano Doria, Conservatore responsabile del Museo di Storia Naturale "G. Doria" e Roberto Poggi, Conservatore onorario a vita del Museo di Storia Naturale "G. Doria", *Dalle foreste di Borneo alla digitalizzazione delle collezioni*.

**Giovedì 16** Convegno *La Liguria e il Mare*: Carlo Nike Bianchi, Accademico e 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*.

**Lunedì 20** Aurora Canepari, Direttore scientifico e Conservatore responsabile Museo d'Arte Orientale "E. Chiossone" e Gian Luca Porcile, Storico dell'architettura, *Come creare un museo d'arte orientale a Genova: da Edoardo Chiossone a Mario Labò*.

**Giovedì 23** Guido Milanese, Università Cattolica del Sacro Cuore, Milano, *Le ragioni del latino*.

**Lunedì 27** Convegno *La Liguria e il Mare*: Antonio Di Natale, Segretario Generale, Fondazione Acquario di Genova e 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*.

**Martedì 28** Patrizia Ginesi, Dottoressa in Metodologie filosofiche, in collaborazione con l'Associazione Amici del Museo "G. Doria", il Festival della Scienza e il Museo di Storia Naturale "G. Doria", *Intrecci tra gli esseri umani e gli altri animali*.

**Giovedì 30** Convegno *La Liguria e il Mare*: Emanuele Magi, Accademico, Università di Genova, Paola Rivaro, Accademica, Università di Genova e 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*.

*Novembre*

**Lunedì 3** Elisabetta Raffo, Direttrice della Fondazione Bruschettini per l'Arte Islamica e Asiatica, *Oltre i confini: arte, conoscenza e responsabilità condivisa. Verso un modello culturale sostenibile: sfide e prospettive. Il caso della Fondazione Bruschettini per l'Arte Islamica e Asiatica*.

**Giovedì 6** Convegno *La Liguria e il Mare*: Claudio Ferrari, Accademico, Università di Genova e Lorenzo Schiano di Pepe, Università di Genova, *Economie portuali: sinergie e difformità in un quadro normativo in evoluzione*.

**Martedì 11** Convegno *La Liguria e il Mare*: Tavola rotonda.

**Giovedì 13** Alessandro Bonsignore, Università di Genova, *Consenso informato in Medicina e disposizioni anticipate di trattamento*.

**Lunedì 17** Piera Melli, Archeologa, *La diffusione della ceramica greca, veicolo di cultura e civiltà, fra VIII e III secolo a.C.*

**Giovedì 20** Andrea Marmori, Direttore Museo Civico "Amedeo Lia", *Il Museo Civico "Amedeo Lia" della Spezia, l'elogio della bellezza*.

**Lunedì 24** Daniela Caracciolo, ARPAL e Mariachiara Chiantore, Università di Genova, *LIFE PINNA, un meraviglioso viaggio tra sfide e opportunità*.

**Giovedì 27** Massimo Verdoya, Accademico, Università di Genova, DISTAV, e Marco Orsi, Geologo, Vice Presidente Associazione Nazionale Impianti Geotermia HP, *Sistemi geotermici a bassa temperatu-*

*ra: un'alternativa rinnovabile e sostenibile anche in Liguria per la climatizzazione degli edifici*.

***Dicembre***

**Lunedì 1** Pietro Borgonovo, Accademico, Direttore artistico della G.O.G. - Giovine Orchestra Genovese, *Suoni e contrasti. Dmítrij Šostakóvič a cinquant'anni dalla scomparsa*.

**Martedì 2** Marco De Montis, Ingegnere, *La Regia Aeronautica nel decennio 1933-1943. Dall'eccellenza mondiale alla tragedia della guerra. Le ragioni del declino e il confronto con gli Alleati*.

**Giovedì 4** Franca Carboni, Restauratrice, *Il restauro: equilibrio fra storia, tecnica e scelte di intervento*.

**Giovedì 11** Walter Riva, Università di Genova, *La cometa dei Magi: le ipotesi astronomiche sull'evento che annunciò la nascita di Gesù*.

**Lunedì 15** Roberta Massabò, Accademica, Università di Genova, *Fragilità nascoste: il ruolo della modellazione nella sfida dei materiali strutturali leggeri*.

## Beppe Manzitti

# *In occasione della nomina ad Accademico Onorario*

Ringrazio il Presidente Mario Pestarino e tutti gli Accademici per l'inattesa e gradita elevazione al rango di Accademico Onorario e anche la cara amica Presidente della Classe di Lettere Maria Stella Rollandi per quanto ha detto per giustificare la mia nomina. Su di lei nutro però il sospetto che abbia voluto eliminare dai ranghi della Classe di Lettere un elemento anomalo innalzandolo al titolo di onorario. Insomma la classica operazione di *promoveatur ut amoveatur*!

Un'altra possibile ipotesi di natura cabalistica è che avendo constatato che gli Accademici Onorari sono in numero di tredici se ne voglia aggiungere uno per evitare qualche malaugurato accidente…

L'*Oxford Dictionary* spiega che il titolo di "onorario" viene attribuito senza gli abituali requisiti ma per fiducia (*truth*).

A sua volta, il vocabolario Devoto-Oli precisa che è derivato dal latino *honorarius* e che si tratta di una qualifica il cui conferimento è puramente onorifico escludendo pertanto gli obblighi inerenti.

Ebbene, dichiaro solennemente dinnanzi a voi che intendo invece assumermi tutti i possibili oneri e obblighi che mi verranno richiesti!

In proposito mi è tornata alla mente una frase di Benedetto Croce alla quale intendo ispirarmi:

> D'invigilare me stesso per l'utile distribuzione delle mie giornate.[1]

Mi impegno quindi affinché nelle mie giornate io possa trovare sempre uno spazio dedicato all'Accademia.

---

[1] B. Croce, *Soliloquio*, Milano, Adelphi, 2022, p. 93.

Infine, un doveroso ricordo al professor Emilio Salvidio che mi propose di entrare in Accademia e al compianto professor Vincenzo Lorenzelli, uomo di grandi qualità umane e scientifiche che ha guidato l'Accademia in questi ultimi anni con significativi risultati che gli rendono onore.

Grazie ancora e auguri non onorari ma veritieri e sentiti a tutti voi e ai collaboratori che qui lavorano ogni giorno operosamente e con grande bravura.

*18 dicembre 2025*

# COMMEMORAZIONE DI VINCENZO LORENZELLI

20 maggio 2025

Il 6 marzo 2025 ci ha lasciati il Presidente Emerito prof. Vincenzo Lorenzelli. L'Accademia Ligure di Scienze e Lettere ha organizzato una cerimonia di commemorazione tenutasi il 20 maggio 2025, a cui sono stati invitati, oltre ai familiari, colleghi e amici del prof. Lorenzelli, che lo hanno ricordato con un loro intervento.

**Mario Pestarino***

# *Ricordo di Vincenzo Lorenzelli*

Vincenzo Lorenzelli nasce a Verona il 15 maggio 1933; successivamente la famiglia Lorenzelli, originaria di Pontremoli, si trasferisce a Milano, dove Vincenzo compie i suoi studi sino all'Università iscrivendosi al Corso di Laurea in Chimica.

Nel periodo milanese Lorenzelli svolge anche una intensa attività sportiva nell'ambito della Nazionale italiana di nuoto diventando primatista italiano nei 100 e 200 metri farfalla.

Ben presto i suoi interessi scientifici lo portano a trasferirsi all'Università di Bologna, dove nel 1956 consegue la Laurea in Chimica sotto la guida del prof. Giovanni Battista Bonino, ottenendo il Premio della Federazione Italiana dei Cavalieri del Lavoro per la migliore tesi.

Nel 1958 si trasferisce a Parigi, con una borsa di studio del governo francese, per lavorare presso il Laboratoire des Recherches Physiques dell'Università La Sorbonne diretto da Jean Lecomte, membro dell'Académie de France, dove partecipa attivamente e con notevole successo allo sviluppo di idee e tecnologie d'avanguardia nel campo della fisico-chimica molecolare.

Nel 1968 è protagonista, sempre in Francia, della nascita dell'Università di Limoges, dove crea il Laboratoire CNRS Céramiques nouvelles, insieme al collega e amico Pierre Quintard.

---

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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.27-31

Negli stessi anni svolge attività di ricerca anche presso l'Università di Norwich, e viene nominato British Council Research Fellow.

Nel 1964 diviene Direttore di Ricerche del CNR a Genova, incarico che conserverà fino alla nomina a Professore Ordinario di Chimica presso l'Ateneo genovese nel 1973. Dal 1975 al 1988 viene nominato Direttore del Centro Studi di Chimica e Chimica Fisica applicata alle caratteristiche di impiego dei materiali, e dal 1982 al 1985 Lorenzelli ricopre anche la carica di Prorettore dell'Università degli Studi di Genova. Nel 2001 l'Ateneo genovese gli conferisce la Laurea *Honoris Causa* in Ingegneria Chimica e in questa occasione egli tiene una *Lectio Doctoralis* dal titolo *Dalle Pirotecnologie alle Biotecnologie*.

Nel 1998 Lorenzelli si trasferisce presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma della quale è stato Magnifico Rettore fino al 2013; vi è ritornato nel marzo 2023 per festeggiare il trentennale della fondazione.

L'attività scientifica di Lorenzelli consiste di oltre 250 articoli pubblicati nelle principali riviste scientifiche internazionali nei settori della chimica applicata e in numerosi libri di testo. È stato inoltre fondatore della rivista scientifica internazionale "Materials Chemistry and Physics".

In un volume del 2003, intitolato *L'Università per un nuovo umanesimo* (Recco, Microart's) Lorenzelli ha raccolto una serie di "riflessioni" allo scopo di "recuperare e rifondare quell'umanesimo europeo che ha forgiato la nostra civiltà", come scrive nella Prefazione il card. Bertone. Credo che queste riflessioni siano ancora pienamente valide e attuali.

Nella sua lunga carriera scientifica e professionale Lorenzelli ricopre cariche amministrative di rilievo in diverse Istituzioni. Ne ricordo soltanto alcune:

- Presidente della Fondazione Carige
- Presidente dell'Istituto Giannina Gaslini di Genova
- Consigliere della Fondazione Gerolamo Gaslini
- Presidente della Fondazione RUI (Residenze Universitarie Internazionali)
- Presidente della Alliance Française di Genova.

Per le sue attività scientifiche e professionali Lorenzelli è stato insignito di numerose onorificenze quali:

- Grand'Ufficiale al merito della Repubblica Italiana
- Cavaliere della Legion d'Onore, Repubblica Francese

- Commendatore delle Palme Accademiche (Ministère de l'Éducation Nationale - France)
- Commendatore dell'Ordine di San Gregorio Magno, Vaticano.

Nel 2011 Massimo Minella, giornalista di "Repubblica", ha pubblicato un libro intitolato *La formula Lorenzelli* (Genova, De Ferrari Editore). Scrive Mario Paternostro nella sua presentazione:

> Vincenzo Lorenzelli è un uomo di potere, che ha avuto e ha potere e che sa gestirlo. La sua fortuna rispetto ad altri che con il potere dialogano, è che lui lo ha conquistato non attraverso percorsi di pura politica, ma per meriti professionali.

Nella prefazione allo stesso libro, Joaquin Navarro-Valls scrive che:

> La formula Lorenzelli è la biografia di uno studioso. È il racconto di un accademico che non si è mai isolato nell'alveolo chiuso della teoria scientifica, ma ha sempre scelto di vivere in modo aperto, realistico, stando cioè dentro alla vita vera, da protagonista e non da spettatore.

Nel 1999 Lorenzelli è eletto Socio corrispondente e nel 2004 Socio effettivo della nostra Accademia; nel 2016 diviene Presidente della Classe di Scienze, dal 2018 al 2023 è eletto Presidente dell'Accademia. Nel 2024 il Consiglio Direttivo e l'Assemblea dei Soci lo nomina Presidente emerito. Mi piace pensare che questo suo nuovo ruolo accademico

> abbia permesso al bambino che osservava per ore dalla finestra di casa, tanti anni fa, lo scorrere dell'Adige con il desiderio inconscio di poterne seguire la corrente, di navigare ancora sul grande fiume della vita partecipando con immutata meraviglia alle attività che si svolgono negli infiniti spazi che questo via via attraversa

come lui stesso scrive nella sua biografia *Fiumi di vita* (La Spezia, Le edizioni del porticciolo, 2017).

Nell'introduzione al già citato libro *La formula Lorenzelli* Massimo Minella scrive:

> I compagni della sua esistenza sono stati tanti e altri ne verranno ancora. C'è chi lo ha accompagnato per un breve tragitto e chi è ancora al suo

> fianco, chi gli è stato leale e chi invece ha cercato di sfruttarne la scia, di combatterlo e di sconfiggerlo, a volte anche riuscendovi. Nulla di tutto questo ha depresso i suoi progetti e i suoi impegni. E nuove occasioni si sono presentate alla sua porta. Lui le ha valutate accettandole e respingendole, e ha fatto un altro passo in avanti.

Ritengo che l'Accademia Ligure di Scienze e Lettere sia stata una di quelle nuove occasioni che il Presidente Lorenzelli ha saputo cogliere, dando nuova vita e nuova forza a questa Istituzione.

Ho conosciuto di persona Vincenzo Lorenzelli soltanto in Accademia, da lui ho imparato quanto siano importanti l'onestà intellettuale, l'entusiasmo e la volontà di non arrendersi mai, come lui ha sempre fatto.

Questa capacità organizzativa la troviamo in tutti gli anni della sua presidenza. Vincenzo Lorenzelli ha fortemente voluto e ha contribuito alla organizzazione di due seminari permanenti sulla "Transizione ecologica ed energetica" (2022 e 2023) ritenendo indispensabile far conoscere a un più vasto pubblico l'opinione degli Accademici sui cambiamenti climatici a cui quotidianamente ci troviamo a dover far fronte. Per raggiungere questi obiettivi il Presidente Lorenzelli ha accolto subito e con entusiasmo questa proposta, dando continuamente suggerimenti e consigli, lasciando però al Comitato organizzatore, coordinato dall'Accademico e presidente della Classe di Scienze Giancarlo Albertelli, la massima libertà nell'individuare le modalità di svolgimento di tali seminari.

Al termine di ciascun seminario sono state organizzate delle tavole rotonde a cui hanno partecipato i rappresentanti delle Istituzioni pubbliche e private e quelli delle principali realtà industriali e produttive. Introducendo questi incontri il Presidente è riuscito a delineare con la massima chiarezza gli aspetti strategici e rilevanti legati alle modalità con cui si poteva e si doveva attuare una transizione ecologica ed energetica, pienamente convinto che l'Accademia avesse in sé tutte le competenze necessarie per potere fornire suggerimenti ed eventualmente soluzioni e che queste potessero essere messe a disposizione della comunità.

Il Presidente Lorenzelli ha avuto uguale attenzione e ha sempre fornito validi suggerimenti sulla attuazione delle numerose proposte di progetti e convegni che la Classe di Lettere, presieduta dall'Accademico Massimo Bacigalupo, è riuscita ad attuare, dimostrando ancora una

volta come il compito della nostra Accademia sia quello di promuovere tutti i campi del sapere senza barriere o vincoli di sorta.

Ricordo con piacere e con emozione una conferenza fra le tante, che il Presidente Lorenzelli tenne all'Accademia Culturale del Comune di Rapallo su invito del prof. Bacigalupo. Parlò delle "acque" per oltre un'ora, a braccio e soprattutto senza proiezioni di diapositive o altri supporti informatici. Fummo tutti impressionati dalla sua capacità di trattare il tema in maniera semplice e scientificamente rigorosa. Capii quanto ampia e aggiornata fosse la sua conoscenza, infatti con le sole parole riuscì a trasmettere al pubblico i concetti essenziali relativi a un tema apparentemente semplice come quello delle "acque".

Questo è stato il professor Lorenzelli per tutti quelli che hanno avuto il privilegio di lavorare con lui. Per me, Vincenzo è stato un maestro e un padre, mi ha fatto capire quanto importanti siano la correttezza, la generosità, l'entusiasmo e l'amicizia oltre che l'amore per la cultura e per questo gliene sarò sempre riconoscente.

Marcella Trombetta*

# *Il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli*

Era il 1988 quando il Beato mons. Álvaro del Portillo, allora Prelato dell'Opus Dei, suggerisce ad alcuni professionisti e docenti, membri della Prelatura, assieme ad altri che ne condividono gli ideali, la promozione di una clinica universitaria a Roma che offra soluzioni alla realtà del dolore e della malattia, attingendo allo spirito cristiano di servizio. Prende, così, il via un primo gruppo di lavoro, denominato "Pensatoio", con l'obiettivo di dare una risposta concreta al suggerimento di don Álvaro, progettando una realtà di eccellenza e capace di durare nel tempo. Il "Pensatoio" studia, quindi, la fattibilità di istituire una Università non statale e dare inizio alla Facoltà di Medicina e Chirurgia con annesso Policlinico a gestione diretta al quale aggiungere, negli anni, un Polo della Ricerca e un Polo della Didattica.

Nel 1990 si costituisce l'Associazione Campus Bio-Medico e la Campus Bio-Medico Spa con sedi a Roma in Palazzo Lancellotti, enti promotori dell'Ateneo. Intanto serve una sede provvisoria e nel 1993 in via Longoni, una periferia dimenticata di Roma, in affitto presso il Rome American Hospital, inizia le sue attività il Libero Istituto Universitario Campus Bio-Medico con il corso di laurea in Medicina e Chirurgia e il diploma in Scienze Infermieristiche.

* Preside della Facoltà Dipartimentale di Scienze e Tecnologie per lo Sviluppo Sostenibile e One Health, Università Campus Bio-Medico di Roma
M.Trombetta@unicampus.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.33-43

Nel frattempo si comincia a cercare i terreni sui quali costruire questa opera e nasce il primo progetto "Trigoria Sud": 60 ettari di verde oltre la periferia di Roma utilizzati come pascolo che comprendono 8 ettari di proprietà di Alberto Sordi, il quale abbraccia il progetto e regala gli 8 ettari poiché ha certezza che saranno destinati a ospitare il CESA – Centro per la Salute dell'Anziano, polo di ricerca dedicato agli anziani fragili.

Nel 1998 il prof. Lorenzelli, componente di quel "Pensatoio", decide di dedicarsi a quest'opera:

> Avevo appena concluso la mia esperienza alla Fondazione Rui, avevo 65 anni e un'idea molto suggestiva che volevo sviluppare. Nel '97, infatti, per iniziativa di Vincenzo Tagliasco e di altri personaggi era nato a Genova il corso di laurea in Ingegneria Biomedica. Perché, pensai, non ci lanciamo anche noi, tra i primi, in questo mondo? E così fu, andai al Campus con lo scopo preciso di far nascere questa facoltà.

Non solo. Il suo progetto era più ampio:

> Avevo la predisposizione per lo studio delle materie scientifiche e per la ricerca, ma avvertivo anche la necessità che esse non fossero affrontate con una prospettiva di arido specialismo, ma bensì collocate in una visione più ampia del sapere: mi rendevo già conto che la scienza finalizzata a sé stessa è sterile e che soltanto una scienza per l'uomo contiene significati e valori.

Così il prof. Lorenzelli si trasferisce a Roma per realizzare il sogno di trasformare il Libero Istituto Universitario Campus Bio-Medico in una importante Università dedicando numerosi sforzi all'attività didattica e educativa facendo sua la seguente affermazione di san Josemaría Escrivá de Balaguer:

> non basta il desiderio di lavorare per il bene comune: la strada per rendere operante questa aspirazione è la formazione di uomini e di donne capaci di acquisire un'adeguata preparazione e capaci di comunicare agli altri i frutti della pienezza da essi raggiunta.

Nel 1998 non solo posa la prima pietra del CESA, ma fonda il Dipartimento di Ricerche Biomediche che ha come finalità primaria la

programmazione, l'organizzazione e la gestione delle attività di ricerca e sperimentazione.

A partire dall'a.a. 1999/2000 il prof. Lorenzelli dà il via alla Facoltà di Ingegneria con il corso di laurea in Ingegneria Biomedica: il Libero Istituto Universitario Campus Bio-Medico diventa l'Università Campus Bio-Medico di Roma, di cui egli assume il ruolo di primo Magnifico Rettore. Ma non basta: nel luglio 1999 consegna le prime tesi nel CESA grezzo.

> Nel mio discorso ai genitori ho sottolineato il percorso formativo svolto dai loro ragazzi. Non solo preparazione e formazione, ma anche educazione alla vita. Non a caso, i motti del Campus sono "la scienza per l'uomo" e "la centralità della persona".

In questa centralità della persona sempre dall'a.a. 1999/2000 l'Università Campus Bio-Medico di Roma accoglierà i nuovi studenti del diploma universitario per Dietisti.

Il progetto è ambizioso: non possiamo non avere aule nostre, un Poliambulatorio nostro e, soprattutto, dei laboratori di ricerca ed ecco che nel 2000 nasce il Polo di via Longoni 47.

Intanto la costruzione del CESA arriva al termine e il 22 giugno 2000, alla presenza di oltre cinquecento invitati e delle principali autorità, tra le quali il sindaco di Roma Rutelli e l'assessore alla Sanità Saraceni, si inaugura il CESA – Centro per la Salute dell'Anziano, la prima realizzazione del progetto.

Il CESA diventa il nostro salotto buono per tutte le occasioni: qui il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli consegna i diplomi di laurea ai suoi amati studenti con quel "gioco delle mani" da lui inventato che sarà portato avanti da tutti i suoi successori:

> io le porgo la mano destra e lei me la stringe e contemporaneamente con la sinistra le porgo la pergamena che lei prenderà e in questa posa ci rivolgiamo sorridenti al fotografo.

E intanto il progetto prosegue. Il 5 marzo 2003 viene in visita, non solo in via Longoni, ma anche a Trigoria, il presidente della Regione Lazio Storace, mostrando grande interesse per il progetto completo con un Policlinico e un Centro di didattica e di ricerca avanzata in Bio-Medicina e Bio-Ingegneria.

È l'anno 2003: compiamo i nostri primi dieci anni, che saranno celebrati al Quirinale davanti al Presidente della Repubblica Carlo Azeglio Ciampi, al ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca Moratti e al ministro della Salute Sirchia.

Nel 2004 il sindaco di Roma Veltroni vede nel nostro progetto la candidatura di Roma a capitale della ricerca biomedica dichiarando:

> Stiamo lavorando affinché Roma sia la capitale della ricerca applicata nel campo delle biotecnologie e si promuova lo sviluppo di centri di eccellenza come questo che si sta costruendo e che continueremo a sostenere.

Veltroni si appassiona al nostro progetto che prevede un investimento complessivo di oltre 250 milioni di euro, di cui 50 finanziati dal governo, che nascerà nel parco tecnologico della Regione Lazio. È proprio nel 2004, il 30 novembre, sotto una pioggia torrenziale, che si posa la prima pietra e il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli inaugura l'a.a. 2004/2005 con il motto "la nostra cura è per gli studenti".

Come da lui affermato più volte, gli studi svolti per tanti anni nelle più antiche università europee gli hanno consentito di riflettere sulle origini e sul significato dell'istituzione universitaria per la cultura europea, che convergono nell'impegno a recuperare e rifondare quell'*umanesimo europeo* che ha forgiato la nostra civiltà. Egli ritiene che nella vita collegiale risiede la possibilità di integrare l'insegnamento curricolare dei corsi di laurea, sia attraverso la convivenza formativa con colleghi di altre facoltà, sia tramite attività tutoriali, sia attraverso corsi multidisciplinari destinati ad ampliare e approfondire la formazione degli studenti e a favorire la loro crescita umana e professionale.

Nel frattempo, tanta dedizione al servizio dello Stato e del prossimo fanno sì che il 2 giugno 2005 Vincenzo Lorenzelli riceva dal presidente della Repubblica Italiana Carlo Azeglio Ciampi il titolo di Grand'Ufficiale dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana.

Il prof. Lorenzelli inaugura l'a.a. 2005/2006 nel grezzo del PRABB – Polo di Ricerca Avanzata in Biomedicina e Bioingegneria – e nel 2006 viene nominato Professore Emerito.

In quello stesso anno chiama la prof.ssa Marina Dachà per conferirle l'incarico di presidente del Comitato tecnico promotore di un nuovo corso di laurea unico a Roma quale evoluzione di quello in Dietistica:

formare degli esperti in nutrizione. Ed ecco che nell'a.a. 2007/2008 parte il corso di laurea in Scienze dell'Alimentazione e della Nutrizione Umana che ha fatto proprio il principio trasmesso dal padre della medicina Ippocrate nel V secolo a.C.: "Fai del tuo alimento la tua medicina e della tua medicina il tuo alimento".

In via Longoni inauguriamo per l'ultima volta un anno accademico – l'a.a. 2006/2007 – perché siamo ormai prossimi al trasloco.

Nel frattempo l'Università cresce, così come il numero dei ricercatori, e la ricerca ha bisogno di una spinta in avanti.

La Giornata della Ricerca 2007, improntata più che mai al futuro, è l'occasione utile e sarà celebrata il 18 maggio nel PRABB – Polo di Ricerca Avanzata in Biomedicina e Bioingegneria – a Trigoria: 20.000 mq dove troveranno posto i nuovi laboratori delle Facoltà di Medicina e di Ingegneria dell'Ateneo. L'edificio, costruito in due anni per un costo complessivo di 30 milioni di euro, ospiterà fino a trecento ricercatori e sarà sede della Ricerca per lo Sviluppo, la strategia con cui l'Università intende sfruttare le potenzialità offerte dal nuovo Polo di Trigoria individuando nove linee di ricerca all'interno delle quali andranno integrandosi le attività dell'Ateneo, così da sfruttare al meglio le risorse. Si lavora per i giovani ricercatori under 35: a loro è dedicata un'intera linea di ricerca, denominata "Advanced Concept Team". Tra gli obiettivi c'è anche quello di dare particolare rilievo alla ricerca clinica e sanitaria, connessa alla diagnosi, alla cura e all'organizzazione dell'assistenza, in controtendenza con il processo di "demedicalizzazione" della ricerca che, all'epoca, si osservava a livello nazionale e internazionale. In questa occasione il prof. Joaquín Navarro-Valls, che nel frattempo aveva assunto il ruolo di presidente dell'Advisory Board d'Ateneo, dichiara:

> In questi anni, il Campus Bio-Medico di Roma ha rappresentato lo sforzo di professori, studenti, ricercatori e pazienti di condividere un'idea profonda della persona.

Pur non abbandonando la sede storica di via Longoni, nell'agosto 2007 ci trasferiamo a casa nostra andando ad abitare, oltre che al PRABB e al CESA, al Policlinico. Il 14 marzo 2008 c'è l'inaugurazione e la benedizione del nuovo Campus. Il Magnifico Rettore Vincenzo

Lorenzelli centra il suo discorso sull'"Università per la società della conoscenza" sottolineando che

> le nuove generazioni si trovano e si troveranno sempre più a operare in una società di cui la conoscenza, l'apprendimento continuo e l'innovazione costituiscono l'unico vero fattore competitivo e il suo stesso fondamento. Si afferma una società della conoscenza nella quale, per la loro stessa natura e anticipatrice esperienza secolare, le Università rappresentano forse la maggiore risorsa

e ricordando altresì che formazione flessibile e integrata, mobilità e rapporto con le imprese rappresentano il futuro.

Intanto si inaugura l'a.a. 2008/2009; alla cerimonia partecipa il ministro dell'Istruzione, dell'Università e Ricerca Gelmini alla quale il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli presenta il *Modello Campus: la scienza per l'uomo e una nuova idea di università* sottolineando che

> la distinzione tra una cultura scientifica tutta orientata a generare nuove conoscenze, e una cultura umanistica destinata a sviluppare l'intelligenza e la capacità di comprensione è una visione recente e involutiva nella lunga storia dell'Università, che ne ha depotenziato la vitalità impoverendo entrambe le culture. Occorre saldare nuovamente umanesimo e scienza, umanesimo ed economia, per capire il significato dei cambiamenti, le motivazioni dell'innovazione, i valori etici che stanno alla base di ogni elaborazione umana.

E si arriva al 2009, un anno straordinario in cui si dà l'avvio alla costruzione del Pronto Soccorso e per la prima volta l'Università investe 660.000 euro nella ricerca dedicandoli a un bando interno al fine di favorire la collaborazione fra le unità di ricerca afferenti alle due Facoltà e tra i giovani ricercatori. Sempre nel 2009 si punta sui dottorati di ricerca: a quelli già esistenti in Bioetica, Endocrinologia e Malattie Metaboliche, Ingegneria Biomedica e Patologia Osteo-oncologica si aggiungono i dottorati di ricerca in Scienze Biochimiche e Tecnologiche Applicate agli Alimenti e alla Nutrizione e in Scienze della Plasticità d'Organo e della Rigenerazione Tissutale per il Recupero Funzionale.

Nel 2009 la Facoltà di Ingegneria compie dieci anni e viene inaugurato il Casale Primo Centro, struttura residenziale dell'Università di 1.770 mq circondati da più di 5.000 mq di giardini.

Arriva l'inaugurazione dell'a.a. 2009/2010 e il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli centra il suo discorso sul *Ripensare il rapporto tra Università e società* ricordando ai colleghi docenti le responsabilità che hanno nei confronti del "capitale umano" a loro affidato e come

> il primo e fondamentale cambiamento che l'Università oggi vive consiste nella presa di coscienza della necessità di rilegittimazione sociale, prendendo atto che la conoscenza nella società della conoscenza non è solo ricerca della verità, ma anche una risorsa diretta alla crescita dell'economia, che deve essere valorizzata senza snaturare l'essenza dell'istituzione.

Nel 2010 il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli, insieme all'allora Preside di Ingegneria prof. Luigi Marrelli, realizza il sogno del rapporto con le imprese per la formazione: si fonda il Comitato Università-Impresa, Sezione Ingegneria Industriale/Ingegneria Chimica, che include aziende leader nello scenario internazionale con le quali ampliare la propria offerta formativa con l'attivazione di una nuova laurea magistrale in Ingegneria Chimica per lo Sviluppo Sostenibile che partirà nell'a.a. 2010/2011. Non un ingegnere chimico nuovo, ma un nuovo ingegnere chimico che raccoglie la sfida di promuovere processi produttivi rispettosi dell'ambiente, improntati a un modello di sviluppo basato sulla centralità dell'essere umano e utilizzabili sia dai Paesi tecnologicamente avanzati sia da quelli in via di sviluppo. In poche parole, una nuova figura professionale che sa utilizzare il patrimonio di competenze classico dell'ingegnere chimico nei vari settori dell'industria di trasformazione, ma è in grado di operare nel rispetto delle risorse naturali e del patrimonio ambientale.

Sempre nell'a.a. 2010/2011 partirà anche la laurea magistrale in Scienze dell'Alimentazione e della Nutrizione Umana con tre indirizzi: nutrizionista, tecnologico degli alimenti e alimentazione nel mondo.

All'inaugurazione dell'a.a. 2010/2011 il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli non fa un discorso di circostanza, ma usa parole chiare e dirette sull'attuale dibattito sull'università italiana: "Ci addolora particolarmente la campagna mediatica che negli ultimi tempi è stata dedicata a delegittimare presso l'opinione pubblica l'intero sistema universitario" e intanto la nostra Università, senza il sostegno di fondi pubblici, è arrivata a contare 1.041 studenti e 308 specializzandi.

Il 21 settembre 2011 si posa la prima pietra del Trapezio, edificio dedicato esclusivamente alla didattica a proposito del quale il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli dichiara: "La centralità dello studente per noi non è un motto, ma un impegno concreto".

Nel 2011 si concentra sulla direzione della ricerca e viene pubblicato il primo *Annuario della Ricerca 2011* nel quale egli scrive:

> Anche nel 2011 è aumentato significativamente il numero delle pubblicazioni e il valore dell'*impact factor* totale, mentre il valore della produzione ha superato i 5 milioni di euro, un traguardo che solo cinque anni fa non avremmo osato ipotizzare nelle più ottimistiche delle previsioni.

E il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli inaugura l'a.a. 2011/2012 puntando sul merito, alla luce del periodo di profondo rinnovamento delle università italiane chiamate a interpretare lo spirito e le norme della legge 240 di riforma universitaria: "La riforma ha riconosciuto che il merito è essenziale. È un punto che siamo tenuti tutti a interpretare al meglio".

È nell'*Annuario della Ricerca 2012* che inizia a lasciare il suo testamento a partire dalla ricerca:

> per il secondo anno consecutivo i risultati dell'attività di ricerca della nostra Università mostrano un trend di crescita più che soddisfacente sia per il numero di pubblicazioni che per il valore del loro *impact factor*. Dato che l'organico dei docenti e ricercatori è rimasto praticamente stabile, questo risultato è sicuramente da attribuire al loro impegno per aumentare la produttività scientifica, che è stata favorita, a mio parere, sia dalla rapida crescita professionale dei giovanissimi che rappresentano una larga parte dell'organico, sia dal lavoro svolto dalla nuova Direzione Ricerca universitaria attivata due anni fa per il miglioramento dell'assetto organizzativo e gestionale del C.I.R.. Nel concludere quindi il mio ultimo mandato rettorale desidero esprimere la più viva riconoscenza al Consiglio di Amministrazione e a tutti gli Enti e persone che mi hanno aiutato sempre, ma soprattutto in quest'ultimo biennio nel quale ho assunto direttamente *ad interim* la direzione del Centro Integrato di Ricerca.

Con l'inaugurazione dell'a.a. 2012/2013 il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli porta l'Ateneo al suo ventesimo compleanno ed è la sua ultima inaugurazione di un anno accademico. In essa ricorda:

> Quali che siano le innovazioni che abbiamo, la responsabilità d'introdurre nell'istituzione, quali che siano le domande sociali o le aspettative economiche che abbiamo il dovere di soddisfare, l'università deve mantenere lealtà a una promessa di coerenza con questa storia, come comunità del ricercare, dell'insegnare e dell'apprendere insieme.

Un concetto di condivisione del sapere tra generazioni che impedisca all'università di scadere in un sistema di apprendimento scolastico, riuscendo invece a rispondere al bisogno

> di classi dirigenti preparate e capaci di affrontare i rapidi cambiamenti che il tempo attuale impone, di cittadini formati e dotati di quel senso critico che garantisce un'autonomia di giudizio.

Il 1° novembre 2013 il prof. Lorenzelli passa il testimone al suo primo successore, il Rettore Onetti Muda, ma prima porta a termine l'opera con la sua amata Facoltà di Ingegneria, terza in Italia e prima nel Lazio nella graduatoria dell'Area Ingegneria stilata dall'ANVUR, Agenzia del Ministero dell'Università e della Ricerca, nel primo Rapporto di Valutazione della Qualità della Ricerca (VQR) in Italia. Il dossier VQR, concepito come una cartina di tornasole sulla ricerca italiana per il periodo 2004-2010, ebbe l'obiettivo principale di aprire tutti gli ambiti della ricerca nazionale all'ottica del cosiddetto "finanziamento competitivo", ovvero una valutazione della qualità dei lavori dei ricercatori di università ed enti di ricerca in base alla quale concedere in futuro quote maggiori o minori di finanziamenti pubblici ai quali noi non siamo destinati.

Non solo. Sempre nel 2013 inaugura il Trapezio, il nuovo edificio destinato alla didattica, portando a termine quel progetto di costruzione di Trigoria Sud voluto dal "Pensatoio" del quale anch'egli fece parte.

Ed è proprio scendendo dalla scala principale del Trapezio che rilascia la sua ultima intervista partendo dal bilancio di quindici straordinari anni da Magnifico Rettore:

> Ho potuto vivere la realizzazione di una nuova Università. Per un accademico credo sia il più grande dei sogni.
> Sono stati quindici anni molto positivi. Quando nel 1998 iniziai il mio primo mandato, il Campus Bio-Medico aveva meno di dieci professori.

> Oggi sono cento. Un anno dopo, nel 1999, ebbi l'onore di conferire le prime lauree in Medicina agli studenti che si erano iscritti nell'anno di fondazione dell'Ateneo. Da lì un succedersi di nuove iniziative che il passare degli anni portava con sé, come l'attivazione delle scuole di specializzazione dopo le prime lauree. Ma soprattutto tante decisioni pensate e realizzate per promuovere la crescita dell'Università.
> Dati scientifici e informazioni si possono trasmettere anche a distanza, ma la formazione non può prescindere dal rapporto interpersonale.

Quel rapporto interpersonale così importante, in particolare, con i suoi amati studenti. Al collega docente universitario indica quali sono le qualità indispensabili che deve possedere:

> Amare le due componenti che caratterizzano il suo compito: lo sviluppo del sapere che chiamiamo ricerca e la trasmissione del sapere, ovvero la passione per la formazione dei giovani. Le due componenti devono andare insieme. Il ricercatore punta al progresso. Il professore di liceo ha il compito di trasmettere il sapere codificato. Il professore universitario è chiamato a trasmettere un sapere in costante costruzione. Solo così può diventare un maestro. Di più non posso dire. Certi messaggi si trasmettono con la vita e non con le parole. Spero con il mio operato di avere dato il buon esempio.

E il Maestro ha dato il buon esempio non solo nei quindici anni in cui è stato Magnifico Rettore dell'Università Campus Bio-Medico di Roma, ma lungo tutta la sua poliedrica carriera. Nella prefazione al libro di Massimo Minella *La formula Lorenzelli* Joaquín Navarro-Valls scrive infatti:

> La formula Lorenzelli è la biografia di uno studioso. È il racconto di un accademico che non si è mai isolato nell'alveolo chiuso della teoria scientifica, ma ha sempre scelto di vivere in modo aperto, realistico, stando cioè dentro alla vita vera, da protagonista e non da spettatore.[1]

L'Università Campus Bio-Medico non si è fermata e ha portato avanti l'opera del Maestro: siamo arrivati a 3 Facoltà Dipartimentali,

[1] Massimo Minella, *La formula Lorenzelli*, Genova, De Ferrari, 2011.

18 Corsi di Studio, 27 Scuole di Specializzazione in Medicina e Chirurgia, 3705 studenti iscritti, dei quali 604 medici specializzandi e 257 dottorandi. Abbiamo 57 Unità di Ricerca, 5 Dottorati di ricerca di cui siamo i coordinatori nazionali del Dottorato in AI per le Scienze della Vita e 8 società spin-off. Non solo: gli ettari sono diventati 90 e il nuovo progetto "Social Green Master Plan" vedrà l'Università strutturata in parchi in armonia con la natura, un'opera unica nel suo genere.

Per la celebrazione del nostro trentesimo compleanno, con l'inaugurazione dell'a.a. 2022/2023, si conia il motto "*Radici profonde e sguardo al futuro*" ed è proprio dalla Radice profonda Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli che siamo partiti.

Il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli parteciperà alla celebrazione del trentennale dell'Università Campus Bio-Medico di Roma che da neonata ha portato all'età adulta. Il Magnifico Rettore Vincenzo Lorenzelli, che per quindici anni ha inaugurato altrettanti anni accademici, conducendo altresì la celebrazione del decennale e del ventennale, in questa occasione sarà seduto in platea accanto ai suoi successori non più in carica, e da lì ascolterà la prolusione dal titolo *Trasformare il nostro mondo dalla primavera silenziosa: la cura della casa comune* della sua allieva Marcella che nel frattempo è diventata Preside.

Concludo con un pensiero rivolto al mio Maestro, il prof. Vincenzo Lorenzelli, Maestro soprattutto di vita: Maestro, ora che il Padre l'ha rivoluto a sé, come consigliava sant'Agostino la sentirò vicino e le parlerò ancora, ma piangerò la sua assenza e sentirò forte la sua mancanza.

**Guido Busca***

# *"Come andiamo, giovane Busca?" La mia vita accademica con Vincenzo Lorenzelli*

Ho letto di Vincenzo Lorenzelli per la prima volta nell'anno 1973. In quell'epoca ero studente del primo anno di Chimica all'Università di Milano ed ero ancora molto impegnato nello sport. Ero infatti un nuotatore di buon livello regionale (campione e primatista lombardo in mezzofondo e delfino), finalista ai campionati nazionali. Avevo, come tutti noi nuotatori lombardi, una certa frequentazione con Aronne Anghileri, già buon nuotatore e giornalista della "Gazzetta dello Sport", che pubblicava allora quotidianamente almeno una mezza pagina di nuoto, con tutti i risultati internazionali, nazionali e anche regionali. In quel periodo apparve un trafiletto, a firma Anghileri, con la notizia seguente: Vincenzo Lorenzelli, già campione italiano e nazionale dei 100 farfalla, ha preso servizio come professore ordinario di Chimica per l'Ingegneria presso l'Università di Genova. Notai la cosa perché associava le mie due passioni, la chimica e il nuoto. Anghileri mi spiegò che era stato compagno di squadra di Lorenzelli alla Canottieri Milano e che conosceva bene anche il padre, alle cui dipendenze aveva lavorato per un certo tempo in banca.

Qualche anno dopo venni a sapere di una attività di formazione per studenti universitari che si sarebbe tenuta a Milano e che vedeva tra i relatori Vincenzo Lorenzelli, e mi ricordai del trafiletto. Dopo la confe-

* Accademico guido.busca@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.45-49

renza gli chiesi conferma del fatto che fosse lui l'ex campione farfallista. Parve leggermente infastidito dalla mia domanda, ma colse l'occasione per informarsi sulla mia situazione. Gli spiegai che ero stato anch'io un nuotatore molto attivo (anche se con minor successo rispetto a lui) e che stavo per laurearmi in Chimica. Gli dissi anche che la mia speranza era di lavorare nel settore della ricerca universitaria, ma che nel laboratorio a Milano dove stavo preparando la tesi mi era stato detto che non sarebbe stato possibile, essendoci già diversi candidati in attesa. Il prof. Lorenzelli mi chiese che voto di laurea mi aspettassi, e io risposi che speravo nel 110 e lode, come poi effettivamente avvenne. Lui mi disse che, se mi fossi laureato con il massimo dei voti, a Genova presso il suo laboratorio ci sarebbe potuta essere qualche opportunità per me. Dopo la laurea nel luglio 1977 andai a Genova e cominciai a lavorare nel suo laboratorio, alla Fiera del Mare, con la prospettiva di una borsa di studio. Così cominciò la mia carriera universitaria, che nei primi tempi è stata ben più complicata di quel che speravo, ma che nel giro di alcuni anni ha cominciato a raddrizzarsi e a darmi grandi soddisfazioni.

Lorenzelli mi diede l'indicazione di riprendere un tema di ricerca che lui aveva approfondito anni prima ma che era stato interrotto da diversi anni, la chimica delle superfici dei materiali. Mi suggerì di lavorare sulle proprietà superficiali degli ossidi di ferro, materiali di grande rilevanza in diversi settori industriali (catalizzatori, adsorbenti, pigmenti, materiali magnetici ecc.) e mi affidò un'apparecchiatura vecchia ma funzionante, con cui aveva lavorato lui stesso anni prima, per studiare per via spettroscopica l'adsorbimento delle molecole sulle superfici dei materiali. In breve, però, comprò per me uno strumento allora nuovissimo e innovativo, un spettrometro infrarosso a trasformate di Fourier, tanto che per alcuni anni fui l'unico in Italia a disporne. Appena ebbi dei risultati interessanti sulle proprietà superficiali degli ossidi di ferro (soprattutto il principale, l'ematite, $\alpha$-$Fe_2O_3$), scrivemmo una prima breve nota che Lorenzelli mandò per la pubblicazione a "Nature", la più importante rivista scientifica mondiale allora e anche oggi. L'articolo non fu accettato, ma questo fatto dà un'idea delle prospettive con cui Vincenzo Lorenzelli impostava la ricerca scientifica così come tutta la sua vita professionale.

Mi mise anche subito in contatto con scienziati di alto livello, come il prof. Pierre Quintard, già suo allievo a Parigi e allora professore di

Chimica dei Materiali all'Università di Limoges, il prof. Jean-Claude Lavalley all'Università di Caen e soprattutto il prof. Norman Sheppard dell'Università dell'East Anglia a Norwich, precedentemente per molti anni a Cambridge e uno dei fondatori della scienza delle superfici, almeno in Europa. Quando consolidammo un po' di altri buoni risultati, mi portò a Norwich a discuterne con il prof. Sheppard, che ne rimase entusiasta. Durante la trasferta a Norwich dormimmo nella stessa stanza d'albergo, cosa che mi sorprese non poco. Vista anche l'opinione del prof. Sheppard, scrivemmo un ampio articolo dal titolo *Infrared Study of the Surface Reactivity of Hematite* a firma Vincenzo Lorenzelli, Guido Busca e Norman Sheppard, che inviammo l'8 novembre 1979 al "Journal of Catalysis" della Academic Press di New York, allora come ora rivista top mondiale nel settore. L'articolo, dopo un paio di revisioni, fu pubblicato a metà del 1980. A circa due anni dal mio arrivo a Genova eravamo già al massimo livello mondiale in questo settore, livello che il gruppo di ricerca ha mantenuto fino ad ora, con oltre 530 articoli pubblicati, citati più di 40.000 volte nella letteratura scientifica mondiale.

Ho lavorato fianco a fianco con Vincenzo Lorenzelli dal 1977 al 2000, avendo il laboratorio e lo studio alla Fiera del Mare, all'Istituto di Chimica di Ingegneria, che Lorenzelli fondò e diresse ininterrottamente per tutti quegli anni. In realtà, io entrai ufficialmente a far parte dell'Istituto solo nel 1988, quando, dopo quattro anni di purgatorio e poi cinque anni in cui fui Ricercatore Universitario a Bologna ma sempre presidiando anche il laboratorio alla Fiera del Mare di Genova, fui chiamato come professore associato a Genova. In questi oltre vent'anni di duro impegno scientifico e didattico per me lavorammo con grande armonia. Egli era un motivatore per noi giovani: sempre ottimista, vedeva gli aspetti positivi delle cose. Curiosamente, il prof. Lorenzelli non mi dava né del tu né del lei. Mi dava del noi. Era un modo di sottolineare partecipazione e interesse. Spesso diceva, per esempio: "Come andiamo, giovane Busca?". Una volta, alla fine del 1993, a una simile domanda mi permisi di rispondere: "Prof., giovane moderatamente… Ho compiuto quarant'anni, e alla mia età lei era già ordinario…". Lorenzelli rispose: "Altri tempi, Busca, altri tempi. Comunque, al più tardi quando vado in pensione, ci sarà una cattedra disponibile…". In realtà la cattedra si rese disponibile qualche anno prima, nel 2000, quando Lorenzelli passò al Campus Biomedico, e in effetti egli fu presidente

della commissione di concorso di cui io fui tra i vincitori. Per questo nel 2000 occupai la cattedra di Fondamenti Chimici delle Tecnologie, che prima era la sua, prima di trasferirmi a quella di Chimica Industriale Tecnologica nel 2004.

In realtà, in quegli anni Lorenzelli si occupò di moltissime cose (fu Prorettore vicario per un mandato, presidente dell'IRRSAE, presidente di Datasiel, presidente della Fondazione RUI, membro del Comitato Tecnico per l'Ambiente della Regione Liguria, membro del Comitato Consultivo per la Cooperazione allo Sviluppo del ministero degli Affari Esteri, membro e poi presidente del Consiglio di Amministrazione della Fondazione Cassa di Risparmio di Genova e Imperia ecc.), e sostenne la ricerca scientifica mia e degli altri suoi allievi in termini di finanziamenti e supporto politico, riducendo progressivamente la sua attività scientifica diretta. Uno degli atti che sono stati di maggiore utilità per noi suoi allievi è stato l'aver ottenuto dall'Ateneo l'istituzione di un Dottorato di Ricerca autonomo per l'Istituto, in Chimica per l'Ingegneria, che ci ha permesso di disporre di borse di studio per numerosi dottorandi chimici e ingegneri chimici, consentendo di sviluppare due gruppi di ricerca piuttosto cospicui, uno centrato sui materiali elettrochimici e il nostro centrato sui materiali catalitici. In effetti, un notevole numero di laureati che hanno partecipato a questo dottorato sono poi rimasti nel mondo della ricerca universitaria. Considerando globalmente gli allievi di Lorenzelli, e gli allievi degli allievi, che hanno lavorato nei laboratori della Fiera del Mare a partire dagli anni ottanta, si contano oggi oltre quindici professori di ruolo in quattro diverse università e in tre diversi settori scientifico-disciplinari.

Comunque, vanno riportati anche almeno altri due importanti contributi che Vincenzo Lorenzelli ha dato ai suoi allievi e al mondo scientifico e accademico. Egli è stato il promotore, con pochi altri colleghi di diverse sedi universitarie, del concetto di Chimica per l'Ingegneria, ottenendo la separazione formale e culturale del Settore Scientifico Disciplinare oggi denominato "Fondamenti Chimici delle Tecnologie" dalla "Chimica Generale e Inorganica" della Facoltà di Scienze. Inoltre, egli è stato uno dei fondatori della Chimica dei Materiali come scienza. Egli ha infatti fondato e diretto la prima rivista mondiale destinata a questo soggetto scientifico, "Materials Chemistry", che è stata per molti anni stampata a Genova ottenendo un notevole successo internaziona-

le, ed è stata poi comprata dalla Elsevier Publishing Co. e ancora oggi pubblicata come "Materials Chemistry and Physics" con la notazione: Founding Editor Vincenzo Lorenzelli. Anche per questo fu membro del Comitato Promotore del primo Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, istituito presso l'Università di Trento a metà degli anni ottanta, dove insegnò per diversi anni sobbarcandosi viaggi settimanali di andata e ritorno, e nella qual sede esportò alcuni allievi scientifici.

A partire dal 2000, con il suo trasferimento al Campus Biomedico, le mie frequentazioni con Vincenzo Lorenzelli si sono molto ridotte, visti anche suoi impegni a Roma come Rettore del Campus Biomedico e a Genova come presidente della Fondazione Carige e poi come presidente della Fondazione Gaslini.

Ci siamo rivisti successivamente quando, ormai ultraottantenne, avendo cessato le precedenti attività, il prof. Lorenzelli fu eletto presidente dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere, nel 2018. In questa veste lo invitai, essendo io allora Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale, alla Laurea Honoris Causa del prof. Sergio Carrà, che con Lorenzelli aveva avuto un rapporto di stima e amicizia. Venne e si sedette in prima fila: "In fondo, sono ancora un'autorità", mi disse.

Successivamente gli scrissi per comunicargli che un progetto presentato congiuntamente da due allieve di suoi allievi, la prof.ssa Paola Carpanese e la prof.ssa Gabriella Garbarino (entrambe a suo tempo studentesse del dottorato che lui aveva fondato), su un tema molto innovativo aveva ottenuto un ingente finanziamento PNRR. Nell'occasione mi comunicò il suo desiderio, poi realizzato, di ottenere la mia nomina a socio dell'Accademia, cosa che mi fece un grande piacere e che considero un onore.

L'ho rivisto alcune altre volte, l'ultima una ventina di giorni prima del suo decesso. Era già molto provato, ma il suo pensiero era concentrato sui suoi famigliari, gli amici e sulla situazione politica nazionale e internazionale. Non un lamento, positività e serenità fino alla fine.

**Andrea Baldini***

# *Vincenzo Lorenzelli ritrova le radici pontremolesi*

"Né tê Visènsi?" era la frase interlocutoria in dialetto pontremolese con la quale si rivolgeva al figlio Vincenzo il padre Gino. Espressione tipica del dialetto che significa: «Cosa hai da dire, Vincenzo?». Nel profondo rapporto di amicizia tra me e Vincenzo mi piaceva ripetergli questa frase. Un rapporto nato con il ritorno di Vincenzo a Pontremoli, come lui stesso scrive nel libro *Fiumi di vita*:

> A Milano addirittura i pontremolesi emigrati avevano costituito un'associazione denominata "Amici del Campanone", dal nome della torre più elevata della cinta di Cacciaguerra che funge oggi da torre campanaria della Cattedrale. Mio padre fu tra i fondatori e i soci più attivi nell'immediato dopoguerra e fu da queste splendide persone che io, ragazzo, imparai ad amare con gli occhi della loro nostalgia le descrizioni di quella città (reale o immaginaria) e dei suoi abitanti. Questa è la ragione per cui, arrivando da Parigi a Genova, una città per me sconosciuta e allora non particolarmente accogliente, mi venne naturale di avvicinarmi all'analoga associazione che i pontremolesi vi avevano istituita, presieduta da un giovane professore di Filosofia della facoltà di Magistero, Giuseppe (Beppe) Benelli, grande appassionato della sua città natale e della cultura lunigianese. Fu lui che divenne punto di riferimento per me e per mio padre nelle nostre visite alla città di origine, che anche mio padre viveva

* Avvocato info@baldinistudiolegale.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.51-54

con quell'emozione che suscitano i ricordi di un'infanzia ormai lontana, interrotta bruscamente dalle circostanze della vita. A Beppe mi legò subito un'affinità elettiva che divenne amicizia spontanea, continuamente rinsaldata dai comuni interessi culturali e che si estese rapidamente a un suo cugino avvocato, Andrea Baldini, giovane brillantissimo e di eccezionale vastità di interessi.
Furono questi due cari amici che, con un lavoro affettuoso e perseverante, mi portarono progressivamente a maturare un grande amore per la città di origine della mia famiglia, della quale, con la scomparsa di mio padre e di mio fratello, ero rimasto l'unico erede. Anno dopo anno, durante le estati a Marina di Pietrasanta, che dista da Pontremoli una cinquantina di chilometri di ottima autostrada, ho cominciato con la famiglia a frequentare spesso la vita e le attività culturali della cittadina. Cominciai così a conoscerne e ad apprezzarne gli abitanti, maturando molte simpatiche amicizie, come quella con Alberto e Maria Teresa Dadduzio, fino a desiderare di trovarvi un punto di appoggio che permettesse di trascorrervi anche periodi di riposo e di studio. Purtroppo si era persa anche nel ricordo di mio padre, che aveva lasciato Pontremoli alla fine della scuola elementare, nel 1904, per proseguire gli studi al collegio Maria Luigia di Parma, la collocazione esatta della casa avita, di cui sapevo soltanto che si trovava sulla via principale e che si affacciava con un terrazzo sul fiume Magra. Per questo ebbe buon gioco Andrea Baldini quando mi comunicò alla fine degli anni ottanta che era in vendita un antico palazzo con quel tipo di collocazione e di caratteristiche, proponendomi di acquistarlo insieme. Lui trasferì al piano terra il suo studio professionale e io ebbi la possibilità di ristrutturare i piani alti le cui finestre affacciano tutte sulla Magra. Da un bel terrazzo situato al piano nobile si apre una vista incantevole sui monti della catena dell'Orsaro, che sovrastano la valle verso nord-est e, più vicino, al di là della Magra, su alcuni degli edifici simbolo delle migliori epoche cittadine: una torre di guardia e un ponte del dodicesimo secolo, la Chiesa di Nostra Donna, gioiello del barocco pontremolese, e il settecentesco Teatro della Rosa.[1]

La ristrutturazione, diretta dall'architetto Gian Luigi Maffei, docente all'Università di Firenze e conoscitore profondo del patrimonio architettonico lunigianese, ha comportato coraggiosi interventi, come

[1] Vincenzo Lorenzelli, *Fiumi di vita*, collana "La Bussola", La Spezia, Le Edizioni del Porticciolo, 2017, pp. 243-247.

la restituzione del cortile seicentesco con i quattro balconi contrapposti e la demolizione di tutte le superfetazioni ottocentesche che ne avevano invaso la struttura. La realizzazione dello scalone nella forma originaria. La scoperta sulla facciata prospiciente la strada del magnifico portale duecentesco in stile romanico, dentro il quale è stato inserito con un elegante artificio architettonico il portale dell'intervento seicentesco. Il piccolo tondo in pietra arenaria collocato in facciata opera dell'artigiano Ennio Tognotti con la graticola scolpita e la sigla S.L.O.P.N.: *Sancte Laurentie Ora Pro Nobis*. Il tetto prospiciente il fiume con l'antica copertura a piagne, caratteristica di Pontremoli.

Nel mese di settembre e durante il periodo natalizio gli amici attendevano come una festa l'arrivo di Vincenzo con la moglie Gioia per un soggiorno, possibilmente lungo, nella casa di Pontremoli. Esisteva un cerimoniale non scritto per gli incontri, a mezzogiorno in uno dei caffè delle piazze per l'aperitivo. Nel tardo pomeriggio ci si trovava nel salotto di Maria Teresa su strada in via Cavour, a poca distanza dall'abitazione di Vincenzo, dal mio studio e dalla mia abitazione, dove tutti gli amici potevano liberamente entrare. Vincenzo diceva: "Siamo come in una commedia di Goldoni, dove le case dei protagonisti affacciano tutte in scena". Maria Teresa e Alberto, Aurelia e Beppe Benelli, Lilli e io, Alfredina e Sandro Armanetti, Rita e Rodolfo Fiorentini, Zita e Angelo Cocchi e altri occasionali amici. Talora si univa al gruppo Pierpaolo Lello, cugino di Vincenzo e amico mio dai tempi dell'infanzia, insieme alla moglie Elisabetta. Si intavolavano i discorsi più diversi: politica, storia, filosofia, musica, arte. Incontri che spesso si trasformavano in simposi presso una delle trattorie pontremolesi. Alla fine della cena mi esibivo in una delle scenette che piacevano tanto a tutti i presenti o nel racconto di qualche burla fatta in gioventù.

Poi Vincenzo, presidente della Fondazione Carige, mi ha voluto nel Consiglio di Amministrazione della Banca, compito che ho assolto con sua grande soddisfazione per gli attestati di stima che riceveva dagli altri componenti dell'organo e dalla direzione. Ho fatto parte del Comitato Esecutivo. Vincenzo, che già aveva lasciato la Fondazione per altri prestigiosi incarichi, mi ha avvisato quando è stato il momento di venir via perché nuvole scure si stavano addensando sull'istituto.

Ricordo con piacere una Pasqua trascorsa a casa mia con la zia Claudia, l'ultima vivente dei fratelli di mia madre, insieme alle figlie

Elisabetta e Giuliana. Tutte orgogliose delle lodi che Vincenzo, durante il pranzo, aveva elargito nei miei confronti.

I viaggi a Roma, insieme a Beppe, quando Vincenzo era Rettore del Campus Biomedico che lui ha incrementato e fatto crescere con iniziative fondamentali.

Voglio concludere con un episodio che coinvolge Joaquín Navarro-Valls, medico e accademico spagnolo, direttore della Sala stampa del Vaticano dal 1984 al 2005 durante il pontificato di Giovanni Paolo II. Nel 2006 era venuto a Genova per presentare il libro di Monsignor Alberto Maria Careggio, *Giovanni Paolo II, l'uomo delle alte vette*. Monsignor Careggio, vescovo prima a Chiavari poi a Ventimiglia, era stato parroco di Challand-Saint-Victor in Val d'Aosta, dove negli anni novanta il papa andava a riposare durante il periodo estivo. Prima della presentazione ci trovammo nell'ufficio di Vincenzo in intimità con Navarro-Valls. Vincenzo si divertì a raccontare della Tota, soprannome di Alba Angiolini, la mia seconda madre, che aveva vissuto in Uruguay ed era rientrata in Italia per sposare mio padre in seconde nozze nel 1975, in quanto entrambi vedovi. Quarant'anni prima lei era venuta in Italia in compagnia della madre ed era sorto tra lei e mio padre un sentimento d'amore mai spento. Poi, mancato mio padre, era rimasta con me, considerandomi un figlio. La Tota aveva una *libreta* nella quale scriveva tutte le persone per le quali pregava, vive e morte. Naturalmente pregava in spagnolo usando il verbo *pedir*, alla prima persona dell'indicativo presente: *pido*. Vincenzo raccontava che la *libreta* conteneva una preghiera per l'intera famiglia Lorenzelli. Parlammo anche della citazione di Carlo V imperatore, riportata da più fonti, che diceva di usare lo spagnolo per parlare con Dio, l'italiano per parlare con le donne, il francese per la diplomazia, il tedesco per dar ordini ai cavalli. Dopo la presentazione e la cena che seguì Navarro-Valls nel salutarmi mi disse: "Avvocato, veda se c'è un posto anche per me nella *libreta* di sua madre". La Tota lo aggiunse con piacere.

**Giuseppe Benelli***

# *Le radici pontremolesi di Vincenzo Lorenzelli*

Ciò che emergeva con evidenza negli incontri con Vincenzo Lorenzelli era il profondo senso di gratitudine verso i genitori, gli amici, i parenti e i tanti maestri che ha incontrato nella sua vita. Rievocare le persone che ci hanno amato e fatto del bene produce il desiderio di ricambiare ciò che abbiamo ricevuto, non per pareggiare un conto o saldare un debito, ma per lasciarne vivo il ricordo. Si intuiva che per Vincenzo era il momento delle "consegne" di esempi, modelli e valori che si sono ricevuti nell'infanzia e nella adolescenza. Erano gli insegnamenti del padre Gino, pontremolese di nascita e di formazione, che dopo la scuola del duro dialetto del Campanone ha portato per tutta la vita l'impronta culturale della "città del libro".

I Lorenzelli erano impresari, maestri muratori che erano scesi dall'appennino ligure nel Seicento per costruire il Duomo e i ponti di Pontremoli. Nella seconda metà dell'Ottocento la famiglia possedeva la fabbrica di laterizi di Casacorvi, con cui hanno contribuito a fare le gallerie delle Ferrovie dello Stato. Vincenzo ricordava il nonno che aveva frequentato le prime classi del ginnasio in seminario a Pontremoli, per poi smettere gli studi e lavorare come imprenditore stradale, soprattutto nella realizzazione della strada del passo della Cisa. Nei primi anni del Novecento aveva trasferito la famiglia a Parma, per fare

* Presidente dell'Accademia Lunigianese di Scienze "Giovanni Capellini"
giusebenelli@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.55-60

completare gli studi ai tre figli, Gino, Rina e Bruno. Gino prendeva la maturità liceale al Collegio Maria Luigia, dove poté frequentare sempre con borse di studio, ottenendo medaglie d'oro in tutte le materie, in particolare latino e greco. Dopo il liceo classico s'iscriveva alla facoltà di Giurisprudenza di Parma, ma era costretto a interrompere per la guerra. Ferito e fatto prigioniero sull'Adamello, veniva portato in un campo di concentramento in Germania dove, in quel lungo periodo di segregazione, studiò il tedesco. Dopo la guerra, per la grave situazione economica della famiglia, Gino andava a lavorare al Provveditorato agli Studi di Parma e poi iniziava il suo percorso alla Banca Commerciale con grandi soddisfazioni.

Vincenzo era nato a Verona, dove il padre era stato trasferito alla Banca Commerciale, ma (sottolineava) era stato concepito a Fiumetto di Forte dei Marmi, dove la nonna Elvira preparava profumati cibi pontremolesi. Il mare della Versilia ha accompagnato le lunghe estati di Vincenzo col cugino Giorgio Zampa, figlio della zia Rina, più grande di dodici anni. Giorgio diventerà docente di Lingua e Letteratura Tedesca all'Università di Firenze, critico letterario e collaboratore dell'"Espresso" e del "Corriere della Sera", poi direttore delle pagine culturali del "Giornale" di Montanelli. Era Giorgio che portava a Fiumetto in casa della nonna scrittori e artisti: Enrico Pea, Piero Bigongiari, Carlo Emilio Gadda e soprattutto Eugenio Montale. Giorgio aveva conosciuto Montale a Firenze nell'ottobre del 1939 quando Einaudi pubblicava *Le occasioni*. Su *Ossi di seppia*, acquistato a Viareggio nel '39, Montale gli scriveva la dedica il 4 luglio del '42: "A Giorgio Zampa / che mi ha sfamato / nella primavera del 1942 / Arsenio Montale". Il poeta ringraziava Zampa che divideva con gli amici i viveri che si faceva mandare dalla mamma.

A Fiumetto il poeta è quasi sempre indicato con il confidenziale nomignolo di Eusebio. Era stato Bobi Bazlen a chiamarlo così storpiando Eugenio, dopo che Montale non aveva trovato ispirazione per una poesia su Eusebius, simbolico personaggio caro a Schumann. Montale, che frequentava la casa Lorenzelli tutti i giorni d'estate con la scusa di leggere il "Corriere della Sera", chiamava Vincenzo "Bibolo" e lo ha fatto protagonista di un racconto. Proprio a Vincenzo il poeta affidava la custodia di Pippo, uno schnauzer nano, che diventerà il suo compagno inseparabile soprattutto nel periodo che è costretto a trascorrere dalla

zia Rina a San Severino Marche, a causa della guerra. Al mare lo scultore Leone Tommasi di Pietrasanta, "l'ultimo gran signore della scultura italiana", ritraeva Vincenzo nel 1941 all'età di otto anni.

Nei pomeriggi assolati sotto il bersò del giardino Vincenzo ricordava da una parte Giorgio e Piero Bigongiari mentre traducevano *I quaderni di Malte Laurids Brigge* di Rainer Maria Rilke; poco lontano Montale, che in quell'estate era al Forte in pensione con la Mosca, la sua compagna Drusilla Tanzi, intento a leggere il "Corriere della Sera". Quando Giorgio e Piero avevano dei dubbi sulla traduzione, richiamavano l'attenzione di Eusebio, ma dovevano chiamarlo più volte perché lui non sentiva tanto era assorto nella lettura. Poi gli chiedevano: "È meglio così – e dicevano la traduzione – o così?". E Montale con fare infastidito: "Ripeti!". "Allora, è meglio questa prima versione o quest'altra?". Gliele faceva ripetere più volte, e diceva: "È meglio la prima, meglio la prima". Per Vincenzo, che a quel tempo era alle prese col greco ginnasiale, l'esperienza versiliese diventava una fucina di formazione, un cenacolo di amici, un continuo stimolo culturale. Scrive Lorenzelli nei suoi ricordi:

> Con il passare degli anni ormai il "Bibolo" del '42 era diventato un ragazzino pieno di interessi e sicuro di sé. Se ne rese conto Eugenio Montale, che divertivo recitandogli con grande impegno le sue poesie la cui musicalità mi affascinava e che mi ricordavano l'ambiente e i profumi versiliesi anche quando erano ambientate nelle molto più rudi Cinque Terre.[1]

Vincenzo rimarrà per tutta la vita fortemente legato alla sua esperienza apuana:

> Un luogo dove ritrovavo anno dopo anno gli affetti familiari e dove ad ogni ritorno il cuore si apriva alla serenità e alla gioia, pronto a emozionarsi di scoperte sempre nuove di bellezza, di umanità e di cultura. […] Con Giorgio che stava terminando gli studi letterari a Firenze, ci vedevamo spesso a Fiumetto anche nelle mezze stagioni, ogni qualvolta la scuola, che frequentavo a Milano, mi permetteva di farlo. […] Spesso andavamo in bicicletta fino al bar Roma di Forte dei Marmi o al Politeama

[1] Vincenzo Lorenzelli, *Fiumi di vita*, La Spezia, Le Edizioni del Porticciolo, 2017, p. 33.

di Viareggio, luoghi classici di incontro degli intellettuali locali, ai quali si aggregavano d'estate i fiorentini e i vari amici provenienti dal nord e soprattutto da Milano che si stava consolidando come capitale editoriale.[2]

Annota Lorenzelli:

> Ricordo che alla fine dell'estate del '71 organizzammo un incontro con Giorgio che mi aveva scritto di dover andare in Versilia per incontrare Montale, in vacanza a Forte dei Marmi. Lo raggiungemmo una mattina in spiaggia e passammo qualche ora in cui loro discussero delle molte cose che li vedevano uniti in una amicizia e in una collaborazione che non terminò neppure con la morte del poeta, perché Giorgio continuò a curare per anni la pubblicazione di varie sue opere. Mentre parlavano io, ormai uomo maturo, ripensavo alle estati degli anni '40 e ritrovavo nell'azzurro sguardo e nel sorriso immutato di Eusebius, come lo chiamavamo familiarmente, la tenerezza con cui trattava me fanciullo essendo anch'egli nell'animo restato tale tutta la vita.[3]

Il dopoguerra di Vincenzo a Milano fu contrassegnato dall'impegno dello studio e dalla pratica sportiva che diventava sempre più impegnativa, raggiungendo risultati importanti. È stato membro della Nazionale Italiana di Nuoto dal 1953 al 1954, campione primatista italiano dei 100 metri farfalla, campione primatista italiano della staffetta 4x100 mista e più volte campione italiano dei 200 metri farfalla, in gara con l'amico Carlo Pederzoli, futuro protagonista del cinema italiano come Bud Spencer. Un momento particolarmente difficile aveva rappresentato la definitiva rinuncia allo sport, proprio nel momento in cui si aprivano orizzonti internazionali e grandi prospettive. Dopo la laurea con Giovanni Battista Bonino dell'Università di Bologna, Vincenzo andava a Parigi a lavorare in un laboratorio di prestigio mondiale quale quello della Sorbona, sotto la guida di Jean Lecomte, uno scienziato di fama internazionale. Infine arrivava a Genova come docente di chimica presso la Facoltà di Ingegneria, nell'intento di dare un taglio ingegneristico ai corsi di Chimica Generale. Il suo apporto risulta di straordinaria rilevanza non solo nel settore della ricerca, ma

[2] *Ibid.*, pp. 83-84.
[3] *Ibid.*, pp. 93-94.

anche in campo didattico. Il suo contributo come docente non si è limitato a concorrere alla formazione di un ingegnere aperto al confronto e alla ricerca dell'eccellenza nello sviluppo scientifico-tecnologico, ma si è esteso al compito di sviluppare negli allievi una coscienza e una consapevolezza critiche dei rischi che innovazione e progresso tecnologici possono comportare.

Per il riconoscimento del lavoro svolto veniva chiamato nel Comitato Nazionale per la Biosicurezza e le Biotecnologie della Presidenza del Consiglio dei Ministri. Presidente dell'IRRSAE, Istituto Regionale per la Ricerca, Sperimentazione e Aggiornamento Educativo dei docenti della scuola di ogni ordine e grado della Liguria; presidente per quindici anni della Fondazione RUI (Residenze Universitarie Internazionali) che lasciava nel '98 quando diventava Rettore dell'Università Campus Bio-Medico di Roma. Nello stesso anno veniva eletto presidente della Fondazione della Banca Carige. Nel 2006 assumeva l'incarico di Commissario Straordinario e poi di presidente del Consiglio di Amministrazione dell'Istituto Giannina Gaslini, il prestigioso ospedale pediatrico genovese. Nel 2005 riceveva l'onorificenza di Grande Ufficiale al Merito della Repubblica Italiana e nel 2006 di Cavaliere della Légion d'honneur della Repubblica Francese. Era Commendatore delle Palme Accademiche presso il Ministère de l'Éducation Nationale Française. L'ultimo suo incarico è stato la presidenza dell'Accademia Ligure delle Scienze e Lettere.

Quante vite ha vissuto Vincenzo Lorenzelli! Costante in tutte queste vite è stato l'insegnamento di suo padre, che ha saputo sviluppare le capacità del figlio con la giusta fiducia e il senso del sacrificio per "tornare a casa vincitore". Sono i valori condivisi della persona, dell'amicizia e della solidarietà, della responsabilità comune. Per Lorenzelli l'uso critico della ragione era rispetto della diversità che va inteso come chiarezza e sincerità nell'assumersi i propri doveri verso gli altri. Solo grazie alla forza del suo temperamento gli è stato possibile vincere il senso di solitudine quando lasciava la presidenza della Fondazione Carige, nello stupore e nell'incomprensione generale.

La sua vita ci offre un'alchimia di elementi che nasce da un lungo processo di conoscenza delle proprie radici e delle varie realtà incontrate. Da un lato c'è la consapevolezza che la vita si dilegua, dall'altro c'è la rassicurante scoperta di un riparo che la preserva. Un'esperienza

straordinaria, un vivere mondi paralleli, un viaggio pieno di scoperte. La visione del mondo che ci offre è il tentativo di riconoscere finalità superiori al puro procedere del tempo. È la possibilità di trascendere lo stato di cose presenti, di non accontentarsi degli assetti vigenti e, dunque, proiettarsi sempre in scenari futuri. Il "visionario" Lorenzelli è legato profondamente alla realtà e ne coglie le potenzialità. Il visionario ha uno sguardo meta-fisico, non anti-fisico, va oltre e non contro la realtà. Non separa uomini e fatti, non li isola nel loro accadere, ma li coglie all'interno di una continuità, come nello scorrere delle acque di un fiume.

Infine Pontremoli, nella terra degli avi, fatto di ricordi del padre e dei racconti degli amici pontremolesi, con la casa sul fiume.

> Il mio studio e la terrazza sul fiume sono così diventati da quasi trent'anni il "buen retiro" dove, alzando lo sguardo dal libro, immagino spesso di godere la stessa vista che deve aver rasserenato i momenti di riposo dei miei antenati, dato che il paesaggio montano ha attraversato i secoli incontaminato. Spesso dal terrazzo guardo scorrere la Magra, con gli stessi occhi con cui il bambino guardava un tempo scorrere l'Adige a Verona e poi, via via, il Naviglio Grande a Milano, la Senna a Parigi, la Vienne a Limoges, la Loira a Nantes, il Tevere a Roma… e sempre con la stessa concentrazione per cogliere il senso dell'eterno divenire.[4]

[4] *Ibid.*, pp. 247-248.

**Roby Carletta***

# *Vincenzo Lorenzelli, un ragazzo della via Pál*

Ho conosciuto Vincenzo Lorenzelli, anzi Vincenzino, negli anni della sua fanciullezza quando ormai stava avvicinandosi ai novant'anni e io agli ottanta.

Posso dire quindi che ci siamo conosciuti da ragazzi in quell'angolo di vita rimasto aperto alle confidenze e agli entusiasmi consumati con altri amici ogni mercoledì al bar dell'Esselunga.

"Eravamo quattro amici al bar", come canta Gino Paoli in una sua famosa canzone; proprio così, spogliati di ogni titolo accademico o professionale e felici del nostro dir niente e dirsi tutto.

Ogni uomo rappresenta un libro di esperienze, emozioni, sapere, competenze, genialità: a volte un semplice libro, a volte un "Bignamino" corto corto, ma obbiettivamente Vincenzo era una vera e propria enciclopedia che si sfogliava con grande semplicità e soprattutto con senso dell'umorismo.

Abbiamo parlato di tutto in quel bar e abbiamo riso tanto ma tanto, risate intelligenti e gioiose.

Così voglio ricordarti caro Vincenzo, Maestro di vita e di quella chimica che formula l'amicizia.

Ci rivedremo ancora tutti insieme in un altro mercoledì, nella grande chimica dell'universo.

* Attore robycarletta@outlook.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.61

# COMMEMORAZIONE DI ENRICO BELTRAMETTI

18 novembre 2025

**Mario Pestarino***

# *Enrico Beltrametti accademico e scienziato*

Il professor Enrico Beltrametti, mancato il 12 dicembre 2024, è stato eletto Accademico Corrispondente nel 1985 e nel 1989 è diventato Accademico Effettivo. Ha partecipato attivamente e con continuità all'attività accademica. In occasione dell'inaugurazione dell'anno accademico 1992 ha tenuto la *plenary lecture* dal titolo *Indizi sulla storia dell'Universo*. Successivamente, in occasione dell'inaugurazione dell'anno accademico 2010 ha tenuto la prolusione ufficiale *Cent'anni di Meccanica quantistica*.

La sua attività scientifica e didattica nel campo della Fisica teorica e della Fisica nucleare si è svolta nell'Università degli Studi di Genova, dove ha ricoperto importanti incarichi istituzionali. È stato Direttore del Dipartimento di Fisica, presidente della Sezione di Genova dell'INFN e Rettore dell'Ateneo genovese dal 1984 al 1990. In qualità di Rettore ha contribuito in maniera significativa allo sviluppo edilizio dell'Ateneo portando a termine la costruzione del polo scientifico universitario di Valletta Puggia, dove hanno trovato una nuova sede i Dipartimenti di Fisica, di Matematica, della sezione di Scienze del Dipartimento di informatica, bioingegneria, robotica e ingegneria dei sistemi, di Chimica e Chimica industriale.

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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.65-66

La rilevante produzione scientifica del prof. Beltrametti ha ottenuto prestigiosi riconoscimenti a livello nazionale e internazionale. Nel dicembre 1979 ha organizzato e diretto, per la Scuola Internazionale di Erice, il corso *Current Issues in Quantum Logic*. È stato il primo Presidente della International Quantum Structures Association (IQSA).

L'Accademia ha ritenuto doveroso ricordare Enrico Beltrametti, invitando alcuni suoi Colleghi ed ex Allievi. Tutti gli interventi a questa cerimonia di commemorazione hanno anche messo in evidenza le qualità umane di Enrico Beltrametti, che si è sempre distinto per la sua disponibilità e gentilezza tipica di un grande gentiluomo, e tale rimarrà nel ricordo di tutti.

**Federico Delfino***

# *Ricordo del prof. Enrico Beltrametti*

Sintetizzare il ricordo di una figura che ha lasciato un'impronta indelebile in tutti i campi in cui si è misurata è compito arduo. Il prof. Enrico Beltrametti è stato un docente stimato, uno studioso di elevata caratura, un Rettore che ha vissuto un momento epocale per l'Università italiana. Un gentiluomo nei modi di fare e di porsi con tutti. In una intervista, breve ma intensa, che ha rilasciato nel 2013 alla radio web dell'Istituto di Scuola Superiore "Primo Levi" di Ronco Scrivia,[1] il prof. Beltrametti ha fatto trasparire dalle sue risposte il proprio attaccamento all'istituzione universitaria e una visione acuta e lungimirante su temi che ancora oggi sono di attualità quali il valore dell'esperienza Erasmus e il significato dei test di ingresso. Ma è sulla domanda "Quale consiglio dare ai ragazzi che stanno per iscriversi all'università?" che – a mio parere – il prof. Beltrametti ha dimostrato la sua saggezza e, allo stesso tempo, il rispetto per il percorso di studi: "La priorità – ha detto – deve essere perseguire ciò che si desidera. Una forte determinazione determina il successo della formazione e il livello che in essa si ottiene".

[1] https://www.radiojeans.net/twr/contributo/19753744/Intervista-a-Prof--Enrico-BELTRAMETTI--gia-ordinario-di-Fisica-Nucleare-presso-lUniversita-di-Genova-e-gia-Rettore-dellAteneo-genovese-?cat=304

* Rettore dell'Università di Genova rettore@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.67-69

E la passione per la propria materia è stata ben rappresentata dalla sua lunga carriera di brillante ricercatore di Fisica teorica, disciplina su cui si è maggiormente focalizzato dopo essersi laureato in Fisica, discutendo una tesi sperimentale sotto la supervisione del prof. Ettore Pancini.

Dall'inizio degli anni settanta e fino ai primi anni ottanta la sua attività di ricerca ha avuto come tema, in senso ampio, il problema dei fondamenti e della struttura matematica della Meccanica Quantistica. Il lavoro di quel periodo è sistematizzato ed esposto nella monografia *The Logic of Quantum Mechanics* e nel corso *Current Issues in Quantum Logic*, da lui organizzato e diretto per la scuola di Erice, nel dicembre 1979. Nello stesso periodo ha rivestito anche la carica di Direttore della Sezione di Genova dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Nel 1984 è stato eletto Rettore, il primo afferente all'area di scienze matematiche fisiche e naturali, e ha ricoperto questo ufficio per due trienni, dal 1984 al 1990.

Nell'arco dei suoi mandati rettorali l'Ateneo ha vissuto due momenti "epocali": l'inaugurazione della nuova sede dell'allora Facoltà di Architettura e la riforma universitaria (legge 168/1989). In modo simbolico queste svolte hanno trovato convergenza nella visita a Genova nel 1990 del prof. Antonio Ruberti, titolare del neonato ministero dell'Università e della Ricerca scientifica e tecnologica e promotore proprio della riforma, nota anche come "legge Ruberti".

Perché si parla di svolta?

Prima del 1990 la collina di Castello, il cuore più antico di Genova, sospeso tra Carignano e l'area portuale, portava ancora le ferite inferte dai massicci bombardamenti subiti durante la Seconda guerra mondiale: le chiese e i conventi che la caratterizzavano giacevano in macerie, testimoni di un passato lontano e glorioso e, allo stesso tempo, monito di orrori più recenti. Con la distruzione materiale era sopraggiunto anche il degrado sociale: per questo l'insediamento di un polo universitario è stato considerato un cambiamento decisivo non solo per l'Ateneo ma anche per la crescita della città. Il progetto complessivo, fortemente sostenuto dall'allora Preside della Facoltà di Architettura prof. Edoardo Benvenuto, è stato realizzato dall'arch. Ignazio Gardella che ha disegnato il blocco di nuova costruzione a cui si è affiancato il recupero degli antichi edifici del monastero di San Silvestro, su progetto dell'ing. Luciano Grossi Bianchi.

Consapevole del valore simbolico della rinascita della collina di Castello, oltre che del suo impatto concreto per l'Università, il Rettore Beltrametti ha deciso di inaugurare i nuovi spazi – a un tempo universitari e, in senso lato, cittadini – con una cerimonia ufficiale alla presenza del ministro Ruberti, a cui ha offerto l'opportunità di esporre la sua riforma. Nel suo ultimo anno di mandato è spettato proprio a lui traghettare l'Università nell'innovativo contesto prefigurato dalla "legge Ruberti". Per la prima volta in Italia veniva istituito un dicastero *ad hoc* per gli Atenei – ministero dell'Università e della Ricerca scientifica e tecnologica – ai quali veniva riconosciuta personalità giuridica e, in attuazione dell'articolo 33 della Costituzione, veniva conferita loro autonomia didattica, scientifica, organizzativa, finanziaria e contabile. In virtù di tale autonomia le università poterono darsi propri ordinamenti, statuti e regolamenti.

L'Università entrava in una nuova stagione. Da allora è stata oggetto di diversi adeguamenti legislativi che, però, ne hanno preservato l'autonomia.

La volontà di radicare l'Università nel tessuto urbano, di realizzare nuove strutture più ampie e adeguate alle esigenze didattiche e il senso dell'istituzione costituiscono l'eredità lasciata dal Rettore Beltrametti da cui ho tratto ispirazione in questi miei anni alla guida dell'Ateneo genovese. Anche se, con l'introduzione della "legge Gelmini", è stata conferita una veste più manageriale alla figura del Rettore, rispetto al passato, i principi che hanno ispirato il mandato rettorale del prof. Beltrametti sono rimasti immutati: ha insegnato, con il suo esempio, come la dedizione all'attività di servizio, unita a una visione a lungo termine, siano determinanti per incidere nella crescita e nello sviluppo dell'Università, che non deve temere i cambiamenti e che può mettersi in dialogo costruttivo con la città, diventandone un punto di riferimento anche "fisico", come è successo per il polo di Architettura sulla collina di Castello.

**Gianni Cassinelli***

# *L'attività di ricerca di Enrico Beltrametti*

Lo scopo di questa nota è di ripercorrere brevemente la carriera accademica e scientifica di Enrico Beltrametti, ricordando gli argomenti della sua ricerca e alcune delle persone che hanno più strettamente collaborato con lui e con cui era particolarmente legato.

Evidentemente, ben più vasti sono stati i suoi interessi e la cerchia delle sue amicizie. Qui ci si limita all'ambito scientifico e accademico.

Enrico Beltrametti nasce a Genova il 23 agosto 1933. Dopo aver frequentato il Liceo Scientifico presso i Maristi (Enrico teneva molto a questo ricordo), si è laureato in Fisica, nell'Università di Genova, nel 1956. Relatore della sua tesi (sperimentale) fu Ettore Pancini.

La fase iniziale dell'attività di ricerca di Enrico Beltrametti si è svolta in collaborazione con Sandro Vitale, portando avanti i temi affrontati nella tesi di laurea. Si tratta quindi di un lavoro sperimentale, avente come tema la misura della polarizzazione circolare della radiazione di Bremsstrahlung. I risultati sono esposti in due articoli pubblicati nel 1958. Termina a questo punto l'attività sperimentale. Da questo momento in poi tutta la ricerca sarà nell'ambito teorico.

Fino ai primi anni sessanta Enrico Beltrametti ha lavorato su problemi di Fisica Nucleare (teorica). Tipicamente, calcoli di sezioni

* già Professore ordinario nell'Università di Genova gcassinelli45@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.71-74

d'urto di reazioni nucleari. Tra questi lavori è stato particolarmente importante e apprezzato un articolo in collaborazione con Luigi Radicati (Università di Pisa) sulla cattura di particelle "μ-negative" da parte di nuclei leggeri. Certamente questo è stato il lavoro che più degli altri lo ha fatto conoscere, mettendolo in luce tra i giovani fisici teorici italiani.

Nei primi anni sessanta è stata attiva la collaborazione con Giunio Luzzatto, anche lui giovane e brillante fisico teorico genovese. Per avere un'idea dei problemi che affrontarono ricordiamo che in Meccanica Quantistica le proprietà del momento angolare sono legate alle rappresentazioni del gruppo delle rotazioni. In un articolo pubblicato nel 1962 Enrico Beltrametti studiò il momento angolare di sistemi (quantistici) non stabili (che decadono nel tempo), mostrando che poteva assumere valori complessi. Nei lavori successivi, in collaborazione con Giunio Luzzatto, tali momenti angolari complessi furono messi in relazione con generalizzazioni (da loro chiamate "forked representations") delle rappresentazioni del gruppo delle rotazioni. Questa trattazione dei momenti angolari complessi (in Meccanica Quantistica) fu accolta con grande interesse. Per esporne i contenuti e i risultati nel 1962 Enrico Beltrametti fu invitato dall'Università del Colorado al Summer Institute of Theoretical Physics di Boulder.

Tra il 1968 e l'inizio degli anni settanta Enrico Beltrametti ha collaborato con Alberto Blasi. Questa attività iniziò con la tesi di laurea di Blasi, nella quale è stato dimostrato un importante risultato sul numero degli operatori di Casimir, per un gruppo di Lie, e viene fornita una formula esplicita per calcolarlo.

L'idea alla base dei lavori successivi è che le coordinate dello spazio-tempo fisico prendano valori in un campo numerico finito (di Galois), e non in numeri reali. Se il numero di elementi di questo campo finito è sufficientemente grande, un tale spazio-tempo finito non avrebbe proprietà molto diverse da quello ordinario. L'analogo del gruppo di Poincaré, per questo spazio-tempo finito, diviene un gruppo finito. Enrico Beltrametti e Alberto Blasi studiarono e classificarono le rappresentazioni di questo gruppo finito e scrissero per esse l'analoga dell'equazione di Dirac. Furono invitati da Bryce DeWitt (che era uno specialista dell'interazione tra Meccanica Quantistica e Cosmologia) all'Università della North Carolina per esporre sistematicamente questi lavori.

Anche chi scrive questa nota ha avuto Enrico Beltrametti come relatore della tesi di laurea, nel 1970. È stato l'inizio di una lunga collaborazione e di una grande amicizia.

In termini molto generali (forse troppo!) il tema di fondo del nostro lavoro è stato lo studio di alcune strutture matematiche che emergono da una formulazione assiomatica della Meccanica Quantistica. In particolare emergono, in maniera abbastanza naturale, le idee di spazi di probabilità quantistici (non commutativi) e di logiche quantistiche. Esposizioni sistematiche di questo studio si trovano nel volume che raccoglie le lezioni per il corso *Current Issues in Quantum Logic* della scuola internazionale di Erice organizzato e diretto da Enrico Beltrametti e Bas van Fraassen nel dicembre 1979, e nella monografia *The Logic of Quantum Mechanics*, pubblicata nel 1981.

Nel frattempo la carriera accademica di Enrico Beltrametti è proseguita con la sua nomina, dal 1° novembre 1972, a Professore Straordinario e successivamente, dal 1° novembre 1975, a Professore Ordinario di Fisica Nucleare.

Parallelamente alla carriera accademica e a quella scientifica deve essere ricordata la sua partecipazione agli organi di governo del nostro Ateneo e delle sue strutture. Credo che debba essere menzionato anche il suo ruolo fondamentale (anche se non istituzionalizzato) nella creazione, all'inizio degli anni settanta, del nuovo Istituto di Scienze Fisiche, che è stato l'embrione del futuro Dipartimento di Fisica.

Tra la fine degli anni settanta e l'inizio degli anni ottanta ha ricoperto la carica di Direttore della Sezione di Genova dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare).

Infine, è stato eletto Rettore dell'Università di Genova, coprendo questo ufficio per due mandati triennali dal 1° novembre 1984 al 31 ottobre 1990.

Dopo aver terminato il mandato di Rettore Enrico Beltrametti fu molto impegnato, insieme a Maria Luisa Dalla Chiara (Università di Firenze) e ad un gruppo di fisici e logici statunitensi, nella creazione di una nuova società scientifica internazionale che prese il nome di IQSA (International Quantum Structures Association). Questa società nacque nel 1992 ed Enrico Beltrametti ne fu il primo presidente. A tutt'oggi è attiva e vitale.

Nel 1994 Enrico Beltrametti organizzò e diresse, insieme a Jean-Marc Lévy-Leblond (Università di Nizza), una scuola internazionale a Erice denominata Advances in Quantum Phenomena: credo si debba

ricordare che ben tre fra i docenti invitati a questa scuola avrebbero conseguito in seguito il premio Nobel per la Fisica. Fatto che dimostra un certo "occhio" nelle scelte.

Dagli anni novanta in poi, terminato il mandato di Rettore, inizia la collaborazione tra Enrico Beltrametti e il fisico-matematico polacco Sławec Bugajski. Questa è una storia che merita qualche parola in più per essere raccontata. L'amicizia tra i due risaliva agli anni settanta. Bugajski era membro di Solidarność (faceva parte dell'ala laico-libertaria dell'organizzazione). Quando nel 1981 in Polonia fu instaurata la legge marziale Bugajski fu espulso dalla sua Università e internato in un campo di prigionia. In quell'anno Enrico Beltrametti era Direttore della Sezione di Genova dell'INFN, e immediatamente si attivò per aiutarlo, utilizzando canali e contatti resi possibili dalla Direzione Nazionale dell'INFN, che collaborò attivamente. Chi scrive è stato testimone (solo testimone!) degli sforzi per ottenere la liberazione di Bugajski o, almeno, per alleviarne le condizioni di detenzione. Anche quando fu rimesso in libertà non venne riammesso nella sua posizione universitaria (per vivere consegnava il latte). Solo dopo la dissoluzione del regime Bugajski fu reintegrato come professore universitario e poté riprendere la sua attività di ricerca. In particolare, ebbe inizio la sua collaborazione scientifica con Enrico Beltrametti.

Il tema su cui collaborarono è la probabilità non commutativa: costruirono esplicitamente dei modelli di spazi di probabilità con proprietà intermedie tra quelle degli spazi di probabilità classici (Kolmogorov) e gli spazi di probabilità non commutativi della Meccanica Quantistica. Questa collaborazione fu interrotta dalla morte prematura di Bugajski per una forma aggressiva di cancro al polmone.

Gli ultimi lavori scientifici firmati da Enrico Beltrametti sono stati in collaborazione con Maria Luisa Dalla Chiara e Roberto Giuntini (Università di Cagliari) e hanno avuto come tema la computazione quantistica.

Enrico Beltrametti fu collocato a riposo a partire dal 1° novembre del 2008. In seguito fu nominato Professore Emerito.

Muore a Genova il 12 dicembre 2024.

Spero che questa nota possa dare un'idea dei temi dell'attività di ricerca di Enrico Beltrametti. Certamente non può dare nessuna idea della sua grande figura e personalità. È stato un grande gentiluomo, aperto e gentile con tutti, che non ha mai confuso la gentilezza con la debolezza.

**Alberto Blasi***

# *Ricordo di Enrico Beltrametti nel periodo dal 1964 al 1970*

Ho avuto il privilegio e il piacere di conoscere Enrico ancora da studente al mio terzo anno del Corso di Laurea in Fisica e precisamente all'esame orale di Istituzioni di Fisica Teorica tenuto dal prof. Giulio Passatore. Fu Enrico a farmi le domande e ben presto ci trovammo a discutere sui fondamenti della meccanica quantistica. L'anno successivo, al momento di chiedere la tesi di laurea, Enrico e Giunio Luzzatto mi proposero un titolo: "Le rappresentazioni complesse del gruppo di Poincaré". Accettai e iniziò così la mia collaborazione scientifica con Enrico, collaborazione che durò fino al 1970.

Lo scopo della tesi era quello di classificare tutte le rappresentazioni irriducibili del gruppo di Poincaré complesso, che all'epoca era rilevante per le proprietà di analiticità della teoria assiomatica dei campi. Nel cercare di classificare queste rappresentazioni la prima domanda fu quella di sapere a priori di quante "etichette" avevamo bisogno per individuare in modo univoco una rappresentazione. Nella letteratura non c'era risposta per il caso generale; dopo vari tentativi infruttuosi una notte sognai la soluzione. Enrico fu molto cauto all'inizio, ma poi facemmo dei confronti con alcuni casi particolari noti e notammo che funzionava. Lui stesso mi incoraggiò a trovare una dimostrazione che, una volta individuata, si trasformò nel mio primo lavoro scientifico

* già Professore ordinario nell'Università di Genova Alberto.Blasi@ge.infn.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.75-77

scritto con Enrico, che in quella occasione mi insegnò come si stende un articolo scientifico e su quale rivista pubblicarlo.

Questo avveniva alla fine del 1965; all'inizio del 1966 Enrico mi parlò di una sua idea affascinante e cioè studiare come realizzare uno spazio-tempo discretizzato. Se si considera la retta reale, ci sono due proprietà importanti: la prima è l'aritmetica, cioè la possibilità di eseguire le quattro operazioni, e la seconda è l'ordinamento completo, per cui dati due numeri si sa quale è maggiore o se sono uguali. Entrambe le proprietà non sono trasferibili su una retta discretizzata. Enrico proponeva di partire con uno spazio-tempo in cui valesse l'aritmetica. Come spesso accade, la matematica aveva già risolto il problema nella persona di Évariste Galois, un giovanissimo matematico francese che aveva studiato il problema ed era giunto alla conclusione che per avere una struttura aritmetica si doveva scegliere un numero primo "p" e che l'ordinamento valeva solo per una catena di elementi dell'ordine di logaritmo naturale di "p". La prima cosa che Enrico suggerì fu quella di descrivere, se possibile, le rotazioni e le trasformazioni di Lorentz in questo spazio-tempo quadrimensionale, cosa che fu portata a termine con successo nel 1966. Il passo successivo fu costruire gli spinori di Dirac che permise di ottenere le correnti covarianti e interpretare una costante di accoppiamento come la carica elettrica che in questo ambito era "naturalmente" quantizzata.

La pubblicazione di questi risultati suscitò un buon interesse a livello sia nazionale sia internazionale. In Italia permise di iniziare una collaborazione con l'Istituto di Fisica di Milano; nel 1969 fummo invitati da Bryce Dewitt a tenere una serie di lezioni sulle geometrie finite alla Duke University di Chapel Hill.

Dewitt, oltre a essere un noto esperto di relatività, era stato anche un pilota di aerei da caccia e poiché viveva vicino a un piccolo campo di aviazione ci invitò un giorno a fare un giro sul suo biplano. Cominciai io e per dieci minuti volammo con picchiate e cabrate alle quali di sicuro non ero abituato. Arrivati a terra, Enrico vide la mia faccia e cortesemente, ma fermamente, gli disse che non se la sentiva di fare la stessa esperienza.

Nel 1970 terminò la collaborazione scientifica con Enrico ma non la frequentazione. Occasionalmente ci incontravamo ancora per discutere alcuni aspetti delle geometrie finite che Enrico aveva continuato a coltivare.

Voglio concludere con un ricordo di Enrico come uomo e non come scienziato. Sia negli anni della nostra collaborazione che in quelli successivi, in cui siamo stati nello stesso Istituto e poi Dipartimento di Fisica, non ho mai sentito Enrico alzare la voce o parlare sopra le righe anche in situazioni non facili: questa sua pacatezza non era un segno di debolezza, ma di un grande equilibrio interiore. Nei rapporti con gli altri Enrico è sempre stato un grandissimo signore che ha saputo con fermezza mantenere le proprie posizioni.

**Giorgio L. Olcese***

# *Ricordo di Enrico Beltrametti*

Chi mi ha preceduto ha saputo illustrare in modo esemplare l'opera scientifica di Enrico Beltrametti: un lavoro di alto livello internazionale in un settore avanzato della Fisica teorica.

A me spetterebbe ora il compito di testimoniare altri versanti della sua aperta personalità. Potrei, per esempio, citare l'alta considerazione che ebbe per il valore del pensiero politico e dell'attività politica: una convinzione che lo vide sempre cittadino impegnato in una costante osservazione critica di ciò che accadeva nel nostro Paese come nel resto del mondo. Guardando a un altro versante culturale, potrei ricordare la perfetta complicità e intesa con cui seguì la cara moglie Elita nell'attenzione alle problematiche e alle tendenze (spesso trasgressive) dell'arte contemporanea. Da questa passione nacque anche una collezione, che resta come un documento del nostro tempo.

Tuttavia, seguendo il filo conduttore di questa seduta accademica, preferisco non cedere a ricordi quasi confidenziali per soffermarmi piuttosto su alcuni aspetti peculiari del ruolo pubblico di Enrico Beltrametti: la sua attività istituzionale di docente e l'incarico di Rettore.

Tenere un corso di lezioni o fare un ciclo di conferenze non fu mai per lui soltanto un'occasione per comunicare, in un tempo ristretto, le conoscenze conquistate dall'annoso lavoro di molti studiosi: una sem-

* Accademico, già Prorettore del Rettore Beltrametti nell'Università di Genova
giorgioluigiolcese@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.79-83

plice esposizione potrebbe certamente risultare erudita, ma rischierebbe anche di essere arida o poco penetrante. Egli pensava che una lezione, per essere feconda, deve saper provocare lo spirito critico dei fruitori e, insieme, trasmettere loro scintille di passione che li entusiasmino, facendoli sentire intelligenti e capaci di entrare nelle strade complesse (talvolta anche oscure) di una disciplina scientifica.

Per ottenere tale risultato occorre certamente possedere buone doti. Ma ciò non basta, così come, in un altro campo, l'essere dotati d'una bella voce non è condizione sufficiente per essere un buon attore. Occorre molta ricerca espressiva. Bisogna riuscire a scrutare umilmente la situazione degli ascoltatori, considerando con molto rispetto le loro aspettative ed esigenze. Questo seppe sempre fare Beltrametti e, da ciò, nacque il fascino della sua parola.

Una seconda osservazione mi viene considerando il modo in cui Enrico Beltrametti accettò di svolgere, durante due mandati consecutivi, il compito di dirigere il nostro Ateneo.

La cappa di ermellino che porta sulle spalle il Rettore è un ornamento indice del suo prestigio e segno di potere, ma è anche piuttosto pesante. Comporta, infatti, una dedizione costante e attenta alla risoluzione tanto di essenziali problemi organizzativi, quanto di difficili questioni finanziarie e di bilancio, oltre a richiedere una responsabile programmazione di linee di sviluppo adeguate alle sempre nuove e complesse esigenze culturali del territorio e del tempo.

L'Università è un organismo antico, che non può mai essere vecchio. Anzi, è una realtà in continuo stato adolescenziale, di sviluppo e di avanguardia, con le relative difficoltà e incertezze.

Enrico Beltrametti, con il suo rigore razionale di fisico teorico, con l'entusiasmo della sua passione civile, con la sua pacata fermezza morale riuscì a svolgere il massimo incarico universitario con piena efficacia e trasparenza.

Sarebbe lungo ripercorrere qui la traiettoria del suo rettorato. Tuttavia, per non limitarmi ad affermazioni generiche, voglio fare alcuni esempi che, pur nei loro limiti, possono lumeggiarne le linee guida.

Il primo riguarda la felice conclusione a cui Beltrametti portò la vicenda post bellica di Villa Hanbury, il famoso giardino botanico ideato (uno dei pochi al mondo) per lo studio sperimentale dell'adattamento fisiologico di piante esotiche a un clima diverso da quello della

loro origine. Creato nella seconda metà dell'Ottocento da Sir Thomas Hanbury, un ricco mercante di t*è*, il Giardino (oasi privata di proprietà inglese nell'estremo Ponente ligure), durante la Seconda guerra mondiale che ci vide schierati contro l'Inghilterra, dovette essere abbandonato dagli eredi del fondatore e cadde in profondo degrado.

Alla fine del conflitto, dopo varie vicissitudini, nel 1960 i proprietari lo vendettero allo Stato italiano, che lo affidò inizialmente all'Istituto Internazionale di Studi Liguri e successivamente, in via provvisoria, al nostro Ateneo. Scaduti i termini di tale seconda fase, verso la fine degli anni ottanta, il definitivo rinnovo dell'affidamento all'Università di Genova dell'importante Istituzione rischiò seriamente di naufragare a seguito della sollevazione di pretestuose, controverse e personalistiche macchinazioni interne all'Ateneo, le quali comportarono forti tensioni anche con gli Enti che, in base alle condizioni di vendita, avevano diritto di partecipare alla conduzione scientifica del Giardino e cioè la famiglia Hanbury e la Royal Horticultural Society di Londra. Perfino il Governo inglese presentò, per le vie diplomatiche, una interrogazione al nostro Governo. Nella complessa vicenda si inserirono anche aspirazioni all'affido del Giardino da parte di altre sedi universitarie, tra cui quella francese della vicina Nizza. Il Rettore, con un esemplare esercizio di faticosa pazienza, di intelligente azione diplomatica e con pacata fermezza scientifica riuscì a sciogliere ogni nodo, riconsolidò il prestigio del nostro Ateneo e, nel 1987, ottenne l'affido di Villa Hanbury in via definitiva all'Università di Genova.

La seconda vicenda che voglio ricordare riguarda il nuovo insediamento universitario creato, su progetto dell'illustre architetto Ignazio Gardella, all'interno dell'antico *castrum* di Genova, ormai devastato dagli eventi bellici. La costruzione di alto prestigio architettonico fu pensata e realizzata come nuova sede della Facoltà di Lettere. Tuttavia, terminato il suo allestimento, il Rettore si trovò di fronte a un irrevocabile e imprevisto rifiuto della stessa Facoltà a trasferirsi nella nuova sede, preferendo restare nei palazzi storici di via Balbi, seppure allora non del tutto adeguati alle esigenze della Scuola (essendo nati come dimore aristocratiche), per di più ancora parzialmente di proprietà privata e, quindi, gravati da pesanti spese di affitto.

Dopo vari tentativi di mediazione, preso atto dell'immobilità della situazione, il Rettore Beltrametti accettò democraticamente la risoluzio-

ne della Facoltà, ma, risoluto a non sprecare il grande sforzo compiuto dall'Ateneo, decise, con intuizione illuminata e autorevole, di assegnare il nuovo complesso alla giovane Facoltà di Architettura, allora ospitata nella sede di Ingegneria. Ciò richiese naturalmente l'attuazione di varie modifiche strutturali agli edifici per adeguarli alle specifiche esigenze della nuova destinazione e comportò anche il superamento d'una certa iniziale resistenza di chi esitava a passare, come fu detto, "dalla nobile Albaro alla plebea Sarzano". Tuttavia tale risoluzione, abbracciata con entusiasmo dal Preside Edoardo Benvenuto, a partire dal 1990 non solo diede un nuovo e prestigioso assetto alla Facoltà di Architettura, ma contribuì al risanamento e alla rivitalizzazione d'una importante zona del centro storico genovese, così recuperata dal degrado.

Voglio, infine, citare uno "strascico" del rettorato di Beltrametti che ci porta a tempi molto più vicini all'attualità.

Negli anni settanta del secolo passato l'Istituto Brignole, comunemente chiamato Albergo dei Poveri, dopo tre secoli d'attività fu svuotato dall'originaria funzione, decretando l'inevitabile decadimento di una struttura monumentale ricca di opere d'arte e con caratteristiche comuni ad altre coeve ben note come l'Hôpital de la Charité di Lione e l'Hôtel des Invalides di Parigi. Fin da quel momento fu ventilata l'idea di un possibile interesse per l'importante edificio da parte della nostra Università, ma nessun atto fu promosso per lo studio di tale eventualità. Fu Enrico Beltrametti il primo Rettore a porre, oltre un decennio dopo, le basi per creare nuovi insediamenti umanistici nell'antico Albergo dei Poveri, provocando la costituzione di una commissione di studio e di contrattazione fra Università, Istituto Brignole e Comune di Genova. Conosco bene la vicenda, avendo avuto la delega a rappresentare il Rettore in tale fase contrattuale, la quale si concluse nel 1990 (alle soglie della fine del secondo mandato rettorale di Beltrametti) con la firma di un accordo per l'ingresso graduale dell'Università nella struttura, previa l'esecuzione dei necessari adeguamenti, nel completo rispetto dell'integrità delle parti monumentali e artistiche del complesso. Io stesso illustrai e consegnai la documentazione di tale accordo al nuovo Rettore. Tuttavia l'intesa non ebbe attuazione durante il decennio seguente, finché, ripresa nel 2001, portò, finalmente alla concessione operativa dell'Albergo dei Poveri all'uso universitario, dando così attuazione postuma alla linea già disegnata da Beltrametti.

Ora mi resta una domanda.

Come Enrico Beltrametti poté uscire dal suo guscio di fisico teorico puro, dalla sua pacata e signorile riservatezza (che lo vide sempre piuttosto portato ad ascoltare gli altri che a imporre il suo pensiero) per svolgere il ruolo di Rettore con entusiastica dedizione, con illuminata e personale autorevolezza e sempre con trasparenza? Quale fu la sorgente del suo coraggio?

La risposta è semplice.

Lo guidò un suo forte principio morale. Non volle essere soltanto un uomo di potere, bensì una persona *al servizio* dell'Istituzione.

Essere al servizio è pesante, spesso poco gratificante, anzi persino oggetto di ostilità da parte di poteri oscuri. Tuttavia è bello perché è giusto. Dunque è anche doveroso.

Ho voluto sottolineare questa lezione di Beltrametti non solo per rendergli onore, ma per consegnare il suo ricordo ai giovani, come si butta un seme nel terreno fertile.

Spero che, guardando al suo esempio, i giovani si innamorino dello spirito di servizio, ciascuno nel suo particolare ruolo e con le sue competenze.

Mettersi al servizio è faticoso, ma è bello perché è il modo concreto che abbiamo per tentare di migliorare la nostra società e contrastarne il degrado.

# SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE, NATURALI E MEDICHE

# Incontri di studio

LA LIGURIA E IL MARE

ottobre-novembre 2025

*Con il patrocinio di*

REGIONE LIGURIA

COMUNE DI GENOVA

Università di Genova | Centro del Mare

Camera di Commercio Genova

Genova Palazzo Ducale

Stazione Zoologica Anton Dohrn Genova

MSCFOUNDATION

*Con il contributo di*

MINISTERO DELLA CULTURA

fondazione CARIGE

FONDAZIONE ACQUARIO DI GENOVA ONLUS

## 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@accademialiguredischienzeelettere.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.93-94

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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.95-109

*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 (Arkhipkin 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 tonnarella; 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 tonnarella, 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 invise 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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.111-127

*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 (Garrabou *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 sponginolitici 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 espresse 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 "labourent 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*. Biogeographya – 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., Meliadò 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., Teixido 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-Escolà 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 combing 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., Froglia C., Siokou I., Violanti D., Sfriso A., San Martìn 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 subìto 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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.129-143

*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.

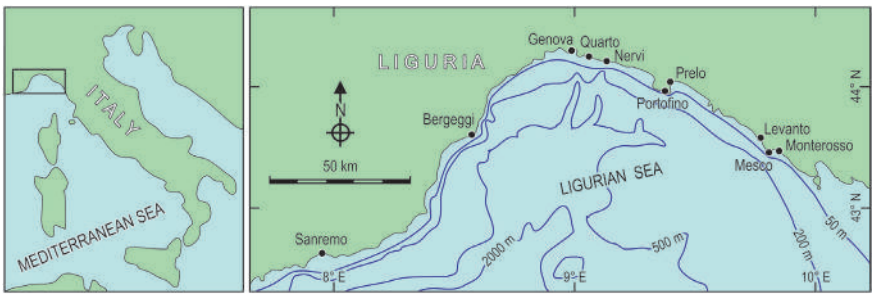



Figure 1. *Geographical position of Liguria in Italy, with the locations of the sites mentioned in the text.*

## 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).

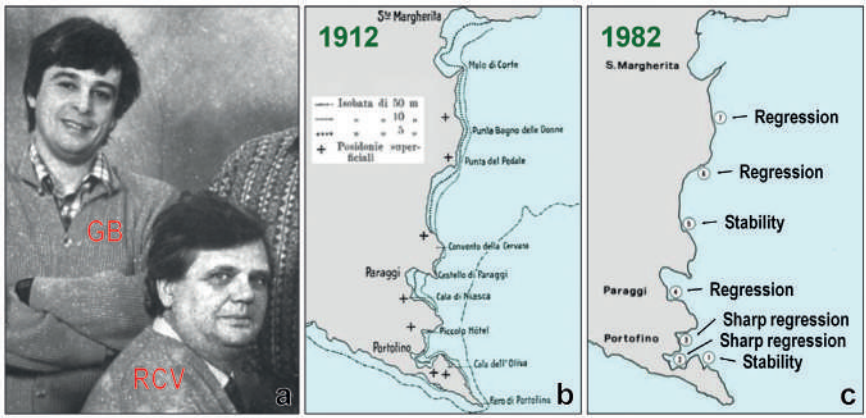



Figure 3. *Revisitation after 70 years of the* Posidonia oceanica *meadows along the eastern side of the Portofino Promontory first studied by Raffaele Issel: a) Giorgio Bavestrello (GB) and Riccardo Cattaneo Vietti (RCV); b) the Issel's map of 1912; c) results of Bavestrello's investigations in 1982.*

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

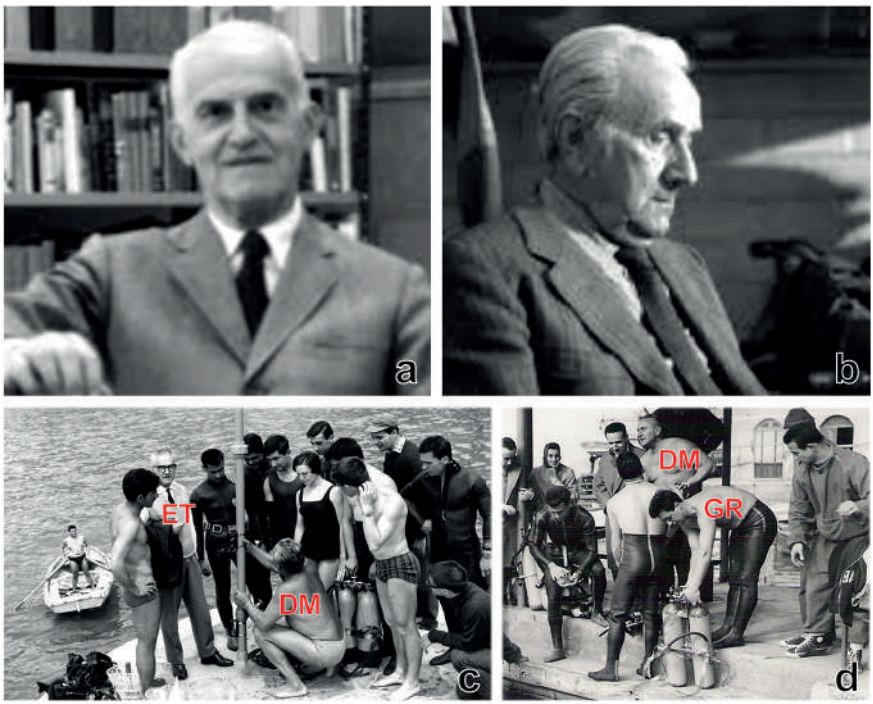



Figure 4. *The protagonists of an ante litteram citizen science approach to studying the marine biology of the Ligurian Sea in the late 1950s - early 1960s: a) Enrico Tortonese (1911-1987); b) Duilio Marcante (1914-1985); c) Tortonese (ET) giving instructions to the divers of Marcante (DM) on a pier; d) Marcante (DM) and Gianni Roghi (GR) among other divers at the* Centro Subacqueo Mediterraneo *of 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 $m^2$ 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

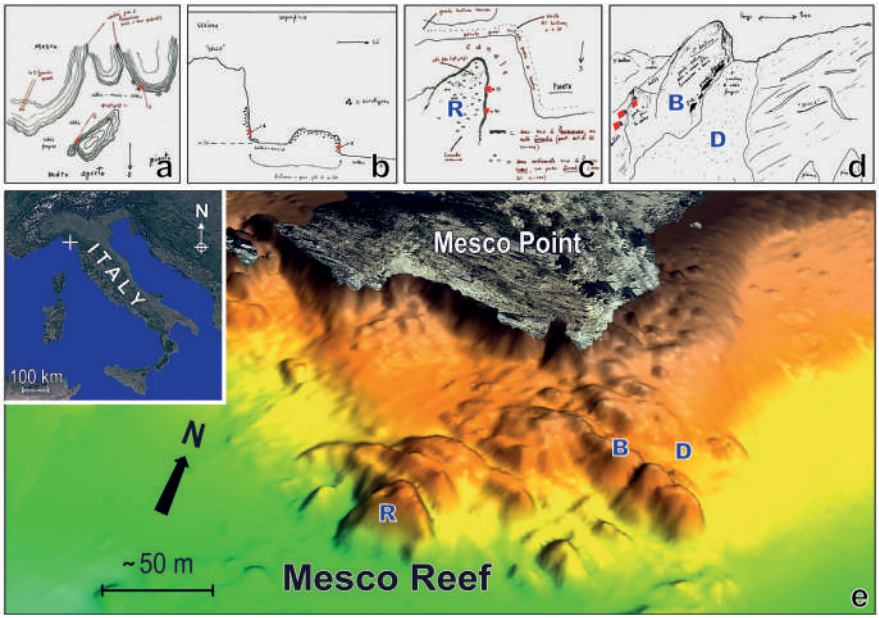



Figure 6. *Topography of the Mesco Reef in the Roghi's sketches of 1961-62 and in a recent rendering: a) schematic plan; b) section; c) detail of the southern end of the reef; d) perspective view of the south-eastern part; e) digital elevation model obtained from a multibeam survey. Inset: location of 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 $m^2$ 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.) Delile 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.). *Liguria 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., Bavestrello 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., Montefalcone 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 Mediterranean 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:* Posidonia 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 century 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: Research 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 Liguria; 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 Levanto (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 strutturanti 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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.145-160

## 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 circalitorale, 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 km$^2$, 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).

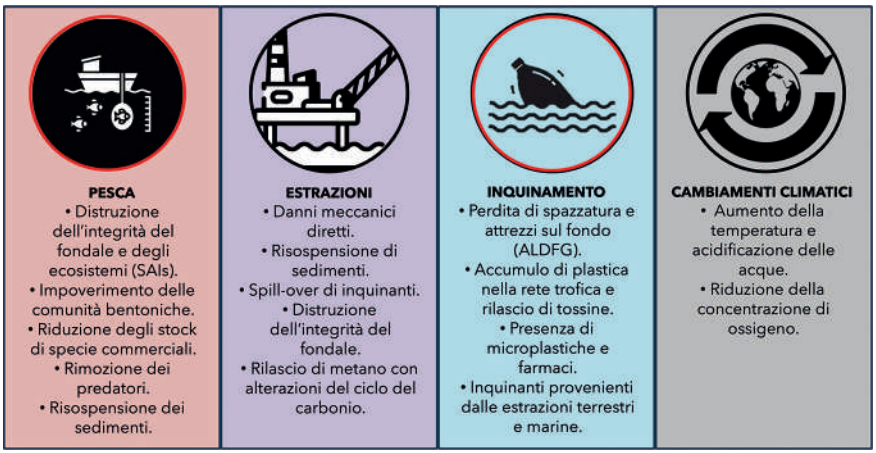



Figura 1. *Principali pressioni antropiche nel* deep sea.

- 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 rovinate) 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 pescata, 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 pescata), 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 madrepore 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

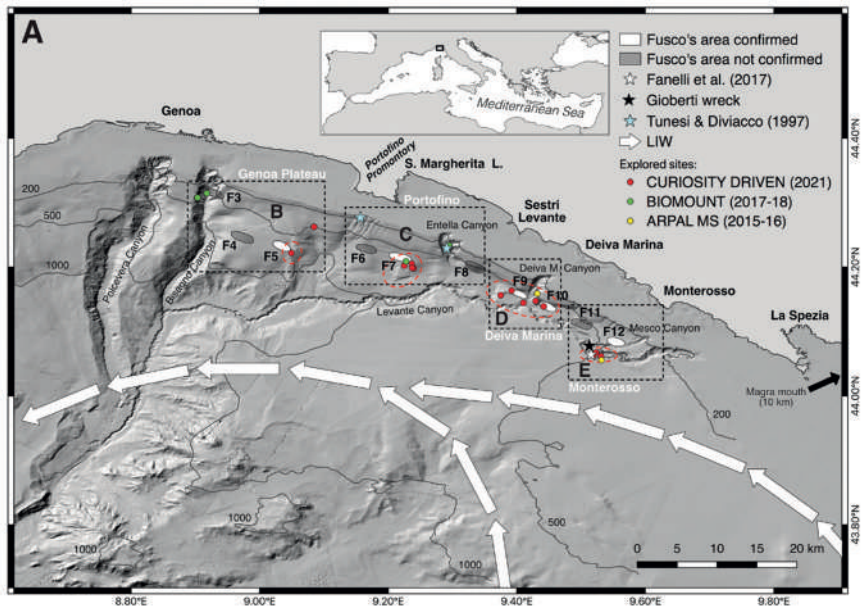



Figura 2. *Aree a coralli bianchi del Levante ligure.*[18]

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 pristine 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

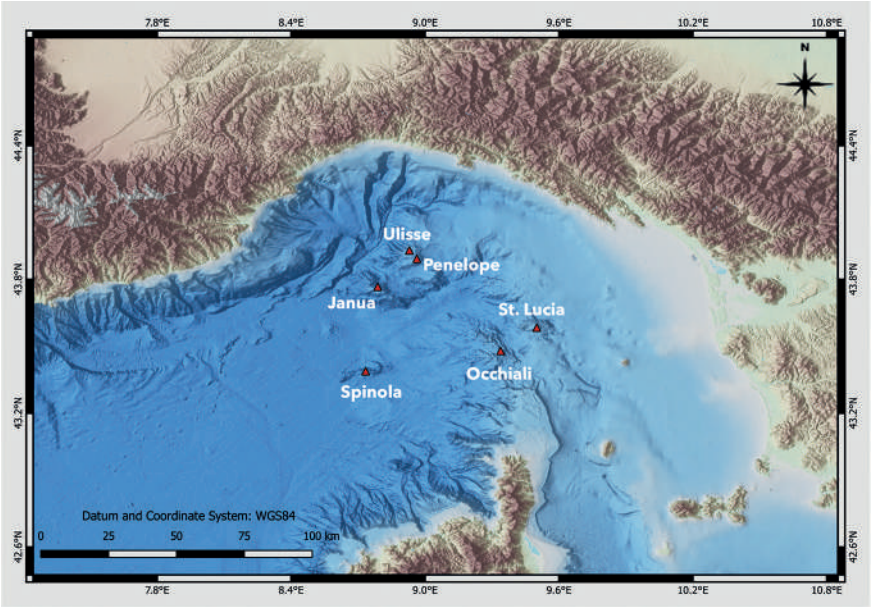



Figura 3. *I monti sottomarini della Liguria.*

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 arborescenti 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., Fraschetti 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 bentique 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 "Nicoloso 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@costaedutainment.com
** Università di Genova tomaso.gaggero@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.161-188

## 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.

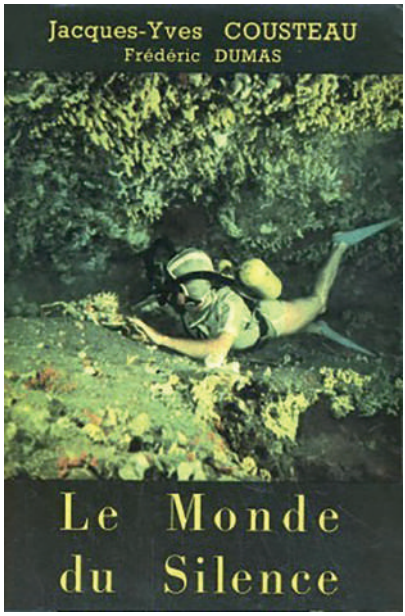



Figura 1. *La copertina della prima edizione del volume* Le Monde du Silence.

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.

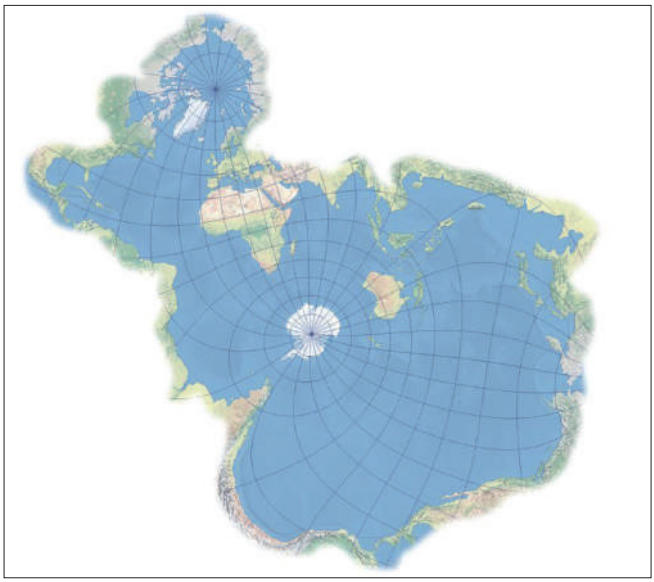


Figura 2. *Visione d'insieme delle acque oceaniche che mostra l'assoluta interconnessione in qualunque parte del pianeta, ottenuta con la connessione di Spilhaus del 1942 (Spilhaus 1991).*

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 macrocefalus*) 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 monossili, per via dell'urto del legno del remo sullo scafo, anch'esso di legno. La prima piroga monossile 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 Guajarat 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

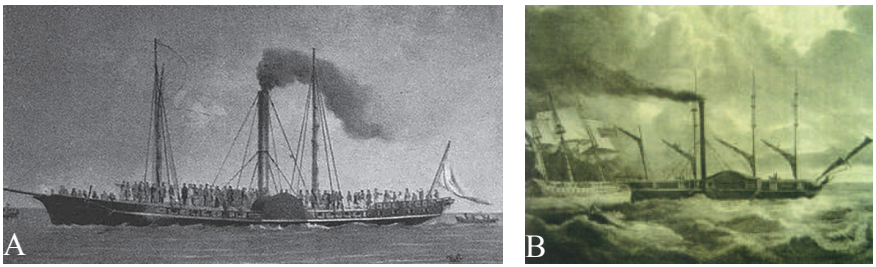



Figura 3. *A) Piroscafo* Real Ferdinando *(poi* Ferdinando I*, 1818); B) Nave da battaglia a motore* Karteia*, 1825.*

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 *Nordernfelt 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'innesco 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

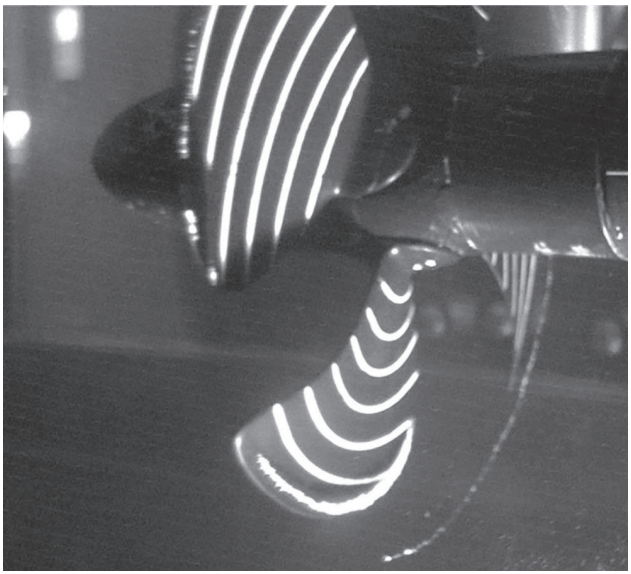


Figura 4. *Visualizzazione di cavitazione in scala modello (Traverso* et al. *2017).*

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 1μPa. 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

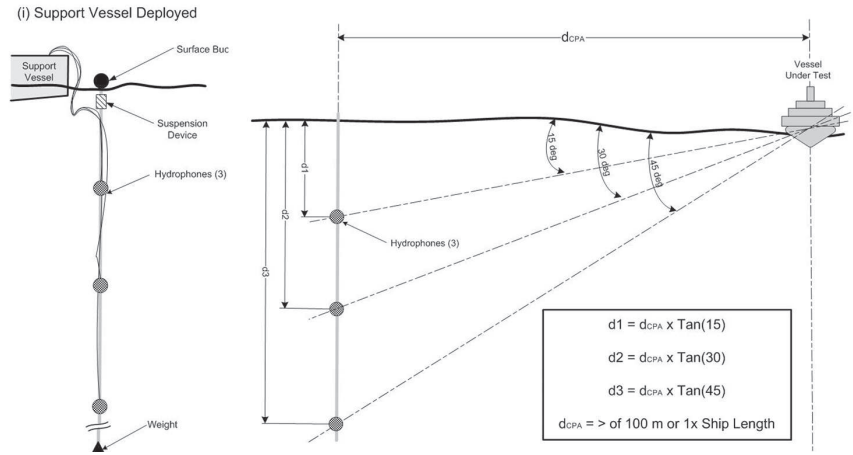



Figura 5. *Cortina idrofonica calata da barca appoggio (*ANSI/ASA, "ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1).

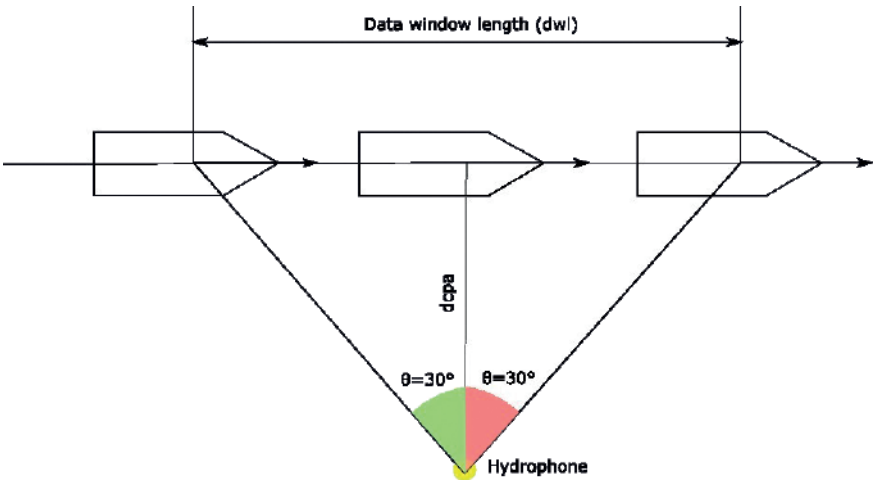



Figura 6. *Vista dall'alto dello schema di misura per rumore irradiato*.

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-

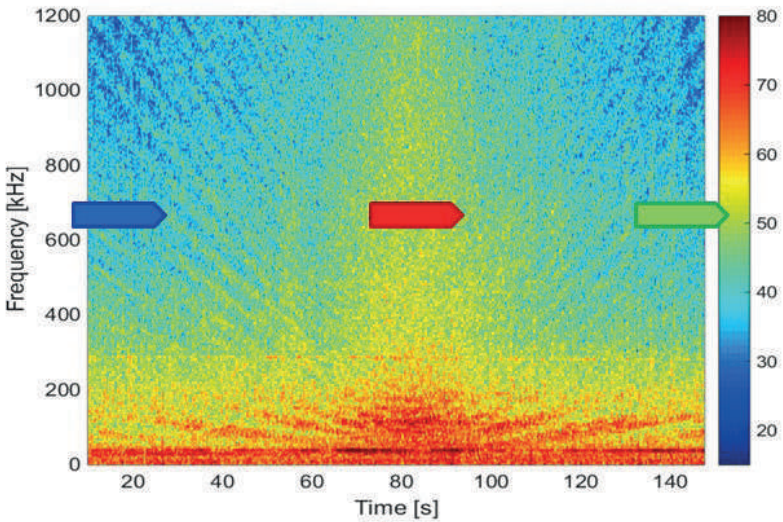



Figura 7. *Esempio di spettrogramma di rumore irradiato per un passaggio nave.*

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

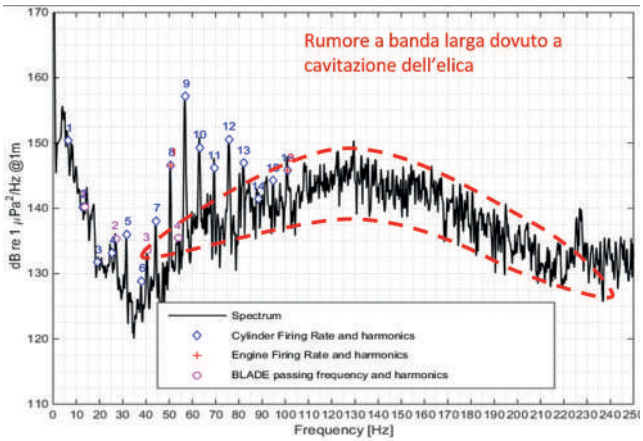



Figura 8. *Esempio di densità spettrale di potenza del rumore sottomarino irradiato da una nave.*

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

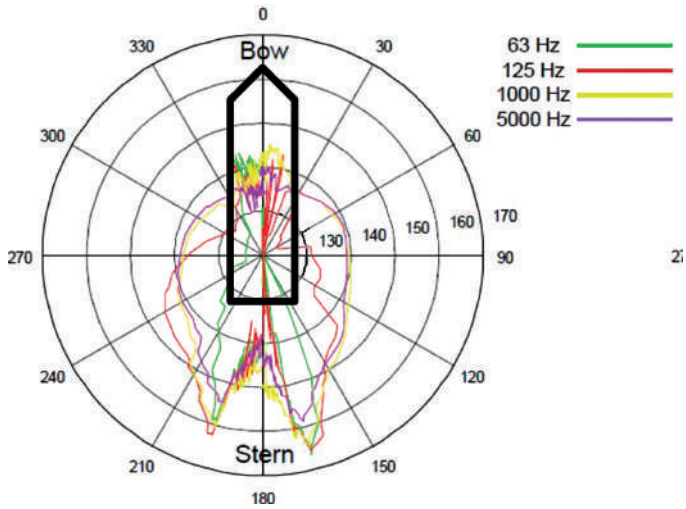



Figura 9. *Diagramma di direttività orizzontale del rumore irradiato da una imbarcazione da pesca.*

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

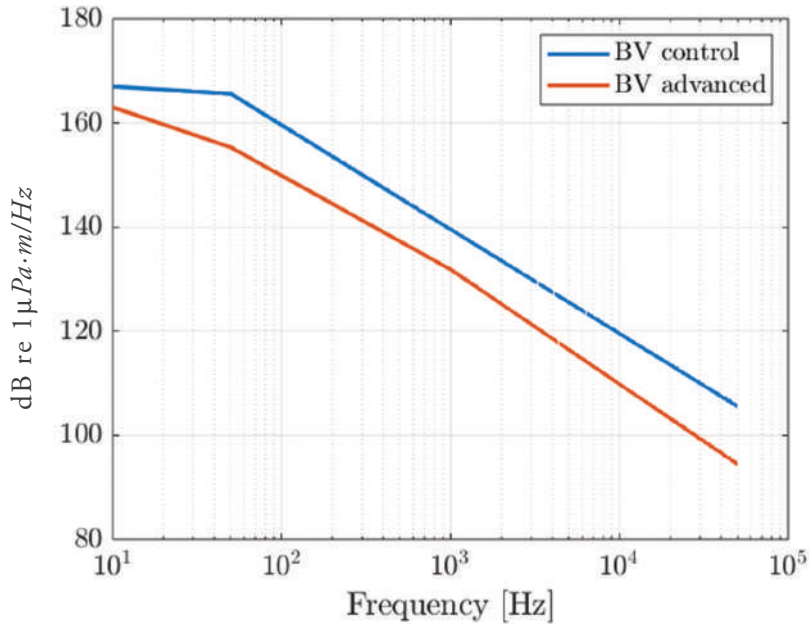



Figura 10. *Curve limite per il rumore irradiato suggerite dal Bureau Veritas.*

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.*

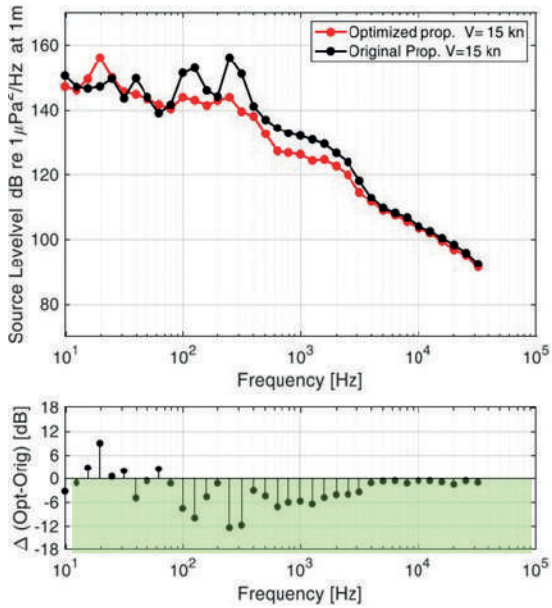



Figura 12. *Confronto della rumorosità di* Primero VII *con eliche originali ed eliche ottimizzate (Gaggero* et al. *2025).*

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 Misticeti 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. ATOC[1] 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.*

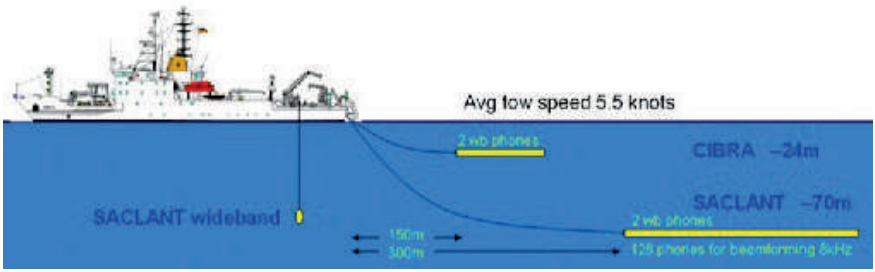



Figura 14. *Rappresentazione schematica delle attrezzature acustiche subacquee passive utilizzate per valutare i comportamenti dei cetacei durante le campagne NATO SOLMAR e SIRENA.*



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 tunnidi, 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 (UNSFA), 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 whale*s. 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., Rodrıguez F., Espinosa de los Monteros A., Herraez P., Castro P., Jaber J.R., Martın 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 chiav**e: 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.

[*] Accademica candiani@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.189-200

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).

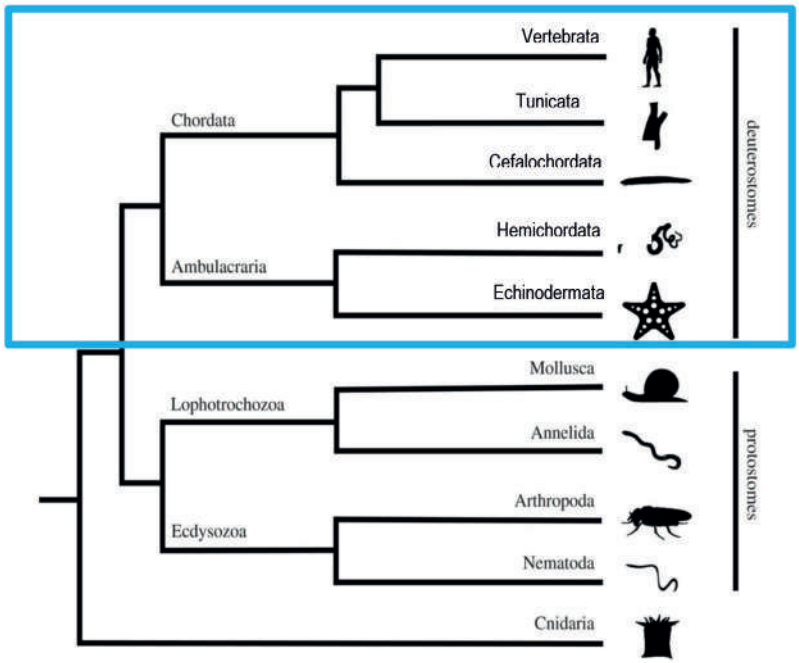



Figura 1. *Albero filogenetico rappresentativo degli organismi protostomi e deuterostomi oggetto del nostro studio.*

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).

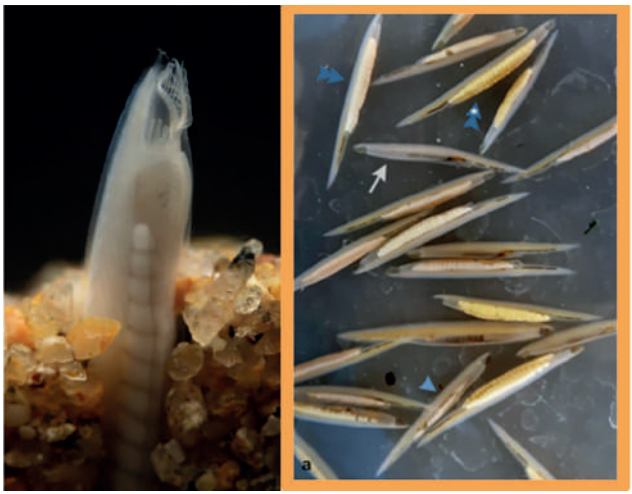


Figura 2.
*Sulla sinistra immagine di un anfiosso adulto infossato nella sabbia; sulla destra individui maschi e femmine fertili con gonadi gialle/biancastre.*

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 altra 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.

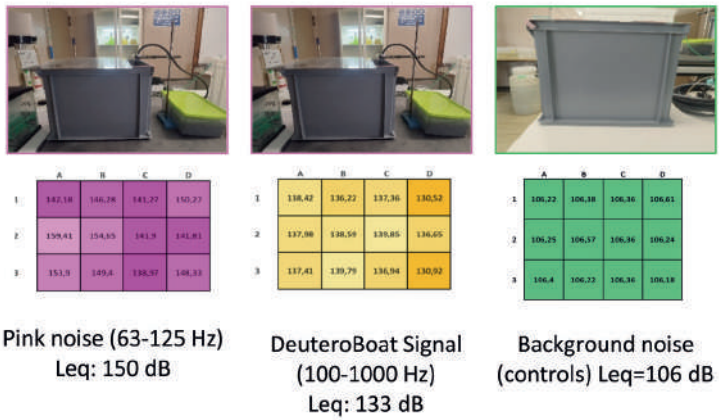



Figura 3. *Set up sperimentale delle vasche utilizzate e tracce sonore applicate con i dB percepiti nelle tre vasche e nei diversi punti. Leq = media dei dB.*

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).

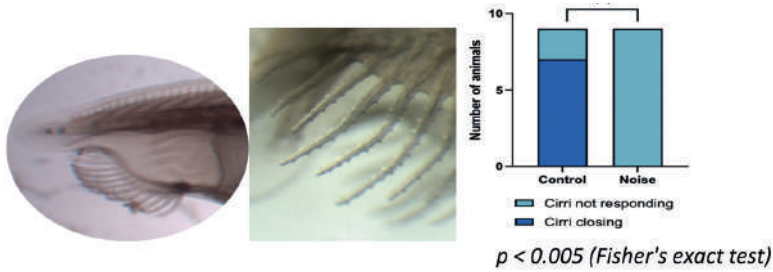



Figura 4. *Parte anteriore di un adulto di anfiosso mostrante la parte orale circondata da tentacoli, con un'immagine ingrandita che mostra delle estroflessioni corrispondenti ai cirri boccali dove si ritrovano le cellule sensoriali. A destra un istogramma mostrante l'effetto del rumore sulla risposta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

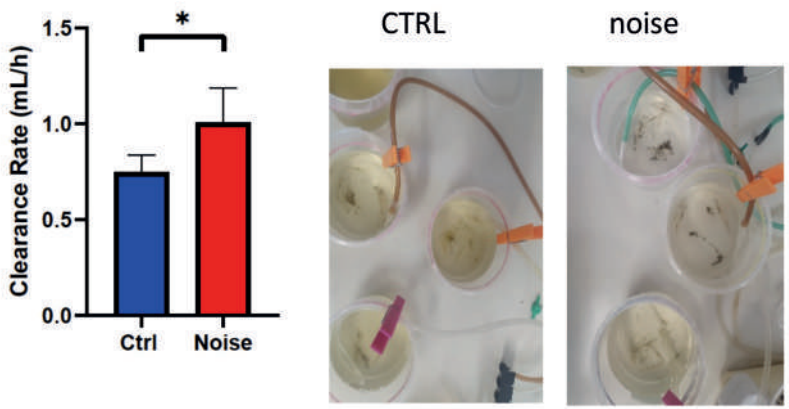



Figura 5. *Capacità di filtrazione (clearance rate espressa come mL/h) negli animali di controllo ed esposti al rumore.*

liquido più limpido, indicativo di una maggiore attività di filtrazione. La quantificazione del tasso di filtrazione (clearance rate) conferma infatti che gli anfiossi 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 glutatione 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

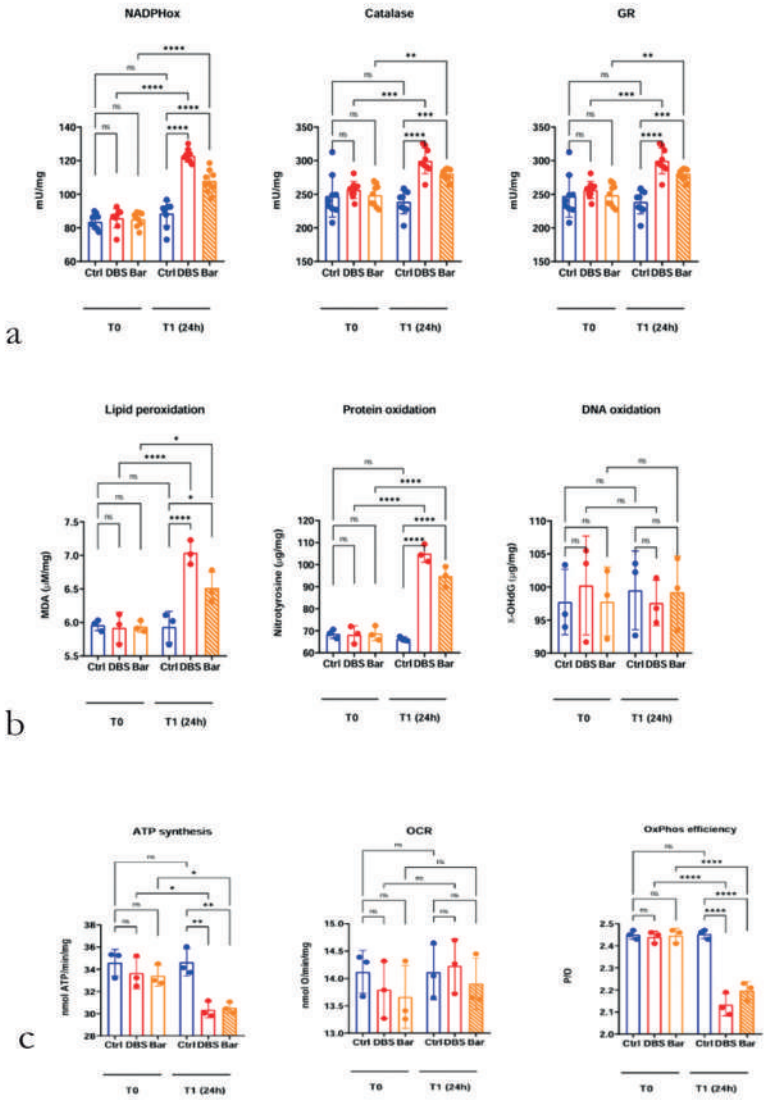



Figura 6. *(a) analisi biochimiche per enzimi ossidanti (NADPH e catalase) e prossidanti (GR, glutatione reductasi); (b) perossidazione lipidica, ossidazione proteica e danno al DNA; (c) sintesi di ATP, consumo di ossigeno (OCR), ed efficienza della fosforilazione ossidativa (OxPhos).*

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.

**Paola Rivaro**[*] **– Emanuele Magi**[**]

# *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

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.201-213

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 costa[1].

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 nanomateriali[2].

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 ecologico[2].

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 occorrano 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 ambientale[3].

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 bioindicatori[4]. 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).

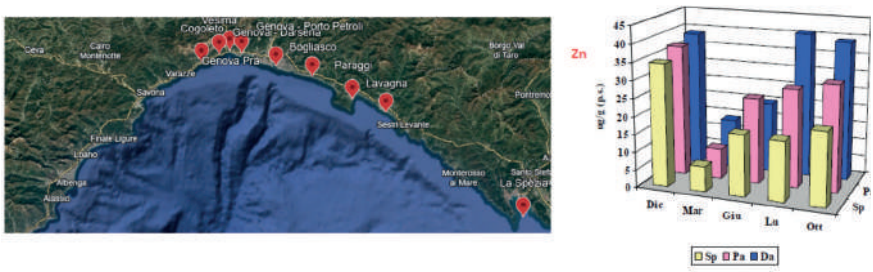



Figura 1. *Mappa dei siti di campionamento del progetto "Mussel Watch" a cui ha preso parte il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale e variazione della concentrazione dello zinco (Zn) in diversi mesi in tre siti di riferimento (Sp = La Spezia; Pa = Paraggi; Da = Genova darsena).*

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 Genova[5].

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, ossidrile, acetato ecc.)[6].

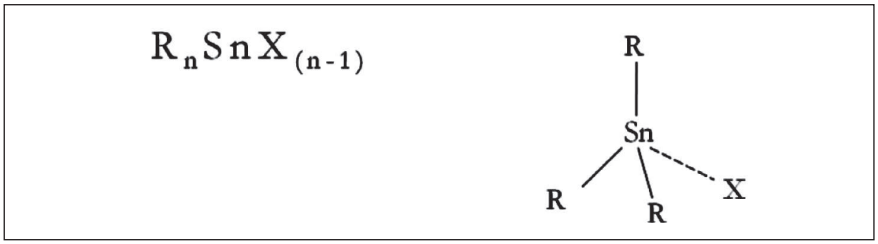



Figura 2. *Formula generale e di struttura dei composti organostannici. R: gruppo alchilico (es. metil-, butil-, cicloesil-) o arilico (es. fenil-); X: gruppo anionico (es. cloruro, floruro, ossido, ossidrile, acetato, carbonato ecc.) (da Blunden e Evans 1990[6]).*

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).

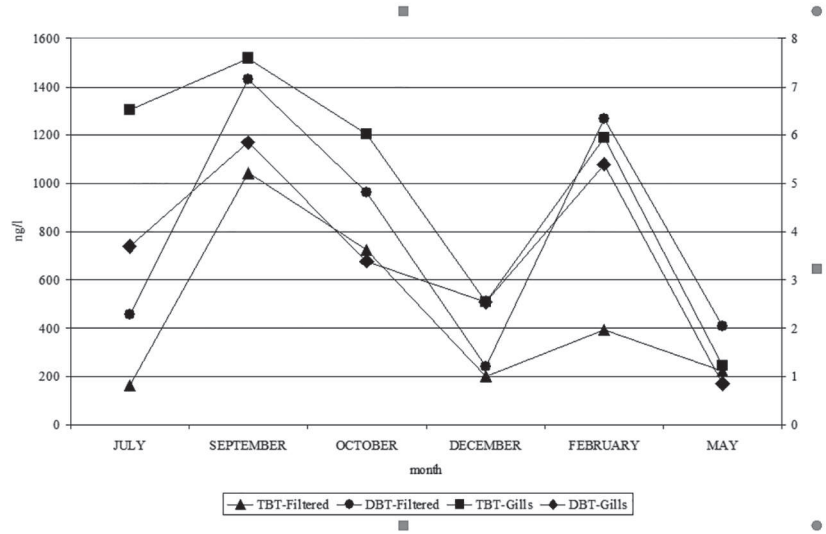



Figura 3. *Confronto tra l'andamento dei livelli di tributilstagno e dibutilstagno nei campioni di acqua di mare filtrata (TBT filtered e DBT filtered) e l'andamento dei livelli di tributilstagno e dibutilstagno (TBT gills e DBT gills) riscontrato nelle branchie dei mitili stabulati nel porto petroli 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 recente[8] 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 ricerca[9-12], 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 perfluoroottanoico (PFOA), carbamazepina (CARB), acido perfluoroottansulfonico (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 campionatore 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 estrogenico[13]: 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 trattamento 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 precedente[14].

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

# Relazioni e contributi

**Andrea Bacigalupo***

# *Terapie cellulari avanzate in ematologia e oltre*

**Sommario**: Verranno brevemente descritte le tappe fondamentali della terapia cellulare a partire dagli anni cinquanta del secolo scorso, con l'impiego di cellule da midollo osseo, sino alle attuali manipolazioni cellulari e all'ingegneria genetica che rappresentano le nuove frontiere cliniche non solo in ematologia ma anche in reumatologia, gastroenterologia, neurologia, dermatologia e sperabilmente, in un futuro prossimo, anche in diabetologia.

**Parole chiave**: terapia cellulare; cellule del midollo osseo; trapianti allogenici e autologhi; ematologia; ingegneria genetica.

**Abstract**: *Advanced Cell Therapies in Hematology and Beyond*
The fundamental stages of cell therapy will be briefly described, starting from the 1950s, with the use of bone marrow cells, up to the current cell manipulations and genetic engineering that represent the new clinical frontiers not only in hematology but also in rheumatology, gastroenterology, neurology, dermatology and hopefully, in the near future, also in diabetology.

**Keywords**: cell therapy; bone marrow cells; allogenic and autologous transplants; hematology; genetic engineering.

* Accademico andrea.bacigalupo@unicatt.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.217-222

*L'inizio: 1950*

La terapia cellulare nasce negli anni cinquanta, con l'impiego di cellule da midollo osseo, per ricostituire la emopoiesi in topi sottoposti a irradiazione totale corporea (*total body irradiation*, TBI). La TBI era stata impiegata negli animali, fin dal 1945, per mimare gli effetti ritardati della bomba di Hiroshima, ovvero la distruzione nell'uomo del sistema emopoietico. Una dose di 6-8 Gy (Gray, unità di misura per la dose assorbita di radiazioni ionizzanti) provoca nel topo una aplasia irreversibile, seguita da decesso per infezioni o emorragia. La dose letale di radioterapia è diversa a seconda della specie animale. I topi impiegati nei primi esperimenti erano singenici (ovvero geneticamente identici) e la ricostituzione ematologica rapida e completa; in pratica l'animale viene sottoposto a TBI, il giorno dopo vengono iniettate, per via endovenosa, cellule midollari da donatore sano singenico, e in 2-3 settimane si ottiene la ricostituzione ematologica completa.

*La malattia trapianto contro ospite nel topo*

Dirk Van Bekkum, lavorando al Rijks Instituut di Rotterdam, ha descritto per primo nel topo la cosiddetta malattia secondaria. Questa si manifesta quando il donatore di midollo sano non è singenico, e differisce dal ricevente per uno o più geni. Si scopre il sistema maggiore di istocompatibilità, che determina l'attecchimento di un impianto cutaneo, e anche di un impianto di cellule midollari.

Van Bekkum chiama questa malattia *Graft versus Host Disease* (GvHD) o malattia del trapianto contro l'ospite, e colpisce la cute, il fegato e l'intestino del ricevente.

La severità della GvHD dipende dal numero di linfociti presenti nell'inoculo midollare, e anche dal grado di isto-incompatibilità. Quindi la GvHD è determinata da numero di cellule linfoidi del donatore infuse al ricevente, e dal grado di differenza tra donatore e ricevente. Ma stiamo sempre parlando dell'animale e siamo già alla fine degli anni cinquanta.

*Gli anni sessanta. Primi trapianti di midollo (BMT) nell'uomo, si scopre HLA*

I primi trapianti di midollo nell'uomo sono stati eseguiti in gemelli singenici, con qualche successo negli anni cinquanta del secolo scorso. Ma appena ci si è spostati dal gemello al fratello (quindi con differenze), sono venute complicazioni letali, le stesse descritte da Van Bekkum nel topo. I linfociti del donatore provocavano danno cellulare nella cute, nel fegato e nell'intestino, e conseguente morte del paziente. Negli anni sessanta vengono scoperti i fattori (gli antigeni) che provocano questa reazione, e sono chiamati HLA (*human leukocyte antigen*). Alla scoperta contribuiscono in modo significativo Ruggero Ceppellini (Torino), Jan van Rood (Leiden) e Jean Dausset (Parigi) – solo quest'ultimo riceverà il Nobel nel 1980.

*Un milione di trapianti nel mondo e i grandi cambiamenti*

La figura 1 mostra l'incremento dei trapianti che raggiunge la cifra di un milione in tutto il mondo, nel 2013.

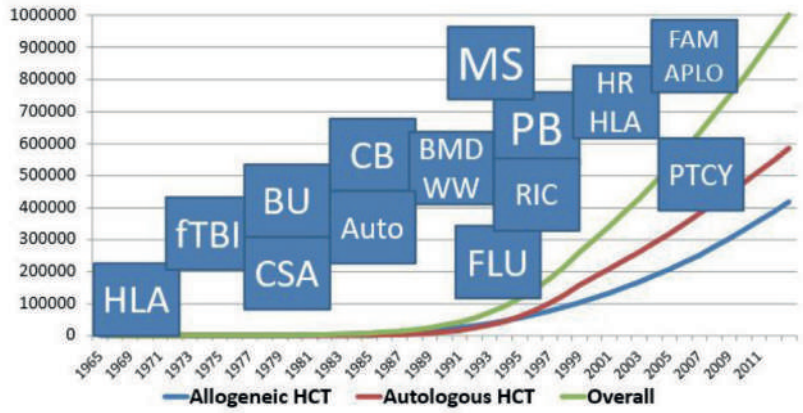



Figura 1. *Numero stimato di trapianti globali allogenici e autologhi (dati da WBMT, Worldwide Network for Blood and Marrow Transplantation). In verde il numero totale di trapianti, in rosso i trapianti autologhi (dove il donatore è il paziente stesso), in blu i trapianti allogenici (dove il donatore è un familiare o un non consanguineo). Le aree blu rappresentano le scoperte in questi 50 anni.*

- *HLA, human leucocyte antigen*: questa scoperta ha reso possibile la identificazione di un fratello HLA identico, ma anche di un donatore fuori HLA identico, al di fuori della famiglia.
- *fTBI, fractionated total body irradiation (irradiazione totale corporea frazionata)*: la TBI, che inizialmente veniva somministrata in singola dose, viene frazionata in 3 giorni. Lo scopo è uccidere le cellule leucemiche prima del trapianto, riducendo il danno ai tessuti del paziente; questo protocollo, definito condizionamento, può essere di diversa intensità, a seconda della malattia e del carico tumorale del paziente.
- *BU, busulfano*: un farmaco anch'esso usato per uccidere cellule leucemiche prima del trapianto; ha il vantaggio che non necessità dei macchinari per erogare l'irradiazione totale corporea.
- CSA, ciclosporina: viene scoperta casualmente nei laboratori della Sandoz (doveva essere un anti-fungino); un significativo passo in avanti nella prevenzione della GvHD.
- *CB, cord blood (sangue cordonale)*: negli anni ottanta si scopre che il sangue cordonale contiene cellule staminali e può essere impiegato come sorgente per trapianto; il primo trapianto viene eseguito a Parigi da Eliane Gluckman, con cellule fornite dagli Stati Uniti (Hal Broxmeyer) con un volo speciale.
- *Auto, trapianto autologo*: John Goldman a Londra (Hammersmith Hospital) scopre che si possono utilizzare cellule staminali autologhe (quindi del paziente stesso) per curare la leucemia mieloide cronica.
- *BMDWW, bone marrow donors world wide (donatori di midollo di tutto il mondo)*: è la creazione più importante di Jan van Rood, il quale riunisce nella sua banca del sangue di Leiden tutti i Registri Nazionali esistenti (UK, F, I, DE, USA ecc.). Oggi questo registro planetario contiene oltre 45.000.000 di donatori e oltre 500.000 di unità di sangue cordonale. Un progetto che consente 30-40.000 trapianti da donatore non consanguineo/anno.
- *FLU, fludarabine*: il gruppo di Massimo Martelli a Perugia inserisce nel condizionamento la fludarabina, farmaco immunosoppressivo molto efficace.
- *PB, peripheral blood (sangue periferico)*: con l'uso di fattori di crescita (come il GCSF, fattore di crescita granulocitario) si possono

ottenere grandi quantità di cellule staminali da sangue periferico. Vengono pubblicati i primi lavori con l'uso di PB anziché di midollo (BM) per il trapianto sia allogenico che autologo.

- *MS, multiple sclerosis (sclerosi multipla)*: la terapia trapiantologica, riservata alla ematologia, si espande verso altre specialità, in questo caso la neurologia, con la sclerosi multipla. Alberto Marmont (Genova), all'inizio degli anni novanta, insieme ad Attanasios Fassas (Thessaloniki, Grecia), iniziano a sottoporre pazienti con MS al trapianto autologo. I risultati sono eclatanti, e oggi il Registro Europeo annovera oltre 1.000 pazienti con MS sottoposti a trapianto autologo. Uno studio di confronto ha dimostrato che è la procedura più efficace in questa patologia, rispetto ai nuovi anticorpi monoclonali.
- *RIC, reduced intensity conditioning (condizionamento a intensità ridotta)*: negli anni ottanta i regimi di condizionamento vengono ridotti di intensità (RIC), con il risultato di poter sottoporre al trapianto pazienti più anziani (60, 70 anni e oltre).
- *HR HLA, high resolution HLA (HLA ad alta risoluzione):* la tecnica per la identificazione delle varie regioni HLA (A, B, C, DR, DQ, DP) diventa più accurata consentendo una migliore caratterizzazione. Questo si traduce in migliori risultati specie con i donatori fuori dalla famiglia.
- *PTCY, post transplant cyclophosphamide (ciclofosfamide post trapianto)*: una vera rivoluzione che arriva da Baltimora (USA) dove Rick Jones all'inizio del 2000, a seguito dei lavori di George Santos degli anni sessanta, somministra ciclofosfamide (un farmaco immunosoppressivo) dopo il trapianto consentendo di eseguire trapianti incompatibili e rivoluzionando la profilassi della GvHD.
- *Fam HAPLO, family haploidentical transplants (trapianti da familiari aploidentici*): grazie alla PTCY, oggi possiamo utilizzare qualsiasi donatore in famiglia che sia per metà (aplo) HLA identico al paziente; quindi padre in figlio, figlio in padre, fratello aplo in fratello, zio, cugino. Questo significa che tutti i pazienti possono oggi avere un donatore sia consanguineo sia non consanguineo.
- *CART cells, chimeric antigen receptor T cells*: si tratta della rivoluzione messa a punto nei primi anni del 2000. Linfociti T (derivati dal timo) autologhi, vengono geneticamente modificati per esprimere un recettore contro un bersaglio presente su cellule tumorali. La

reinfusione di CART nel paziente provoca la distruzione del tumore (in particolare nei casi di leucemia, linfoma, mieloma). È stato possibile guarire pazienti che avevano già ricevuto multiple linee di terapia ed erano risultati refrattari. Il protocollo CART è stato recentemente utilizzato anche per le malattie autoimmuni (lupus, dermatomiosite, sclerodermia) con risultati al di là dell'atteso in pazienti guariti ad anni di distanza, senza cortisone e senza terapia immunosoppressiva.

*Conclusione*

La terapia cellulare, iniziata oltre mezzo secolo fa, è oggi in piena espansione grazie a nuovi strumenti, quali manipolazioni cellulari e ingegneria genetica, permettendo di aprire nuove frontiere cliniche in ematologia, reumatologia, gastroenterologia, neurologia, dermatologia, e forse in un prossimo futuro anche diabetologia. La speranza è di ottenere nei prossimi anni una maggiore probabilità di guarigione accompagnata da una ridotta tossicità.

Tiziano Bandiera*

# *Dal laboratorio alla farmacia: il lungo viaggio per arrivare a un nuovo farmaco*

**Sommario**: La scoperta di un nuovo farmaco parte da un'ipotesi biologica circa la possibile causa di una malattia e attraverso il lavoro di un team di ricercatori, con competenze in diverse discipline scientifiche, porta alla molecola che diventerà un farmaco. Questo processo si sviluppa attraverso tre fasi: Ricerca e Sviluppo Preclinico, Sviluppo Clinico e richiesta di autorizzazione all'immissione in commercio alle Autorità Regolatorie. A partire dalle attività in laboratorio, il tempo per arrivare a un nuovo farmaco sul mercato è di circa dieci anni. Negli ultimi anni sono stati approvati molti farmaci innovativi che hanno portato a un significativo miglioramento della qualità di vita dei pazienti.

**Parole chiave**: farmaci; scoperta farmaci; target biologico; Lead; modalità terapeutiche.

**Abstract**: *From Lab to Market: The Long Journey to Get to a New Drug*
The discovery of a new drug is a long process requiring big efforts of a team of scientists and technologists with expertise in many different scientific fields. Starting from a hypothesis on the role of a biological target on initiation or progression of a disease, the drug discovery process develops through three main phases, the Discovery and Preclinical Development, the Clinical Development, and the request for approval of the new drug by Regulatory Authorities. The overall process may take about ten years from the lab to the market. In the last few years, many innovative drugs were approved providing patients with therapies that significantly improves their quality of life.

**Keywords**: drugs; drug discovery; therapies; Lead; target.

* Chimico farmaceutico t.bandiera@alice.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.223-234

Negli ultimi decenni l'aspettativa di vita nel mondo occidentale è aumentata in maniera significativa grazie al miglioramento delle condizioni di vita e ai progressi della medicina (La Rocca 2025). Su quest'ultimo versante hanno giocato un ruolo molto importante la scoperta di nuovi farmaci e la loro sempre più ampia disponibilità (Lichtenberg 2022).

La scoperta di un nuovo farmaco è un processo che parte da un'ipotesi biologica circa la possibile causa di una specifica malattia e, attraverso un lungo e complesso lavoro di un team di ricercatori, con competenze in diverse discipline scientifiche, porta alla molecola che diventerà un farmaco. Questo processo può essere convenzionalmente schematizzato mediante una successione di tre macro fasi: 1) la ricerca e scoperta della molecola candidata a diventare un farmaco e il suo Sviluppo Preclinico, 2) lo Sviluppo Clinico, che mira a verificare la sicurezza e l'efficacia del potenziale farmaco e 3) la successiva sottomissione dei risultati alle Autorità Regolatorie per ottenere l'autorizzazione all'immissione in commercio del farmaco (fig. 1).




Figura 1. *Fasi del processo di scoperta di un nuovo farmaco.*

Ciascuna di queste fasi può essere, a sua volta, suddivisa in più passaggi. La fase di cui al punto 1) precedentemente riportato si sviluppa a partire dalla identificazione e validazione in laboratorio del bersaglio terapeutico, in gergo "target", a cui fa seguito la "Hit Identification", ovvero la ricerca di molecole da cui partire per arrivare al potenziale farmaco. A partire da uno o più di questi hit si arriva alla identificazione del Lead, passaggio "Hit to Lead", ovvero di un composto che presenti una migliore attività rispetto al hit di partenza. A seguire, il Lead viene ottimizzato, passaggio "Lead Optimization", per arrivare a un composto con caratteristiche simili a un farmaco. Questo composto verrà poi avviato allo Sviluppo Preclinico, dove si cerca primariamente di valutare la sicurezza del composto in modelli sperimentali atti a evidenziare potenziali tossicità (fig. 2).

Al termine di questi passaggi può avere inizio lo Sviluppo Clinico, punto 2) precedentemente riportato, che si articola in studi di fase 1,

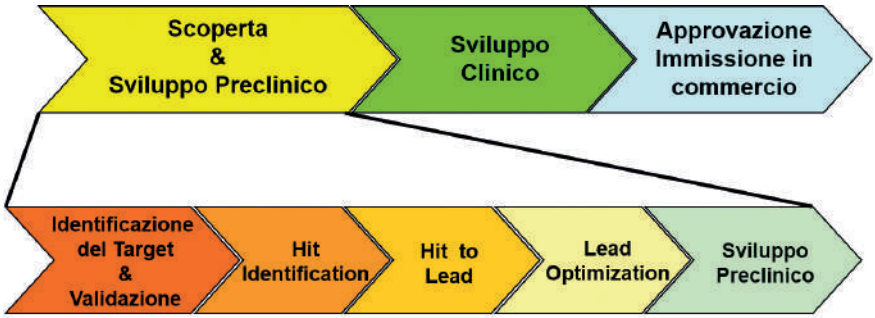



Figura 2. *Passaggi della fase di scoperta e sviluppo preclinico di un nuovo farmaco.*

fase 2 e fase 3. Alla conclusione degli studi clinici i risultati di tutti gli studi condotti, sia clinici sia preclinici, andranno presentati alle Autorità Regolatorie che valuteranno i risultati ottenuti e decideranno in merito alla concessione dell'autorizzazione all'immissione in commercio, punto 3) precedentemente riportato (fig. 3).

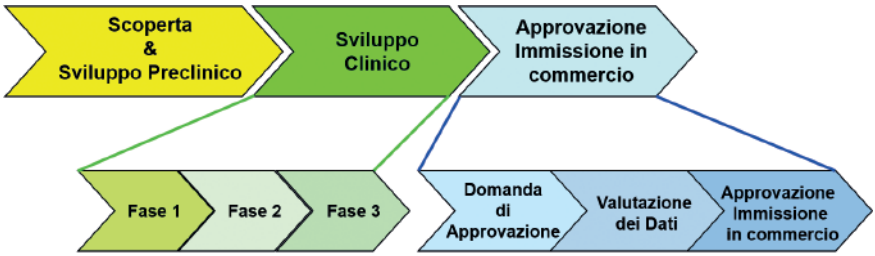



Figura 3. *Passaggi dello Sviluppo Clinico e della fase di Approvazione e Immissione in commercio di un nuovo farmaco.*

I progressi nella conoscenza delle cause di moltissime malattie hanno portato all'identificazione di diverse tipologie di target e, di conseguenza, a diverse tipologie di farmaci: a questo proposito si parla di "modalità terapeutiche" (Valeur *et al.* 2017; Yang *et al.* 2020). Di seguito sono riportati alcuni esempi di modalità terapeutiche. Una delle principali è costituita dalle "piccole molecole", per la maggior parte composti organici con basso peso molecolare (PM). Tipicamente, il peso molecolare è inferiore a 500-600 Dalton (Da), ma sono in commercio anche composti con peso molecolare prossimo a 1000 Da. Esempi molto noti di piccole molecole sono il *paracetamolo* (PM

151 Da), l'*ibuprofene* (PM 151 Da) e l'*omeprazolo* (PM 345 Da). Sul versante opposto nella scala dei pesi molecolari, un farmaco di recente approvazione per il trattamento dell'HIV, *lenacapavir*, ha un peso molecolare di 968 Da (fig. 4).

Una seconda modalità terapeutica è costituita dai "peptidi", molecole ad elevato peso molecolare costituite da sequenze di amino acidi legati tra loro mediante legami ammidici, come nelle proteine che co-

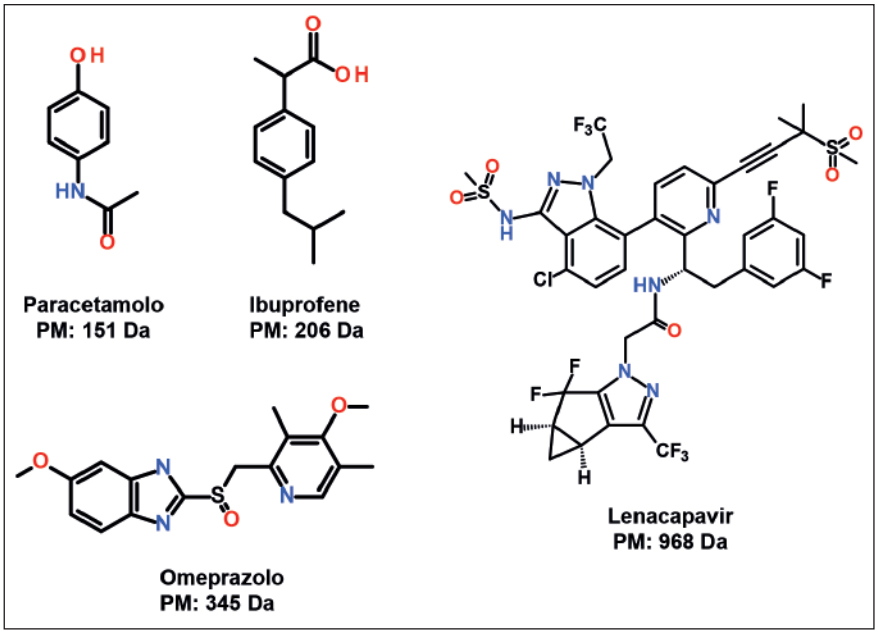



Figura 4. *Alcuni esempi di farmaci costituiti da piccole molecole: struttura chimica e relativo peso molecolare.*

stituiscono una grande parte del nostro organismo. Un esempio recente e molto noto di farmaco è la *semaglutide*, che viene prescritto per il trattamento del diabete e dell'obesità. La semaglutide ha peso molecolare di 4114 Da. Una terza modalità terapeutica è quella degli "anticorpi monoclonali". Si tratta di molecole molto complesse costituite da lunghissime sequenze di aminoacidi e, pertanto, ad elevatissimo peso molecolare. Un esempio, tra gli oltre cento anticorpi monoclonali oggi disponibili, è costituito da *adalimumab*, un farmaco per il trattamento dell'artrite reumatoide: il suo peso molecolare è di circa 148.000 Da.

Un'altra recente modalità terapeutica è rappresentata da "derivati di acidi nucleici", molecole che hanno una somiglianza con il DNA o l'RNA. Tali farmaci sono costituiti da una sequenza, più o meno lunga, dei "mattoni" costitutivi degli acidi nucleici, vale a dire le cosiddette "basi azotate". Un esempio di tale categoria di farmaci è *nusinersen*, un oligonucleotide che lega specificamente una sequenza di basi nel precursore dell'RNA messaggero che codifica per una proteina difettosa che causa l'atrofia muscolare spinale, una grave malattia genetica. Un altro esempio di questa categoria di farmaci è *inclisiran*, che è stato recentemente approvato per il trattamento della ipercolesterolemia primaria. Anche in questo caso si tratta di una specifica sequenza di basi azotate che legano l'RNA messaggero di una proteina coinvolta nella ipercolesterolemia impedendo la sintesi della proteina.

Una ulteriore e più recente modalità terapeutica è costituita dalla terapia genica. Con questo termine si intendono diversi interventi mirati a ripristinare la funzionalità di una proteina difettosa in quanto derivante da un gene con una o più mutazioni nella sequenza che codifica per tale proteina. In breve, tale risultato può essere ottenuto portando dentro una specifica cellula il gene che codifica per la proteina corretta oppure l'RNA messaggero della proteina corretta. Un più recente e innovativo approccio consiste nel "correggere" la sequenza di DNA difettosa mediante la tecnologia "CRISPR-Cas9" (Pacesa, Pelea e Jinek 2024). Grazie a questa tecnologia è possibile tagliare un tratto di DNA che porta una sequenza difettosa e sostituirlo con la sequenza corretta. La scoperta di questa tecnologia, esistente in natura, ha fruttato a Jennifer Doudna ed Emmanuelle Charpentier il premio Nobel per la Chimica nel 2020.

Nel prosieguo di questo contributo verrà brevemente descritto il processo che porta all'identificazione e approvazione di un farmaco costituito da una "piccola molecola". Come riportato precedentemente, la fase di ricerca e scoperta di una nuova molecola con caratteristiche di potenziale farmaco parte dall'identificazione di un target biologico, che può essere una proteina oppure un acido nucleico, DNA o RNA, la cui modulazione si ritiene possa portare a un effetto farmacologico che può essere sfruttato per il trattamento di una specifica malattia. Questo target biologico viene studiato in maniera approfondita, in un processo che prende il nome di "validazione", per essere il più possibile sicuri che la sua modulazione sia rilevante per l'instaurarsi o la progressione di

una specifica malattia. Occorrerà anche verificare che la modulazione di tale target non provochi tossicità severa o non controllabile a causa, ad esempio, della sua rilevanza per uno o più normali processi fisiologici. Uno fra i tanti esempi di successo di identificazione e validazione del target biologico è costituito dalla scoperta, nel 1989, del gene che codifica per la proteina denominata Cystic Fibrosis Transmembrane conductance Regulator (CFTR) le cui mutazioni causano la fibrosi cistica, la più frequente tra le malattie genetiche rare. Alcune mutazioni nel gene che codifica per questa proteina si traducono nella mancata espressione della proteina stessa o in forme caratterizzate da una più o meno ridotta funzionalità. Questa scoperta ha dato inizio a un'intensa attività di ricerca che ha portato, nel 2012, all'approvazione di *ivacaftor* (nome commerciale Kalydeco), il primo farmaco per i pazienti con fibrosi cistica che, interagendo con la proteina avente una specifica mutazione, è in grado di aumentarne la funzionalità, portando in tal modo a un sostanziale miglioramento della sintomatologia per una piccola percentuale dei pazienti (Trouvé, Saint-Pierre e Férec 2024). Negli anni successivi sono state approvate combinazioni di modulatori di cui le più recenti (Trikafta e Alyftrek) hanno mostrato un significativo miglioramento del quadro clinico per una grande percentuale di pazienti.

A seguire la validazione del target inizia il passaggio che va sotto il nome di "identificazione del Hit" (Hit Identification, fig. 2), dove per hit si intende una molecola che presenta un'attività biologica misurabile su un determinato target e che può costituire il punto di partenza per arrivare a un potenziale farmaco. Nel caso delle piccole molecole questo processo consiste tipicamente nello screening di un grande numero di composti per identificare quelli che interagiscano con il target. Nella maggior parte dei casi si utilizza un saggio biologico che misura l'interazione dei composti con il target isolato, ovvero non in un contesto cellulare. Lo screening viene generalmente condotto in maniera automatizzata, utilizzando opportuni robot che permettono di eseguire tutti i passaggi di un saggio biologico senza intervento dell'uomo. In gergo questo processo prende il nome di "high-throughput screening" (HTS) ovvero screening ad alto flusso. Con alcune tecnologie è ora possibile effettuare lo screening anche di molti milioni di composti. Qualora la struttura tridimensionale del target sia nota è possibile condurre uno "screening virtuale" ovvero simulare per via computazionale l'interazio-

ne di un composto con il target e stimare l'energia associata a questa interazione. Considerate le attuali potenze di calcolo dei computer, in particolare con sistemi di High Performing Computing (HPC), è possibile condurre uno screening virtuale su miliardi di composti in tempi relativamente brevi. I composti che presentano la migliore energia di interazione con il target sono poi acquistati dai venditori o sintetizzati in laboratorio e testati in un saggio biologico per verificare la bontà della predizione. Nel caso in cui non sia possibile condurre lo screening su un target isolato, ad esempio su una proteina che svolge la sua funzione solamente sotto forma di complesso con altre proteine, si può ricorrere a uno screening "fenotipico". In tal caso lo screening viene condotto, nella maggior parte dei casi, in cellule dopo aver messo a punto un saggio che permetta di "leggere" un segnale, tipicamente luminoso, correlato all'interazione e modulazione del target da parte di un composto.

Una volta identificati gli hit, questi saranno oggetto di modifiche della loro struttura chimica volte ad aumentare la loro attività biologica, ridurre l'eventuale interazione con altri target, che potrebbe portare a tossicità, e a migliorare le caratteristiche di tali molecole in modo da renderle dei buoni farmaci. Si tratta di un processo iterativo di sintesi di nuovi composti, test di tali composti in uno o più saggi biologici, valutazione dei risultati biologici e, alla luce dei risultati ottenuti, disegno di nuovi analoghi da sintetizzare. Questo processo, che prende il nome di "Hit to Lead", porta a un "Lead", ovvero una molecola che ha una migliore attività biologica rispetto al hit da cui si è partiti. Il Lead non è ancora il punto di arrivo per poter proseguire il cammino verso gli studi clinici, ma viene sottoposto a un processo di "ottimizzazione", "Lead Optimization", che consiste nella sintesi di diversi analoghi del Lead che portano specifici cambiamenti strutturali introdotti per migliorare alcune delle proprietà del Lead. L'obiettivo di questo processo è arrivare a una molecola con caratteristiche migliori rispetto al Lead, in particolare per quanto riguarda una serie di proprietà che generalmente si riscontrano nei farmaci, definite come proprietà "drug-like", ad esempio un'accettabile solubilità, una elevata stabilità metabolica, una buona permeabilità attraverso le membrane biologiche e altre ancora. Il processo di Lead Optimization può richiedere parecchio tempo per il disegno e la sintesi dei diversi composti, poiché occorre trovare una molecola nella quale ci sia un buon compromesso tra l'attività biologica e le proprietà drug-like.

Il Lead ottimizzato può procedere al passaggio successivo che è lo Sviluppo Preclinico. Durante questo passaggio vengono condotti diversi studi per capire se il composto selezionato può progredire alla fase di Sviluppo Clinico. A questo scopo occorre prima di tutto sintetizzare il composto in quantità dell'ordine delle centinaia di grammi, o anche alcuni chilogrammi, mettendo a punto una procedura sintetica che permetta la sintesi su larga scala e tale da poter essere utilizzata per la produzione industriale qualora il composto diventasse un farmaco. Questo quantitativo rilevante di composto serve per condurre studi di formulazione, ovvero per capire quali eccipienti possono essere utilizzati per preparare le compresse o le capsule contenenti il farmaco, studi di farmacocinetica in almeno un paio di specie animali per potere predire quale dosaggio dovrà essere somministrato nell'uomo e studi di tossicologia per identificare possibili tossicità a seguito di somministrazione ripetuta per alcune settimane. I risultati degli studi di Sviluppo Preclinico, insieme a quelli ottenuti nella fase di scoperta del candidato, andranno a costituire la documentazione che deve essere presentata alle autorità competenti per poter iniziare gli studi clinici sull'uomo.

Completato lo Sviluppo Preclinico, il candidato farmaco può iniziare la seconda macro fase del processo, vale a dire lo Sviluppo Clinico (fig. 1). In questa fase si valuta *in primis* la sicurezza e, successivamente, l'efficacia del potenziale farmaco in una specifica patologia su un numero sufficientemente elevato di pazienti. Lo Sviluppo Clinico si suddivide in tre fasi: fase 1, fase 2 e fase 3. Nella fase 1 si valutano la tollerabilità e la sicurezza, a diversi dosaggi, del candidato farmaco. Questi studi vengono condotti, in genere, su alcune decine di persone. Se non emergono problemi di tollerabilità, il candidato farmaco passa alla fase 2. In questa fase si continua la valutazione della sicurezza aumentando il numero di soggetti coinvolti nello studio e si inizia a valutare l'efficacia terapeutica del candidato farmaco su un numero limitato di pazienti. Se gli studi di fase 2 danno esito positivo il candidato farmaco può passare a quelli di fase 3. Tali studi sono finalizzati a confermare l'efficacia su un numero di pazienti elevato: per alcune patologie può essere necessario condurre gli studi su migliaia di pazienti. Anche negli studi di fase 3 si pone molta attenzione alla sicurezza del farmaco, evidenziando e monitorando possibili effetti collaterali ai diversi dosaggi impiegati per poterne valutare il rapporto rischio/beneficio.

Lo Sviluppo Clinico è la fase più lunga e costosa del processo che porta a un nuovo farmaco: può richiedere dai 3 ai 6 anni e avere un costo che può arrivare a qualche centinaia di milioni di euro. Inoltre, lo Sviluppo Clinico è la fase in cui si registra la più alta percentuale di "fallimento" nei progetti di ricerca di un nuovo farmaco. Diversi studi hanno stimato che solo il 10% di candidati farmaci che iniziano la fase 1 completano con successo lo Sviluppo Clinico e arrivano a essere approvati come farmaco. Tale percentuale sale a circa il 20% per i candidati farmaci che hanno superato la fase 1 e iniziano la fase 2. Decisamente migliore è la percentuale di successo per candidati che hanno superato la fase 2 e iniziano la fase 3: in media, un candidato su due arriva a essere approvato come farmaco (Wouters, McKee e Luyten 2020). Va precisato che le percentuali di successo riportate sopra sono un valore medio tra le diverse aree terapeutiche: ad esempio, nelle aree terapeutiche cardiovascolare e malattie infettive le percentuali sono maggiori dei valori medi sopra riportati, mentre in oncologia sono addirittura inferiori.

La conclusione positiva dello Sviluppo Clinico di un candidato farmaco non porta automaticamente all'approvazione e alla conseguente autorizzazione all'immissione in commercio. La grandissima mole di risultati raccolti durante tutto il processo di ricerca di un nuovo farmaco, con ovvia enfasi sui risultati clinici, deve essere presentata alle autorità regolatorie per l'approvazione. Negli Stati Uniti l'approvazione viene concessa dalla Food and Drug Administration (FDA), mentre nell'Unione Europea l'approvazione viene dalla Commissione Europea, sentito il parere favorevole della European Medicines Agency (EMA). Le autorità regolatorie possono sollevare dubbi, ad esempio sui risultati o sulle metodiche applicate, e chiedere allo "sponsor" (questo il termine tecnico per indicare il soggetto che richiede l'approvazione di un nuovo farmaco) ulteriori studi clinici. Dati di letteratura indicano che circa il 15% delle richieste di approvazione di un nuovo farmaco vengono respinte (Wouters, McKee e Luyten 2020).

Nonostante l'intrinseca difficoltà del processo di scoperta e sviluppo di un nuovo farmaco, e l'elevata percentuale di fallimento, negli ultimi anni è stata autorizzata l'immissione in commercio di un significativo numero di nuovi farmaci in varie aree terapeutiche. A titolo di esempio, la figura 5 riporta il numero dei nuovi farmaci autorizzati

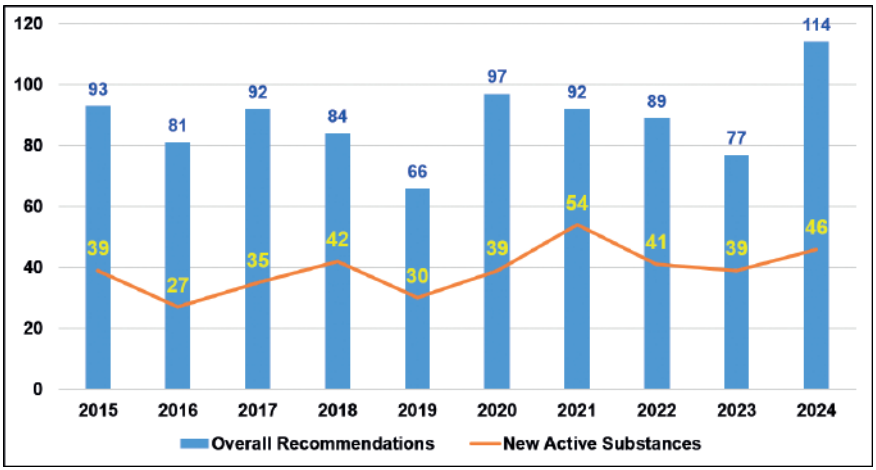



Figura 5. *Numero di nuovi farmaci autorizzati all'immissione in commercio nell'Unione Europea nel periodo 2015-2024. In giallo è riportato il numero di farmaci che contengono un principio attivo che non era mai stato autorizzato in precedenza nell'Unione Europea.*

dalla Commissione Europea, a seguito del parere favorevole dell'EMA, nel periodo 2015-2024.

Il numero in blu in testa a ciascuna barra rappresenta il numero complessivo di nuove medicine approvate dalla Commissione Europea mentre quello in giallo si riferisce a medicine che contengono un principio attivo che non era mai stato autorizzato in precedenza nell'Unione Europea. Queste ultime rappresentano, quindi, la vera innovazione in diverse aree terapeutiche. La differenza tra il numero in blu e quello in giallo include medicine già note che sono state approvate per una diversa indicazione terapeutica, oppure farmaci generici che hanno ottenuto l'autorizzazione all'immissione in commercio.

Come riportato all'inizio di questo contributo, i progressi nella conoscenza delle cause delle malattie hanno permesso di sviluppare diverse "modalità terapeutiche", anche per la stessa malattia. Un esempio interessante è rappresentato dall'atrofia muscolare spinale, una grave malattia genetica. Si è fatto menzione precedentemente di *nusinersen* (nome commerciale Spinraza), un oligonucleotide antisenso e primo farmaco approvato nel 2016 per il trattamento dall'atrofia muscolare spinale. A distanza di tre anni, nel 2019, è stata approvata una terapia

genica, *onasemnogen* (nome commerciale Zolgesma), che permette di portare nei motoneuroni dei pazienti il gene corretto utilizzando un virus innocuo per l'uomo. A distanza di un anno, nel 2020, è stato approvato *risdiplam* (nome commerciale Evrysdi), una piccola molecola. Oggi sono quindi disponibili tre diverse modalità terapeutiche per il trattamento dell'atrofia muscolare spinale (McPheron e Felker 2024). È interessante notare come una piccola molecola, *risdiplam*, produca lo stesso effetto terapeutico di un oligonucleotide antisenso, *nusinersen*, un farmaco strutturalmente più complesso e con un peso molecolare 17 volte maggiore di *risdiplam*.

Negli ultimi anni sono state sviluppate terapie avanzate per malattie per le quali non erano disponibili farmaci per un efficace trattamento farmacologico. Questi nuovi farmaci hanno spesso un costo molto elevato, con conseguente impatto sui sistemi sanitari nazionali e sulla disponibilità per i pazienti. Le aziende farmaceutiche sostengono che questo sia dovuto alla necessità di rientrare dei costi sempre più alti di ricerca e sviluppo. Diversi articoli in letteratura hanno cercato di stimare questi costi (Wouters, McKee e Luyten 2020; Schlander *et al.* 2021). Alcune stime si spingono a ipotizzare un costo che supera il miliardo di dollari per ogni nuovo farmaco (Schlander *et al.* 2021) sviluppato dalle grandi aziende farmaceutiche (Big Pharma). Occorre tenere presente che cifre così elevate includono tutti i costi necessari per portare avanti tutte le attività di ricerca, nelle diverse aree terapeutiche in cui l'azienda è attiva, e tengono conto del fatto che, per un nuovo farmaco che arriva sul mercato, molti progetti hanno fallito per varie cause e hanno assorbito risorse finanziarie.

In conclusione, il processo di ricerca e sviluppo di un nuovo farmaco richiede il lavoro di un team con competenze multidisciplinari, sia in fase di ricerca sia in fase di sviluppo. Si tratta di un processo molto lungo, che può richiedere anche oltre dieci anni dal momento in cui il progetto parte fino all'approvazione del farmaco. È un processo rischioso, poiché la maggior parte dei progetti fallisce prima di arrivare alla fase più avanzata dello Sviluppo Clinico e questo porta con sé costi consistenti che possono scaricarsi sul prezzo del farmaco. Ciò nonostante, un numero piuttosto elevato di nuovi farmaci viene approvato ogni anno dalle autorità regolatorie, sia in Europa sia negli Stati Uniti. Grazie a molti di questi nuovi farmaci, un numero significativo di patologie, tra cui molte

malattie rare per le quali non esisteva trattamento o erano disponibili terapie poco efficaci, oggi può essere affrontato con approcci terapeutici in grado di migliorare la qualità della vita dei pazienti.

*Bibliografia*

La Rocca M., *EU, life expectancy reaches 81.5 years*. EU News (2025): https://www.eunews.it/en/2025/03/14/eu-life-expectancy-reaches-81-5-years

Lichtenberg F.R. *The Effect of Pharmaceutical Innovation on Longevity: Evidence from the U.S. and 26 High-income Countries*. Economics and Human Biology (2022) 46: 101124. doi: 10.1016/j.ehb.2022.101124

McPheron M.A., Felker M.V. *Clinical perspectives: Treating spinal muscular atrophy.* Molecular Therapy (2024) 32: 2489-2504. doi: 10.1016/j.ymthe.2024.06.020

Pacesa M., Pelea O., Jinek M. *Past, Present, and Future of CRISPR Genome Editing Technologies*. Cell (2024) 187: 1076-1100. doi: 10.1016/j.cell.2024.01.042

Schlander M., Hernandez-Villafuerte K., Cheng C.Y., Mestre-Ferrandiz J., Baumann M. *How Much Does It Cost to Research and Develop a New Drug? A Systematic Review and Assessment.* Pharmacoeconomics (2021) 39: 1243-1269. doi: 10.1007/s40273-021-01065-y

Trouvé P., Saint-Pierre A., Férec C. *Cystic Fibrosis: A Journey through Time and Hope*. International Journal of Molecular Sciences (2024) 25: 9599. doi: 10.3390/ijms25179599

Valeur E., Guéret S.M., Adihou H., Gopalakrishnan R., Lemurell M., Waldmann H., Grossmann T.N., Plowright A.T. *New Modalities for Challenging Targets in Drug Discovery.* Angewandte Chemie International Edition (2017) 56: 10294-10323. doi: 10.1002/anie.201611914

Wouters O.J., McKee M., Luyten J. *Estimated Research and Development Investment Needed to Bring a New Medicine to Market, 2009-2018*. Journal of the American Medical Association (2020) 323: 844-853. doi: 10.1001/jama.2020.1166

Yang W., Gadgil P., Krishnamurthy V.R., Landis M., Mallick P., Patel D., Patel P.J., Reid D.L., Sanchez-Felix M. *The Evolving Druggability and Developability Space: Chemically Modified New Modalities and Emerging Small Molecules.* The AAPS Journal (2020) 22: 21. doi: 10.1208/s12248-019-0402-2

**Alberto Birga***

# *Energia e ambiente, fonti rinnovabili e innovazione tecnologica per la transizione energetica*

**Sommario**: La transizione energetica è ormai al centro delle strategie industriali, politiche e ambientali a livello globale. La crescente urgenza di affrontare il cambiamento climatico, unitamente alla necessità di garantire la sicurezza energetica e la competitività economica, richiede un profondo ripensamento dei modelli di produzione, distribuzione e consumo di energia. Le tensioni geopolitiche, l'instabilità del mercato e la crescente domanda legata alla digitalizzazione e alla mobilità elettrica rendono ancora più urgente conciliare sostenibilità, affidabilità e accessibilità economica dell'approvvigionamento energetico. Questa presentazione si propone di fornire una panoramica delle prospettive della transizione energetica, considerando la limitata disponibilità di combustibili fossili e il loro pesante impatto sul clima.

**Parole chiave**: transizione energetica; fonti rinnovabili; decarbonizzazione; sostenibilità ambientale; innovazione tecnologica.

**Abstract**: *Energy and Environment, Renewable Sources and Technological Innovation for the Energy Transition*
The energy transition is now at the core of industrial, political, and environmental strategies worldwide. The growing urgency to address climate change, together with the need to ensure energy security and economic competitiveness, requires a profound rethinking of the models of energy production, distribution, and consumption. Geopolitical tensions, market instability, and increasing demand linked to digitalization and electric mobility make it even more pressing to reconcile sustainability, reliability, and affordability of energy supply. This presentation aims to provide an overview of the prospects of energy transition, considering the limited availability of fossil fuels and their heavy impact on the climate.

**Keywords**: energy transition; renewable energy sources; decarbonisation; environmental sustainability; technological innovation.

* Accademico albert.birga@libero.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.235-247

*Il fabbisogno globale di energia primaria*

Il crescente fabbisogno energetico del pianeta deve essere soddisfatto considerando le caratteristiche e i rischi derivanti dall'impiego delle varie fonti: le non rinnovabili sono disponibili in quantità limitata e pertanto sono destinate a esaurirsi nel tempo.

Inoltre, i combustibili fossili rilasciano gas serra, contribuendo al cambiamento climatico e ad altri danni ambientali; sono stati prodotti da processi naturali in tempi lunghissimi e con l'attuale ritmo di consumo si esauriranno in poche centinaia di anni.

Viceversa, le fonti rinnovabili si rigenerano continuamente e pertanto sono considerate inesauribili; il sole, attraverso la reazione di fusione nucleare, irradia sulla Terra una quantità annua di energia che corrisponde a circa 80.000 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep); il fabbisogno dell'uomo corrisponde a circa 8 miliardi di tep all'anno.

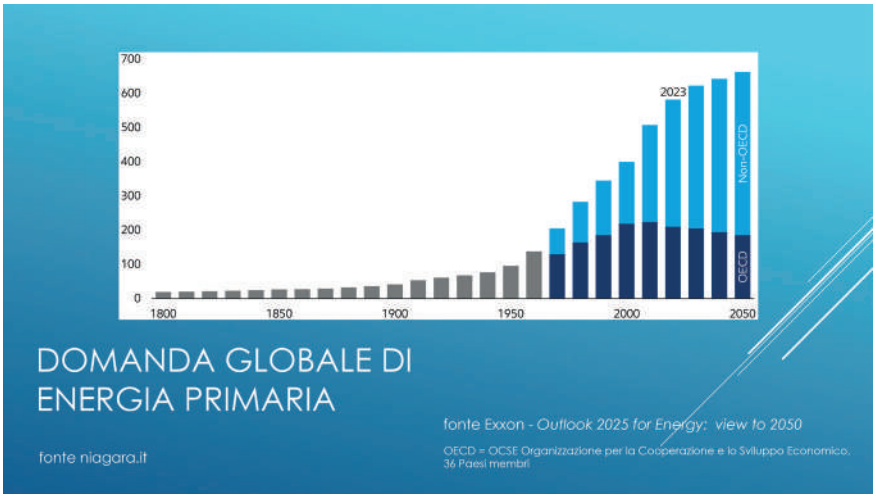



Figura 1. *Domanda globale di energia primaria.*

Il consumo di energia primaria è in forte aumento nei vari settori: residenziale, trasporti, manifattura, altre industrie e servizi; carbone, petrolio e gas sono ancora prevalenti nello scenario globale, ma per fortuna le tecnologie pulite stanno rimodellando il mix energetico e si prevede che nel 2035 si produrranno da fotovoltaico ed eolico oltre 23.000 Twh all'anno.




Figura 2. *Le tecnologie pulite stanno rimodellando il mix energetico globale.*

Anche la previsione al 2040 per sorgente di energia primaria evidenzia la forte crescita di produzione da rinnovabili, nucleare e gas con un calo marcato per petrolio e soprattutto carbone; per lo stesso periodo, circa 20 anni fa si prevedevano scenari molto diversi, ritenendo che a causa del progressivo esaurimento delle riserve di petrolio e gas (meno di 100 anni) sarebbe stato incrementato il consumo di carbone, disponibile in natura in quantità molto maggiori.

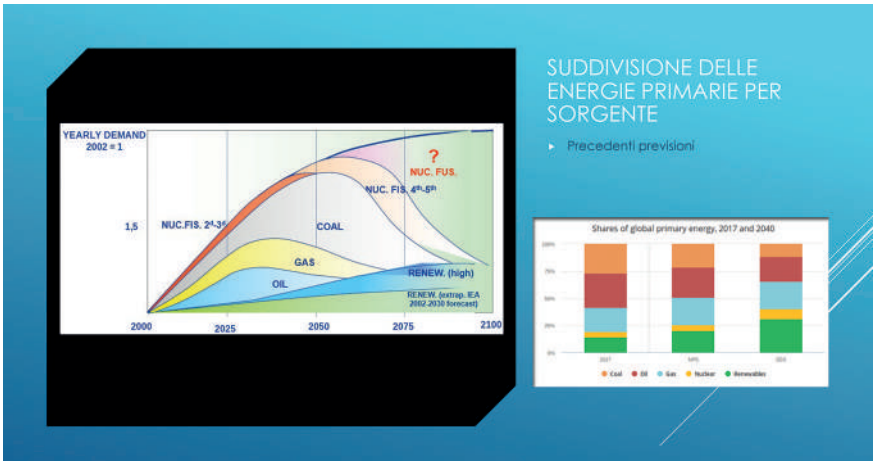



Figura 3. *Suddivisione delle energie primarie per sorgente.*

Fortunatamente le cose sono andate in modo diverso. L'allora inaspettato fortissimo incremento dell'energia da rinnovabili ha consentito di avviare, soprattutto nei paesi occidentali, il processo di decarbonizzazione. Oggi, anche grazie all'impiego del "fracking" che consente di estrarre idrocarburi dalle rocce di scisto, le previsioni sulla disponibilità di gas e petrolio sono decisamente più ottimistiche, ma si stanno sottovalutando i danni ambientali che tale tecnica estrattiva comporta: contaminazione chimica delle falde, radioattività, qualità dell'aria, terremoti ecc.

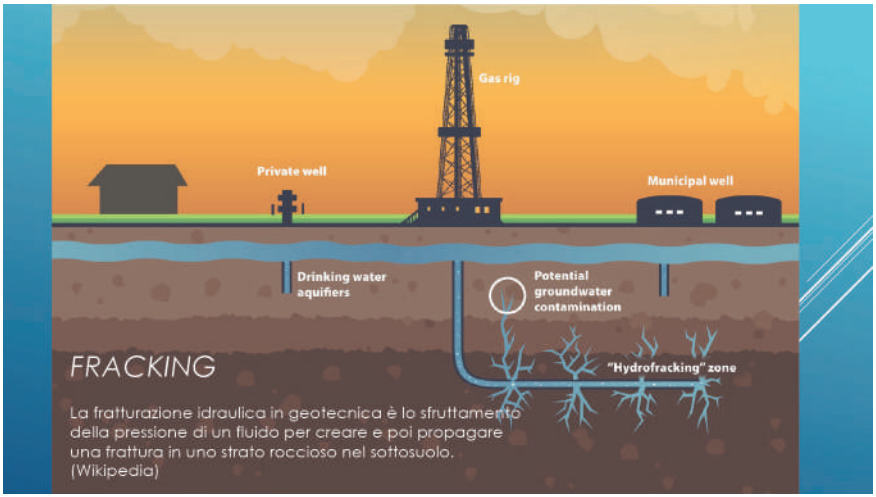


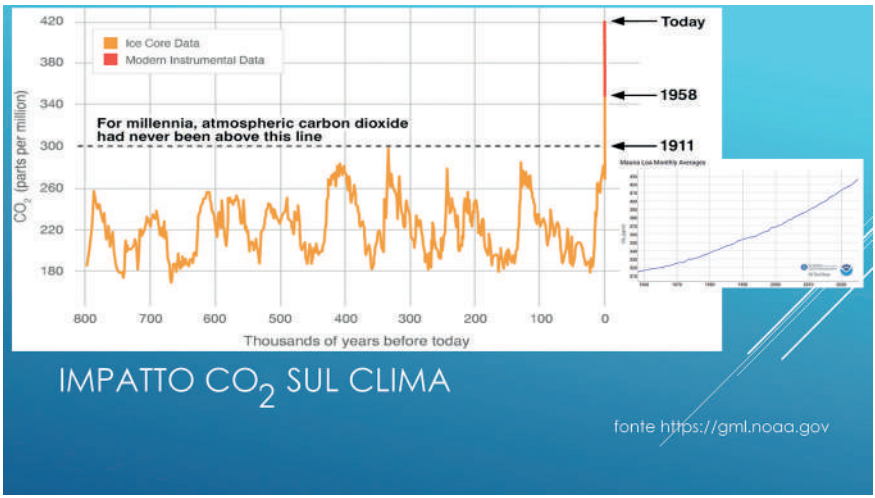

Figura 4. *Fracking, fratturazione idraulica.*

Nonostante l'incremento di produzione di energia da fonti rinnovabili, il consumo di petrolio è molto rilevante soprattutto in Nord America, Asia ed Europa ed è destinato a crescere sensibilmente; si ipotizza una domanda mondiale al 2040 di oltre 110 milioni di barili al giorno tenendo conto dell'utilizzo non solo nella produzione di energia ma anche nella petrolchimica, con realizzazione di plastiche, fertilizzanti, solventi, prodotti farmaceutici ecc.

L'impiego massiccio dei combustibili fossili ne riduce la disponibilità; si stima che il petrolio possa esaurirsi in meno di un secolo, seguito qualche decennio dopo da gas e carbone. Inoltre, esso determina l'incremento della percentuale di $CO_2$ presente nell'atmosfera; oggi siamo

a livelli mai visti in centinaia di migliaia di anni, con un significativo aumento della temperatura media.

I paesi dell'Asia orientale seguiti da Nord America ed Europa sono responsabili della maggior parte di emissioni di $CO_2$, ma considerando le emissioni pro capite il Nord America, pur con qualche riduzione negli ultimi anni, è ancora a livelli elevatissimi, oltre il doppio rispetto a Europa e Asia.



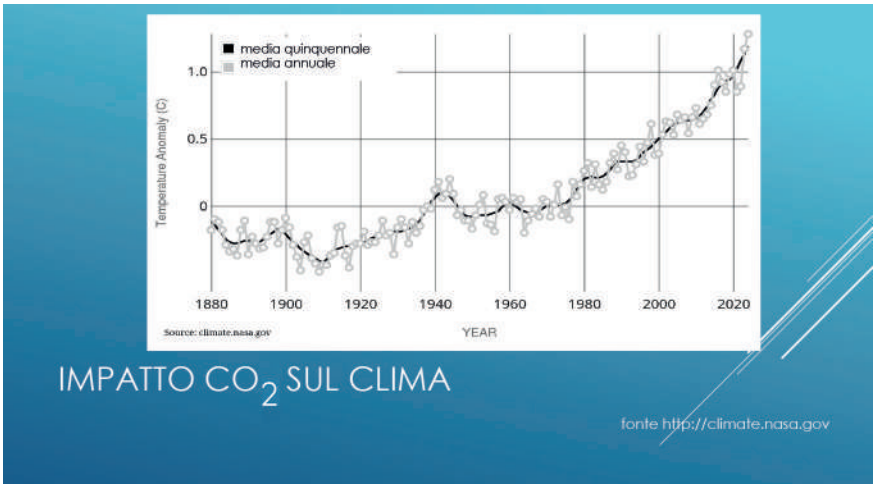




Figure 5 e 6. *Andamento delle emissioni di $CO_2$ e impatto sul clima.*

Si ipotizzano scenari drammatici al 2050 in termini di siccità e innalzamento del livello del mare se non si adotteranno adeguate misure.

I cambiamenti climatici potrebbero portare la domanda di energia al 2050 a un aumento compreso tra l'11% e il 27 % se il riscaldamento sarà di 1,4 gradi, tra il 25% e il 58% se il riscaldamento supererà i 2 gradi, generando il cosiddetto "circolo vizioso delle emissioni".

Si ipotizza che la Terra sarà divisa in sei zone climatiche e che da 700 milioni a 1,2 miliardi di persone vivranno in aree a rischio; la siccità colpirà i paesi del Mediterraneo per almeno sei mesi all'anno; il livello medio globale del mare aumenterà da 75 a 190 cm entro il 2100 e le pianure costiere con altezza inferiore ai 2 metri saranno inondate.

Per contrastare questo fenomeno, oltre alla riduzione di combustibili fossili si deve ricorrere alla cattura di $CO_2$, puntando alla rimozione dall'atmosfera di miliardi di tonnellate; i costi di tale operazione sono ancora elevati anche se si sono ridotti negli ultimi anni, passando da oltre 1.000 dollari a tonnellata a cifre oscillanti tra i 50 e 200.

Per compensare almeno in parte tali costi occorre sfruttare la $CO_2$ per creare prodotti a valore aggiunto, lavoro e fonti di reddito.

*La produzione di energia elettrica*

L'energia elettrica ha profondamente cambiato la nostra vita; si stima che una fornitura domestica da 3 kW equivalga al lavoro di 30 schiavi.

Le prime applicazioni risalgono alla fine del 1800; nel 1882 Galileo Ferraris scoprì il campo magnetico rotante e nacque la prima centrale elettrica in America, seguita nel 1883 dalla prima centrale termoelettrica dell'Europa continentale a Milano (Santa Radegonda) e nel 1887 dalle prime centrali idroelettriche europee.

Nel 1895 entrò in funzione la centrale a carbone di Genova Canevari che consentì l'elettrificazione della rete tramviaria cittadina.

Il fabbisogno mondiale annuo di energia elettrica cresce di anno in anno e si stima che supererà abbondantemente i 360.000 GWh al 2040; in fortissima crescita i consumi di India, Cina e altri paesi con economia in sviluppo.

Le fonti fossili (carbone, gas e petrolio) rappresentano oltre il 50% del totale e sono destinate ad avere ancora un ruolo importante nono-

stante la forte crescita delle rinnovabili, soprattutto considerando che il carbone, più economico, continuerà probabilmente a essere la fonte preferita dai paesi in via di sviluppo.

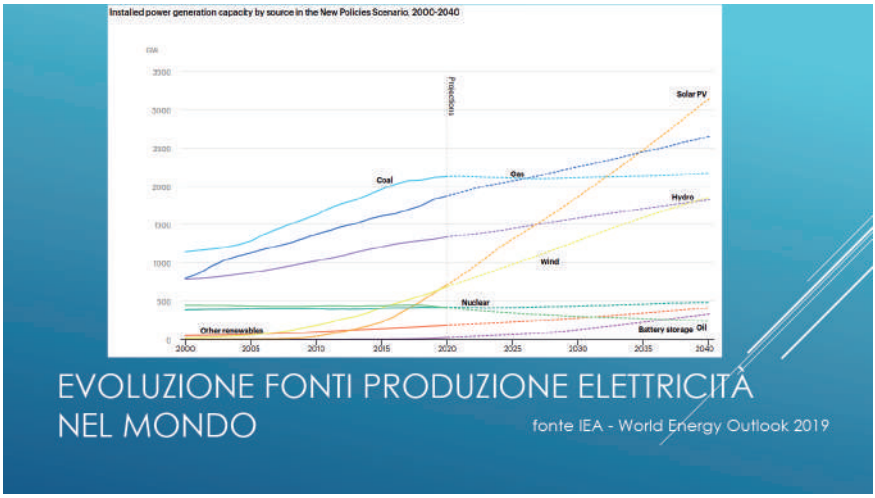



Figura 7. *Evoluzione delle fonti di produzione di elettricità nel mondo.*

Il fotovoltaico sta superando l'idroelettrico (seppure anch'esso in crescita), il carbone, ancora fonte prevalente, viene superato dal gas e l'eolico, che ha già superato il nucleare, verso il 2040 supererà l'idroelettrico.

La produzione di energia elettrica da fissione nucleare è una valida alternativa al termoelettrico, non produce emissioni climalteranti ed è stata resa più sicura attraverso l'innovazione tecnologica, con reattori a fissione avanzata di terza e quarta generazione; la produzione è prevista stabile nei prossimi anni ma anche il combustibile fissile è disponibile sul pianeta in quantità limitata, visto che i giacimenti di uranio potrebbero esaurirsi nell'arco di circa 80 anni.

Inoltre, non vanno sottovalutati i rischi del processo, con conseguenze disastrose in caso di incidenti, e i problemi di stoccaggio delle scorie, radioattive per centinaia di migliaia di anni. Le centrali nucleari sono anche obiettivi sensibili e di non facile localizzazione.

La fusione nucleare è la reazione con cui viene prodotta l'energia dal sole e dalle altre stelle; la reazione deuterio-trizio, che fondendosi danno luogo a un nucleo di elio, un neutrone e molta energia, è quella più facilmente realizzabile sul nostro pianeta.

Purtroppo, non disponiamo ancora delle tecnologie necessarie per gestirla, viste le temperature elevatissime (150 milioni di gradi) richieste per attivare la reazione; nessun materiale può resistere a tali temperature, pertanto, il plasma carico elettricamente viene sospeso grazie a campi magnetici di fortissima intensità evitando il contatto con le pareti del reattore.

A Cadarache, nel sud della Francia, è stato costruito un reattore sperimentale nell'ambito del progetto ITER, cui lavora un consorzio internazionale composto da Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, India e Corea del Sud.

Il reattore ha un diametro di 28 metri e un peso di 23.000 tonnellate; per dare un'idea delle cifre in gioco la portaerei francese *Charles de Gaulle* pesa 38.000 tonnellate ed è lunga 261 metri.

La fusione nucleare presenterà enormi vantaggi:

- materia prima (il deuterio) estraibile dall'acqua con riserve per milioni di anni;
- quantità di energia ricavabile immensa (10 g di deuterio e 15 di trizio produrrebbero energia sufficiente per l'intera vita di una persona in una nazione industrializzata);
- processo intrinsecamente sicuro (in caso di malfunzionamento il plasma si estingue in una frazione di secondo);
- assenza di produzione di $CO_2$ e debole radioattività residua degli impianti (limitata a un periodo di circa 50 anni).

*L'evoluzione del sistema elettrico italiano*

Il sistema elettrico sta affrontando un importante cambiamento lungo tutta la catena di creazione di valore, dalla generazione al consumo; la crescente penetrazione delle fonti rinnovabili e la diminuzione della capacità termica convenzionale lo impongono. Si sta rapidamente passando dalla generazione centralizzata e flussi di energia unidirezionali verso i consumatori alla generazione distribuita con significativo ruolo di fonti rinnovabili e sistemi di accumulo, flussi di energia multidirezionali e "prosumer", consumatori e produttori nello stesso tempo.

La transizione energetica è in atto ma sono necessari ingenti investimenti per sviluppare le infrastrutture delle reti elettriche e renderle

idonee a integrare le nuove generazioni da fonti rinnovabili per ridurre progressivamente la dipendenza dai combustibili fossili.

Nel percorso di decarbonizzazione l'Italia ha raggiunto una produzione da rinnovabili di circa il 40% dei consumi elettrici, destinata a salire al 63% nel 2030 e al 70% entro il 2035; nel frattempo diverse centrali a carbone sono state chiuse e le altre lo saranno a breve.

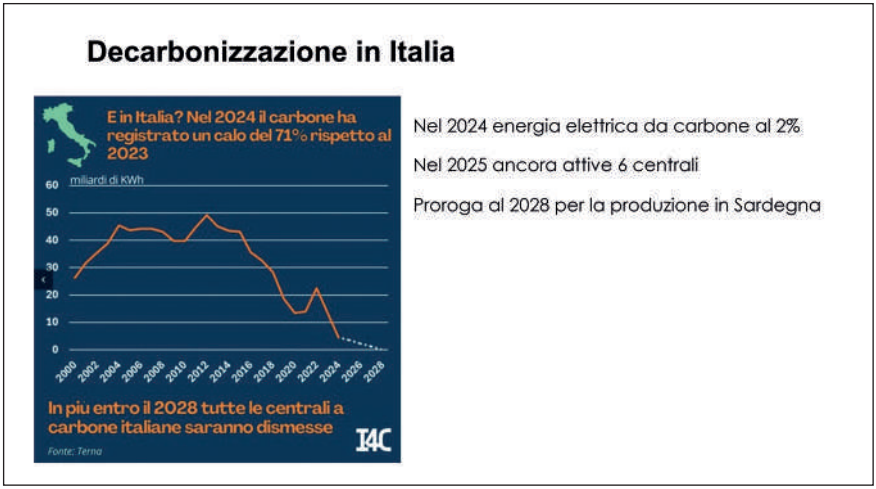



Figura 8. *Decarbonizzazione in Italia.*

Questi radicali cambiamenti vanno ovviamente gestiti per assicurare elevati livelli di qualità e sicurezza del servizio offerto ai cittadini; l'incremento della produzione da fonti rinnovabili, per loro natura intermittenti, deve essere associato allo sviluppo di adeguati sistemi di accumulo, elettrochimici (batterie) e idraulici (centrali reversibili di pompaggio e turbinaggio), indispensabili per garantire la stabilità della rete attraverso il costante equilibrio della domanda e dell'offerta di energia nelle varie fasce orarie.

Quando c'è eccesso di produzione rispetto al carico, ad esempio in giornate festive molto soleggiate, o viceversa scarsità di produzione e molta richiesta di energia, si deve necessariamente ricorrere all'accumulo e, quando non è sufficiente, al distacco controllato dalla rete di generatori o carichi, con i disagi che comporta.

Significativo il caso di *over-generation* avvenuto in Italia il 7 aprile 2024, giorno di Pasqua. La produzione da fonti rinnovabili ha toccato il

record di 14,5 GW, mai raggiunto prima, coprendo il 74% della domanda elettrica giornaliera e arrivando nel suo picco massimo, alle ore 13, al 97%. Per mantenere la stabilità di rete è stato necessario impiegare tutte le possibili forme di accumulo, pompando acqua nei bacini per immagazzinare 13,6 GWh oltre a ordinare il fermo di alcuni generatori eolici.

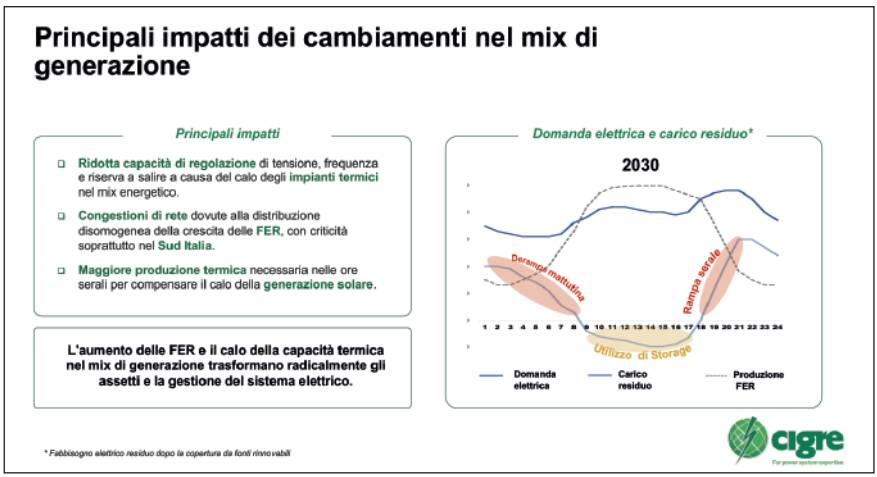



Figura 9. *Domanda elettrica giornaliera e carico residuo*

La stabilità di una rete ricca di produzioni rinnovabili intermittenti si salvaguarda attraverso il potenziamento del mix di generazione, la cui capacità deve crescere per fare fronte ai picchi di domanda. Nel 2024 in Italia è stata raggiunta la capacità totale installata di 141 GW, tra accumuli elettrochimici, idrico e pompaggi, eolico, fotovoltaico e termoelettrico e si prevede che questo valore aumenterà di almeno il 41% entro il 2030.

Anche l'incremento delle connessioni di rete a livello internazionale favorisce il mantenimento delle condizioni di stabilità. Il piano di sviluppo di Terna - Rete Elettrica Nazionale S.p.A. prevede interventi mirati per ottimizzare il sistema di trasmissione rafforzando le dorsali ad altissima tensione (380.000 e 500.000 Volt) nei collegamenti nord-sud, con le isole e con l'estero.

La mobilità elettrica e il *cold ironing* (elettrificazione dei porti con alimentazione dalla rete di terra delle navi in stazionamento) costituiscono ulteriori importanti elementi di sviluppo e tutela ambientale de-

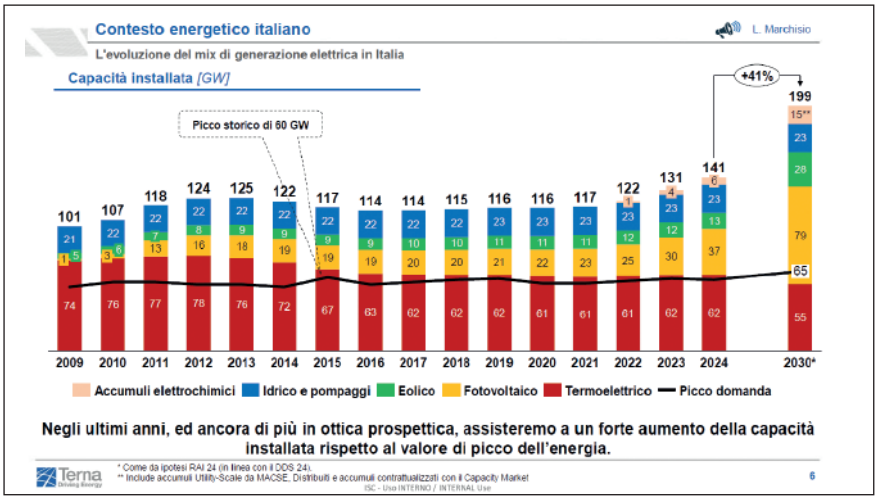



Figura 10. *L'evoluzione del mix di generazione elettrica in Italia, capacità installata (GW).*

gli ambienti cittadini. Anche le auto in ricarica possono contribuire alla stabilità della rete con l'energia immagazzinata nelle loro batterie; i porti verdi sono un concentrato di tecnologia con sistemi di produzione da rinnovabili e accumulo.

In particolare, l'elettrificazione delle banchine consente di spegnere i generatori delle navi durante lo stazionamento, azzerando l'inquinamento acustico e le emissioni di $CO_2$ e altri inquinanti.




Figura 11. *Porti verdi.*

Infine l'idrogeno, oltre a essere utilizzato nei trasporti più energivori in sostituzione o affiancamento alle batterie, può essere una forma di stoccaggio per l'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili.

Inoltre, le risorse solari ed eoliche possono trovarsi lontano dagli utenti finali e l'idrogeno, una volta prodotto, può essere trasportato senza i vincoli delle reti elettriche.

Fatto positivo è la riduzione del prezzo dell'energia pulita grazie al calo dei costi di pannelli fotovoltaici, turbine eoliche, sistemi di accumulo e batterie per auto elettriche.

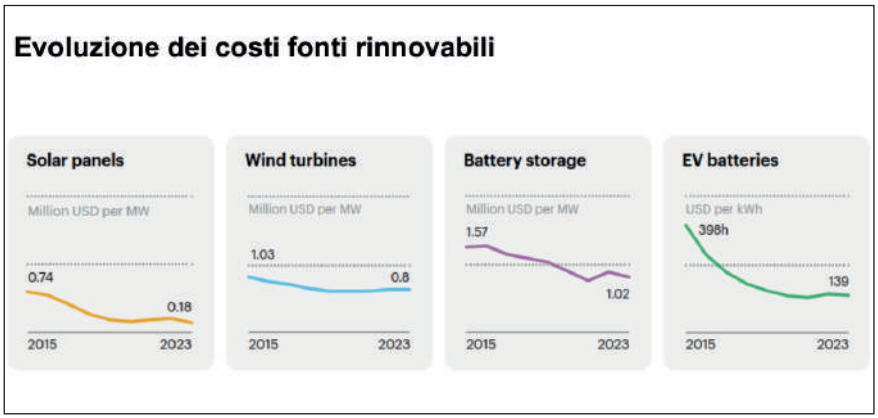



Figura 12. *Evoluzione dei costi delle fonti rinnovabili.*

## *Conclusioni*

La tecnologia sarà di grande aiuto nell'affrontare le sfide che ci attendono. Le città del futuro necessiteranno di energia pulita, reti e servizi efficienti, tecnologie digitali per monitorare i consumi e in generale ottimizzare la vita quotidiana dei cittadini. La tutela dell'ambiente e la produzione dell'energia sono aspetti che vanno assolutamente armonizzati e oggi abbiamo gli strumenti per farlo.

*Fonti bibliografiche*

CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques). https://www.cigre.org/

Climate Change (NASA critical long-term observations of our changing planet). https://science.nasa.gov/climate-change/

Global Monitoring Laboratory of the (GML) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). https://gml.noaa.gov/

International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2024 Report.* https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

McKinsey Global Institute, *Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts*, January, 16, 2020 Report. https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-response-physical-hazards-and-socioeconomic-impacts

Terna - Rete Elettrica Nazionale S.p.A. https://www.terna.it/en

**Maria Bolla*** – **Emanuela Drago*** – **Patrizia Perego****

# *Sustainable Technologies for the Valorization of Agri-Food Residues: From Waste to Resources*

**Abstract**: The agri-food residues have become one of the most crucial issues related to environmental sustainability, responsible resource management, and transition toward a circular economic paradigm. A substantial portion of the global food production is lost or discarded at different stages of the supply chain, contributing to the depletion of natural resources and the release of greenhouse gases, while producing materials that are costly to manage and dispose of. Despite these challenges, agri-food residues contain valuable bioactive compounds, functional biomolecules, and biodegradable raw materials that can serve as starting points for innovative applications in food technology, biotechnology, packaging, and medicine. This article provides an overview of the main sustainable strategies for transforming agri-food residues into high-value products focusing on green non-conventional extraction techniques, encapsulation methods and applications ranging from functional ingredients to biomedical platforms.

**Keywords**: agri-food waste valorization; green extraction technologies; bioactive compounds encapsulation; biodegradable biopolymers; circular bioeconomy.

*Tecnologie sostenibili per la valorizzazione dei residui agroalimentari: dai rifiuti alle risorse*
**Sommario**: I residui agroalimentari sono una questione cruciale legata alla sostenibilità ambientale, alla gestione responsabile delle risorse e alla transizione verso un paradigma economico circolare. Una parte sostanziale della produzione alimentare globale viene persa o scartata nelle diverse fasi della filiera, contribuendo all'esaurimento delle risorse naturali e al rilascio di gas serra, oltre a produrre materiali costosi da gestire e smaltire. Nonostante queste criticità, i residui agroalimentari contengono preziosi composti bioattivi, biomolecole funzionali e materie prime biodegradabili che possono costituire un punto di partenza per applicazioni innovative in tecnologie alimentari, biotecnologia, packaging e medicina. Verrà fornita una panoramica delle principali strategie sostenibili per trasformare i residui agroalimentari in prodotti ad alto valore aggiunto. L'enfasi è posta sulle tecniche di estrazione verdi e non convenzionali, sui metodi di incapsulamento e sulle applicazioni che spaziano dagli ingredienti funzionali alle piattaforme biomediche.

**Parole chiave**: valorizzazione degli scarti agroalimentari; tecnologie di estrazione green; incapsulamento di composti bioattivi; biopolimeri biodegradabili; bioeconomia circolare.

* DICCA, Università di Genova; ** Accademica p.perego@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.249-256

*Introduction*

Human activities have profoundly altered natural equilibria in the contemporary age, intensifying the exploitation of ecosystems and accelerating the consumption of critical resources. Within this scenario, the agri-food sector plays a pivotal and dual role. On one end, it is one of the main contributors to environmental issues. On the other hand, it offers significant opportunities for sustainability-driven innovation and mitigation of environmental problems. The food waste represents a paradigmatic example of this duality. Large quantities of edible and potentially valuable materials are continuously lost along the supply chain, generating environmental concerns, economic losses, and ethical dilemmas. Such residues embody the inefficient use of water, soil, energy, and labor, while also contributing to climate change through the emission of greenhouse gases during their decomposition in landfills (Kassim, Thomas, Afolabi 2022). At the same time, as demonstrated by numerous research studies, they contain a remarkable variety of high-added value compounds, including polyphenols, proteins, vitamins, lipids, and fibers. Their recovery is in line with the principles dictated by the Agenda 2030 and the Sustainable Development Goals, promulgating sustainability and circular economy practices, including the exploitation of renewable resources and processes aimed at extending the life cycle of materials (Ahmad, Esposito, Cirillo 2025). The development of efficient and environmentally friendly technologies is, therefore, crucial for transforming agri-food residues into estimable resources, able to generate economic, social, and environmental benefits. The scientific community is increasingly involved in designing processes capable of selectively extracting bioactive molecules, stabilizing, and incorporating them into innovative materials. In these regards, the present article offers a general overview of the valorization of agri-food waste through the use of green non-conventional extraction techniques and innovative encapsulation technologies. Finally, the main practical applications are reviewed.

*Agri-Food Waste in the Circular Economy Era*

Agri-food residues generate remarkable concern in the environmental, economic, and social spheres. Indeed, their accumulation con-

tributes to resource depletion, biodiversity loss, and environmental pollution. At the same time, these residues represent a renewable source of compounds suited to a wide range of industrial and scientific purposes. If approached through the main principles of circular economy, they can no longer be referred to as wastes but as opportunities for innovation (Ahmad, Esposito, Cirillo 2025). The traditional production processes are overcome by innovative ones, which embrace the circular economy aspects, promoting the preservation of material value for as long as possible. In this context, agri-food waste can be transformed into functional ingredients, bio-based materials, fertilizers, bioplastics, and biomedical components. To this end, the integration of green chemistry, process engineering, and biotechnology is required, along with careful consideration of scalability, regulatory requirements, and economic viability (Capanoglu, Nemli, Tomás-barbéran 2022). The challenge lies in combining the technological innovation with the industrial needs, in compliance with environmental and social requirements.

*Green Extraction Technologies*

Target components can be selectively extracted from agri-food residues through several techniques, which should guarantee and efficient extraction while reducing the associated environmental impact. Green non-conventional extraction methods have been developed for this purpose, offering advantages in terms of reduced toxic solvents consumption, shorter processing times, and better preservation of thermolabile compounds. Ultrasound-Assisted Extraction (UAE), Microwave-Assisted Extraction (MAE), High-Pressure and Temperature Extraction (HPTE), and Supercritical Fluid Extraction (SFE) represent some of the most widely explored approaches (Frosi *et al.* 2021) UAE exploits the cavitation effect, generating localized mechanical forces capable of rupturing plant cell walls and enhancing the transfer of intracellular compounds into the solvent. This technique allows efficient extraction under mild operating conditions (Chemat *et al.* 2017). MAE, instead, relies on the rapid heating of polar molecules induced by electromagnetic radiation. The resulting increase in the internal pressure within the plant tissues accelerates diffusion processes and shortens ex-

traction times. The exploitation of high pressures and temperatures, through HPTE, guarantees higher extraction yields, even if assisted by greener solvents, thanks to increased mass transfer and penetration phenomena. Finally, SFE represents a promising alternative for the recovery of several compounds, e.g. the lipophilic ones if carbon dioxide is used in its supercritical conditions. Indeed, supercritical carbon dioxide acts as a tunable solvent, whose selectivity and solvating power can be modulated through pressure and temperature adjustments. The above mentioned technologies represent sustainable approaches that can be adapted to different types of agri-food residues and scaled up for industrial applications. Their integration into biorefinery models supports the fractionation of waste materials into multiple streams, each containing compounds of high functional and commercial value.

*Encapsulation Strategies for Stabilizing Bioactive Extracts*

Bioactive extracts from agri-food residues usually exhibit limited chemical stability and tend to degrade when exposed to light, heat, oxygen, or pH variations. Encapsulation provides a solution to these limitations by entrapping the bioactive components within protective micro- or nanostructures. Encapsulation thus enhances stability, increases solubility, monitors release kinetics, and improves biological availability, thereby expanding the potential applications of natural extracts. Microencapsulation is frequently achieved through processes such as spray drying or coacervation, which transform liquid extracts into solid microparticles capable of protecting sensitive compounds during storage and processing. Spray drying is particularly valued for its scalability and its ability to produce fine powders that can be easily incorporated into food and nutraceutical formulations. Nanoencapsulation further enhances these advantages by creating submicron carriers such as liposomes, polymeric nanoparticles, or nano-emulsions. These nano-systems are able to specifically modulate the transport and release of bioactive molecules and facilitate their uptake across biological membranes. Encapsulation strategies represent an essential link between the extraction of bioactive compounds from natural resources and their final application. They transform fragile and reactive molecules into

stable and functional ingredients, suitable for a wide range of industrial uses. Their relevance spans the production of fortified foods, natural health products, pharmaceuticals, and advanced biomedical materials (Bufalini, Campardelli 2025).

## *Application Fields of Valorized Agri-Food Residues*

### *Food Technology*

Agri-food residues provide a rich source of natural compounds that can be used to improve the quality, stability, and functionality of food products. Extracts rich in antioxidants, pigments, or antimicrobial molecules can be directly incorporated into foods as natural additives, replacing synthetic ingredients and responding to the growing consumer interest in clean-label formulations. These compounds also contribute to extending shelf life by slowing oxidative degradation and inhibiting microbial growth. When integrated into biodegradable films produced through specific manufacturing processes, like solvent casting or electrospinning, natural extracts generate active packaging capable of interacting with the food surface and preserving freshness. This type of packaging reduces dependence on conventional plastics and supports the development of sustainable food preservation systems (Drago *et al.* 2020).

### *Biopolymer and Bioplastic Production*

Agri-food residues represent an ideal carbon source for microbial synthesis of biodegradable polymers such as polyhydroxyalkanoates. The conversion of organic waste into biopolymers reduces the environmental impact associated with traditional plastic production and lowers the cost of raw materials. These bio-based polymer types are versatile and can be processed into flexible films, rigid containers, coatings, or fibers. Their biodegradability makes them suitable for applications in packaging, agricultural tools, and single-use products that benefit from reduced environmental persistence. Furthermore, the use of residues as a feedstock strengthens the link between waste management and sustainable material development, establishing an integrated biorefinery model capable of generating added value from biomass waste otherwise destined for disposal (Bolla *et al.* 2025).

*Biomedical and Pharmaceutical*

Valorized residues offer significant potential in the biomedical field due to the presence of compounds with antioxidant, anti-inflammatory, or antimicrobial activity, as well as the possibility to produce biopolymers suitable for tissue engineering. The extracted biomolecules can be encapsulated and used in controlled-release drug delivery systems, where their natural properties contribute to therapeutic functions.

Moreover, the biopolymers derived from these residues can be processed into scaffolds designed to support cell adhesion, proliferation, and differentiation, making them suitable for applications in regenerative medicine. Their biodegradability ensures gradual integration or in vivo resorption, reducing the need for secondary interventions. Nanostructured materials based on natural residues also offer opportunities in wound healing, the fabrication of vascular grafts, and the development of bioactive coatings for medical devices (Ahmad, Esposito, Cirillo 2025; Rodriguez, Cu 2025).

*Sustainable Agriculture*

Extracts from agri-food residues can be reintegrated into agricultural systems in the form of nutrient-rich natural fertilizers. These products are able to enhance soil fertility, support the plant growth, and reduce the dependence on synthetic fertilizers, whose production is energetically intensive and environmentally impactful. When applied in hydroponic or aeroponic systems, nutrient solutions derived from residues help create closed-loop cultivation models characterized by minimal water use and high resource efficiency. This integration reinforces the principles of circular agriculture by returning organic matter to the production cycle and promoting a regenerative approach to food cultivation (Godlewska, Ronga, Michalak 2021).

*Environmental and Industrial Biotechnology*

Agri-food residues can be transformed into substrates for microbial processes exploited for wastewater treatment, bioenergy production, and remediation of contaminated environments. Their organic fractions provide a valuable carbon source for the microorganisms involved in anaerobic digestion, producing biogas and contributing to renewable energy generation. Such residues can also be used in the production of

biosorbents capable of capturing heavy metals or organic pollutants, offering sustainable alternatives to synthetic adsorbents. In industrial biotechnology, these materials support fermentation processes to produce enzymes, organic acids, and microbial metabolites, thereby expanding the portfolio of bio-based products derived from a circular use of resources (Ahamefule *et al.* 2024)

*Conclusions*

The valorization of agri-food residues through sustainable technologies represents a strategic opportunity for addressing environmental challenges while promoting innovation across multiple sectors. Green non-conventional extraction methods enable efficient recovery of valuable compounds, followed by encapsulation strategies which ensure their stability and functionality. These approaches demonstrate that agri-food residues are not merely waste but a renewable resource, capable of contributing to a more resilient and responsible socio-economic system. The transition to a circular model of production and consumption depends on technological progress, its economic feasibility, and the adoption of regulatory frameworks that support sustainable practices. Within this context, the integration of engineering, environmental preservation, and industrial development is essential from the perspective of a sustainable future in which circular practices and biorefinery models are pursued.

*References*

Ahamefule C.S., Osilo C., Ahmefule B.C. Madueke S.N., Moneke A.N. *Current Research in Microbial Sciences Simultaneous production of biofuel from agricultural wastes and bioremediation of the waste substrates: A review*. Curr. Res. Microb. Sci. (2024) 7: 100305. doi: 10.1016/j.crmicr.2024.100305

Ahmad T., Esposito F., Cirillo, T. *Food Bioscience Valorization of agro-food by-products: Advancing sustainability and sustainable development goals 2030 through functional compounds recovery*. Food Biosci. (2025) 62: 105194. doi: 10.1016/j.sio.2024.105194

Bolla M., Pettinato M., Francesco P., Fabiano B., Perego P. *Polyhydroxyalkanoates production from laboratory to industrial scale: A review*. Int. J. Biol. Macromol. (2025) 310: 143255. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.143255

Bufalini C., Campardelli R. *Versatile Emulsion-Based Encapsulation System Production Processes: A Review*. Process Saf. Prog. (2025) 13: 1409. doi: 10.3390/pr13051409

Çapanoğlu E., Nemli E., Tomás-barbéran F. *Novel Approaches in the Valorization of Agricultural Wastes and Their Applications*. J. Agric. Food Chem. (2022) 70: 6787-6804. doi: 10.1021/acs.jafc.1c07104

Chemat F., Rombaut N., Sicaire A., Meullemiestre A., Abert-vian M. *Ultrasonics Sonochemistry Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review*. Ultrason Sonochem (2017) 34: 540-560. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Drago E., Campardelli R., Pettinato M., Perego P. *Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review*. Foods (2020) 9. doi: 10.3390/foods9111628

Frosi I., Montagna I., Colombo R., Milanese C. *Recovery of Chlorogenic Acids from Agri-Food Wastes: Updates on Green Extraction Techniques*. Molecules (2021) 26: 4515. doi: 10.3390/molecules26154515

Godlewska K., Ronga D., Michalak I. *Plant extracts - importance in sustainable agriculture*. Ital. J. Agron. (2021) 16: 1851. doi: 10.4081/ija.2021.1851

Kassim F.O., Thomas C.L.P., Afolabi O.O.D. *Biomass and Bioenergy Integrated conversion technologies for sustainable agri-food waste valorization: A critical review*. Biomass and Bioenergy (2022) 156: 106314. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106314

Rodrigues F., Cu D. *Editorial: Exploring bioactive polyphenols in agri-food wastes: From extraction to biological impact*. Front. Nutr. (2025) 12: 1638180. doi: 10.3389/fnut.2025.1638180

Alessandro Bonsignore*

# *Consenso informato e disposizioni anticipate di trattamento*

**Sommario**: L'articolo analizza la legge 219/2017, che disciplina consenso informato e disposizioni anticipate di trattamento, evidenziando il passaggio da una medicina paternalistica a un'alleanza terapeutica fondata su autonomia del paziente, responsabilità del medico e valore della comunicazione. Esamina rifiuto delle cure, DAT, minori e incapaci, urgenze, cure palliative e fine vita, chiarendo la distinzione tra rifiuto di trattamenti sanitari ed eutanasia attiva.

**Parole chiave**: consenso informato; disposizioni anticipate di trattamento; autodeterminazione del paziente; alleanza terapeutica; fine vita.

**Abstract**: *Informed Consent and Advance Treatment Directives*
The article examines Italian Law No. 219/2017 on informed consent and advance treatment directives, highlighting the shift from paternalistic medicine to a therapeutic alliance based on patient autonomy, physician responsibility, and the value of communication. It addresses refusal of treatment, advance directives, minors and incapacitated persons, emergencies, palliative care, and end-of-life decisions, clarifying the distinction between refusing medical treatment and active euthanasia.

**Keywords**: informed consent; advance treatment directives; patient self-determination; therapeutic alliance; and-of-life care.

* Università di Genova alessandro.bonsignore@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.257-266

*Introduzione*

La legge 219/2017 ha fornito una disciplina organica al consenso informato e alle disposizioni anticipate di trattamento. Il suo nucleo è semplice ma decisivo: il paziente è il centro della relazione di cura, il consenso è un processo di comunicazione e il medico conserva autonomia tecnica entro i limiti della legge, della deontologia e delle buone pratiche cliniche.

Quando si parla di consenso informato molto spesso si pensa a un modulo da firmare prima di un intervento, di un esame o di una terapia. In realtà, ridurre il consenso a un semplice adempimento burocratico è un errore profondo, sia sul piano giuridico sia su quello clinico. Il consenso informato rappresenta uno dei cardini del rapporto di cura: è il punto in cui si incontrano l'autonomia della persona malata e la competenza professionale del medico. In altre parole, non è un foglio, ma un processo di comunicazione.

Questo principio, che oggi consideriamo acquisito, è stato per lungo tempo affidato più all'elaborazione giurisprudenziale che a una disciplina legislativa organica. Per anni, infatti, in Italia il consenso informato è stato costruito soprattutto attraverso sentenze, orientamenti della Corte di Cassazione e progressiva evoluzione della sensibilità sociale e professionale.

Solo con la legge n. 219 del 22 dicembre 2017, entrata in vigore nel 2018, il nostro ordinamento ha finalmente dato forma normativa compiuta sia al consenso informato sia alle disposizioni anticipate di trattamento, comunemente dette DAT.

Si tratta di una legge importante perché ha chiarito principi fondamentali, ha risolto molte incertezze interpretative e ha affrontato con maggiore precisione temi delicatissimi come il rifiuto delle cure, la nutrizione e l'idratazione artificiali, il ruolo dei familiari, la tutela dei minori e delle persone incapaci, la pianificazione condivisa delle cure e, appunto, le DAT. Al tempo stesso è una legge che continua a suscitare discussioni, perché tocca il confine tra libertà individuale, tutela della salute, dignità della persona e limiti giuridici posti alla disponibilità della vita.

*Il fondamento del consenso informato*

Il consenso informato non nasce dal nulla. Le sue radici sono costituzionali e internazionali. In primo luogo, vi è l'articolo 32 della Costituzione, secondo cui nessuno può essere obbligato a un determinato trattamento sanitario se non per disposizione di legge. È un principio essenziale: il corpo della persona non è a disposizione del medico, dell'ospedale o dello Stato, se non nei limiti eccezionali previsti dall'ordinamento.

A questo si aggiunge, sul piano internazionale, la Convenzione di Oviedo, che ribadisce come nessun trattamento sanitario possa essere effettuato senza il consenso libero e informato della persona interessata. Sul piano penalistico, poi, assume rilievo anche l'articolo 50 del Codice penale, che esclude la punibilità quando la lesione di un diritto avviene con il consenso valido del titolare di quel diritto. Applicato alla medicina, questo principio significa una cosa molto concreta: il trattamento sanitario è lecito perché il paziente lo autorizza nell'interesse della propria salute. In mancanza di consenso, perfino un atto apparentemente banale, come incidere la cute per una procedura, costituirebbe una lesione personale.

Da qui si comprende perché il consenso non sia un fatto secondario, ma un vero e proprio presupposto di liceità dell'atto medico.

*Dalla medicina paternalistica all'alleanza terapeutica*

Per molti decenni la medicina ha vissuto dentro una logica paternalistica: il medico decideva, il paziente si affidava. Questo modello, in parte comprensibile in epoche in cui le conoscenze scientifiche erano percepite come quasi sacre e non facilmente accessibili al cittadino, oggi non è più compatibile con il nostro ordinamento e con la moderna etica della cura.

La legge 219/2017 afferma chiaramente che nella relazione di cura si incontrano due poli: da un lato l'autonomia decisionale del paziente, dall'altro la competenza, l'autonomia professionale e la responsabilità del medico. Questo significa che il paziente non è un soggetto passivo, ma il protagonista delle decisioni che riguardano il proprio corpo e la

propria salute. Tuttavia, significa anche che il medico non è un mero esecutore materiale di volontà altrui: conserva una propria autonomia tecnica e non è obbligato a eseguire richieste contrarie alla legge, alla deontologia o alle buone pratiche clinico-assistenziali.

Il punto di equilibrio è proprio l'alleanza terapeutica, espressione spesso usata ma non sempre praticata. Il consenso informato dovrebbe esserne la forma più alta: non un atto burocratico imposto alla fine della visita, ma il risultato di un dialogo autentico, comprensibile e rispettoso.

*Il paziente è l'interlocutore centrale*

Uno dei chiarimenti più importanti introdotti dalla legge riguarda il rapporto tra medico, paziente e familiari. Nella pratica, soprattutto in passato, non era raro che il professionista sanitario si rivolgesse prima ai parenti, ritenendo magari di proteggere il malato da informazioni ritenute troppo gravose. Talvolta questo accadeva in buona fede, ma il principio giuridico è chiaro: l'interlocutore primario del medico è il paziente.

Spetta al paziente decidere se vuole conoscere integralmente il proprio stato di salute, se preferisce ricevere solo alcune informazioni oppure se desidera delegare un'altra persona a dialogare con i sanitari. Questa persona può essere il coniuge, un figlio, un altro parente, ma anche un amico o un soggetto di fiducia. Non esiste una gerarchia automatica della parentela. La volontà del paziente prevale.

Questo aspetto è di grande rilievo culturale: il diritto all'informazione comprende anche il diritto a non sapere tutto, purché sia il paziente a scegliere consapevolmente questa strada. Ciò che non è consentito è che siano i sanitari o i familiari a decidere al posto suo, senza una sua espressa volontà.

*Il consenso non è solo scritto, ma oggi deve essere documentato*

Per lungo tempo il nostro ordinamento ha valorizzato soprattutto l'oralità del consenso. L'idea di fondo era che il rapporto di cura non dovesse essere soffocato dalla burocrazia. Con il tempo, però, la complessità crescente della medicina, l'aumento del contenzioso e l'esigenza

di documentare in modo preciso l'informazione resa al paziente hanno portato a una progressiva formalizzazione.

La legge 219/2017 stabilisce che il consenso informato deve essere documentato, in forma scritta oppure attraverso videoregistrazioni o dispositivi che consentano alla persona con disabilità di comunicare. Anche questo punto è spesso stato male interpretato: la videoregistrazione non nasce per difendere il medico da eventuali accuse, ma per estendere il diritto al consenso anche a chi non può parlare o scrivere. Il riferimento ideale è il caso di persone perfettamente coscienti ma impossibilitate a esprimersi con i mezzi ordinari.

Nella pratica clinica ciò comporta una conseguenza significativa: oggi non basta più un consenso generico all'ingresso in ospedale. Ogni procedura rilevante richiede un consenso specifico, adeguato a quella determinata prestazione. Non è dunque corretto ritenere che una firma iniziale autorizzi indistintamente ogni successivo esame o trattamento.

### *Nutrizione e idratazione artificiali: la vera svolta*

Uno dei punti più innovativi e, per molti anni, più controversi della legge riguarda la qualificazione di nutrizione e idratazione artificiali. La norma afferma che, essendo somministrate su prescrizione medica e mediante dispositivi medici, esse devono essere considerate a tutti gli effetti trattamenti sanitari.

Questo chiarimento ha un impatto enorme. Se sono trattamenti sanitari, possono essere rifiutati o interrotti dal paziente, al pari di una ventilazione meccanica, di una trasfusione o di altre terapie. Per lungo tempo, invece, su questo terreno si era sostenuto che si trattasse di mezzi di sostegno vitale non rifiutabili, proprio perché direttamente connessi alla sopravvivenza.

La legge ha quindi segnato una svolta netta: la persona capace di autodeterminarsi può rifiutare anche trattamenti che la mantengono in vita, e il medico che rispetta questa volontà non incorre, per ciò solo, in responsabilità civile o penale connessa alla mancanza di consenso.

Va però chiarito un punto essenziale: questo non significa che il consenso costituisca uno scudo generale per qualsiasi esito negativo. Se un intervento è eseguito male, il medico risponde comunque dell'errore

tecnico o organizzativo. La protezione riguarda la dimensione del vizio di consenso, non la "malpractice" in senso complessivo.

*Il paziente può rifiutare le cure, ma non pretendere l'impossibile*

La centralità del paziente non equivale a una sovranità assoluta. La legge dice chiaramente che il paziente non può esigere trattamenti contrari alla legge, alla deontologia professionale o alle buone pratiche clinico-assistenziali. Questo principio tutela la dignità del malato, ma anche quella del medico e della medicina stessa.

Il sanitario non è obbligato a eseguire richieste prive di fondamento scientifico o incompatibili con i limiti etici e giuridici dell'ordinamento. In altri termini, il paziente ha diritto di scegliere tra opzioni lecite e appropriate, non di imporre qualsiasi prestazione desideri.

È un equilibrio delicato, ma indispensabile per evitare che il rapporto di cura degeneri in una contrapposizione tra volontà individuale assoluta e potere tecnico assoluto. La legge cerca, appunto, di bilanciare.

*Urgenza, emergenza e stato di necessità*

Un tema classico della medicina legale riguarda il rapporto fra consenso e stato di necessità. Tradizionalmente si distingueva tra urgenza ed emergenza: nella prima vi sarebbe stato un margine temporale per acquisire il consenso, nella seconda la necessità di intervenire immediatamente per salvare la vita.

La legge 219/2017 supera in parte questa rigidità, ampliando la possibilità di agire senza previo consenso quando sussista una reale situazione di necessità clinica. Tuttavia resta fermo un principio fondamentale: se il paziente è vigile, capace e manifesta un dissenso attuale, quel dissenso va rispettato.

È il caso, spesso richiamato, del testimone di Geova che rifiuta la trasfusione. Se la persona è cosciente e ribadisce il proprio rifiuto, il medico non può imporre la trasfusione neppure in una situazione gravissima. Se invece il paziente arriva in pronto soccorso privo di coscienza, senza elementi noti che facciano emergere una volontà

contraria, il sanitario può agire in stato di necessità senza che ciò costituisca una violazione.

*Il tempo della comunicazione è tempo di cura*

Tra le affermazioni più felici della legge vi è quella secondo cui il tempo della comunicazione tra medico e paziente costituisce tempo di cura. Non è una frase retorica: è un principio normativo di grande valore.

Comunicare bene richiede tempo, ascolto, capacità di tradurre concetti complessi in parole comprensibili, disponibilità a rispondere a dubbi e paure. In un sistema sanitario sotto pressione, dove si tende a comprimere i tempi delle visite e a massimizzare il numero delle prestazioni, questo principio ricorda che non esiste buona medicina senza buona comunicazione.

Il consenso informato, dunque, non è un allegato della cura: ne è parte integrante.

*Minori, incapaci e ruolo del giudice tutelare*

La legge affronta con particolare attenzione la posizione dei minori e delle persone incapaci. Anche qui il linguaggio giuridico è cambiato nel tempo: da una vecchia idea di potestà si è passati a quella di responsabilità genitoriale. Non è solo un cambio lessicale: è un cambio di prospettiva.

Per i minori il consenso è espresso dai genitori esercenti la responsabilità genitoriale, ma il minore deve essere coinvolto in modo proporzionato alla sua età e maturità. Nei casi di conflitto fra genitori, o fra genitori e sanitari, entra in gioco il giudice tutelare, figura essenziale per dirimere le controversie quando la decisione incide sulla salute del minore.

Se i genitori rifiutano cure ritenute necessarie nell'interesse del figlio, i sanitari non possono semplicemente subire la situazione: devono attivare il giudice tutelare, il quale può autorizzare i trattamenti e, in casi specifici, limitare temporaneamente la responsabilità genitoriale. Nelle situazioni di massima urgenza, la risposta del giudice può arrivare anche verbalmente, con successiva formalizzazione.

*Le disposizioni anticipate di trattamento: che cosa sono davvero*

Le DAT rappresentano una delle maggiori novità della legge. Consentono a ogni persona maggiorenne e capace di intendere e di volere di esprimere anticipatamente le proprie volontà in materia di trattamenti sanitari, per l'eventualità futura in cui non sia più in grado di autodeterminarsi. In termini semplici, permettono di dire oggi che cosa si vorrebbe, o non si vorrebbe, se domani si fosse in condizioni di incapacità. È per questo che spesso vengono chiamate, impropriamente ma efficacemente, testamento biologico.

Con le DAT si può anche nominare un fiduciario, cioè una persona di fiducia incaricata di rappresentare il disponente nelle relazioni con i medici e con le strutture sanitarie. Il fiduciario non è un dettaglio accessorio: è spesso la figura concreta che rende effettivamente conoscibile e applicabile la volontà espressa. In sua assenza, infatti, il rischio è che la DAT esista ma non sia prontamente reperibile o interpretabile nel momento del bisogno.

*Un sistema utile, ma ancora perfettibile*

Dal punto di vista pratico uno dei limiti emersi è stata la pluralità delle modalità di deposito delle DAT: presso il notaio, presso il Comune di residenza e mediante altre forme di raccolta consentite. L'intento era quello di facilitare il cittadino, ma in concreto si è creato per anni un sistema frammentato. Da qui la necessità di una banca dati nazionale che consenta ai sanitari di verificare l'esistenza delle DAT quando necessario.

Resta comunque una raccomandazione di buon senso: chi redige una DAT dovrebbe scegliere un fiduciario affidabile, informarlo chiaramente e verificare che il deposito sia effettivamente registrato nei canali accessibili.

Le DAT possono essere modificate o revocate in ogni momento. Inoltre, se la persona torna a essere capace e manifesta una volontà attuale diversa, quest'ultima prevale sempre sulle disposizioni anticipate.

*Fine vita, cure palliative e divieto di ostinazione irragionevole*

La legge 219/2017 affronta anche il tema del fine vita, chiarendo che la persona ha diritto a non subire ostinazione irragionevole nelle cure. Si supera così, anche sul piano terminologico, la vecchia espressione di accanimento terapeutico, sostituendola con una formula più precisa.

Allo stesso tempo, la legge valorizza le cure palliative e la sedazione palliativa profonda continua nei casi previsti, riconoscendo che alleviare la sofferenza non è una concessione, ma un dovere di cura. Questo passaggio ha avuto anche un significato culturale importante in un Paese che, per molto tempo, ha guardato con diffidenza all'uso della morfina e di altri strumenti palliativi, per il timore infondato che equivalessero ad anticipare la morte.

La corretta terapia del dolore, così come la sedazione palliativa nei casi consentiti, non va confusa con pratiche eutanasiche: il loro fine è il controllo della sofferenza, non la provocazione intenzionale della morte.

*Consenso, rifiuto delle cure ed eutanasia: non sono la stessa cosa*

Uno degli equivoci più frequenti nel dibattito pubblico consiste nel mettere sullo stesso piano il rifiuto o l'interruzione di trattamenti sanitari e l'eutanasia attiva. Non è così.

Nel nostro ordinamento il paziente ha il diritto di rifiutare trattamenti sanitari anche salvavita. Questo rientra nel principio di autodeterminazione e nella disciplina del consenso informato. Altra cosa è l'eutanasia attiva diretta, cioè il compimento di un atto finalizzato a provocare la morte, ad esempio attraverso la somministrazione di farmaci in dosaggio letale. Questa condotta, allo stato attuale, non è consentita in Italia.

Restano inoltre in vigore norme penali come quelle sull'omicidio del consenziente e sull'aiuto o istigazione al suicidio, salvo i limitati spazi individuati dalla giurisprudenza costituzionale in casi molto specifici, rigorosamente delimitati. È dunque indispensabile non confondere piani diversi: il rispetto del rifiuto di un trattamento sanitario non equivale alla pratica dell'eutanasia attiva.

*Un cambio di civiltà giuridica e sanitaria*

La legge sul consenso informato e sulle DAT ha segnato un passaggio di civiltà. Ha spostato il baricentro della cura verso la persona, senza annullare il ruolo del medico. Ha ricordato che curare non significa solo fare, ma anche spiegare, ascoltare, rispettare, accompagnare. Ha dato dignità normativa a principi che in parte esistevano già, ma che avevano bisogno di essere chiariti e consolidati.

Naturalmente non ha risolto ogni problema. Restano zone di difficoltà applicativa, persistono disomogeneità organizzative, vi sono tensioni fra norma giuridica, deontologia professionale e sensibilità etiche differenti. Tuttavia il messaggio di fondo è chiaro: in medicina non si può più prescindere dalla volontà informata della persona.

Il consenso informato, se vissuto correttamente, non impoverisce la medicina, non la burocratizza e non la rende più fredda. Al contrario, la rende più rispettosa, più trasparente e, in definitiva, più umana.

**Maurizio Canepa***

# *Dalle stelle alle (nano)piramidi*

**Sommario**: Nel 2015 i due interferometri giganti LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) hanno captato il segnale di un'onda gravitazionale generato dalla fusione di due buchi neri. Nel 2017, i due interferometri LIGO e l'interferometro Virgo (European Gravitational Observatory) hanno rivelato un altro evento simile, determinando la porzione di cielo di provenienza del segnale, e il primo evento generato dalla fusione di due stelle di neutroni. La relazione presenterà sinteticamente l'accidentato percorso, durato un secolo, dalle prime teorie einsteiniane sulle onde gravitazionali alle prime rivelazioni. Si vuole illustrare come il successo degli esperimenti LIGO-Virgo dipenda, tra altri fattori, dallo sviluppo di materiali e metamateriali innovativi, in particolare dalle proprietà degli specchi "perfetti"(riflettori interferenziali) impiegati negli interferometri, costituiti da strati dielettrici sottili di ossidi allo stato amorfo, la cui qualità è legata all'ordinamento nanoscopico a medio raggio di unità strutturali primarie poliedriche.

**Parole chiave**: onde gravitazionali; rivelatori interferometrici; specchi dielettrici; ossidi amorfi; ellissometria spettroscopica.

**Abstract**: *From Stars to (Nano)Pyramids*
In 2015, the two giant interferometers LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) detected the signal of a gravitational wave generated by the merger of two black holes. In 2017, the two LIGO interferometers and the Virgo interferometer (European Gravitational Observatory) detected another similar event, determining the portion of the sky from which the signal originated, and the first event generated by the merger of two neutron stars. This talk aims to briefly outline the century-long journey from Einstein's first theories of gravitational waves to the first detections and to illustrate how the success of the LIGO-Virgo experiments depends, among other factors, on the development of innovative materials and metamaterials. It will focus on the properties of the "perfect" mirrors (interferential reflectors) used in the interferometers, consisting of thin dielectric layers of amorphous oxides, whose quality is linked to the medium-range nanoscopic ordering of polyhedral primary structural units.

**Keywords**: gravitational waves; interferometric detectors; dielectric mirrors; amorphous oxides; spectroscopic ellipsometry.

---

* Università di Genova maurizio.canepa@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.267-293

## 1. *Introduzione*

Nel 1915, in un'Europa che era rapidamente e tragicamente sprofondata negli orrori delle trincee, Albert Einstein pubblicava l'articolo contenente la teoria e le equazioni della Relatività Generale (Einstein 1915). Completava un percorso personale iniziato con l'articolo sulla Relatività Speciale (Einstein 1905), apparso nel suo cosiddetto *Annus Mirabilis*. Tra il 1916 e il 1918 Einstein si dedicò intensamente allo studio di come le equazioni della relatività generale potessero comportare l'esistenza di *Gravitationswellen* (onde gravitazionali) (Einstein 1916; Einstein 1918). Le onde gravitazionali erano state preconizzate anni prima da diversi illustri fisici matematici (Heavyside, Poincaré), sulla scia del successo delle onde Hertziane, perlopiù ricorrendo ad argomentazioni analogiche, a posteriori rivelatesi forzate, tra la forza elettrica e la forza gravitazionale (e i rispettivi campi). La caratterizzazione matematica delle onde gravitazionali fu un compito difficilissimo anche per lo stesso Einstein, che tuttavia pervenne, sulla base di assunzioni semplificative (procedimento di *linearizzazione*), a proporre una equazione delle onde compatta ed elegante; la propagazione delle onde avveniva alla velocità della luce. Doveva passare un secolo per la prima evidenza sperimentale diretta di tali onde. Nel settembre 2015 i due interferometri giganti LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory), negli Stati Uniti,[1] hanno rivelato, in coincidenza, il primo segnale di un'onda gravitazionale (fig. 1), prodotta nello spazio-tempo cosmico (Abbott 2016) nelle ultime fasi della fusione di un sistema binario di buchi neri, in accordo con previsioni teoriche (Cutler 1993). Il confronto con i modelli ha permesso di assegnare ai due corpi celesti una massa pari a 36 e 29 masse solari.

Nell'agosto 2017 i due interferometri statunitensi e, con grande soddisfazione per la comunità scientifica italiana, l'interferometro Virgo (European Gravitational Observatory)[2] hanno rivelato un altro evento di coalescenza di buchi neri triangolando la porzione di cielo di provenienza del segnale (Abbott 2017a). Sempre nell'agosto 2017 LIGO

[1] I due interferometri sono situati a Hanford (stato di Washington) e a Livingston (Louisiana).

[2] Operativo nella piana di Cascina (Pisa).

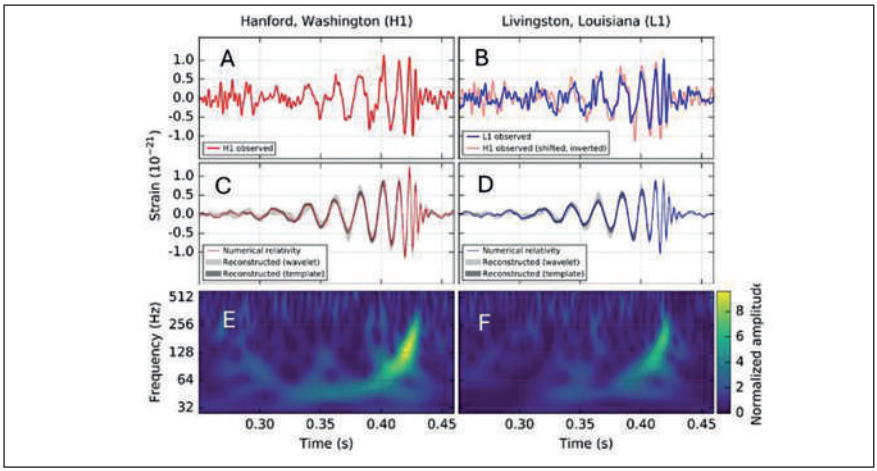



Figura 1. *Prima rivelazione diretta di onde gravitazionali (evento GW150914) ad opera degli interferometri LIGO. (A-B) Dati sperimentali: variazione della lunghezza dei bracci dell'interferometro rispetto alla lunghezza a riposo (vide infra). (C-D) Confronto tra modello teorico e dati. (E-F) "Chirp": variazione caratteristica della frequenza del segnale durante l'evento (Crediti: LIGO collaboration e American Physical Society).*

e Virgo hanno poi rivelato il primo evento di fusione di due stelle di neutroni (Abbott 2017b). Questa rivelazione, ottenuta in coincidenza con osservazioni elettromagnetiche, rappresenta una pietra miliare dell'astronomia "multi-messenger" (Abbott 2017c). Da allora gli interferometri hanno rivelato più di duecento eventi.[3] L'osservazione diretta delle onde gravitazionali è valsa il premio Nobel per la fisica 2017[4] a tre fisici statunitensi, Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne, iniziatori e propugnatori del progetto LIGO. Si completava un lungo percorso che si potrebbe far risalire alla formulazione newtoniana della legge di gravitazione universale, e alla realizzazione del primo telescopio, attribuita a Galilei. Allo stesso tempo si apriva una nuova era di ricerca con l'obbiettivo di penetrare nello spazio-tempo sempre più profondo in prospettiva cosmologica.

[3] Per maggiori dettagli si consulti https://gwosc.org/eventapi/html/GWTC/
[4] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/

## 2. *Il legno storto della fisica*

Cento anni dalla prima concezione teorico-matematica alle prime rivelazioni sperimentali possono apparire molti. Certamente, la ricerca sulla gravitazione non ebbe il potenziale interesse militare di altre scoperte scientifiche sostanzialmente coeve. L'evoluzione dalla teoria agli esperimenti fu in effetti piuttosto tortuosa ed è stata ricostruita con dovizia di particolari, anche con interessanti risvolti aneddotici (Kennefick 2007). Con una certa dose di arbitrarietà il percorso può essere distinto in tre fasi: (a) l'affinamento della descrizione teorico-matematica e la piena comprensione della natura fisica delle onde gravitazionali; (b) l'elaborazione di strategie sperimentali potenzialmente atte a consentirne la rivelazione; (c) la progressiva realizzazione di esperimenti di crescente sensibilità e complessità. Ognuna di queste fasi, logicamente e temporalmente conseguenti, si è dispiegata attraverso molti decenni.

Riguardo al primo punto è opportuno ricordare che la teoria della relatività generale aveva ricevuto una poderosa conferma dall'osservazione della deviazione di un raggio di luce da parte del campo gravitazionale del sole fatta durante un'eclisse totale di sole nel 1919 (Dyson 1919). Tre anni più tardi, proprio il più noto ricercatore coinvolto in questa osservazione, Arthur Eddington, direttore dell'Osservatorio di Cambridge, pubblicò un articolo critico su alcuni aspetti della trattazione matematica delle onde gravitazionali nei lavori di Einstein (Eddington 1922). Forse con una sfumatura di malignità, Eddington, a proposito di due delle soluzioni proposte da Einstein (su cui Einstein stesso aveva sollevato dubbi) scriveva: "They are merely sinuosities in the co-ordinate-system, and the only speed of propagation relevant to them is 'the speed of thought'".

Secondo il principio galileiano del *provando e riprovando*, la sistemazione teorica non era ancora stata raggiunta e si era aperta di fatto una crisi nella fisica teorica della gravitazione. Lo stesso Einstein, in un percorso di ricerca non lineare, arrivò a dubitare della reale esistenza delle onde gravitazionali, o quanto meno della possibilità di determinarne correttamente le equazioni. Con la nuova guerra mondiale, molte menti brillanti furono coinvolte in ricerche orientate a obiettivi bellici. La ricerca sulle onde gravitazionali non ebbe sviluppi notevoli fino alla fine degli anni quaranta. La sistemazione teorica si ebbe infine verso la metà degli anni cinquanta. Nell'articolo *On the physical significance of*

*the Riemann tensor* (Pirani 1956) un giovane fisico matematico, Felix Pirani, sviluppando alcuni importanti lavori degli anni trenta (tra cui uno del matematico italiano Tullio Levi Civita) dimostra "the intimate connection between the Riemann tensor and generally relativistic dynamics […]" e suggerisce le implicazioni del suo studio per la ricerca sulle onde gravitazionali. In effetti, negli anni seguenti, Pirani e il suo mentore accademico Hermann Bondi elaborarono soluzioni a onda piana basate sulla relatività generale in connessione con la geometria riemanniana. Pirani e Bondi furono tra i partecipanti alla "Conference on the Role of Gravitation in Physics"[5] svoltasi a Chapel Hill (North Carolina) nel 1957. Dalla conferenza, un punto di svolta negli studi sulle onde gravitazionali, emersero diverse direttrici di studio. Si trattava da un lato di approfondire la comprensione teorica delle tipologie di sorgenti di onde gravitazionali, della loro intensità, delle forme d'onda. Fece capolino l'idea dell'utilizzo del calcolo numerico, che avrebbe avuto un'importanza straordinaria anche in relazione agli sviluppi sperimentali. Dall'altro lato emerse chiaramente la necessità di evidenze sperimentali che potessero confermare – o confutare – il progresso dei risultati teorici. A tal proposito vanno ricordati gli interventi, poco paludati nell'atmosfera generale, di Richard Feynman. Egli propose un esperimento concettuale per determinare il lavoro meccanico speso dalle onde gravitazionali, spesso evocato negli anni a venire come l'argomento delle "Sticky Beads"; è interessante riportare una frase significativa in uno dei suoi "comments": "I think it is easy to see that if gravitational waves can be created, they can carry energy and can do work".

## 3. *L'età delle antenne*

Tra i partecipanti alla conferenza GR1 figura Joseph Weber, un brillante fisico sperimentale già noto per contributi pionieristici nella fisica dei laser e dei maser. Dotato di conoscenze sviluppate di fisica elettronica e di notevoli capacità ingegneristiche, Weber decise di intraprendere la realizzazione di un rivelatore di onde gravitazionali. Concepì quindi l'idea di utilizzare antenne risonanti costituite da barre cilindriche mas-

[5] Nota anche come General Relativity 1 (o GR1).

sicce di alluminio, isolate nella maniera migliore possibile da disturbi ("noise") vibrazionali di varia natura. Sensori piezoelettrici, posizionati opportunamente sulla barra, avrebbero potuto rivelarne quelle minuscole deformazioni (fino a $10^{-16}$ metri, una sensibilità impressionante per l'epoca), attese al passaggio di un'onda di frequenza prossima alla risonanza della barra.

Negli anni a seguire vennero realizzate diverse antenne di crescente sensibilità, con lunghezza dell'ordine di 1-2 metri e diametro di qualche decina di centimetri, e frequenze di risonanza dell'ordine del kilohertz (fig. 2). Weber si rese anche conto dell'importanza di una rivelazione sincrona su antenne localizzate in siti ben distinti per meglio identificare segnali spuri. Nel 1969, sulla prestigiosa rivista "Physical Review Letters" dell'American Physical Society, dichiarava infine la "scoperta della radiazione gravitazionale" (Weber 1969): "data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation". Le onde erano attribuite a sorgenti relativamente intense poste nel centro della nostra galassia. L'articolo divenne oggetto di critiche circostanziate e, in sostanza, la comunità scientifica finì per disconoscere la scoperta.[6] Il concetto di antenna alla Weber ebbe comunque notevole successo e diffusione. È doveroso ricordare le ricerche di scienziati italiani su antenne operanti a temperature criogeniche, concepite per abbattere il cosiddetto rumore termico. A partire dai primi anni settanta, sotto l'impulso di Edoardo Amaldi e l'egida dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), vennero avviati diversi esperimenti.[7] Nonostante progressivi raffinamenti sperimentali, le antenne gravitazionali non raggiunsero mai l'obiettivo dell'osservazione. Tuttavia, lo sviluppo di rivelatori sempre più sensibili contribuì a diffondere nuove consapevolezze della enorme difficoltà della rivelazione diretta di segnali estremamente deboli in rapporto a molteplici fonti di interferenze che furono studiate e catalogate. Non secondariamente, le ricerche sulle antenne contribuirono alla formazione di una comunità di ricerca sperimentale che avrebbe concepito nuove imprese scientifiche.

---

[6] Retrospettivamente, un fisico sperimentale non può che rimanere ammirato dal contributo di Weber.

[7] Esperimenti Nautilus (INFN Frascati), Auriga (INFN Legnaro) ed Explorer (CERN Ginevra).



Figura 2. *Nella fotografia a sinistra Joseph Weber è al lavoro su un'antenna; al centro della barra, in posizione radiale, si possono notare i dispositivi piezoelettrici per rilevare le deformazioni. La fotografia a destra mostra l'originale monumento nel Weber Memorial Garden all'Università del Maryland.*

## 4. *Intermezzo: la scoperta delle pulsar*

Nel 1967, all'osservatorio astronomico di Cambridge, aveva avuto luogo la prima osservazione di una pulsar (Hewish 1968). Le pulsar, stelle massicce, compatte e in rapidissima rotazione attorno al loro asse, costituiscono una sorta di radiofaro ("beacon"). La scoperta apriva nuovi orizzonti nella ricerca astronomica e valse ad Antony Hewish il premio Nobel 1974.[8] Proprio nel 1974, presso il radiotelescopio di Arecibo (Puerto Rico), Russell A. Hulse e Joseph H. Taylor, allora all'Università del Massachusetts, realizzarono la prima osservazione di un sistema binario comprendente una pulsar[9] (Hulse 1974) (fig. 3A). Una proprietà molto importante della nuova pulsar si rivelò la stabilità del periodo di impulso radio (0,05903 secondi). Si era scoperto un vero e proprio "laboratorio spaziale" per nuove verifiche della teoria della relatività generale, inclusa la possibilità di ottenere informazioni sulle onde gravitazionali. Le osservazioni cumulate negli anni successivi evidenziarono infatti una diminuzione del periodo orbitale – circa 75 microsecondi

[8] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1974/summary/
[9] Denominata PSR 1913 + 16.

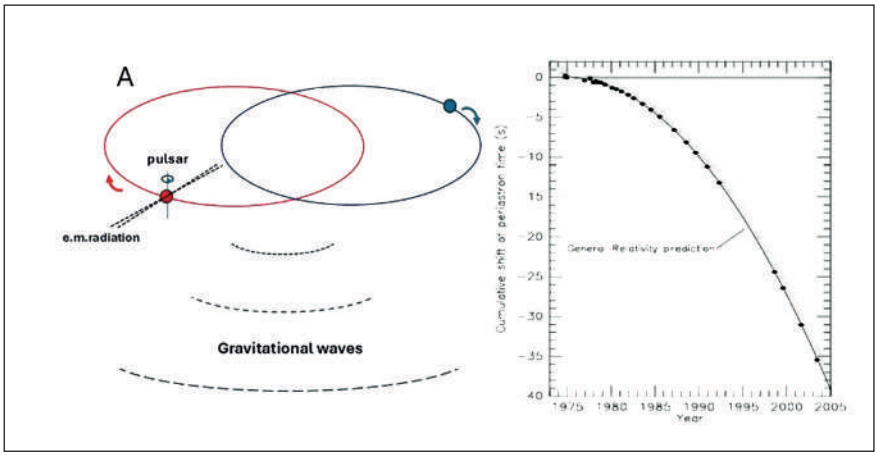



Figura 3 (A). *Rappresentazione schematica di una coppia di stelle in rotazione. Nel caso del sistema PSR 1913 + 16 le due stelle hanno masse simili, pari a circa 1.4 masse solari. La pulsar emette onde radio ogni circa 5 centesimi di secondo. Il sistema nel suo complesso genera onde gravitazionali.* (B). *Andamento negli anni del periastro della pulsar, in accordo con calcolati basati sulla relatività generale (Weisberg 2004).*

all'anno – che indicava la tendenza del sistema a spiraleggiare sempre più velocemente attorno al suo centro di massa (Taylor 1979). Questo comportamento segnalava il decremento di massa-energia legato (secondo la famosa relazione di equivalenza einsteiniana) alla generazione di onde gravitazionali. Osservazioni successive e il confronto con calcoli sempre più precisi confermarono quantitativamente le prime interpretazioni (fig. 3B). Si era acquisita la certezza della capacità delle onde gravitazionali di trasportare energia. Si trattava quindi di progettare nuovi esperimenti capaci di ottenere la rivelazione diretta di tale energia. Hulse e Taylor furono insigniti del premio Nobel nel 1993.[10]

## 5. *L'età degli interferometri ($h=10^{-21}$)*

L'idea di utilizzare metodi interferometrici non fu consequenziale all'esito degli esperimenti sulle antenne risonanti, ma si sviluppò piut-

[10] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/

tosto autonomamente, seppure ponendosi come alternativa radicale agli esperimenti di Weber. I primi concetti sull'argomento furono sviluppati "oltrecortina". L'articolo di riferimento, molto stringato (poco più di due pagine, otto riferimenti bibliografici), comparve su una rivista scientifica in russo nel 1962 e tradotto in inglese sulla rivista JETP (Gertsenshtein 1963) che godeva di una certa diffusione nei laboratori occidentali.[11] Tuttavia, per l'importanza che avrebbe rivestito nei decenni successivi per lo sviluppo degli osservatori LIGO, l'inizio "operativo" dell'era degli interferometri laser si fa risalire a un "Progress Report" del MIT nel 1972 (Weiss 1972). Rainer Weiss vi descrive il concetto completo di un'antenna gravitazionale a larga banda di frequenze. Il documento riporta diversi riferimenti alle ricerche di Weber ma non cita il lavoro sovietico; Weiss affermerà nella sua lezione Nobel: "Unknown to me two Russians, Gertsenshtein and Pustovoit, in 1963 had come up with a similar idea".

Al punto 4 del documento vengono presentati i principi di rivelazione, di fatto la misurazione della deformazione differenziale indotta dall'interazione con l'onda nei due bracci a forma di L di un interferometro di tipo Michelson (un braccio si "accorcia" e l'altro si "allunga"). Vengono esposti uno schema a blocchi dell'apparato e i punti chiave della possibile realizzazione: in estrema sintesi, si descrive un interferometro operante in vuoto secondo una metodologia di rivelazione del segnale "di zero", tale da assicurare la massima sensibilità. Il progetto riporta accorgimenti di assemblaggio delle parti "meccaniche" sensibili (le masse di test dotate di specchi e il divisore di fascio) tipici dei sismometri e propone tecnologie laser, elettroniche e di trattamento del segnale allo stato dell'arte per l'epoca. Al punto 5 vengono discussi nove differenti fattori di disturbo e possibili modalità di contrasto. In diversi punti del documento e nella sua appendice Weiss si sofferma sui vantaggi dei rivelatori interferometrici rispetto alle barre risonanti. L'interferometria avrebbe permesso da un lato di investigare il fenomeno a frequenze significativamente più basse di quelle tipiche delle antenne di Weber e più promettenti per la rivelazione; dall'altro prometteva una più efficace discriminazione tra segnali "veri" e segnali spuri in base alla

[11] Il lavoro degli scienziati sovietici viene citato in un articolo di Weber già nel 1963 (Weber 1963).

loro "firma" in frequenza. Viene poi affermata la minore vulnerabilità al rumore termico, assumendo che questo potesse costituire la tipologia di rumore dominante nei due tipi di antenna. Nel progetto di Weiss si affacciano praticamente tutti i temi e le problematiche che avrebbero influenzato la scena sperimentale nei successivi cinquant'anni, compresa l'ineluttabile questione di fondo: quale doveva e poteva essere la sensibilità dell'apparato per giungere a una rivelazione inequivoca di segnali così elusivi. L'estrema difficoltà insita in questa questione può essere rappresentata quantitativamente. A tal proposito è prassi comune riferirsi al parametro adimensionale $h = \frac{\delta L}{L_0}$, la deformazione relativa di un oggetto di test, di dimensioni "a riposo" $L_0$, prodotta dall'azione dell'onda gravitazionale. Il fattore, per un dato tipo di detector, dipende essenzialmente da intensità, frequenza, polarizzazione e direzione di arrivo delle onde. Weiss riporta una stima del parametro *h* per onde originate in una coppia pulsar pervenendo al valore, piuttosto scoraggiante, di $10^{-24}$, da confrontarsi con il fattore dell'ordine di $10^{-16}$ nei lavori di Weber. Stime successive avrebbero suggerito valori solo un po' meno sfidanti, dell'ordine di $10^{-21}$. Per ottenere maggiore sensibilità si poteva pensare a interferometri di grandi dimensioni. Ma quanto grandi? Sarebbe stato questo il traguardo da raggiungere. Furono necessari più di quarant'anni di raffinamenti del concetto di interferometro, nuove tecnologie laser, digitali e, più recentemente, quantistiche, per tagliare il filo di lana.

## 6. *LIGO, Virgo e LIGO/Virgo*

Può essere utile riassumere alcune tappe fondamentali dell'evoluzione degli apparati interferometrici, dai primi prototipi di laboratorio agli interferometri giganti. Gli anni settanta-ottanta videro la nascita di vari esperimenti, negli Stati Uniti (MIT, CalTech) e in Europa (Garching, Orsay, Glasgow). Vennero dapprima sviluppati interferometri con bracci dell'ordine di qualche decina di metri. Questi apparati raggiunsero sensibilità ben superiori alle antenne risonanti ma ancora lontane da quelle che si sarebbero dimostrate utili per la rivelazione. Nel 1983-84 la National Science Foundation (NSF) finanzia studi congiunti di MIT e CalTech per il progetto di un interferometro con bracci

chilometrici; è l'incubazione del progetto LIGO, effettivamente finanziato a cavallo degli anni novanta. L'idea di costruire un interferometro "gigante" fa breccia anche nel vecchio continente. Nel 1985 due gruppi di ricerca facenti capo a Adalberto Giazotto (INFN, Pisa) e Alain Brillet (CNRS, Orsay) decidono di coordinare competenze acquisite e sforzi progettuali. Negli anni successivi da questa collaborazione, allargata ad altri gruppi italiani, prenderà vita il progetto Virgo.[12] I due osservatori LIGO e l'osservatorio Virgo[13] vengono costruiti a partire dalla seconda metà degli anni novanta. Per completezza è necessario menzionare che negli stessi anni si sviluppa un progetto anglo-tedesco (Garching, Glasgow, Cardiff), rivolto alla realizzazione di un altro interferometro con bracci di tre chilometri, presso Hannover. La dimensione si fermerà a 600 metri, da cui deriva l'attuale denominazione di GEO600. GEO600 si è orientato alla ricerca delle onde di più alta frequenza, perseguendo la complementarità rispetto a LIGO e Virgo, più sensibili a basse frequenze. Più recentemente si è aggiunto l'interferometro giapponese KAGRA, in funzione dal 2020. La sua particolarità principale è quella di mantenere le masse di test a temperature criogeniche. Un altro interferometro è in progetto in India.[14]

Nelle vicende legate allo sviluppo degli apparati interferometrici si possono ravvisare due tendenze. Da un lato, abbiamo menzionato diverse iniziative in sostanziale competizione. Dall'altro, la complessità e la quantità di problemi da affrontare e le enormi difficoltà operative promuovono il coordinamento degli sforzi e l'integrazione delle competenze fra le varie iniziative.[15] Si possono leggere in quest'ottica gli accordi di networking tra LIGO e GEO600 (2004) e tra Virgo e LIGO (2007), oggetto di aggiornamenti successivi per tenere conto della forte espansione numerica e internazionale delle due collaborazioni. Dal 2023 la rete è stata allargata a KAGRA. Gli accordi sono formalizzati in Memoranda of Understanding (MoU) che individuano gli obiettivi scientifici e regolano gli aspetti operativi della collaborazione. Tra

[12] Dal nome di un ammasso di galassie nella costellazione della Vergine.

[13] Il progetto Virgo (disponibile sul sito www.ego-gw.it) viene presentato all'INFN nel 1989 e viene definitivamente approvato nel 1992.

[14] https://www.ligo-india.in/

[15] Fu proprio Giazotto a preconizzare una rete di esperimenti in collaborazione sinergica.

questi, le norme che stabiliscono la formazione della lista di autori dei lavori scientifici, una questione sempre molto sentita dagli scienziati. Al punto 12 del MoU 2014 tra LIGO e Virgo si riafferma: "Observational results papers will be published with one single alphabetical list of authors, referred to as 'The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration'".

La formulazione, in stile burocratico, riassume il carattere cooperativo fra entità e comunità che rimangono distinte. A dispetto di qualche oggettiva limitazione nell'integrazione, indotta anche da una costante disparità di finanziamenti, la collaborazione LIGO/Virgo si rivelerà fattiva e importante per un ulteriore sviluppo tecnologico degli apparati sperimentali nei primi anni dieci del nuovo secolo. Gli aggiornamenti, che investiranno tutti i punti chiave dei rivelatori, sfoceranno in una seconda generazione di interferometri (Advanced LIGO e Advanced Virgo) che consentirà il decisivo salto in avanti nella sensibilità.

La realizzazione dei rivelatori interferometrici giganti, complessi e fragili, e la loro operatività, sono processi che necessitano di un forte coordinamento di centinaia di persone, che apportano molte e variegate competenze scientifiche e tecniche (fisici, ingegneri con varie specializzazioni, scienziati dei materiali, informatici, geologi…). Di qui il senso dell'attribuzione dei premi Nobel: a Rainer Weiss, come riconoscimento alla fase di ideazione, a Barry Barish, a lungo direttore del progetto LIGO, per i suoi contributi nella fase di realizzazione operativa, a Kip Thorne, tra i fondatori di LIGO, per i suoi studi teorici e computazionali che hanno reso possibile il riconoscimento dei segnali provenienti dal cosmo, quali il cosiddetto "cosmic chirp", prodotto nella coalescenza di due buchi neri, oggetto dell'osservazione GW150914. E di qui anche la ragione del riconoscimento da parte dei premiati verso molti collaboratori e a tutta la collaborazione LIGO/Virgo, reso esplicito nella lezione Nobel di Thorne[16]:

> The first observation of gravitational waves, by LIGO on September 14, 2015, was the culmination of a nearly half century effort by ~1200 scientists and engineers of the LIGO/Virgo Collaboration. […] The Nobel

[16] Dei 1200 scienziati menzionati è parte un gruppo di ricercatori genovesi dell'INFN e del dipartimento di Fisica operanti da molti anni in Virgo, coordinati da Gianluca Gemme (INFN).

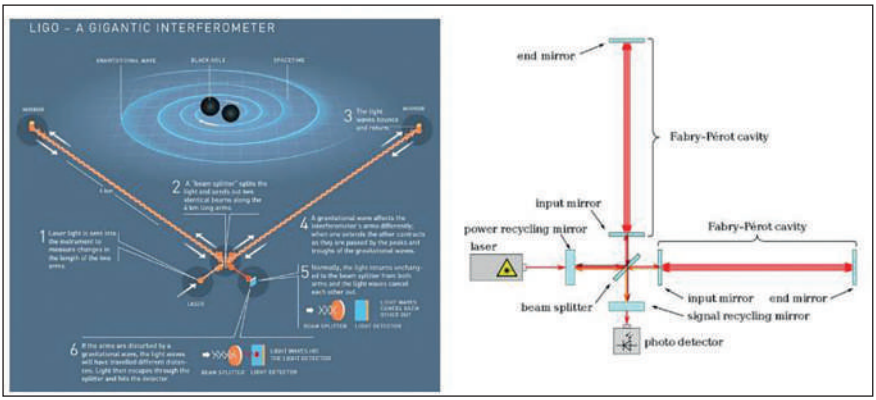



Figura 4. (A) *Principio di rivelazione interferometrica delle onde gravitazionali.* (B) *Schema semplificato degli interferometri LIGO e Virgo (Crediti: Fondazione Nobel). La massima sensibilità si ha quando la direzione dell'onda è perpendicolare al piano del rivelatore.*

> Prize […] was awarded to only three members of the Collaboration […]. But, in fact, it is the entire collaboration that deserves the primary credit.

Il destino e – almeno in parte, i finanziamenti – ha voluto che LIGO tagliasse per primo il traguardo osservativo. L'importanza di Virgo all'interno della rete dei rivelatori è descritta, forse non compiutamente, nella lezione di Barry Barish. Probabilmente nulla sarebbe cambiato nell'assegnazione dei premi se anche Virgo avesse centrato la prima osservazione. Adalberto Giazotto si spense un mese dopo l'attribuzione dei premi, poco dopo i primi eventi di rivelazione a Virgo.

## 7. *Il cuore degli interferometri: le masse di test*

LIGO, Virgo, GEO600 e KAGRA sono versioni sofisticate dell'interferometro di Michelson. Il principio di rivelazione è sommariamente descritto in figura 4A.[17]

Advanced LIGO e Advanced Virgo condividono gran parte della loro struttura, sebbene i bracci abbiano lunghezza diversa (4 km per gli

[17] Si veda la bella animazione "Most Precise Ruler Ever Constructed" creata da T. Pyle (https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v6).

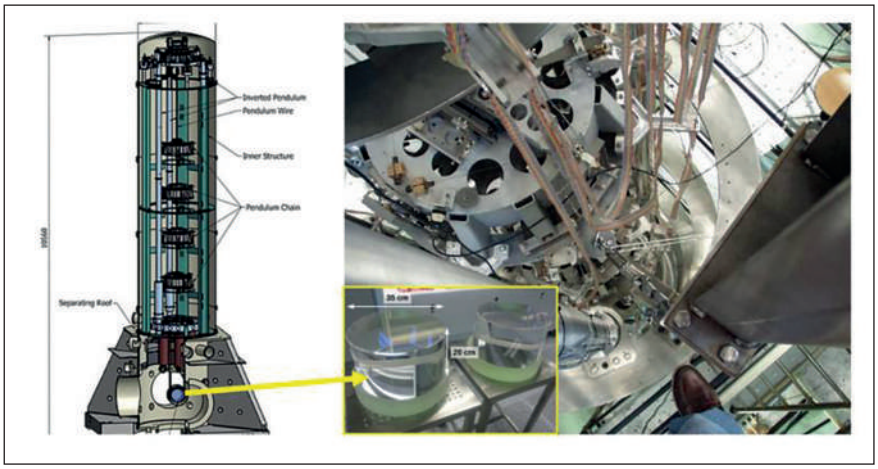



Figura 5. *A destra: schema di un super-attenuatore; a sinistra: foto del super-attenuatore visto dall'alto. Nel riquadro due masse di test. Le masse nella foto pesano circa 40 kg.*

osservatori LIGO e 3 km per Virgo). I due bracci in realtà contengono al loro interno (fig. 4B) una cavità Fabry-Perot per il cosiddetto "Dual Recycling".[18] Di seguito ci si concentrerà sulle masse di test, dotate di un opportuno rivestimento ("coating", di pochi micrometri di spessore) riflettente per la luce a 1064 nm, nel vicino Infrarosso (*vide infra*). Le masse sono poste alle estremità della L e si possono considerare il cuore dell'apparato; un cuore che dovrebbe "pulsare" – molto flebilmente – esclusivamente a causa della deformazione dello spazio-tempo effetto dell'onda gravitazionale. Le masse di test, in quarzo fuso (amorfo) purissimo,[19] appositamente fabbricate da una industria del vetro specializzata, sono caratterizzate da superfici di altissima planarità, con "rugosità" su scala atomica (fig. 5).

Il materiale è caratterizzato da un assorbimento ottico virtualmente nullo a 1064 nm e garantisce bassi livelli di rumore termico. Con i progressi nella tecnologia laser, e in quella di produzione dei coating riflettenti, le dimensioni delle masse di test sono andate aumentando. Le

[18] Per una descrizione del *Dual Recycling* e di altri aspetti assolutamente decisivi per il successo della rivelazione, tecnologicamente sofisticati, non si può che riferirsi a pubblicazioni specializzate (Cella 2011).

[19] Sono allo studio soluzioni alternative in zaffiro e silicio.

masse di test sono "sospese" utilizzando una complessa struttura meccanica denominata super-attenuatore (fig. 5), alta una decina di metri e composta di diversi stadi con componenti che filtrano molto efficacemente le vibrazioni, e attuatori che permettono un controllo attivo del posizionamento statico delle masse e il corretto allineamento degli specchi. Le masse di test sono collegate alla struttura attraverso sottili fibre, come "marionette". Le fibre sono realizzate *ad hoc* in quarzo fuso, per ottimizzare l'isolamento e minimizzare il rumore termico. L'attacco delle fibre alle masse di test ha rappresentato uno dei punti cruciali della messa a punto dell'apparato; negli anni, gli scienziati italiani della collaborazione Virgo hanno fornito un fattivo contributo nella realizzazione

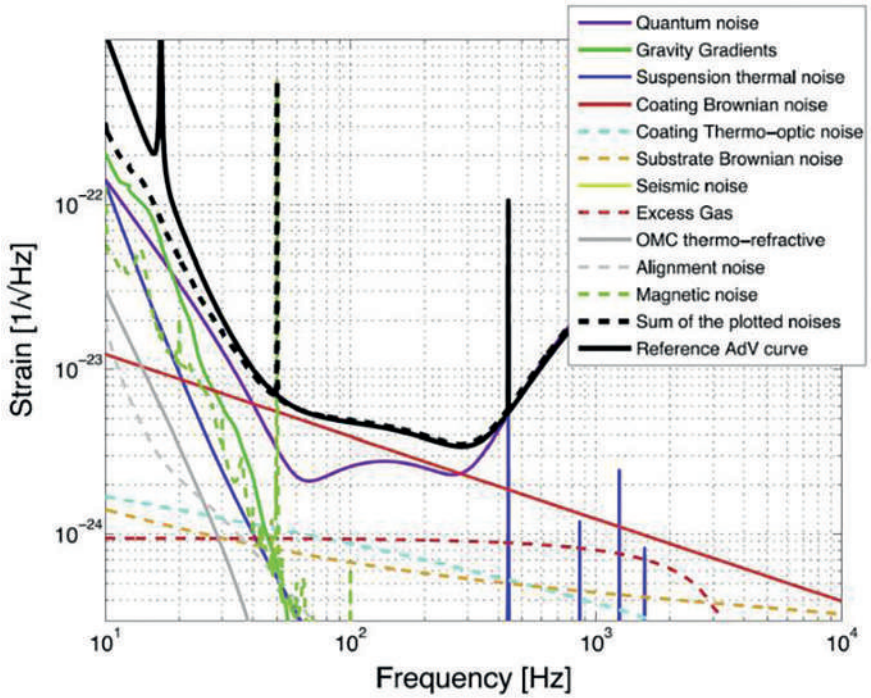



Figura 6. *Tipico "budget" di rumore per Advanced Virgo. Il grafico mostra il contributo di varie sorgenti di rumore. La curva nera rappresenta il limite di sensibilità conseguente. Il rumore termico nelle sospensioni risulta dominante alle basse frequenze, sotto i 20 Hz. Tuttavia, si può notare come, in una banda piuttosto estesa in frequenza e molto interessante per le osservazioni, la sensibilità sia limitata dal rumore termico nel coating riflettente.*

del super-attenuatore e delle sospensioni. Più sopra si è introdotto il parametro di sensibilità $h$. Una visione della sensibilità più adatta alle caratteristiche operative degli interferometri si ottiene considerando il cosiddetto bilancio di rumore ("noise budget"), in pratica il parametro in funzione della frequenza. In figura 6 viene riportata una figura di rumore tipica di un passato ciclo operativo di Advanced Virgo.

## 8. *Specchi delle mie brame: non solo proprietà ottiche*

Il rivestimento riflettente delle masse test soggiace a due requisiti principali (Amato 2025). Deve innanzi tutto garantire una riflettività virtualmente totale, con assorbimenti ottici idealmente nulli alla frequenza del laser di lavoro. L'assorbimento trascurabile è importante per diversi aspetti ed è utile per minimizzare il rumore termico. Anche la diffusione ("scattering") della luce deve essere trascurabile, implicando grande planarità e assenza virtuale di difetti microscopici. Non secondariamente alla loro qualità ottica, i coating devono essere caratterizzati da ottime proprietà meccano-elastiche. In particolare, devono presentare bassissime dissipazioni per attriti interni (in gergo "internal friction" [Zener 1938]), idealmente simili a quelle della massa di test, una condizione importante per aumentare la sensibilità e per minimizzare il rumore termico.

Uno specchio otticamente "perfetto" si può ottenere, ed è l'opzione adottata negli attuali interferometri, realizzando un cosiddetto riflettore interferenziale di Bragg (Distributed Bragg Reflector, DBR) (fig. 7A). Un DBR consiste in una serie di strati alternati di due materiali, omogenei e isotropi, perfettamente trasparenti alla frequenza di lavoro, con "basso" e "alto" indice di rifrazione (Gao 2020). La scelta dei due materiali, del numero delle coppie e dello spessore degli strati, viene determinata in maniera che il rivestimento si comporti, ad angolo di incidenza della luce normale, come uno specchio con riflettività prossima al 100% in una banda ristretta attorno alla lunghezza d'onda di lavoro (fig. 7B). Anche se i fenomeni di interferenza della luce, che sono alla base della specularità selettiva in lunghezza d'onda, coinvolgono tutti gli strati del rivestimento, utilizzando un numero di coppie relativamente grande la frazione di radiazione incidente che penetra

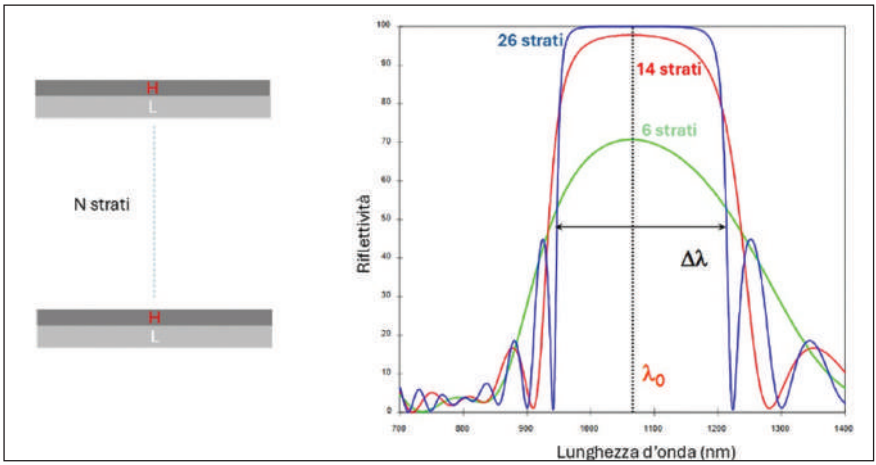



Figura 7. (A) *Schema di un Distributed Bragg Reflector. La struttura è formata da N coppie di strati a basso (L) e alto (H) indice di rifrazione. Lo "spessore ottico" di ogni strato, ovvero il prodotto dello spessore geometrico per l'indice di rifrazione, deve essere pari a un quarto di lunghezza d'onda della luce utilizzata; per la lunghezza d'onda di lavoro di 1064 nm lo spessore dei singoli strati risulta dell'ordine di qualche centinaio di nanometri.* (B) *Riflettività in funzione della lunghezza d'onda (nel vicino IR) per un DBR con lunghezza d'onda di lavoro a 1064 nm (LMA, Lyon).*

negli strati più interni del coating si riduce progressivamente, fino ad annullarsi virtualmente all'interfaccia con il substrato. Si possono progettare configurazioni multistrato riflettenti più sofisticate, al prezzo di aumentare il numero di coppie impiegate (Durante 2024).

L'indice di rifrazione dei film e multistrati può essere valutato sperimentalmente tramite semplici misure di spettroscopia in trasmissione e riflessione. Si ottiene una maggiore accuratezza tramite misure di ellissometria spettroscopica (Canepa 2013), che permettono anche di determinare lo spessore e altre proprietà morfologiche dei film (Prato 2011). Per quantificare gli assorbimenti ottici residuali che i coating di migliore qualità presentano nella regione di trasparenza (fino a $10^{-7}$ $cm^{-1}$), sono disponibili metodi di maggiore sensibilità, quali ad esempio la interferometria laser fototermica a singolo fascio (Photothermal Common-Path Interferometry, PCI), (Alexandrovski 2009).

Per valutare la qualità meccanica di un campione si effettuano sostanzialmente misure di attenuazione acustica. Vengono eccitati diversi

modi di vibrazione e se ne studia l'attenuazione nel tempo misurando il cosiddetto fattore di merito Q. Maggiore è il fattore Q minore sarà il rumore termico aspettato per un dato tipo di materiale.[20]

Le misure ottiche e meccaniche sono in genere accompagnate da analisi capaci di fornire informazioni più dirette sulla stechiometria e sulla struttura del coating, da misure di topografia della superficie a livello macro-, micro- e nanoscopico (per esempio tramite microscopi a forza atomica) (Amato 2025).

## 9. *Rumore termico: specchi imperfetti*

La realizzazione di un rivestimento multistrato omogeneo, uniforme e isotropo restringe il campo dei materiali e dei metodi di deposizione adottabili. La scelta è caduta su film di ossidi dielettrici amorfi, depositati tramite un processo denominato Ion Beam Sputtering Deposition (IBSD, fig. 8A) (Sites 1983), correntemente utilizzato nella realizzazione di componenti ottici di qualità.

Il metodo IBSD, con specificazioni che non menzioniamo per necessità di sintesi e dopo la messa a punto di numerosi parametri sperimentali in gioco, garantisce la formazione di film di ossidi amorfi omogenei e isotropi, con notevole uniformità di spessore. Per l'applicazione agli interferometri la sfida è consistita nella produzione di un multistrato lateralmente uniforme che potesse preservare le proprietà di planarità e rugosità della superficie della massa di test (area dell'ordine di 1000 $cm^2$). Allo scopo, un laboratorio specializzato nella crescita di film sottili per applicazioni ottiche (Laboratoire des Matériaux Avancés LMA, IN2P3-CNRS, Lione) ha realizzato un apparato per IBSD non convenzionale, denominato con una certa enfasi "Grand Coater" per le dimensioni inusuali del fascio ionico. LMA ha definito protocolli di crescita e di trattamento post-crescita fornendo infine diverse unità di specchi di alta qualità ottica alle collaborazioni LIGO, Virgo e KAGRA.

[20] Questa relazione è focalizzata su materiali e proprietà ottiche. Per quanto riguarda la misura delle proprietà meccaniche il lettore interessato può riferirsi a Cesarini (2009) dove è illustrato il metodo GeNS (Gentle Nodal Suspension) messo a punto da scienziati membri della collaborazione Virgo.

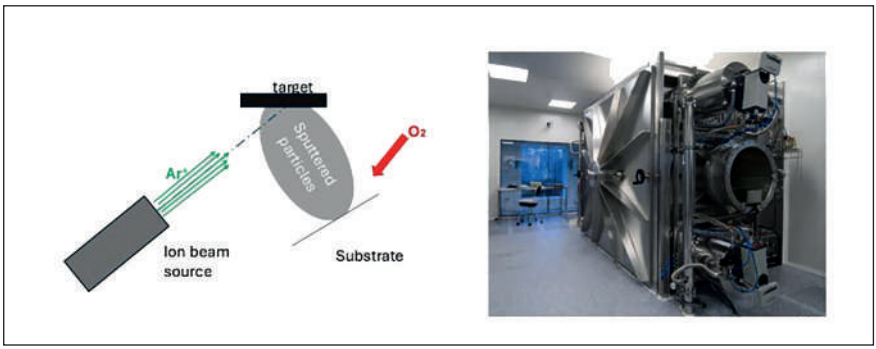



Figura 8. (A) *Schema semplificato del processo IBSD. Entro una camera ad alto vuoto, un fascio di ioni di energia cinetica controllata (~ 1 keV), viene indirizzato su un materiale bersaglio (metallico o di silicio). L'impatto induce una eiezione (sputtering) di atomi con una caratteristica distribuzione angolare di uscita. Un substrato di crescita, mantenuto a temperatura conveniente, viene posizionato per raccogliere nella maniera più efficace gli atomi emessi dal target. Il processo è accompagnato dall'esposizione ad ossigeno, introdotto nella camera in opportune proporzioni.* (B) *Immagine del Grand Coater installato presso il centro LMA (Lione).*

I film di ossidi, così come risultano dal processo di crescita, sono piuttosto densi, con vari tipi di difetti stechiometrici, ad esempio legami non saturi fra gli atomi componenti. Risultano di fatto insoddisfacenti quando sono sottoposti a misure di rumore termico. Si rende generalmente necessaria una procedura di ricottura ("annealing") per favorire il rilassamento della struttura a livello atomico. La procedura, effettuata in aria, induce anche una riduzione del disordine stechiometrico e favorisce l'espulsione di atomi di argon eventualmente rimasti intrappolati nel film. L'annealing consta di tre fasi: il riscaldamento a una data temperatura (normalmente qualche centinaio di gradi), un periodo di latenza alla stessa temperatura e infine il raffreddamento. Le modalità di tutte le fasi del processo devono essere determinate in maniera da non generare semi cristallini o altri difetti strutturali che possano causare diffusione della luce. La determinazione dei protocolli di ricottura comporta prolungate campagne sperimentali. L'estrapolazione di regole che possano essere applicate con generalità e di informazioni che garantiscano livelli previsionali attendibili per quanto riguarda la struttura multistrato completa degli specchi risulta purtroppo difficile.

Riguardo agli ossidi, la $SiO_2$ fu individuata, fin dalle prime ricerche, come materiale di elezione per gli strati a basso indice di rifrazione. Film di $SiO_2$ sono caratterizzati da ottima qualità ottica e da una soddisfacente qualità meccanica. Per il materiale ad "alto" indice si è optato, altrettanto naturalmente almeno dal punto di vista delle proprietà ottiche, per ossidi di metalli di transizione (Ti, Ta, Nb, Zr, Hf…) (Amato 2025). Il processo di selezione è risultato molto articolato. Il materiale ad alto indice degli specchi di LIGO e Virgo è a oggi costituito da un ossido non convenzionale, di fatto una miscela di $TiO_2$ e $Ta_2O_5$ con proporzioni dell'ordine del 20% in $TiO_2$. Si è pervenuti a questa formulazione dopo estese campagne di misure durate diversi anni (Granata 2020). Purtroppo, tutti i coating ad alto indice testati, pur di qualità ottica soddisfacente, presentano una qualità meccanica inferiore a quella della $SiO_2$ e costituiscono a tutt'oggi la sorgente di rumore termico che limita maggiormente la sensibilità degli interferometri (Amato 2025). Da quanto esposto si può intuire come gli studi sui coating riflettenti richiedano competenze variegate e molto specializzate, difficili da reperire in un singolo laboratorio. In effetti la ricerca dello specchio perfetto, otticamente e meccanicamente un compito improbo, ha coinvolto e coinvolge tuttora due comunità piuttosto estese di scienziati facenti capo rispettivamente a LIGO e a Virgo.

## 10. *(Nano)-piramidi*

La comprensione della struttura atomica degli ossidi amorfi complessi e delle variazioni strutturali e morfologiche indotte nel processo di annealing rappresenta la chiave per un più deciso avanzamento della ricerca sui rivestimenti riflettenti. Metodi consolidati utilizzati nello studio delle strutture cristalline (*in primis* la diffrazione di raggi X) non sono di immediata replicabilità per solidi amorfi. Tuttavia, diverse metodologie di scattering a raggi X basate sull'utilizzo di radiazione di sincrotrone e di scattering di neutroni permettono di ottenere funzioni di correlazione atomica (Pair Distribution Functions, PDF). Le PDF forniscono informazioni sul cosiddetto ordine "a corto raggio", ovvero la posizione statisticamente più probabile degli atomi prossimi a un dato atomo. Da queste misure si possono ricavare distribuzioni di lunghezze e angoli di legame. Inoltre, lo sviluppo di potenti metodi com-

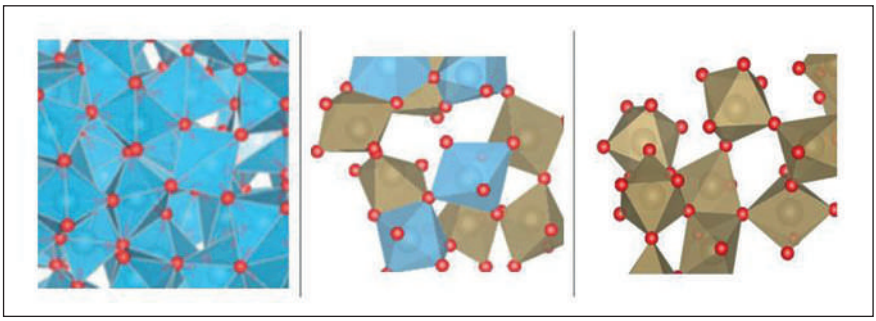


Figura 9. *Simulazioni di configurazione di strutture poliedriche in ossidi amorfi. Pannello sinistro: strutture tetraedriche in $TiO_2$. Pannello destro: strutture ottaedriche in $Ta_2O_5$. Pannello centrale: strutture miste in composti $TiO_2$ - $Ta_2O_5$ (Damart 2016).*

putazionali (ad esempio il "machine learning") associato alla diffusione di super computer di ultima generazione sta permettendo di ottenere simulazioni atomistiche sempre più realistiche della struttura dei materiali amorfi che integrano e orientano gli esperimenti.

Il complesso di esperimenti e simulazioni ha permesso, per esempio, di ottenere informazioni piuttosto precise sulla struttura microscopica della $SiO_2$. È noto che i quarzi cristallini sono caratterizzati da unità strutturali primarie (Primary Structural Units, PSU), nano-tetraedri in cui un atomo di silicio è coordinato a quattro atomi di ossigeno posti nei vertici del tetraedro (fig. 9). Ogni vertice è idealmente condiviso con un'altra PSU ("corner sharing"). Le unità primarie formano a loro volta delle strutture, dette celle unitarie, che si ripetono regolarmente creando un ordinamento "a lungo raggio", che si manifesta in ben definite figure di diffrazione negli esperimenti e che determina la forma dei micro- e macro-cristalli. Nella silice allo stato amorfo la disposizione degli atomi risulta intrinsecamente disordinata; tuttavia, si possono rinvenire configurazioni atomiche locali di fatto simili alla PSU del quarzo cristallino, che danno origine a massimi abbastanza ben definiti nelle PDF e che evolvono in picchi di diffrazione nella eventuale fase di cristallizzazione. Sia i cristalli che gli amorfi possono presentare difetti. Questi ultimi in genere presentano una difettosità più elevata (comunemente vacanze atomiche) con accoppiamenti di pseudo-PSU che coinvolgono anche i loro lati o faccette (edge- o face-sharing). Il livello

di comprensione della struttura di ossidi complessi, quali le miscele di ossidi di metalli di transizione investigate all'interno della collaborazione LIGO/Virgo, è ancora limitato ma i concetti sulla coordinazione di unità strutturali poliedriche risultano di grande utilità (Damart 2016).

I network amorfi non sono stabili. A temperature ordinarie, i movimenti atomici provocano una successione incessante di mutazioni strutturali locali che contribuiscono a ridurre l'energia libera del film e sono fonte di rumore termico. Il riscaldamento controllato dei film accelera questi processi. Aumentando la temperatura, in presenza di ossigeno (in pratica in aria), si perviene a configurazioni maggiormente stabili (di minore energia libera) e a una migliore stechiometria. Gli esperimenti stanno mostrando che, calibrando il processo di ricottura, si possono ottenere configurazioni atomiche metastabili che mostrano un principio di ordinamento su diverse lunghezze atomiche. In questo caso si parla di una situazione di ordine a raggio intermedio per esprimere la differenza con le strutture amorfe "disordinate" che mostrano un ordinamento a corto raggio e le strutture cristalline in cui l'ordine è a lungo raggio (Amato 2025). Queste configurazioni risultano di minore impatto riguardo al rumore termico rispetto ai film "as deposited". Temperature sufficientemente elevate e tempi di annealing troppo protratti possono innescare la proliferazione di nanocristalli e la progressiva micro-cristallizzazione del materiale. Queste poche note suggeriscono la ratio della scelta della miscela di $Ta_2O_5$ e $TiO_2$. $Ta_2O_5$ presenta una temperatura di cristallizzazione più alta di quella di $TiO_2$ e quindi può essere soggetto a temperature di annealing più elevate, con migliori risultati nella riduzione dei difetti. Inoltre, $TiO_2$ presenta un indice di rifrazione IR maggiore rispetto a $Ta_2O_5$ (Amato 2025); l'aggiunta (il "doping") di titanio consente di ridurre lo spessore complessivo degli strati ad alto indice, un fattore che contribuisce a mitigare il rumore termico. Il doping ha anche un effetto, ancora non del tutto compreso, sulla riduzione della difettosità (Amato 2023).

## 11. *Controllare efficacemente i processi:* ex situ vs in situ

La ricerca di un materiale ad alto indice "migliore" coinvolge tuttora molti gruppi di ricerca e vede impegnato, ormai da diversi anni,

anche il laboratorio OPTMATLAB del dipartimento di Fisica dell'Università di Genova, specializzato nella misura delle proprietà ottiche e nelle applicazioni dell'ellissometria spettroscopica. Una parte delle ricerche riguarda la sperimentazione su nuovi materiali, principalmente ossidi di altri metalli di transizione (ad esempio Nb e Zr), singoli o in miscela (Amato 2019). Recentemente, ad esempio, diversi gruppi di ricerca, incluso OPTMATLAB, si sono occupati di una miscela, relativamente esotica, di ossidi di titanio e germanio. Si sta inoltre valutando un'opzione promettente, che prevede l'utilizzo di nitruri (di Si, Ge). La ricerca di materiali migliori comporta certamente ulteriori progressi nella comprensione chimico-fisica dei complessi processi atomici nei solidi amorfi che vengono impiegati (o che si vorrebbero impiegare in alternativa) in funzione della temperatura (Granata 2018). Su un piano solo apparentemente più tecnologico appare quindi necessario un maggiore controllo delle procedure di crescita e ricottura dei film (Amato 2023). Molto spesso, infatti, l'effetto di una modifica di processo sulle proprietà dei film viene analizzato *ex post*, con misurazioni *ex situ*; questa modalità fu sicuramente adottata nel periodo in cui furono selezionati i materiali che compongono gli specchi attuali, risalente ormai a una quindicina di anni fa. Si stanno sperimentando metodi che permettono di monitorare i processi di crescita e di ricottura dei coating *in situ*. Da questo punto di vista i metodi ottici e spettroscopici rappresentano una valida opzione perché accoppiabili in modo relativamente semplice con le camere di crescita e le celle per il riscaldamento. L'ellissometria è uno strumento molto potente per la possibilità di ottenere, in tempo reale e in funzione della temperatura (Colace 2024; Magnozzi 2026), informazioni chiave sia sulle proprietà ottiche dei film (indice di rifrazione e coefficiente di assorbimento in funzione della lunghezza d'onda) sia su proprietà morfologiche quali lo spessore (con una sensibilità inferiore al nanometro), la rugosità ed eventuali microporosità.

Misure dirette di tipo meccanico in tempo reale risultano di più difficile concezione e attuazione. Tuttavia, anche in questo contesto l'ellissometria spettroscopica si rivela di aiuto. La soglia fondamentale di assorbimento degli ossidi amorfi di metalli di transizione si trova nel vicino ultravioletto e presenta una "coda", ben nota nella fisica dei semiconduttori (Urbach 1953), che si estende verso lunghezze d'onda più grandi. L'estensione della coda è descritta da un parametro, l'energia di

Urbach, determinabile sperimentalmente. L'energia di Urbach aumenta con il disordine ed è un marcatore della difettosità. Si è riscontrata una correlazione piuttosto diretta tra energia di Urbach e attrito interno (Amato 2020). In pratica l'analisi della coda di Urbach risulta predittiva sulle proprietà meccaniche e sul rumore termico del film.[21]

## 12. *Epilogo*

Le onde gravitazionali che sono state rivelate sono la flebile eco di eventi cosmici catastrofici avvenuti nello spazio-tempo lontano. La loro osservazione diretta ha comportato la faticosa individuazione e messa a punto di esperimenti sempre più sensibili e complessi. Progetti di nuovi rivelatori interferometrici, ancora più ambiziosi e grandiosi, come Einstein Telescope in Europa e Cosmic Explorer negli Stati Uniti, o addirittura l'interferometro spaziale LISA, stanno prendendo corpo e promettono nuove sfide che coinvolgeranno migliaia di scienziati e tecnici con le più svariate competenze. Una parte non secondaria di queste sfide si giocherà ancora sul terreno della fisica-chimica dei solidi su scala atomica, nel dominio delle nanoscienze e nanotecnologie. Volendo estremizzare, e utilizzando quello che può apparire come un ossimoro fisico-chimico, si potrebbe affermare che migliorare la sensibilità dei rivelatori interferenziali dipende dal grado di ordinamento atomico a medio raggio degli strati amorfi che compongono il rivestimento riflettente delle masse di test. Come a dire, parafrasando Richard Feynman, che anche in questi esperimenti che sondano la terribile immensità del cosmo: "There's (still) plenty of room at the bottom".

*Bibliografia*

Abbott B.P. *et al.* (LIGO-Virgo collaboration). *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.* Phys. Rev. Lett. (2016) 116: 061102.

[21] Esperimenti esplorativi in corso presso OPTMATLAB, utilizzando l'ellissometria nel dominio del medio infrarosso per identificare i modi di vibrazione, si stanno rivelando promettenti per raccogliere nuove informazioni sui processi di rilassamento e ordinamento a medio raggio.

Abbott B.P. *et al.* (LIGO-Virgo collaboration). *GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence*. Phys. Rev. Lett. (2017a) 119: 141101.

Abbott B.P. *et al.* (LIGO-Virgo collaboration). *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral.* Phys. Rev. Lett. (2017b) 119: 161101.

Abbott B.P. *et al.* (LIGO-Virgo collaboration). *Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger.* The Astrophysical Journal (2017c) 848: L12.

Alexandrovski A., Fejer M., Markosian A., Route R. *Photothermal Common-Path Interferometry (PCI): New Developments.* Proc. SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices, 71930D (28 February 2009): 79-91.

Amato A., Terreni S., Dolique V., Forest D., Gemme G., Granata M., Mereni L., Michel C., Sassolas B., Teillon J., Cagnoli G., Canepa M. *Optical Properties of High-Quality Oxide Coating Materials Used in Gravitational-Wave Advanced Detectors*. Journal of Physics: Materials (2019) 2: 035004.

Amato A., Terreni S., Granata M., Michel C., Pinard L., Sassolas B., Canepa M., Cagnoli G. *Observation of a Correlation Between Internal Friction and Urbach Energy in Amorphous Oxides Thin Films*. Scientific Reports (2020) 10: 1670.

Amato A., Magnozzi M., Shcheblanov N., Lemaître N., Cagnoli G., Granata M., Michel C., Gemme G., Pinard L., Canepa M. *Enhancing Titania-Tantala Amorphous Materials as High-Index Layers in Bragg Reflectors of Gravitational-Wave Detectors.* ACS Applied Optical Materials (2023) 1 (1): 395-402.

Amato A., Magnozzi M., Wöhler, J., *Mirror Coating Research and Developments for Current and Future Gravitational-Wave Detectors.* Adv. Photonics Res. (2025) 6: 2400117.

Canepa M. *A Surface Scientist's View on Spectroscopic Ellipsometry*. In Bracco G., Holst B. (eds.). *Surface Science Technique*. Vol. 51. Berlin: Springer; 2013. 99-135.

Cella G., Giazotto A., *Invited Review Article: Interferometric Gravitational Detectors.* Review Scientific Instruments (2011) 82: 101101.

Cesarini E., Lorenzini M., Campagna E., Martelli F., Piergiovanni F., Vetrano F., Losurdo G., Cagnoli G. *A "Gentle" Nodal Suspension for Measurements of the Acoustic Attenuation in Materials*. Rev. Sci. Instrum. (2009) 80: 053904.

Colace S., Samandari S., Granata M., Amato A., Caminale M., Michel C., Gemme G., Pinard L., Canepa M., Magnozzi M. *Monitoring the Evolution*

*of Optical Coatings during Thermal Annealing with Real-Time, in situ Spectroscopic Ellipsometry*. Classical and Quantum Gravity (2024) 41: 175016.

Cutler C., Apostolatos T.A., Bildsten L., Finn L.S., Flanagan E.E., Kennefick D., Markovic D.M., Ori A., Poisson E., Sussman G.J., Thorne K.S. *The Last Three Minutes: Issues in Gravitational-Wave Measurements of Coalescing Compact Binaries*. Phys. Rev. Lett. (1993) 70: 2984-2987.

Damart T., Coillet E., Tanguy A., Rodney D. *Numerical Study of the Structural and Vibrational Properties of Amorphous $Ta_2O_5$ and $TiO_2$-doped $Ta_2O_5$.* J. Appl. Phys. (2016) 119: 175106.

Durante O. *et al. Toward the Optimization of $SiO_2$ and$TiO_2$-based Metamaterials: Morphological, Structural, and Optical Characterization.* Optical Materials (2024) 157: 116038.

Dyson F.W., Eddington A.S., Davidson C. *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, Volume 220, 1920: 291-333.

Eddington A.S. *The Propagation of Gravitational Waves.* Proceedings of the Royal Society of London (1922) 102: 268-282.

Einstein A. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper.* Annalen der Physik (1905) 17: 891-921.

Einstein A. *Zur Allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1915): 778-786 e 799-801 (suppl.).

Einstein A. *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.* Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1916) XXXIII: 688.

Einstein A. *Über Gravitationswellen*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1918) 8: 154.

Gao B., Puthenparampil G.J., Beeckman J., Neyts K., *Design, Fabrication and Characterization of a Distributed Bragg Reflector for Reducing the Étendue of a Wavelength Converting System.* Opt. Express (2020) 28: 12837-12846.

Gertsenshtein M.E., Pustovoit V. *On the Detection of Low Frequency Gravitational Waves.* Soviet Physics JETP (1963) 16: 433-435.

Granata M., Coillet E., Martinez V., Dolique V., Amato A., Canepa M. Margueritat J., Martinet C., Mermet A., Michel C., Pinard L., Sassolas B., Cagnoli G. *Correlated Evolution of Structure and Mechanical Loss of a Sputtered Silica Film*. Phys. Rev. Materials (2018) 2: 053607.

Granata M., Amato A., Balzarini L., Canepa M., Degallaix J., Forest D., Dolique V., Mereni L., Michel C., Pinard L., Sassolas B., Teillon J.,

Cagnoli G. *Amorphous Optical Coatings of Present Gravitational-Wave Interferometers.* Classical and Quantum Gravity (2020) 37: 095004.

Hewish A., Bell S.J., Pilkington J.D.H., Scott, P.F., Collins R.A. *Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source*. Nature (1968) 217: 709-713.

Hulse R.A., Taylor J.H. *Discovery of a Pulsar in a Binary System.* Astrophys. J. Lett. (1975) 195: L51-L53.

Kennefick D. *Traveling at the Speed of Thought*. Princeton: Princeton University Press; 2007.

Magnozzi M., Colace S., Samandari S., Caminale M., Venturino V., Galafassi R., Michel C., Teillon J., Martinez V., Bazzan M., Cagnoli G., Gemme G., Bisio F., Canepa M. *Exploring in Situ the Thermal Annealing of Amorphous $TiO_2$-$GeO_2$ Coatings.* Journal of Non-Crystalline Solids (2026) 673: 123866.

Pirani F. *On the Physical Significance of the Riemann Tensor.* Acta Physica Polonica (1956) 15: 389-405.

Prato M., Chincarini A., Gemme G., Canepa M. *Gravitational Waves Detector Mirrors: Spectroscopic Ellipsometry Study of $Ta_2O_5$.* Thin solid films (2011) 519: 2877-2880.

Sites J.R., Gilstrap P., Rujkorakarn R. *Ion Beam Sputter Deposition of Optical Coatings*. Optical Engineering (1983) 22: 224447.

Taylor J., Fowler L., McCulloch P. *Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR1913 + 16*. Nature (1979) 277: 437-440.

Urbach F. *The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids*. Phys. Rev. (1953) 92: 1324-1324.

Weber J. *Remarks on Gravitational Experiments*. Nuovo Cimento (1963) XXIX: 930-934.

Weber J. *Evidence for Discovery of Gravitational Radiation.* Phys. Rev. Lett. (1969) 22: 1320-1324.

Weisberg J.M., Taylor J. *Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis*. Binary Radio Pulsars, ASP Conference Series, Vol. 328, Proceedings of the conference held 11-17 January, 2004, Aspen, Colorado, USA. Edited by F.A. Rasio and I.H. Stairs. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific; 2005. 25-31.

Weiss R. *Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna.* Quarterly Progress Report. Research Laboratory of Electronics (MIT) (1972) 105: 54.

Zener C. *Internal Friction in Solids.* Physical Review (1938) 53: 90-99.

**Daniela Caracciolo**[*] **– Mariachiara Chiantore**[**]

# *Un meraviglioso viaggio tra sfide e opportunità*

**Sommario**: Il progetto LIFE Pinna (2021-2025) è un'iniziativa internazionale cofinanziata dall'UE per contrastare il declino critico di *Pinna nobilis*, il più grande bivalve del Mediterraneo. Coordinato da ARPAL con partner italiani e sloveni, ha affrontato la mortalità di massa legata a *Haplosporidium pinnae* e ai cambiamenti climatici tramite azioni di conservazione attiva. Tra i risultati: traslocazioni di adulti, protocolli condivisi, una rete scientifica internazionale, progressi nella riproduzione in laboratorio e campagne di Citizen Science per mappare le popolazioni residue, proponendosi come modello integrato di tutela della biodiversità costiera.

**Parole chiave**: *Pinna nobilis*; biologia della conservazione; restauro ecologico; specie minacciate; Mediterraneo.

**Abstract**: *A Wonderful Journey Through Challenges and Opportunities*
The LIFE Pinna project (2021-2025) is an EU co-funded international initiative to counter the drastic decline of *Pinna nobilis*, the largest Mediterranean bivalve, now critically endangered. Coordinated by ARPAL with seven Italian and Slovenian partners, it addressed mass mortality caused by *Haplosporidium pinnae* and climate change through active conservation in Italy and Slovenia. Key achievements include successful adult translocations, shared protocols, a permanent scientific network, advances in laboratory reproduction extending larval stages, and Citizen Science campaigns essential for mapping surviving populations, making LIFE Pinna an integrated model for coastal biodiversity protection.

**Keywords**: *Pinna nobilis*; conservation biology; restoration ecology; endangered species; Mediterranean.

---

[*] ARPAL daniela.caracciolo@arpal.liguria.it
[**] Università di Genova mariachiara.chiantore@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.295-308

Il progetto LIFE Pinna rappresenta un'iniziativa cofinanziata dall'Unione Europea nell'ambito del programma LIFE, concepita per rispondere a una delle più gravi crisi di biodiversità che abbiano colpito il bacino del Mediterraneo in epoca recente. Il progetto si è sviluppato nel periodo compreso tra il 2021 e il 2025 e ha coinvolto un partenariato articolato che include enti di ricerca, università, agenzie ambientali e istituzioni pubbliche, operando su scala transnazionale e interregionale. Le attività progettuali si sono concentrate in quattro regioni italiane e in un'area della Slovenia, riflettendo la necessità di affrontare un problema ecologico che trascende i confini amministrativi e richiede un coordinamento a livello sovralocale. Il beneficiario coordinatore è rappresentato da ARPAL (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure) mentre i beneficiari associati sono Triton Research Srl, Università di Genova, Università di Sassari, Parco Nazionale Asinara, Shoreline Società Cooperativa, National Institute of Biology – NIB. Il budget complessivo, pari a circa tre milioni di euro, risulta commisurato alla complessità delle azioni previste, alla durata pluriennale del progetto e alla necessità di integrare competenze scientifiche, tecniche e gestionali.

Il focus del progetto è rappresentato dalla specie *Pinna nobilis* (fig. 1), chiamata volgarmente nacchera di mare, un mollusco bivalve endemico del Mediterraneo, il più grande bivalve presente in questo mare, la cui lunghezza della conchiglia può arrivare a 120 cm, anche se comunemente gli individui adulti raggiungono dimensioni comprese tra i 60 e i 65 centimetri. La specie rappresenta non solo un elemento di rilievo dal punto di vista biologico, ma anche un simbolo della salute degli ecosistemi costieri mediterranei. La morfologia imponente rende la specie facilmente riconoscibile e storicamente ben nota alle comunità costiere.

Dal punto di vista ecologico *Pinna nobilis* è una specie tipicamente associata ai fondali sabbiosi o fangosi delle acque costiere poco profonde, con una distribuzione batimetrica che generalmente non supera i 10-15 metri di profondità. La specie mostra una forte affinità per le praterie di *Posidonia oceanica*, che costituiscono l'habitat di elezione della specie e rappresentano un habitat prioritario a livello europeo, così definito ai sensi della Direttiva Habitat (dir. 92/43/CE), e considerato uno degli ecosistemi più produttivi e importanti del Mediterraneo. L'associazione con le praterie di fanerogame marine non è casuale, ma riflette una relazione ecologica stretta, in cui la stabilità del substrato,




Figura 1. *Carta d'identità di* Pinna nobilis*, con note biologiche ed ecologiche.*

la qualità delle acque e la presenza di strutture tridimensionali favoriscono l'insediamento e la sopravvivenza degli individui. In particolari situazioni la specie può comunque insediarsi anche su substrati rocciosi.

L'ancoraggio al fondale avviene mediante il bisso, un insieme di filamenti proteici secreti dall'animale che consentono un fissaggio stabile al sedimento. Questa caratteristica rende *Pinna nobilis* una specie sessile, con capacità di movimento estremamente limitate una volta raggiunta la fase adulta. Tale condizione comporta una particolare vulnerabilità ai disturbi fisici diretti, come il rimaneggiamento del fondale, le attività di pesca distruttiva o gli ancoraggi non regolamentati, ma allo stesso tempo consente alla specie di svolgere una funzione strutturale all'interno dell'ecosistema bentonico.

Con riferimento agli aspetti biologici e riproduttivi della specie, *Pinna nobilis* è un ermafrodita successivo (fig. 1), in grado di maturare gameti maschili e femminili, anche se il rilascio tende ad avvenire in maniera asincrona per evitare l'autofertilizzazione. La riproduzione avviene prevalentemente durante il periodo estivo e si basa sulla liberazione dei gameti nella colonna d'acqua. Ne consegue una fase larvale planctonica, durante la quale le larve vengono disperse dalle correnti marine prima di insediarsi sul fondale. Questa fase risulta particolarmente delicata e sensibile alle condizioni ambientali, rendendo il successo riproduttivo

fortemente dipendente dalla qualità delle acque, dalla temperatura, dalla presenza di inquinanti e dalla stabilità degli habitat costieri.

*Pinna nobilis* svolge un ruolo ecologico chiave all'interno degli ecosistemi marini costieri. In quanto organismo filtratore, la specie è in grado di processare grandi volumi d'acqua, contribuendo alla rimozione del particolato sospeso, del fitoplancton e di parte della materia organica presente nella colonna d'acqua (Zhang *et al.* 2021; Gu *et al.* 2022). Questa attività di filtrazione ha effetti positivi sulla trasparenza delle acque e sulla qualità ambientale complessiva, influenzando indirettamente numerosi altri organismi marini e processi ecosistemici (Trigos *et al*. 2014).

La conchiglia di *Pinna nobilis* costituisce inoltre un substrato duro in contesti dominati da sedimenti mobili (Katsanevakis *et al.* 2022). Su questa superficie si insediano numerose specie epibionti, tra cui alghe, spugne, briozoi, anellidi e altri invertebrati, creando micro-habitat complessi che aumentano la biodiversità locale. Per questo motivo la specie viene considerata una vera e propria "specie ingegnera" o "costruttrice di habitat", in grado di modificare fisicamente l'ambiente e di influenzare la struttura delle comunità bentoniche.

*Pinna nobilis* viene definita "specie ombrello", in quanto la sua tutela comporta benefici indiretti per un ampio numero di altre specie e, più in generale, dell'habitat in cui vive, ma anche "specie bandiera", con un significato iconico, in quanto per coloro che amano il mare è sinonimo di un ambiente sano e di qualità.

Dal punto di vista storico, è possibile ricostruire il quadro delle principali pressioni antropiche che hanno inciso sulle popolazioni della specie nel corso dei secoli. In passato, infatti, *Pinna nobilis* è stata oggetto di raccolta diretta, sia per il consumo alimentare sia per fini ornamentali. Il bisso, noto anche come "seta di mare", è stato utilizzato per la produzione di tessuti pregiati, contribuendo allo sfruttamento della specie in epoche storiche. A queste pressioni dirette si sono aggiunti, con l'intensificarsi delle attività umane lungo le coste, impatti indiretti legati alla distruzione e frammentazione degli habitat.

La pesca a strascico, gli ancoraggi ripetuti, le opere di difesa costiera, la costruzione di porti e infrastrutture turistiche hanno poi progressivamente degradato ampie porzioni di fondale costiero. L'inquinamento marino, di origine sia chimica sia organica, ha ulteriormente compromesso la qualità degli habitat, incidendo in particolare sugli stadi larvali e giovanili della

specie. Anche l'aumento della torbidità e l'alterazione dei regimi di sedimentazione vengono riconosciuti come fattori di stress rilevanti.

Nonostante questo quadro critico, l'introduzione di misure normative di tutela, tra cui l'inserimento della specie negli allegati della Direttiva Habitat e nella Convenzione di Barcellona, ha consentito in alcune aree un parziale recupero delle popolazioni. Intorno al 2010 *Pinna nobilis* veniva considerata una specie vulnerabile ma in lento recupero, grazie alla riduzione della raccolta diretta e a una maggiore attenzione alla conservazione degli habitat marini.

Questa fase positiva viene improvvisamente interrotta a partire dal 2016, quando si registra un evento di mortalità di massa senza precedenti. Il fenomeno, inizialmente segnalato lungo le coste meridionali della Spagna, si diffonde rapidamente verso est (fig. 2), interessando progressivamente gran parte del Mediterraneo. Nel giro di pochi anni molte popolazioni locali vengono quasi completamente annientate, con tassi di mortalità che raggiungono in numerosi casi il 90-99%, fino alla completa estinzione locale. Si stima che centinaia di migliaia di individui siano andati perduti in un arco temporale estremamente ridotto, portando la specie a essere classificata come in pericolo critico di estinzione (lista rossa IUCN).




Figura 2. *Distribuzione delle morie di massa di* Pinna nobilis.

Le cause di questa crisi vengono descritte come multifattoriali. Numerosi studi scientifici hanno identificato la presenza del protozoo *Haplosporidium pinnae*, associato a gravi infezioni che compromettono le funzioni vitali degli individui. Tuttavia, occorre sottolineare come la presenza di questo patogeno non sia sufficiente, da sola, a spiegare l'estensione e la rapidità del fenomeno. Vengono quindi considerati anche altri agenti biologici, tra cui batteri, virus e funghi opportunisti, nonché il ruolo delle condizioni ambientali (Scarpa *et al.* 2020; Carella *et al.* 2023; Theodorou *et al.* 2024).

Un fattore chiave è probabilmente da ricercarsi anche nel cambiamento climatico, in particolare nell'aumento della temperatura delle acque marine. Temperature più elevate possono infatti favorire la proliferazione dei patogeni e allo stesso tempo ridurre la capacità di risposta fisiologica e immunitaria degli organismi marini. L'interazione fra stress termico, alterazione delle condizioni ambientali e presenza di agenti patogeni viene quindi considerata uno degli elementi centrali alla base del collasso delle popolazioni di *Pinna nobilis*.

In questo contesto di emergenza ecologica si inserisce il progetto LIFE Pinna, che si propone di superare un approccio puramente descrittivo e di monitoraggio dello stato delle popolazioni e di sperimentare azioni attive di conservazione. Il progetto, terminato nel settembre 2025, ha integrato attività di monitoraggio ambientale, ricerca scientifica applicata e interventi operativi sul campo, con l'obiettivo di sviluppare strategie efficaci e replicabili anche in altri contesti mediterranei.

Una delle azioni principali previste dal progetto consiste nella traslocazione di individui adulti (fig. 3). Questa strategia prevede lo spostamento controllato di esemplari sani da siti donatori, nei quali la specie è ancora presente, verso siti riceventi caratterizzati da condizioni ambientali potenzialmente idonee ma nei quali *Pinna nobilis* è scomparsa. Questa operazione è particolarmente complessa e delicata, in quanto comporta rischi legati allo stress da manipolazione, al trasporto, all'adattamento a nuovi contesti ambientali e alla possibile diffusione di patogeni. Nel corso del progetto sono state trasportate, anche per 500 chilometri, e trapiantate decine di individui riuscendo a ottenere un livello di mortalità pari a zero durante il trasporto, a testimonianza dell'efficacia dei protocolli adottati. Infatti, a distanza di diversi mesi, gli individui si trovavano ancora in buona salute.

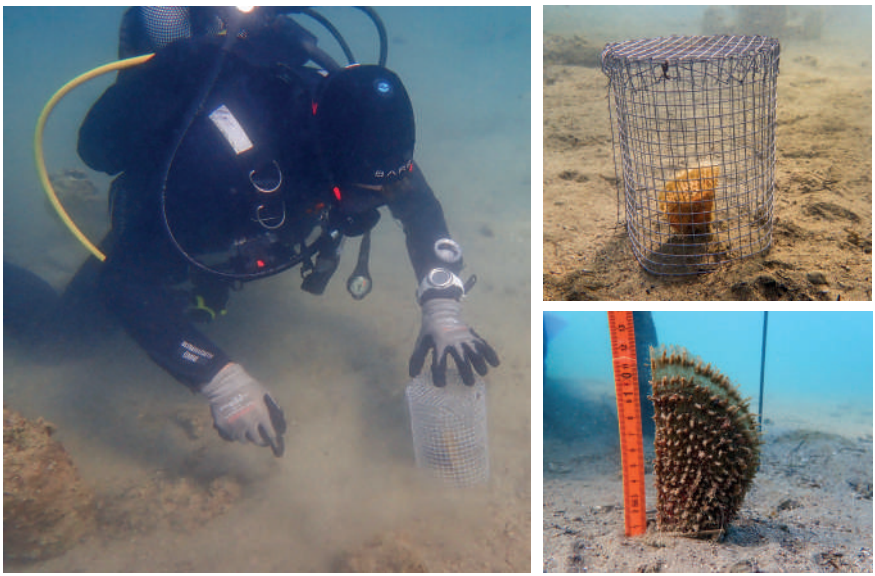


Figura 3. *Fasi della traslocazione di individui adulti di* Pinna nobilis*, con posizionamento di gabbia di protezione da predazione e strascico.*

Prima dell'attuazione delle traslocazioni il progetto ha previsto una fase approfondita di studio e preparazione. Sono stati effettuati monitoraggi dettagliati dei fondali mediante immersioni subacquee e rilievi con il ROV (Remotely Operated Vehicle; fig. 4), finalizzati all'individuazione delle popolazioni residue e alla valutazione dello stato di salute degli individui. Parallelamente sono state analizzate le caratteristiche ambientali dei potenziali siti riceventi, includendo la qualità delle acque, lo stato di salute delle praterie di *Posidonia oceanica*, la stabilità del substrato e il livello di pressione antropica.

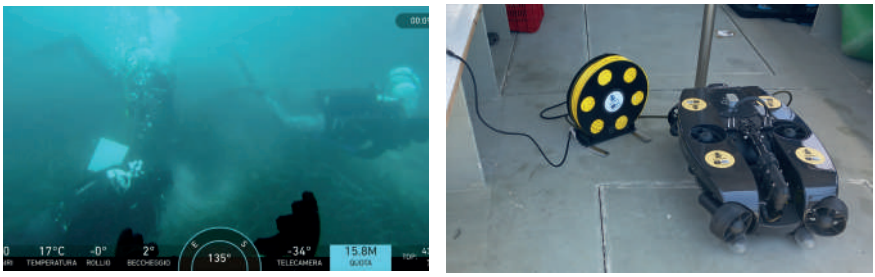



Figura 4. *Monitoraggio dei siti di intervento realizzati con ROV.*

Questa fase preliminare viene considerata essenziale per ridurre i rischi associati alle azioni di conservazione e per aumentare le probabilità di successo degli interventi. L'approccio adottato si basa su una valutazione integrata degli habitat e su una pianificazione attenta delle operazioni, in modo da minimizzare gli impatti negativi e massimizzare i benefici ecologici.

Un aspetto cruciale del progetto è rappresentato dalle analisi genetiche (Sanna *et al.* 2013; Azzena *et al*. 2025), che sono state svolte dall'Università di Sassari per due ragioni: i) valutare la variabilità genetica delle popolazioni superstiti di *Pinna nobilis*; ii) identificare gli organismi potenzialmente patogeni, sia sugli esemplari vivi di *Pinna nobilis* da utilizzare per i trapianti, sia sui cosiddetti bivalvi "sentinella", specie affini alla nacchera prelevate nei "siti pilota", cioè le aree scelte per i ripopolamenti.

Da questo punto di vista preme sottolineare come, nel corso del progetto, siano stati messi a punto due differenti protocolli che in futuro possono trovare applicazione in mitilicoltura o nei casi in cui siano necessarie analisi molecolari su specie sotto stretto regime di protezione. Il primo, basato su tecniche forensi non invasive (fig. 5), prevede l'estrazione del DNA da campioni biologici di individui vivi (prelevati tramite tampone) e persino da frammenti di gusci. Il secondo protocollo si concentra sulla valutazione dei livelli di infezione da *Haplosporidium pinnae*, il protozoo associato prioritariamente all'insorgenza della malattia, nei tessuti degli esemplari analizzati.



Figura 5. *Campionamento non invasivo tramite "tampone".*



Figura 6. *Collettori per intercettare larve di* Pinna nobilis*, presso impianti di mitilicoltura.*

Inoltre, sempre in questa prima fase del progetto, sono stati allestiti nel Mar Adriatico i cosiddetti collettori larvali, dispositivi usati per intercettare i giovanili di *Pinna nobilis,* naturalmente insediatisi dalle larve rilasciate nella colonna d'acqua (fig. 6).

La seconda fase del progetto ha riguardato invece numerosi tentativi di riproduzione in condizioni controllate, allo scopo di ottenere larve (fig. 7) da mantenere e far accrescere fino all'ottenimento di individui adulti resistenti, da trasportare e impiantare sui fondali delle "aree pilota". Da questo punto di vista è stato conseguito un risultato molto prestigioso, in quanto i ricercatori dell'Università di Genova hanno ottenuto la fecondazione di *Pinna nobilis* e sono riusciti a portare lo sviluppo larvale a 21 giorni, raggiungendo lo stadio iniziale di larva umbonata a 16 giorni post fertilizzazione, con una conchiglia lunga 150 micron, dimensioni mai raggiunte in precedenza per questa specie. Quindi, seppure nell'ambito del progetto non sia stato possibile completare lo sviluppo larvale, è stato ottenuto un risultato con un grande valore scientifico. È importante sottolineare che, a oggi, nessun centro di ricerca è riuscito a chiudere (ovvero a ottenere i giovanili della specie partendo dagli individui adulti riproduttori) il ciclo larvale della specie e anche grazie al progetto LIFE Pinna si è costituita una task force internazionale per lavorare di concerto, con protocolli comuni, sulla riproduzione della specie in condizioni controllate.

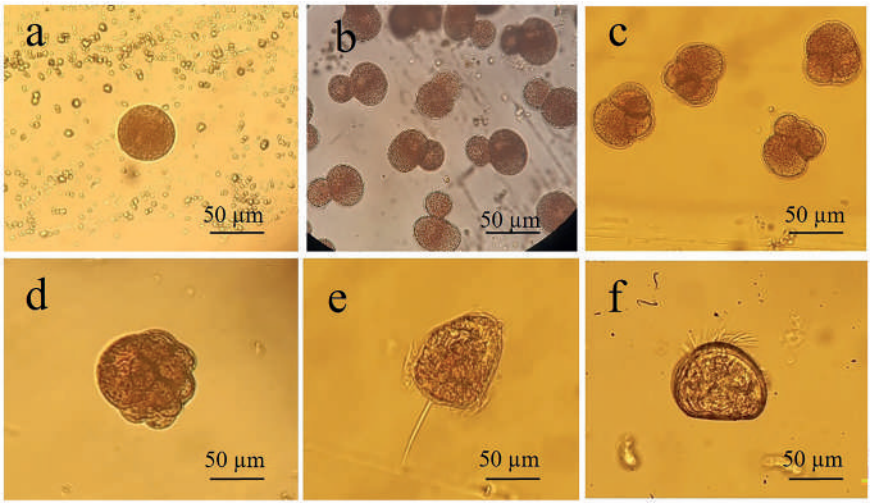



Figura 7. *Stadi di sviluppo larvale di* Pinna nobilis. *(a) Uovo con corpo polare; (b) prima divisione completa; (c) terza e quarta divisione; (d) fine della fase di divisione cellulare (> 8 cellule); (e) trocofora tardiva; (f) veliger precoce. Barra di scala: 50 µm (Ferranti* et al. *2024).*

Uno dei risultati più importanti del progetto, derivante dall'intensa collaborazione tra i partner, è indubbiamente la messa a punto di dettagliati protocolli per tutte le fasi del progetto, in particolare per il trasporto, il mantenimento e la riproduzione, cui è stato dedicato l'articolo di Ferranti *et al.* (2024).

Inoltre, è stato creato un networking a livello internazionale che si è consolidato nel corso del progetto e che continuerà a lavorare in stretta collaborazione anche in futuro. Il team di LIFE Pinna in collaborazione con SPA/RAC, l'Istituto delle Nazioni Unite per la biodiversità marina nel Mare Nostrum, ha organizzato importanti sessioni di formazione. Nel 2024 a Valencia e Calpe, in Spagna, nell'ambito del Simposio Internazionale delle Scienze Marine, è stato organizzato un evento congiunto con il progetto LIFE PINNARCA che ha coinvolto anche la IUCN. Una delle principali eredità del progetto è la creazione di un gruppo di lavoro internazionale, già menzionato in precedenza, che oggi riunisce ricercatori di diverse discipline – dall'ecologia alla biologia della riproduzione – impegnati nello studio di *Pinna nobilis* in tutto il bacino del Mediterraneo. Il gruppo opera attraverso una condivisione

trasparente delle conoscenze e dei dati disponibili, con l'obiettivo di sviluppare nuove strategie di conservazione.

Infine, non si può non citare il ruolo della Citizen Science. Per coinvolgere il pubblico e per contrastare la scarsità di dati sulla presenza di esemplari vivi di *Pinna nobilis*, nell'ambito del progetto è stata avviata una campagna denominata "Segnala la Pinna!" (fig. 8), diffusa tramite canali digitali, media tradizionali e incontri di formazione dal vivo e online, con la collaborazione di istituti come IMC International Marine Centre e associazioni di subacquei. Attraverso un'interfaccia creata dai tecnici di ARPAL e disponibile sul sito web lifepinna.eu, sono state raccolte le segnalazioni dei cittadini, poi in gran parte validate dai ricercatori di LIFE Pinna. Questo approccio ha portato alla raccolta

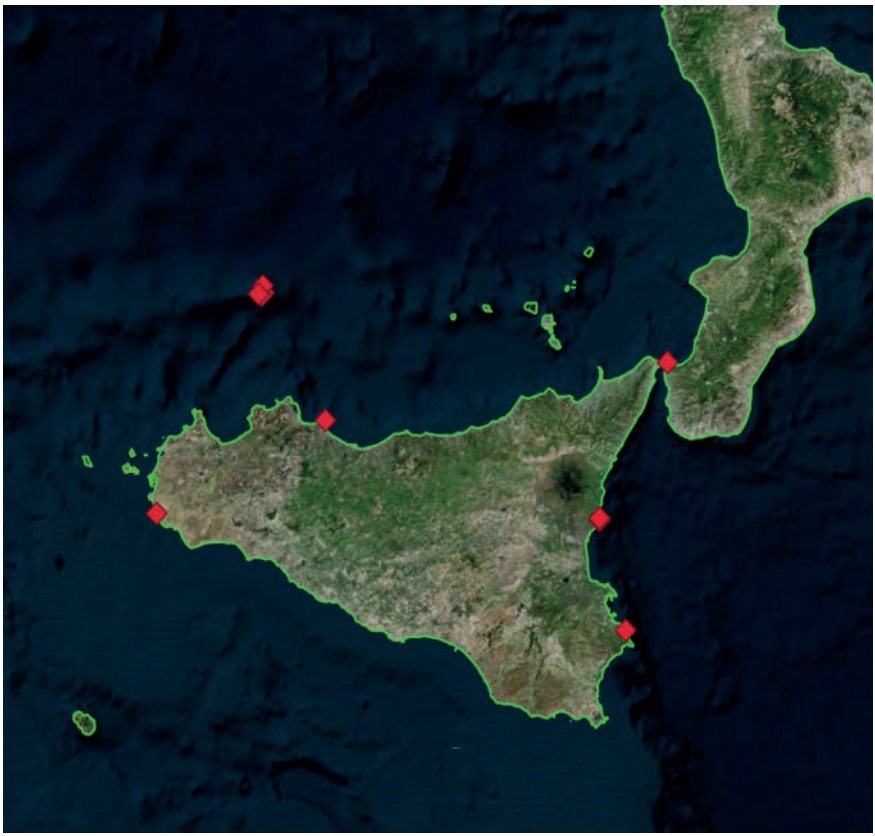


Figura 8. *Segnalazioni di* Pinna nobilis *ottenute tramite Citizen Science.*

di oltre 60 segnalazioni, con più di 50 individui vivi, incluse alcune piccole popolazioni sopravvissute nel medio Adriatico e nel Mar di Sardegna, finora sconosciute ai biologi. I risultati hanno dimostrato come i cittadini possano contribuire al lavoro dei ricercatori nelle attività di conservazione di *Pinna nobilis*.

Nel complesso, il progetto LIFE Pinna può essere considerato come un esempio significativo di approccio integrato alla conservazione della biodiversità marina. L'esperienza maturata contribuisce a migliorare la comprensione delle dinamiche ecologiche che regolano la sopravvivenza di *Pinna nobilis* e fornisce indicazioni utili per la gestione futura di altre specie e habitat marini minacciati. Il progetto evidenzia inoltre l'importanza di abbinare conoscenze scientifiche, strumenti normativi e azioni operative in un contesto mediterraneo sempre più esposto agli effetti combinati delle pressioni antropiche e del cambiamento climatico.

Le attività del progetto LIFE Pinna vanno inquadrate all'interno del più ampio panorama di conservazione e ripristino degli ecosistemi marini e terrestri, e delle imposizioni della *Nature Restoration Regulation* (2024/1991), che richiede di restaurare il 30% delle aree degradate entro il 2030, il 60% entro il 2040 e il 90% entro il 2050. Per l'ambiente marino la legge pone particolare attenzione agli habitat e alle specie prioritarie secondo la Direttiva Habitat (94/43/CEE) e secondo la Direttiva Quadro sulla Strategia per l'Ambiente Marino (MSFD-2008/56/CE), tra cui le Praterie di *Posidonia oceanica* (Habitat 1120) e naturalmente *Pinna nobilis*, specie elencata nell'allegato IV della Direttiva Habitat.

In Italia è stato istituito nel 2022 il *National Biodiversity Future Center* (NBFC; www.nbfc.it; CN_00000033), uno dei cinque Centri Nazionali finanziati dall'Unione Europea – NextGenerationEU – Piano Nazionale Resistenza e Resilienza (PNRR) – Missione 4 Componente 2 Investimento 1.4, con lo scopo di creare un network nazionale per il monitoraggio, la conservazione, il restauro e la valorizzazione della biodiversità italiana, terrestre, marina e urbana. All'interno del centro si è strutturata una comunità di oltre 3.000 ricercatori e, in particolare, un gruppo trasversale di lavoro sul restauro ecologico in ambito terrestre, marino e urbano. È stata inoltre organizzata la prima Summer School sul ripristino ecologico che ha consentito la formazione, su solide basi scientifiche e di buone pratiche, di 40 partecipanti (giovani ricercatori, imprenditori, impiegati di enti pubblici e amministrazioni)

che svolgono o potenzialmente svolgeranno attività relative alla conservazione e al restauro della biodiversità all'interno dei Piani Nazionali che verranno varati per l'implementazione della Nature Restoration Regulation. La Summer School ha anche favorito la creazione di un network tra i practitioners formati(e il corpo docente, configurandosi come uno strumento prezioso per consolidare e rafforzare i principi e le buone pratiche acquisite, nonché per promuovere lo scambio di opportunità e informazioni rilevanti il settore.

*Bibliografia*

Azzena I., Locci C., Pascale N., Deplano I., Senigaglia R., Batistini E., Caracciolo D., Chiantore M., Ciriaco S., Ferranti M.P., Grech D., Liconti A., Montefalcone M., Oprandi A., Pitacco V., Segarich M., Zakhama-Sraieb R., Ben Hmida A., Zribi S., Scarpa F., Casu M., Sanna D. *Conservation hints for* Pinna nobilis *from a century-old genetic time capsule*. Scientific Reports (2025) 15: 37660. https://doi.org/10.1038/s41598-025-21574-6

Carella F., Palić D., Šarić T. *et al. Multipathogen Infections and Multifactorial Pathogenesis Involved in Noble Pen Shell (*Pinna nobilis*) Mass Mortality Events: Background and Current Pathologic Approaches*. Veterinary Pathology (2023) 60, 5: 560-577. https://doi.org/10.1177/03009858231186737

Ferranti M.P., Azzena I., Batistini E., Caracciolo D., Casu M., Chiantore M., Ciriaco S., Firpo V., Intini L., Locci C., Montefalcone M., Oprandi A., Sanna D., Scarpa F., Segarich M. *Handling of the bivalve* Pinna nobilis*, endangered and pathogen-affected species, for controlled reproduction: precautions taken*. Ecology & Evolution (2024) 14: e70565. https://doi.org/10.1002/ece3.70565

Gu Y., Lyu S., Wang L., Chen Z., Wang X. *Assessing the Carbon Sink Capacity of Coastal Mariculture Shellfish Resources in China from 1981-2020*. Frontiers in Marine Science (2022) 9: 981569. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.981569

Katsanevakis S., Carella F., Çinar M.E., *et al. The Fan Mussel* Pinna nobilis *on the Brink of Extinction in the Mediterranean*. In: D.A. Della Sala and M.I. Goldstein (eds.). *Imperiled: The Encyclopedia of Conservation*, Oxford: Elsevier; 2022. 700-709. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00070-2

Sanna D., Cossu P., Dedola G.L., *et al. Mitochondrial DNA reveals genetic structuring of* Pinna nobilis *across the Mediterranean Sea*. PLoS One 8 (2013) 6: e67372.

Scarpa F., Sanna D., Azzena I., *et al. Multiple non-species-specific pathogens Possibly Triggered the Mass Mortality in* Pinna nobilis. Lifestyles (2020) 10, 10: 238. https://doi.org/10.3390/life10100238

Theodorou J.A., Spinos E., Ramfos A., Tsamadias I.E., Bekiari V., Kamilari M., Ntouni M.-M., Tsotsios D., Feidantsis K., Lattos A. *et al. Fan Mussel (*Pinna nobilis *L.) Spat Collection, Monitoring of Early Growth and Conservation Implications by Deploying Conventional Aquaculture Methodology*. J. Mar. Sci. Eng. (2024) 12: 2070. https://doi.org/10.3390/jmse12112070

Trigos S., Garcia-March J.R., Vicente N., Tena J., Torres J. *Utilization of muddy detritus as organic matter source by the fan mussel* Pinna nobilis. Mediterranean Marine Science (2014) 15, 3: 667-674. https://doi.org/10.12681/mms.836

Zhang J., Liu J., Zhang Y., Li G. *Strategic approach for mariculture to practice Ocean Negative Carbon Emission.* Bulletin of the Chinese Academy of Sciences (2021) 36: 252-258. https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20210217101

**Georgia Cesarone***

# *Protecting the Digital Future: Everyday Cybersecurity Challenges for Citizens, Public Bodies and Enterprises*

**Abstract**: in recent years, cybersecurity has emerged as one of the major systemic risk factors affecting the economic, social and institutional stability of digitalised societies. The exponential growth of cyber incidents, the increasing sophistication of attack techniques and the expansion of exposed digital surfaces have transformed cybersecurity from a sector-specific technological issue into a structural challenge involving citizens, enterprises and public bodies. This paper proposes an analysis based on global and national data, with particular reference to the Italian context, integrating statistical evidence, real-world cases and theoretical foundations. The results show that the primary vulnerability of contemporary digital systems does not lie in technology itself, but in the human factor and organisational models. The article introduces a human-centric paradigm for cyber resilience, highlighting the urgent need for a methodological shift in prevention, training and risk-governance strategies.

**Keywords**: cybersecurity; governance; human factor; business continuity; risk management.

**Sommario**: *Proteggere il futuro digitale: le sfide quotidiane della cybersecurity per cittadini, enti e imprese*
Negli ultimi anni la cybersecurity è emersa come uno dei principali fattori di rischio sistemico per la stabilità economica, sociale e istituzionale delle società digitalizzate. L'aumento esponenziale degli incidenti informatici, la crescente sofisticazione delle tecniche di attacco e l'estensione delle superfici di esposizione hanno trasformato la sicurezza informatica da problema tecnologico settoriale a questione strutturale che coinvolge cittadini, imprese ed enti pubblici. Questo lavoro propone un'analisi basata su dati globali e nazionali, con particolare riferimento al contesto italiano, integrando evidenze statistiche, casi reali e fondamenti teorici. I risultati mostrano come la principale vulnerabilità dei sistemi digitali contemporanei non risieda nella tecnologia, bensì nel fattore umano e nei modelli organizzativi. L'articolo introduce un paradigma human-centric per la resilienza cyber, evidenziando l'urgenza di un cambiamento metodologico nelle strategie di prevenzione, formazione e governance del rischio

**Parole chiave***:* cybersecurity; governance; fattore umano; continuità operativa; risk management.

* Ingegnere elettronico, Start 4.0 Centro di Competenza gcesarone@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.309-319

*Context analysis and key definitions*

Digital transformation has profoundly changed the economic, social and institutional dynamics of contemporary societies. IT networks, cloud platforms, automated industrial systems, IoT devices and digital services are now an integral part of the daily lives of citizens, enterprises and public administrations. In this scenario, cybersecurity is no longer merely a technical support function, but an enabling factor for digital trust and for the operational continuity of socio-economic systems.

Data show a constant and significant growth in cyber incidents worldwide from 2019 to the first half of 2024, with an increase not only in quantity but also in quality, in terms of severity and pervasiveness of attacks. The trend highlights how cyber threats are evolving into a systemic phenomenon, with impacts extending far beyond the boundaries of individual organisations, generating economic, reputational and national-security effects.

According to the global-incident analysis conducted by the Italian Association for Information Security [1] (fig. 1), the attack curve shows steady growth reflecting the expansion of exposed digital surfaces and the increasing professionalisation of cyber-criminal organisations.

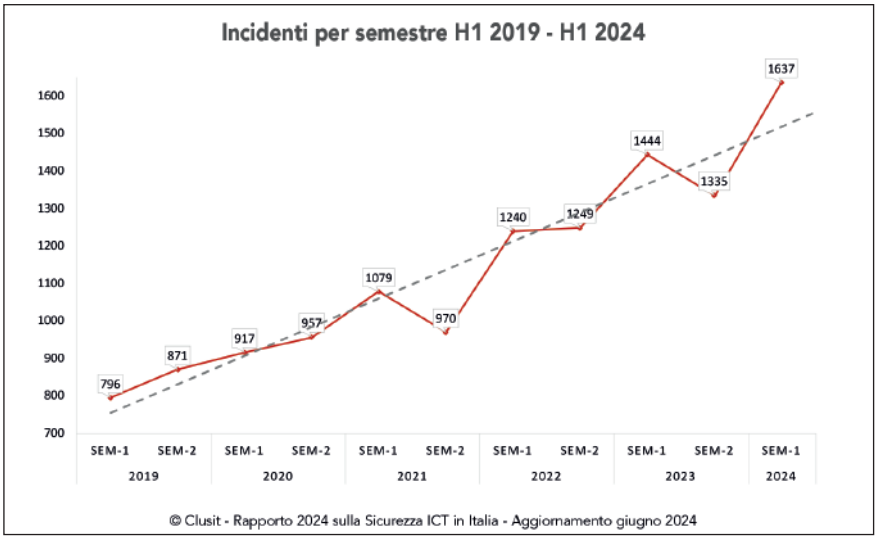



Figure 1. *Major known cyber incidents worldwide from 2019 to the first half of 2024.*

The aim of this article is to provide a scientific and integrated interpretation of the cyber phenomenon, analysing the distribution of threats, the evolution of attack techniques, sectoral and geographical impacts and, above all, the role of the human factor as the main risk amplifier.

The prefix *cyber* derives from the Greek term *kybernḗtēs*, meaning "helmsman", that is, one who guides and governs [2]. In technical contexts, the term began to be used as early as the late eighteenth century, when James Watt applied it to describe systems capable of automatically controlling the operation of steam engines [3].

Cybernetics later became an established scientific discipline in the twentieth century thanks to the studies of Norbert Wiener, Alan Turing and other pioneers, assuming the meaning of the science of control and communication in systems [4]. Today, the term *cyber* is used in a much broader sense, to indicate the set of technologies and dynamics related to the digital world and its impacts on contemporary life, referred to as *cyberspace*, first cited in a short story by William Gibson, *Burning Chrome* [5].

In the NIST glossary, cybersecurity is defined as the set of technologies, processes and strategies aimed at ensuring the three fundamental pillars of information security: confidentiality, integrity and availability and thus the security of cyberspace [6].

However, the growing complexity of cyberspace has made it evident that protecting digital systems can no longer be addressed exclusively through technological tools, but requires a systemic approach integrating governance, training and organisational culture.

*Interpretative methodology*

The analysis proposed in this paper is based on the integration of quantitative data from major national and international reports, with a specific focus on the Italian context and a qualitative interpretation of recent case studies and attack dynamics.

The methodology adopts a human-centric perspective, considering the human factor as a critical variable in cyber-risk assessment. In particular, the following aspects are examined:

- global cyber-incident trends from 2019 to 2024;
- distribution by type of attack and by sector;

- geographical trends with a focus on Europe and Italy;
- significant real cases for analysing systemic impacts.

The objective is to identify recurring patterns and correlations between behaviours, organisational models and technological vulnerabilities.

*Global trends in cyber incidents*

Global data analysis shows a constant growth in cyber incidents from 2019 to the first half of 2024. The number of attacks displays a linear upward trend, with a marked acceleration from 2022 onwards, confirming a structural increase in cyber risk (fig. 1).

This growth is not only quantitative but also qualitative: attack severity is increasing, with a prevalence of High and Critical events. Over 80% of global incidents exhibit high severity, indicating tangible impacts on operational continuity and data security (fig. 2).

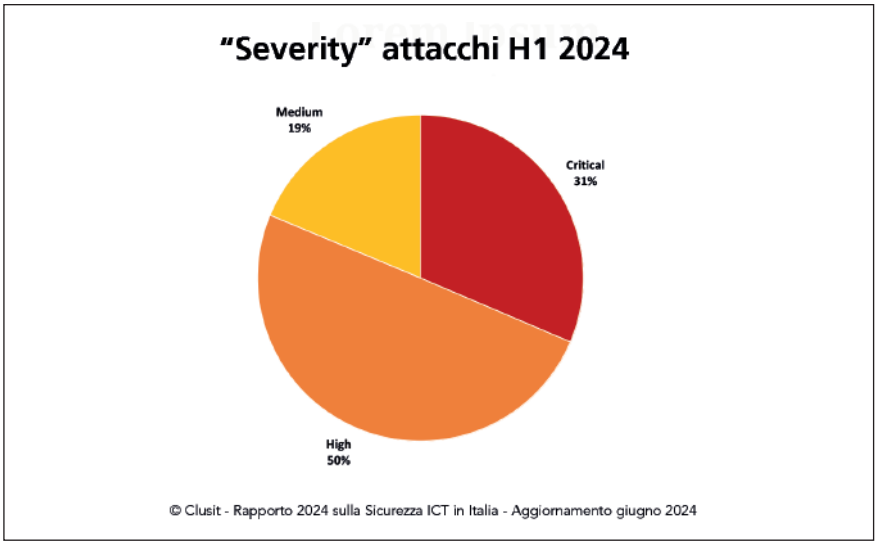



Figure 2. *Severity of major known cyber attacks worldwide in the first half of 2024.*

The distribution of attack techniques shows a clear predominance of exploited vulnerabilities, phishing/social engineering, malware and identity theft (fig. 3).

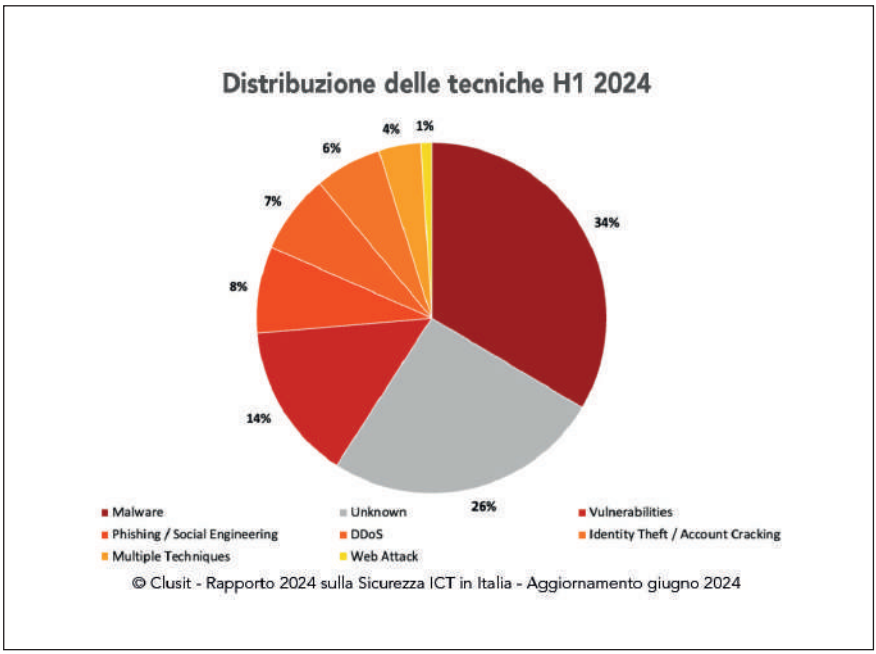



Figure 3. *Major attack techniques worldwide in the first half of 2024.*

A particularly relevant finding is that about one quarter of global incidents are classified as *Unknown*, highlighting the increasing sophistication of threats and attribution difficulties. Social-engineering and phishing techniques remain among the main threats, directly exploiting human vulnerability. These attacks are particularly effective even in technologically mature contexts, due to the growing use of artificial-intelligence tools that make them highly deceptive, demonstrating that technological investment alone, without behavioural maturity, is insufficient to reduce risk exposure.

At sectoral level, healthcare is the most affected globally, accounting for 18% of incidents in the first half of 2024, while attacks on government sectors are also increasing due to international tensions.

Geographically, the Americas still record the largest share of victims, but the growth in Europe is particularly significant, suggesting an expansion of exposure not yet balanced by adequate systemic maturity.

*The Italian context*

Italian data show that Italy accounts for 7.6% of global incidents, with particular exposure of manufacturing, government, healthcare and transport sectors (fig. 4).

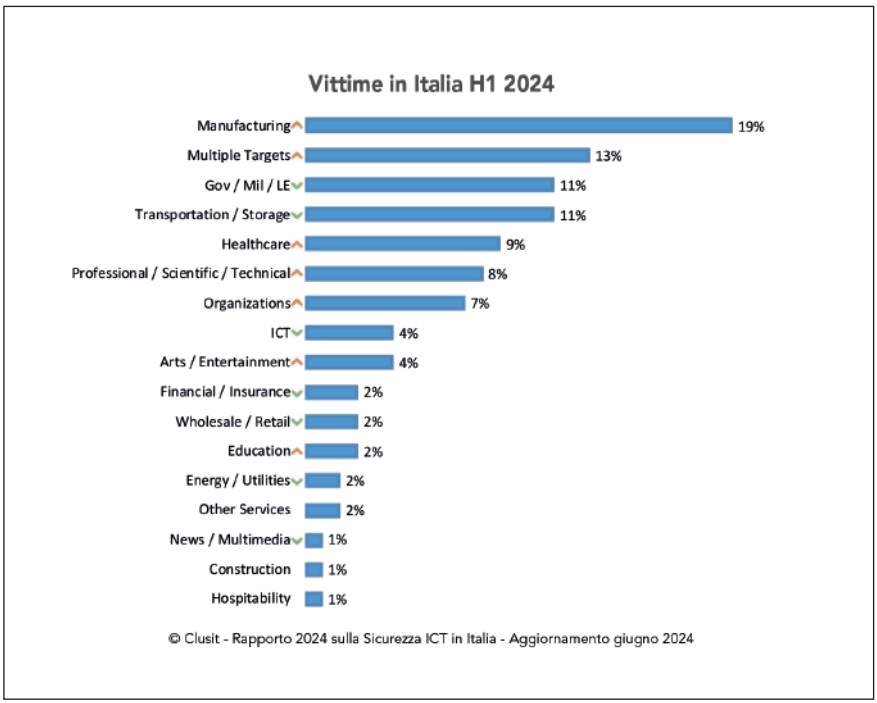



Figure 4. *Main Italian victims in the first half of 2024.*

A distinctive feature of the Italian context is the high incidence of hacktivism-related attacks, which represent over one third of global episodes of this category and show continuous growth.

Such attacks, often carried out through DDoS techniques, aim to disrupt service continuity and generate operational instability with strong reputational impacts, especially when institutions are targeted.

The Italian context clearly shows that cybersecurity has become a geopolitical factor: cyber attacks are no longer merely criminal tools but instruments of pressure and destabilisation among States. Campaigns of hacktivism and attacks on critical infrastructures demonstrate that

cyberspace is now a new dimension of conflict, with direct impacts on national security and economic stability.

*The new regulatory framework and national governance*

The European Union and Italy have responded to growing cyber-risk exposure with unprecedented regulatory strengthening. The NIS2 Directive [8], the establishment of the National Cybersecurity Agency [9] and the definition of a national cybersecurity framework [10] formally recognise cybersecurity as a primary strategic interest of the State.

This framework introduces a paradigm shift: security is no longer a purely technical responsibility but an organisational and managerial duty involving governance, decision-making processes and corporate culture.

*Cybersecurity domains as a resilience ecosystem*

Contemporary cybersecurity can no longer be reduced to a single technological domain but must be understood as an ecosystem of interdependent domains. These include network, information, application, cloud, industrial and OT (Operational Technology) security, identity and access management, mobile and IoT (Internet of Thing) devices, digital supply chains and, increasingly, the domain of awareness and the human factor [7].

Among these, the human factor emerges as the most critical domain, capable of neutralising or amplifying the effectiveness of all others. Every individual interacting with cyberspace can become, knowingly or unknowingly, a vulnerability vector.

*Towards a human-centric model of digital resilience*

Evidence shows that increasing technological investments do not produce a proportional reduction in cyber incidents. This asymmetry is due to the structural imbalance between growing system complexity and the organisational and decision-making maturity of the people

who design, govern and use them. Consequently, the primary vulnerability lies not in technology itself, but in decision-making processes, accountability models and organisational dynamics.

This leads to the need for a human-centric cybersecurity governance model that integrates people, processes and decision architectures. It is based on structured assessments of human and organisational risk, controlled attack simulations to test the resilience of people and processes, adaptive and continuous training pathways, and measurement mechanisms for behaviours and digital decisions by role, context and experience. At the same time, cybersecurity is introduced as an explicit variable in governance processes and accountability systems, transforming security from a technical function into a structural component of corporate governance.

This approach goes beyond mere compliance and transforms cybersecurity from a defensive cost into a strategic factor of competitiveness, reliability and systemic resilience.

*Human-centric governance as a new cyber-risk governance model*

Current cybersecurity governance paradigms are mainly based on technical-normative approaches: standards, controls, policies, audits and compliance requirements. Although necessary, they are no longer sufficient to govern a risk that has become systemic, adaptive and highly dependent on human and organisational dynamics, nor are they able to transform compliance into competitive advantage.

The increasing interdependence between information systems, decision-making processes and critical infrastructures makes cyber risk comparable to financial and macroeconomic systemic risks [12] [13]. Governance must therefore manage how organisations make decisions, manage uncertainty, assign responsibilities and distribute risk along the digital value chain.

The human-centric paradigm radically reconfigures cyber governance: security is governed not from systems, but from the human decision processes that generate, configure, use and expose them.

*Beyond compliance: cybersecurity as governance of uncertainty*

Traditional governance models derive from control engineering and classical risk management, based on static probabilistic logic. However, modern cyber threats are characterised by information asymmetry, strategic adaptiveness and non-linear impacts, making purely quantitative logics inadequate [11].

Human-centric governance considers cyber risk as radical uncertainty, where governance focuses not only on technical events but on the organisation's capacity to anticipate, absorb, learn and reconfigure. This shifts the focus from control to systemic resilience.

Cybersecurity thus becomes a domain of corporate governance, similar to financial governance or human-capital management, and must be treated as a governance function rather than an IT function.

*Architecture of the human-dentric model*

The model is based on five structural pillars:

- governance of digital decisions;
- distributed accountability for risk;
- governance of complexity and interdependencies;
- adaptive capacity as the primary security metric;
- integration of cybersecurity into corporate governance.

*From perimeter to network: a new ontology of risk*

In traditional paradigms, risk is conceived as a function of technological perimeters. In the human-centric model, risk is a function of relationships between people, systems, organisations, suppliers and users. This approach is grounded in complex-systems theory and socio-technical networks [15], according to which security emerges from interactions rather than from individual components.

Consequently, the protection of cyberspace cannot be achieved through technological fortifications, but through the governance of digital relationships.

*Strategic implications*

This model transforms cybersecurity into a structural lever of competitiveness, reliability and digital sovereignty. Organisations adopting human-centric governance are more governable, transparent and resilient, reducing systemic exposure and strengthening stakeholder trust.

Governance maturity generates stabilising effects on the entire digital ecosystem. Human-centric governance extends protection beyond organisational boundaries, recognising employees, collaborators and citizens (for public administrations) as primary nodes of cyberspace and active components of national digital resilience.

Cybersecurity thus becomes the invisible infrastructure of digital government, the foundation of economic continuity and national security, and a tool for safeguarding individual digital sovereignty, where organisational and citizen resilience converge into a single systemic protection architecture.

*Conclusions*

Cybersecurity is today one of the main systemic challenges of digital society. The growth of attacks, the entry of cyber warfare into the geopolitical sphere and regulatory strengthening demonstrate that information security can no longer be treated as a technical problem.

The true element of instability is the imbalance of the human factor: only through governance of behaviours, conscious training, governance of processes and cultural maturity will it be possible to build authentic, durable and sustainable digital resilience.

*References*

[1] *Clusit Report on ICT Security in Italy*. New edition October 2024. https://www.mmn.it/wp-content/uploads/2024/04/Rapporto_Clusit_2024.pdf.
[2] https://accademiadellacrusca.it/it/consulenza/cyber/1417
[3] https://it.wikipedia.org/wiki/Cibernetica

[4] Wiener, N. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine.* Hoboken: John Wiley; 1948.
[5] Gibson, W. *Burning Chrome.* Omni (1982) 46: 72-107.
[6] https://csrc.nist.gov/glossary/term/cybersecurity
[7] *ENISA Threat Landscape 2024*. (2024) September. https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2024
[8] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX-:32022L2555
[9] https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legge:2021-06-14;82
[10] https://www.cybersecurityframework.it/framework2
[11] Taleb, N.N. *Antifragile: Things that Gain From Disorder.* New York: Random House USA Inc.; 2012.
[12] World Economic Forum. *Global Risks Report*. 2023. https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/
[13] World Economic Forum. *Global Cybersecurity Outlook*. 2023. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Security_Outlook_Report_2023.pdf
[14] Zhu, Q. *Foundations of Cyber Resilience: The Confluence of Game, Control, and Learning Theories*. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01205
[15] Latour, B. *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network Theory*. Oxford: Oxford University Press; 2005.

Michela Chiappalone*

# *Neuroingegneria per lo sviluppo di terapie elettroceutiche, la nuova frontiera della medicina personalizzata*

**Sommario**: La neuroingegneria integra neuroscienze e tecnologia per comprendere e modulare l'attività del sistema nervoso. In questo contributo vengono presentati approcci sperimentali basati su modelli in vitro e tecnologie di registrazione e stimolazione neurale, con particolare attenzione alle terapie elettroceutiche. I risultati evidenziano il potenziale della neurostimolazione personalizzata nel promuovere la plasticità e il recupero funzionale, aprendo prospettive per una medicina sempre più precisa e adattata al singolo paziente.

**Parole chiave**: interfacce neurali; neurostimolazione; microelettrodi; modelli sperimentali; plasticità neurale.

**Abstract**: *Neuroengineering for the Development of Electroceutical Therapies: The New Frontiers toward Personalized Medicines*
Neuroengineering combines neuroscience and technology to understand and modulate nervous system activity. This contribution presents experimental approaches based on in vitro models and neural recording and stimulation technologies, with a focus on electroceutical therapies. The results highlight the potential of personalized neurostimulation in promoting plasticity and functional recovery, paving the way toward more precise and patient-tailored medicine.

**Keywords**: neural interfaces; neurostimulation; microelectrodes; experimental models; neural plasticity.

* Università di Genova michela.chiappalone@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.321-342

*Il cervello: complessità e fragilità*

Il cervello umano rappresenta uno dei sistemi biologici più complessi ad oggi conosciuti. È costituito da circa $10^{11}$ neuroni e da un numero di connessioni sinaptiche dell'ordine di $10^{15}$, organizzati in reti altamente strutturate e dinamiche (fig. 1). Questa straordinaria densità di connessioni consente l'elaborazione e l'integrazione di informazioni su molteplici scale spaziali e temporali, permettendo l'emergere di funzioni che vanno dal controllo motorio e dall'elaborazione sensoriale fino ai processi cognitivi superiori, quali memoria, apprendimento e linguaggio (Kandel *et al.* 2000).

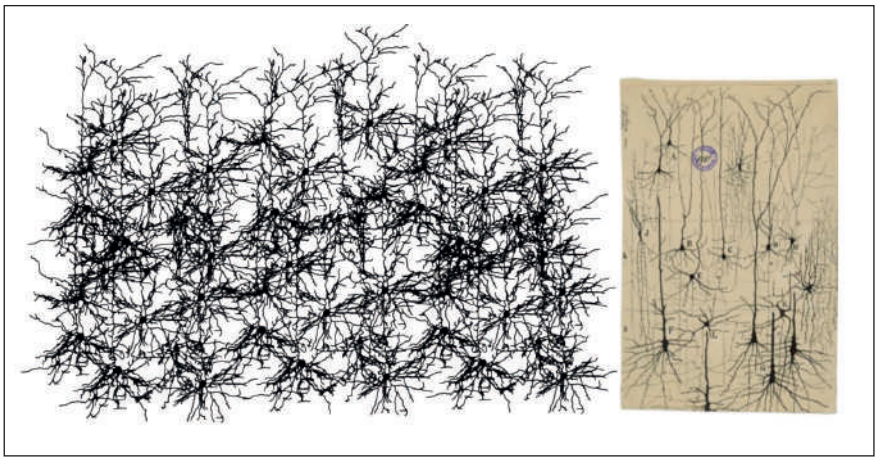


Figura 1. *La complessità del cervello è dovuta non solo all'elevato numero di cellule che lo compongono, ma anche alle intricate connessioni tra di esse. A sinistra è mostrata una rappresentazione di una rete neuronale; a destra, i dettagliati disegni di Santiago Ramón y Cajal (premio Nobel per la medicina nel 1906) raffiguranti diversi neuroni del sistema nervoso.*

Alla base del funzionamento del sistema nervoso vi sono due proprietà fondamentali: l'eccitabilità e la plasticità (Adrian 1928; Hebb 1949). La prima descrive la capacità delle cellule nervose di rispondere a stimoli attraverso la generazione e la propagazione di segnali elettrici; la seconda si riferisce alla capacità delle reti neuronali di modificare in modo duraturo la propria organizzazione funzionale in risposta all'esperienza o a perturbazioni esterne. Queste due proprietà, strettamente legate, sono alla base sia del normale funzionamento del cervello sia dei processi di adattamento e recupero in condizioni patologiche.

La complessità strutturale e funzionale del sistema nervoso centrale è tuttavia intrinsecamente associata a una significativa vulnerabilità. Anche alterazioni circoscritte, sia a livello cellulare sia a livello dei circuiti, possono propagarsi e determinare effetti rilevanti sull'organizzazione globale dell'attività neurale (Baldassarre *et al.* 2014; Carter *et al.* 2010). In questo contesto, le patologie neurologiche, tra cui malattie neurodegenerative, ictus e traumi, rappresentano una sfida di primaria importanza per la medicina contemporanea.

Le più recenti analisi del Global Burden of Disease (GBD) indicano che le patologie del sistema nervoso costituiscono oggi la principale causa di disabilità a livello globale, misurata in termini di Disability-Adjusted Life Years (DALYs), ossia anni di vita persi per mortalità prematura e disabilità (fig. 2). Secondo i dati pubblicati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (World Health Organization – WHO), oltre una persona su tre nel mondo è affetta da una condizione neurologica, e tali patologie rappresentano la principale causa di malattia e disabilità a livello globale. Nel 2021, il carico complessivo delle malattie neurologiche è stato stimato in circa 443 milioni di DALY a livello globale, confermandone l'impatto predominante rispetto ad altre categorie di patologie (J.D. Steinmetz *et al.* 2024). Un ulteriore elemento di rilievo è rappresentato dall'andamento temporale di questo fenomeno.

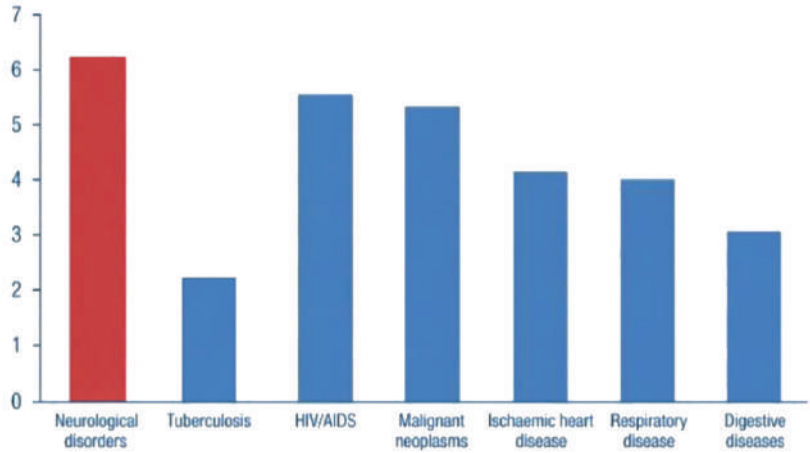



Figura 2. *Impatto globale delle malattie in termini di Disability-Adjusted Life Years (DALYs): si evidenzia che il DALYs maggiore si ha in caso di patologie neurologiche.*

Sebbene in alcuni casi i tassi standardizzati per età mostrino una relativa stabilità, i valori assoluti risultano in aumento. Questo andamento è principalmente riconducibile ai cambiamenti demografici in atto, piuttosto che a un peggioramento delle condizioni cliniche. In particolare, l'invecchiamento della popolazione e l'aumento dell'aspettativa di vita determinano un incremento del numero di individui esposti a patologie croniche e neurodegenerative (Béjot e Yaffe 2019). Di conseguenza, il carico globale delle malattie neurologiche è destinato ad aumentare ulteriormente nei prossimi anni, configurandosi come una delle principali sfide per i sistemi sanitari (Feigin *et al.* 2020).

*Neuroingegneria: un approccio interdisciplinare*

Per affrontare la complessità e la vulnerabilità del sistema nervoso è necessario un approccio che superi i confini disciplinari tradizionali. In questo contesto, la "neuroingegneria" si configura come un ambito di ricerca intrinsecamente interdisciplinare (fig. 3), che integra neuroscienze, ingegneria elettronica, informatica e scienza dei materiali con l'obiettivo di sviluppare strumenti avanzati per l'analisi e la modulazione dell'attività neurale (Panuccio *et al.* 2018; Vassanelli e Mahmud 2016).

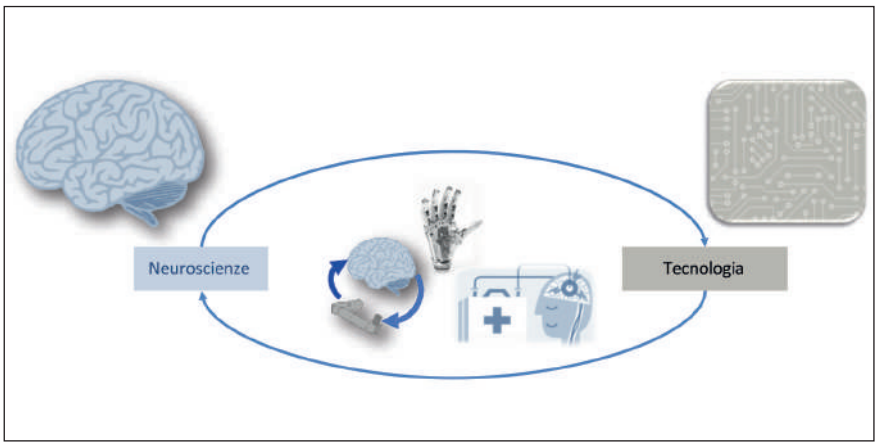



Figura 3. *La neuroingegneria è considerata un'interazione virtuosa tra neuroscienze e tecnologie, in grado di dare vita a dispositivi e sistemi innovativi capaci di dialogare con il sistema nervoso per il recupero delle funzionalità perdute.*

A differenza degli approcci puramente descrittivi, la neuroingegneria introduce una prospettiva quantitativa e sperimentale, basata sulla possibilità di misurare, modellare e intervenire direttamente sui sistemi biologici. In particolare, essa consente di acquisire segnali neurali con elevata risoluzione spaziale e temporale, di interpretarli mediante tecniche di analisi dei dati e di progettare dispositivi in grado di interagire con il sistema nervoso attraverso stimolazioni controllate. In questo quadro, la tecnologia non rappresenta soltanto uno strumento di osservazione, ma diventa un elemento attivo del processo conoscitivo: permette di testare ipotesi funzionali, di esplorare le dinamiche dei circuiti neurali e di sviluppare nuove strategie terapeutiche basate sull'interazione diretta con il tessuto nervoso. Tale integrazione tra comprensione e intervento costituisce uno degli aspetti distintivi della neuroingegneria e ne definisce il ruolo crescente nello sviluppo di approcci innovativi alla medicina (Chiappalone *et al.* 2022; Chiappalone e Levi 2026; Levi *et al.* 2018).

### *Il linguaggio dei neuroni*

La comunicazione tra neuroni avviene attraverso segnali elettrici generati da variazioni del potenziale di membrana, che costituiscono il linguaggio fondamentale del sistema nervoso (Hodgkin e Huxley 1952). Tali segnali emergono dall'attività elettrofisiologica delle cellule e riflettono i processi di integrazione sinaptica e trasmissione dell'informazione all'interno dei circuiti neurali.

Dal punto di vista sperimentale, è possibile distinguere diverse componenti di questo linguaggio, caratterizzate da differenti scale spaziali e temporali. I potenziali d'azione (spike) rappresentano eventi discreti e rapidi associati all'attività delle singole cellule, mentre i potenziali di campo locali (Local Field Potentials, LFP) descrivono variazioni più lente, risultanti dall'attività sincrona di popolazioni neuronali e dai flussi sinaptici nello spazio extracellulare (Buzsáki *et al.* 2012; Buzsáki e Draguhn 2004). Queste diverse tipologie di segnale forniscono informazioni complementari: gli spike consentono di analizzare l'attività di singoli neuroni e i pattern di scarica, mentre gli LFP permettono di investigare la dinamica collettiva dei circuiti e le interazioni tra diverse regioni (fig. 4). La possibilità di registrare e interpretare tali segnali è

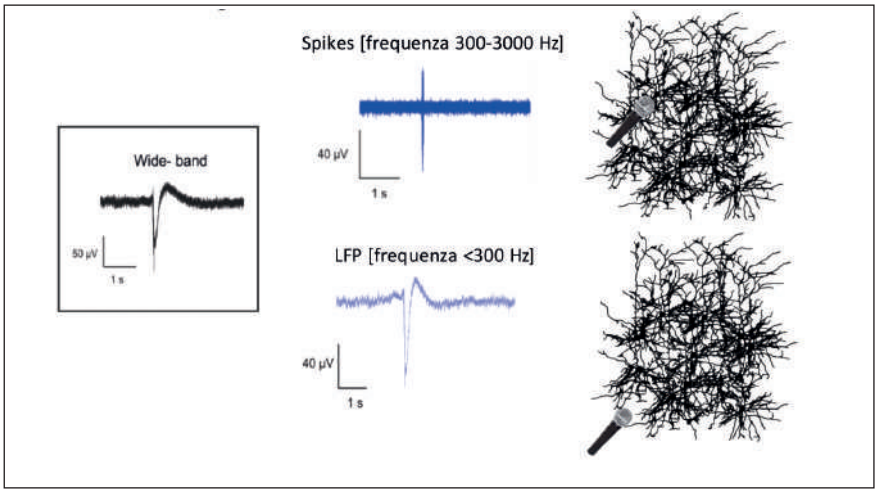



Figura 4. *Segnali elettrofisiologici: il segnale a banda ampia (wide-band) è registrato da un elettrodo. A seconda del filtraggio applicato, è possibile ottenere la componente ad alta frequenza (da circa 300 Hz fino a 3 kHz, relativa ai potenziali d'azione, o spike, associati all'attività di singoli neuroni) e quella a bassa frequenza (sotto i 300 Hz, relativa ai potenziali di campo, o LFP, associati all'attività di popolazioni neuronali).*

quindi centrale per comprendere come l'informazione venga codificata, trasmessa ed elaborata nel cervello.

### *Le sfide dello studio del cervello*

Una delle principali difficoltà nello studio del sistema nervoso risiede nella sua natura intrinsecamente multi-scala (fig. 5). I processi neurali si sviluppano infatti su un ampio spettro di scale spaziali e temporali: dalle dinamiche ioniche e sinaptiche a livello cellulare, fino all'organizzazione funzionale di circuiti e aree cerebrali distribuite (Bassett e Bullmore 2017; Bassett e Sporns 2017; Betzel e Bassett 2017). Questa eterogeneità rende complessa un'analisi integrata dei fenomeni, poiché le diverse scale non sono indipendenti, ma fortemente interconnesse.

Dal punto di vista sperimentale, tale complessità si riflette nei limiti delle tecniche di registrazione disponibili. Le diverse metodologie consentono di accedere a specifici livelli di osservazione, ma introdu-

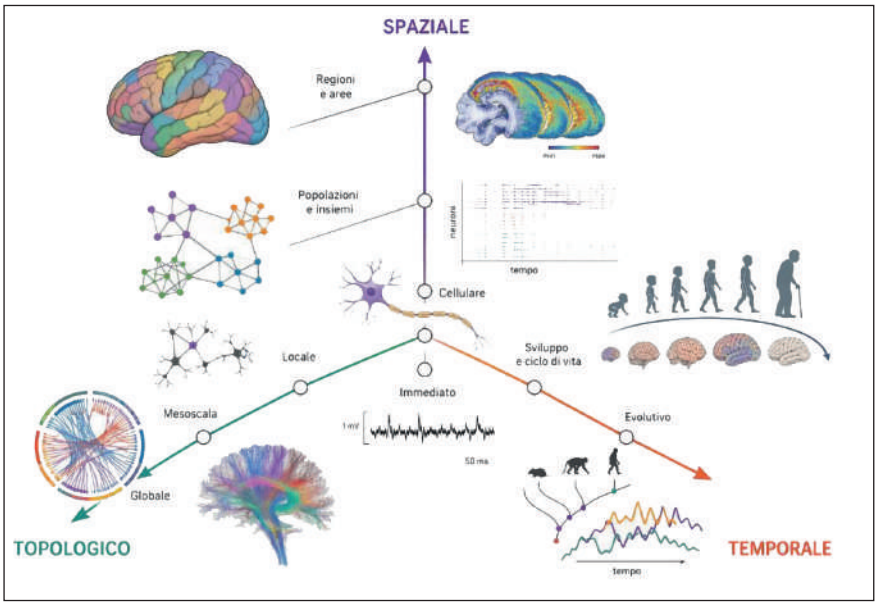



Figura 5. *Il cervello multiscala integra la dimensione spaziale, temporale e topologica. Figura ispirata a Betzel e Bassett (2017).*

cono inevitabilmente compromessi tra risoluzione spaziale, risoluzione temporale, invasività e rischio. Ad esempio, tecniche ad alta risoluzione spaziale e temporale richiedono spesso un accesso diretto al tessuto nervoso, mentre approcci meno invasivi forniscono informazioni più globali ma meno dettagliate.

Di conseguenza, nessuna singola tecnica è in grado di restituire una descrizione completa dell'attività neurale. Questo limita la possibilità di correlare in modo diretto i fenomeni osservati a diverse scale e rende necessario lo sviluppo di strategie sperimentali integrate, capaci di combinare modelli controllati e tecnologie avanzate per la registrazione e la stimolazione (Amunts *et al.* 2022; D'Angelo e Jirsa 2022).

### *Modelli sperimentali e tecnologie di registrazione*

Lo studio del sistema nervoso può essere affrontato a diversi livelli di complessità e organizzazione, ciascuno dei quali offre vantaggi e

limiti specifici. In generale, è possibile distinguere approcci che spaziano dai modelli in vitro, a quelli in vivo, fino allo studio diretto nell'uomo (Potter 2010). Questa pluralità di livelli riflette la necessità di bilanciare, da un lato, il grado di controllo sperimentale e, dall'altro, la rilevanza fisiologica del sistema studiato. I modelli in vitro rappresentano un livello intermedio di organizzazione: pur essendo sistemi semplificati rispetto all'organismo completo, mantengono caratteristiche fondamentali delle reti neurali, consentendo di investigare in modo mirato i meccanismi di base dell'attività elettrica e della comunicazione sinaptica (Chiappalone *et al.* 2019). Al contrario, i modelli in vivo e gli studi sull'uomo permettono di analizzare il funzionamento del cervello nel suo contesto naturale, ma con minori possibilità di controllo diretto sui parametri sperimentali.

In questo ambito, i modelli in vitro basati su colture neuronali costituiscono uno strumento particolarmente efficace (Banker e Goslin 1998), in quanto permettono di studiare le proprietà delle reti neurali in condizioni altamente controllate e riproducibili (Chiappalone *et al.*

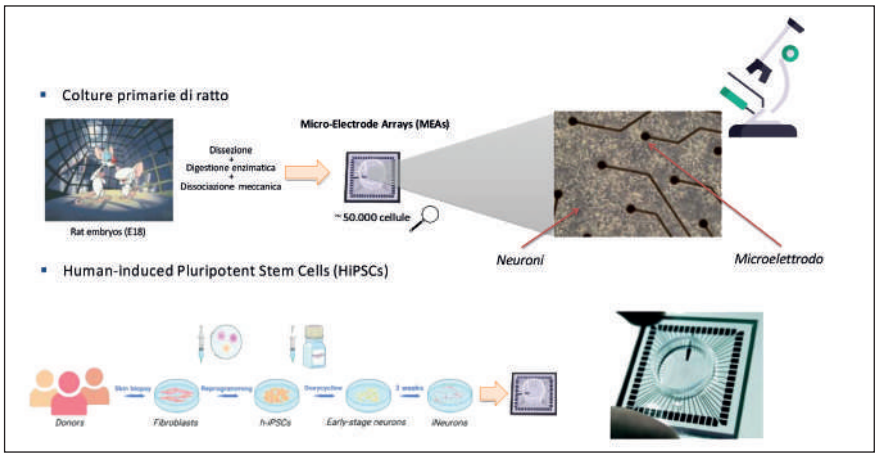



Figura 6. *Modelli in vitro di reti neuronali: in alto, colture di neuroni di origine animale dissociate e coltivate su microelettrodi (MEA) per lo studio dell'attività elettrofisiologica; in basso, generazione di neuroni umani a partire da cellule somatiche tramite riprogrammazione in iPSCs e successiva differenziazione. Questi approcci consentono di investigare il funzionamento delle reti neurali in condizioni controllate e riproducibili.*

2006; Chiappalone *et al.* 2007). In particolare, è possibile distinguere due principali tipologie di colture: quelle di origine animale e quelle di origine umana. Le colture animali, storicamente più diffuse, hanno rappresentato per lungo tempo il modello di riferimento per lo studio delle dinamiche di rete e delle proprietà elettrofisiologiche. Tuttavia, l'avvento delle cellule staminali pluripotenti indotte (induced Pluripotent Stem Cells, iPSCs) ha reso possibile la generazione di colture neuronali umane a partire da cellule somatiche riprogrammate (Takahashi *et al.* 2007; Takahashi e Yamanaka 2006, 2013). Questo approccio ha aperto nuove prospettive, consentendo di studiare reti neuronali con specifico background genetico umano e di modellare in vitro condizioni fisiologiche e patologiche (Frega *et al.* 2019). Queste due tipologie di colture neuronali (fig. 6) presentano caratteristiche e potenzialità complementari, offrendo strumenti distinti ma integrabili per l'analisi delle reti neurali.

Nei sistemi in vitro, i neuroni in coltura sono in grado di riorganizzarsi spontaneamente formando reti funzionali che conservano molte delle proprietà elettrofisiologiche e sinaptiche osservate in vivo (Brofiga *et al.* 2025; Brofiga *et al.* 2023). Questo consente di investigare in modo sistematico i meccanismi della comunicazione neuronale, della plasticità e della risposta a stimoli esterni, riducendo al contempo la complessità tipica dei sistemi biologici completi. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla possibilità di intervenire in modo diretto e controllato sull'attività della rete, modulando specifici parametri sperimentali e osservandone gli effetti nel tempo.

Un ruolo centrale nello studio delle reti neuronali in vitro è svolto dalle Micro Electrode Arrays (MEAs), dispositivi costituiti da matrici di microelettrodi che consentono di registrare e stimolare l'attività neuronale in modo simultaneo su più siti (Chiappalone *et al.* 2006; Chiappalone *et al.* 2007). A differenza delle tecniche di registrazione a singolo elettrodo, le MEAs permettono di acquisire informazioni distribuite nello spazio, rendendo possibile l'analisi dell'attività di rete e delle interazioni tra diverse regioni del preparato (fig. 7). Dal punto di vista funzionale, questi sistemi offrono una doppia capacità: da un lato, la registrazione extracellulare dell'attività spontanea ed evocata, dall'altro, la possibilità di erogare stimoli elettrici controllati, instaurando un'interazione bidirezionale con la rete neuronale.

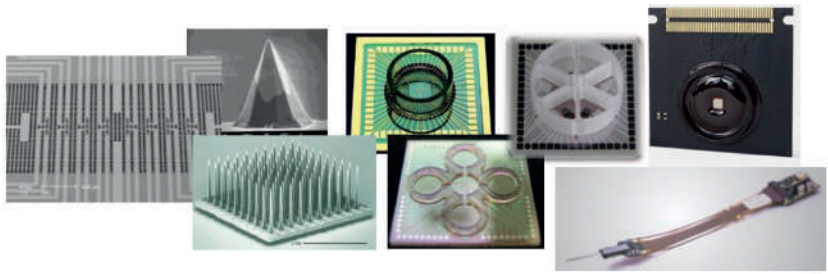


Figura 7. *Esempi di diverse tipologie di matrici di microelettrodi (Micro-Electrode Arrays, MEAs) per registrazioni elettrofisiologiche. In alto, da sinistra a destra: MEA con elettrodi tridimensionali a forma piramidale, mostrati anche in ingrandimento per evidenziare la geometria della punta e la deposizione di metallo sulla tip; dispositivi MEA con elettrodi planari convenzionali su substrato rigido; MEA con microstrutture/pozzetti per il confinamento delle colture cellulari; dispositivi MEA planari ad alta densità con elettronica integrata (CMOS-MEA). In basso, da sinistra a destra: array tridimensionali di microaghi in stile Utah array, progettati per l'interfacciamento in profondità con il tessuto in vivo; piattaforme multi-compartimentali per lo studio di reti neurali interconnesse; sonde ad alta densità denominate Neuropixels, per registrazioni in vivo.*

Questa caratteristica consente non solo di osservare il comportamento del sistema, ma anche di perturbarlo in modo mirato per studiarne la dinamica e le proprietà di adattamento. Un ulteriore elemento distintivo delle MEAs è la possibilità di effettuare registrazioni a lungo termine, che si estendono da giorni a settimane, permettendo di seguire l'evoluzione temporale delle reti neurali, i processi di maturazione e le modificazioni indotte da stimoli o lesioni. Tuttavia, l'elevata quantità di dati generati e la natura distribuita dei segnali rendono l'analisi e l'interpretazione dei risultati particolarmente complesse, richiedendo approcci quantitativi avanzati (Bologna *et al.* 2010; Gandolfo *et al.* 2010; Pasquale *et al.* 2010, 2017; Pasquale *et al.* 2008).

Nel loro insieme, le MEAs rappresentano quindi uno strumento fondamentale per lo studio delle dinamiche di rete e costituiscono una piattaforma sperimentale privilegiata per l'integrazione tra registrazione, stimolazione e analisi dei segnali neurali.

L'evoluzione tecnologica degli ultimi anni ha portato a un significativo incremento del numero di siti di registrazione disponibili, consentendo il passaggio da sistemi a bassa densità a dispositivi ad alta densità di

elettrodi (Angotzi *et al.* 2019; Battaglia e Schnitzer 2015; Jun *et al.* 2017; Paulk *et al.* 2022; Steinmetz *et al.* 2021; Steinmetz *et al.* 2018). Questo progresso ha determinato un miglioramento sostanziale della risoluzione spaziale, permettendo di osservare l'attività neuronale con un livello di dettaglio sempre più elevato e di ricostruire in modo più accurato la dinamica dei circuiti neurali. L'aumento del numero di canali di registrazione consente inoltre di analizzare simultaneamente popolazioni neuronali più estese, facilitando lo studio delle interazioni tra neuroni e delle proprietà emergenti delle reti. In questo senso, l'attenzione si sposta progressivamente dalla singola unità neuronale alla dimensione collettiva dell'attività di rete, in cui fenomeni come sincronizzazione, connettività funzionale e plasticità assumono un ruolo centrale. Tuttavia, questo avanzamento tecnologico comporta anche nuove sfide. L'acquisizione di grandi quantità di dati richiede infatti lo sviluppo di metodologie di analisi sempre più sofisticate, capaci di estrarre informazioni rilevanti da segnali complessi e ad alta dimensionalità (Bullmore e Sporns 2009). La gestione e l'interpretazione di tali dati rappresentano quindi un elemento cruciale per sfruttare appieno il potenziale delle tecnologie di registrazione di nuova generazione (Buccino *et al.* 2020; Buccino *et al.* 2026; Buccino *et al.* 2023).

### *Terapie elettroceutiche: una nuova prospettiva*

Le conoscenze acquisite nello studio dei segnali neurali e delle dinamiche di rete hanno favorito lo sviluppo delle cosiddette terapie elettroceutiche, un approccio che si propone di modulare l'attività del sistema nervoso attraverso stimolazioni elettriche mirate (Magisetty e Park 2022; Majid 2017; Reardon 2014). A differenza delle terapie farmacologiche, che agiscono in modo diffuso e spesso non specifico, le strategie elettroceutiche mirano a intervenire direttamente su circuiti neurali definiti, modulandone selettivamente l'attività (fig. 8). Questo paradigma si basa sull'idea che molte funzioni fisiologiche e patologiche siano riconducibili a pattern di attività elettrica alterati, e che sia quindi possibile ristabilire condizioni funzionali attraverso una stimolazione opportunamente progettata. In tale prospettiva, il sistema nervoso viene considerato non solo come un oggetto di studio, ma come un sistema dinamico con cui è possibile interagire in modo controllato.

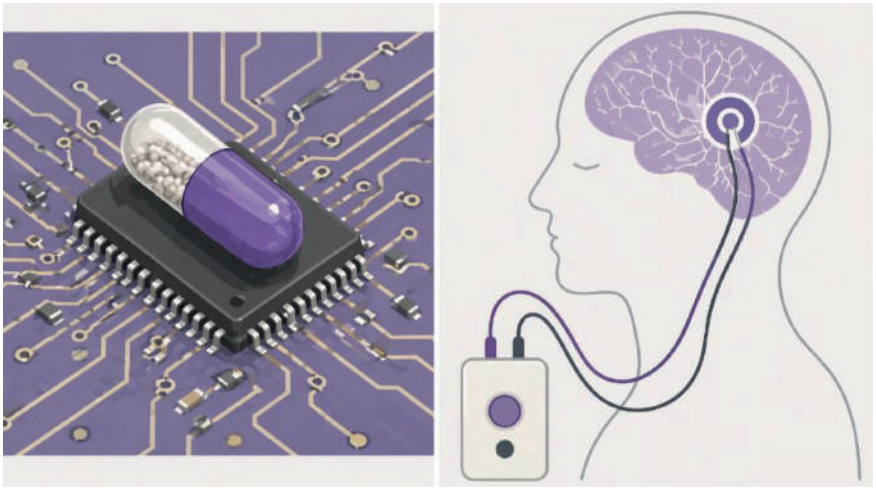


Figura 8. *Rappresentazione della medicina bioelettronica: a sinistra, una "pillola" su chip simboleggia il passaggio dalla farmacologia tradizionale a terapie basate su dispositivi elettronici in grado di modulare i segnali biologici. A destra, l'interfacciamento con il sistema nervoso evidenzia la possibilità di intervenire direttamente sui circuiti neurali. In questo contesto si colloca l'elettroceutica, che utilizza stimolazioni elettriche mirate per trattamenti più precisi e personalizzati.*

Alcuni esempi clinicamente consolidati, come la stimolazione cerebrale profonda (Deep Brain Stimulation, DBS) per il trattamento del morbo di Parkinson (Dostrovsky e Lozano 2002; Perlmutter e Mink 2006), dimostrano la fattibilità di questo approccio. Parallelamente, lo sviluppo di interfacce neurali e sistemi di stimolazione sempre più sofisticati sta ampliando le possibilità di applicazione, includendo ambiti quali la riabilitazione motoria (Cho *et al.* 2024; Formento *et al.* 2018; Phillips *et al.* 2025; Powell *et al.* 2023; Prat-Ortega *et al.* 2025), il trattamento del dolore (Aurucci *et al.* 2025; Petrini *et al.* 2019), il recupero delle funzioni sensoriali (George *et al.* 2019; Greenspon *et al.* 2025; Valle *et al.* 2025) e la modulazione di funzioni cognitive (Balasubramanian *et al.* 2024; Geva-Sagiv *et al.* 2023; Opris 2017).

In questo contesto, le terapie elettroceutiche rappresentano una prospettiva promettente per lo sviluppo di interventi più mirati, adattivi e potenzialmente personalizzati, in grado di integrare o affiancare le strategie terapeutiche tradizionali.

*Verso una neurostimolazione personalizzata*

Il contributo del nostro gruppo di ricerca si inserisce in questo contesto e si concentra sullo sviluppo di strategie di neurostimolazione volte a guidare e modulare i processi di plasticità neurale (Averna *et al.* 2022; Averna *et al.* 2021; Averna *et al.* 2020; Beaubois *et al.* 2024; Canu *et al.* 2025; Carè *et al.* 2022; Carè *et al.* 2024; Del Corso *et al.* 2025). La plasticità rappresenta una proprietà fondamentale del sistema nervoso, che consente alle reti neuronali di riorganizzarsi in risposta a stimoli, esperienze o lesioni, ed è alla base dei processi di apprendimento e recupero funzionale.

In particolare, il nostro approccio si fonda sull'idea che la stimolazione elettrica possa essere progettata in modo da interagire con i meccanismi intrinseci di adattamento del cervello, favorendo modificazioni funzionali mirate. In questo senso, la neurostimolazione non viene considerata come un intervento esterno imposto al sistema, ma come uno strumento per "dialogare" con la dinamica neurale, sfruttandone le proprietà plastiche. Un elemento centrale di questa strategia è rappresentato dagli approcci di stimolazione "closed-loop", nei quali l'intervento viene modulato in tempo reale sulla base dell'attività neurale registrata (fig. 9). A differenza delle modalità "open-loop", in cui la stimolazione è predefinita e indipendente dallo stato del sistema, il paradigma "closed-loop" consente di adattare continuamente i parametri di stimolazione alle condizioni dinamiche della rete (Carè *et al.* 2024; Chiappalone *et al.* 2022; Panuccio *et al.* 2018). Questo approccio permette non solo di aumentare l'efficacia dell'intervento, ma anche di ridurre la quantità di stimoli erogati, intervenendo in modo selettivo nei momenti in cui il sistema è più sensibile alla modulazione. In particolare, strategie di stimolazione temporizzate rispetto all'attività neurale possono favorire meccanismi di plasticità sinaptica coerenti con i principi Hebbiani ("cells that fire together wire together"), contribuendo a rafforzare o ristabilire specifiche connessioni funzionali (Guggenmos *et al.* 2013; Hebb 1949; Jackson *et al.* 2006).

I risultati ottenuti indicano che strategie di stimolazione personalizzate, progettate sulla base dell'attività neurale osservata, possono contribuire a contrastare gli effetti funzionali indotti da una lesione

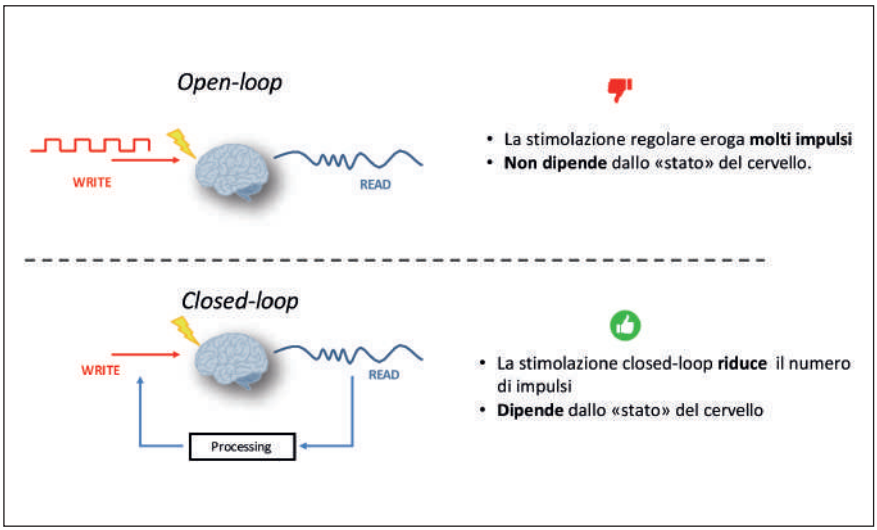



Figura 9. *Schema delle operazioni fondamentali nelle interfacce neurali: lettura (read), cioè la registrazione dell'attività elettrica del cervello, e scrittura (write), ovvero la stimolazione dei tessuti neurali. In alto è mostrato un approccio a ciclo aperto ("open-loop"), in cui la stimolazione è applicata senza utilizzare l'informazione registrata: questo comporta una minore adattabilità alle variazioni dinamiche dell'attività neurale e l'erogazione di un numero elevato e costante di impulsi, pur risultando una strategia più semplice e robusta. In basso, un approccio a ciclo chiuso ("closed-loop"), in cui i segnali acquisiti vengono utilizzati come feedback per modulare la stimolazione in tempo reale: ciò introduce una maggiore complessità tecnologica e computazionale, ma consente interventi più precisi e personalizzati, con un numero di impulsi variabile in funzione dello stato del sistema neurale.*

e a promuovere processi di recupero. In particolare, nei modelli sperimentali utilizzati, la lesione determina una riduzione significativa dell'attività neurale e un'alterazione delle dinamiche di rete, che possono essere parzialmente compensate attraverso protocolli di stimolazione opportunamente definiti. L'applicazione di stimolazioni temporizzate e coerenti con i pattern di attività della rete consente infatti di modulare la risposta neurale e di favorire meccanismi di riorganizzazione funzionale. Questo suggerisce che l'efficacia dell'intervento non dipende unicamente dalla presenza dello stimolo, ma dalla sua struttura temporale e dalla sua relazione con lo stato del sistema.

Nel loro insieme, questi risultati evidenziano il potenziale di approcci terapeutici adattivi, in cui la stimolazione è progettata in modo specifico per il sistema in esame, aprendo la strada allo sviluppo di strategie di intervento più mirate e personalizzate (Chiappalone e Levi 2026; Semprini *et al.* 2018).

*Prospettive future*

L'integrazione tra modelli sperimentali avanzati, tecnologie di registrazione ad alta risoluzione e metodologie di analisi dei dati apre prospettive rilevanti per lo sviluppo di nuove strategie terapeutiche. In questo contesto, l'obiettivo non è soltanto quello di aumentare la precisione degli interventi, ma di sviluppare approcci capaci di adattarsi dinamicamente alle caratteristiche del singolo paziente, tenendo conto della variabilità biologica e delle specifiche condizioni patologiche.

In questa direzione, si osserva anche un cambiamento significativo nel paradigma della ricerca biomedica. Accanto al tradizionale approccio *from bench to bedside*, si sta affermando un modello più circolare, definito *from bedside to bench to bedside*, in cui le osservazioni cliniche guidano lo sviluppo dei modelli sperimentali e delle tecnologie, e i risultati della ricerca vengono successivamente riportati alla pratica clinica. Questo approccio consente di sviluppare soluzioni maggiormente "user-centered", cioè orientate alle esigenze reali dei pazienti e dei clinici.

Un elemento chiave di questa evoluzione è rappresentato dall'impiego di modelli in vitro sempre più sofisticati, in particolare quelli basati su iPSCs. Questi sistemi permettono di studiare meccanismi fisiopatologici e di testare nuove strategie terapeutiche in condizioni controllate, mantenendo al contempo una maggiore rilevanza rispetto ai modelli animali tradizionali. In prospettiva, tali approcci offrono la possibilità di sviluppare modelli personalizzati, basati sulle caratteristiche cellulari del singolo paziente.

Parallelamente, le tecniche di neurostimolazione e di interazione con i sistemi biologici stanno trovando applicazione anche in contesti diversi dal sistema nervoso centrale. Un esempio significativo è rappresentato dallo studio di strategie per la modulazione della motilità

intestinale in condizioni patologiche severe, come la Pseudo-Ostruzione Intestinale Cronica (PIPO). In questo ambito, sono in corso attività di ricerca in collaborazione tra il nostro gruppo e l'Istituto Giannina Gaslini (prof. P. Gandullia), con l'obiettivo di sviluppare approcci innovativi per il ripristino della funzionalità motoria in sistemi complessi diversi dal cervello.

Nel loro insieme, queste linee di sviluppo evidenziano come la neuroingegneria stia evolvendo verso un ruolo sempre più centrale nella progettazione di tecnologie biomediche avanzate, contribuendo in modo significativo alla transizione verso una medicina più precisa, adattiva e personalizzata.

*Bibliografia*

Adrian E.D. *The Basis of Sensation*. London: Norton & Norton; 1928.

Amunts K., DeFelipe J., Pennartz C., Destexhe A., Migliore M., Ryvlin P., Furber S., Knoll A., Bitsch L., Bjaalie J.G. *Linking brain structure, activity, and cognitive function through computation*. eneuro (2022) 9(2).

Angotzi G.N., Boi F., Lecomte A., Miele E., Malerba M., Zucca S., Casile A., Berdondini, L. *SiNAPS: An implantable active pixel sensor CMOS-probe for simultaneous large-scale neural recordings*. Biosensors and Bioelectronics (2019) 126: 355-364.

Aurucci G.V., Gozzi N., Wagner M., Preatoni G., Brunello N., Cimolato A., Secerovic N., Zipser C.M., Raspopovic S. *Targeted neural stimulation congruent with immersive reality decreases neuropathic pain*. Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation (2025) 18(5): 1671-1674.

Averna A., Barban F., Carè M., Murphy M.D., Iandolo R., De Michieli L., Nudo R.J., Guggenmos D.J., Chiappalone M. (2022). *LFP analysis of brain injured anesthetized animals undergoing closed-loop intracortical stimulation*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 30, 1441-1451.

Averna, A., Hayley, P., Murphy, M.D., Barban, F., Nguyen, J., Buccelli S., Nudo, R.J., Chiappalone, M., Guggenmos, D.J. *Entrainment of network activity by closed-loop microstimulation in healthy ambulatory rats.* Cerebral Cortex (2021) 31(11): 5042-5055.

Averna A., Pasquale V., Murphy M.D., Rogantin M.P., Van Acker G.M., Nudo R.J., Chiappalone M., Guggenmos D.J. *Differential effects of open- and closed-loop intracortical microstimulation on firing patterns of neurons in distant cortical areas*. Cerebral Cortex (2020) 30(5): 2879-2896.

Balasubramanian S., Weston D.A., Levin M., Davidian D.C.C. *Charging ahead: Examining the future therapeutic potential of electroceuticals*. Advanced Therapeutics (2024) 7(7): 2300344.

Baldassarre A., Ramsey L., Hacker C.L., Callejas A., Astafiev S.V., Metcalf N.V., Zinn K., Rengachary J., Snyder A.Z., Carter A.R. *Large-scale changes in network interactions as a physiological signature of spatial neglect*. Brain (2014)137(12): 3267-3283.

Banker G., Goslin K. *Culturing nerve cells*. Cambridge MA: MIT Press; 1998.

Bassett D.S., Bullmore E.T. *Small-world brain networks revisited*. The Neuroscientist (2017)23(5): 499-516.

Bassett D.S., Sporns O. *Network neuroscience*. Nature Neuroscience (2017) 20(3): 353.

Battaglia F.P., Schnitzer M.J. *Editorial overview: Large-scale recording technology: Scaling up neuroscience*. (2015) 32: iv-vi.

Beaubois R., Cheslet J., Duenki T., De Venuto G., Carè M., Khoyratee F., Chiappalone M., Branchereau P., Ikeuchi Y., Levi T. *BiœmuS: A new tool for neurological disorders studies through real-time emulation and hybridization using biomimetic Spiking Neural Network*. Nature Communications (2024) 15(1): 5142.

Béjot Y., Yaffe K. *Ageing population: A neurological challenge*. Neuroepidemiology (2019) 52(1-2): 76-77.

Betzel R.F., Bassett D.S. *Multi-scale brain networks*. Neuroimage (2017) 160: 73-83.

Bologna L.L., Pasquale V., Garofalo M., Gandolfo M., Baljon P.L., Maccione A., Martinoia S., Chiappalone M. *Investigating neuronal activity by SPYCODE multi-channel data analyzer*. Neural Networks (2010) 23(6): 685-697.

Brofiga M., Callegari F., Cerutti L., Tedesco M., Massobrio P. *Cortical, striatal, and thalamic populations self-organize into a functionally connected circuit with long-term memory properties*. Biosensors and Bioelectronics (2025) 267: 116840.

Brofiga M., Poggio F., Callegari F., Tedesco M., Massobrio P. *Modularity and neuronal heterogeneity: Two properties that influence in vitro neuropharmacological experiments*. Frontiers in Cellular Neuroscience (2023) 17: 1147381.

Buccino A.P., Hurwitz C.L., Garcia S., Magland J., Siegle J.H., Hurwitz R., Hennig M.H. *SpikeInterface, a unified framework for spike sorting*. eLife, (2020) 9: e61834.

Buccino A.P., Sridhar A., Feng D., Svoboda K., Siegle J.H. *Efficient and reproducible pipelines for spike sorting large-scale electrophysiology data*. eLife (2026) 15: RP110170.

Buccino A.P., Winter O., Bryant D., Feng D., Svoboda K., Siegle J.H. *Compression strategies for large-scale electrophysiology data*. Journal of Neural Engineering (2023) 20(5): 056009.

Bullmore E., Sporns O. *Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems*. Nature Reviews Neuroscience (2009) 10(3): 186.

Buzsáki G., Anastassiou C.A., Koch C. *The origin of extracellular fields and currents – EEG, ECoG, LFP and spikes*. Nature Reviews Neuroscience (2012) 13(6): 407.

Buzsáki G., Draguhn A. *Neuronal oscillations in cortical networks*. Science (2004) 304(5679): 1926-1929.

Canu M.G., Barban F., Chiappalone M., Arnulfo G., Cota V.R. *Impact of ischemic lesion on sleep related connectivity in the sensorimotor cortex*. Frontiers in Neuroscience (2025) 19: 1661458.

Carè M., Averna A., Barban F., Semprini M., De Michieli L., Nudo R.J., Guggenmos D., Chiappalone, M. *The impact of closed-loop intracortical stimulation on neural activity in brain-injured, anesthetized animals*. Bioelectronic Medicine (2022) 8(1): 4.

Carè M., Chiappalone M., Cota V.R. *Personalized strategies of neurostimulation: From static biomarkers to dynamic closed-loop assessment of neural function*. Frontiers in Neuroscience (2024) 18: 1363128.

Carter A.R., Astafiev S.V., Lang C.E., Connor L.T., Rengachary J., Strube M.J., Pope D.L., Shulman G.L., Corbetta M. *Resting interhemispheric functional magnetic resonance imaging connectivity predicts performance after stroke*. Annals of Neurology (2010) 67(3): 365-375.

Chiappalone M., Bove M., Vato A., Tedesco M., Martinoia S. *Dissociated cortical networks show spontaneously correlated activity patterns during in vitro development*. Brain Research (2006) 1093(1): 41-53.

Chiappalone M., Cota V.R., Carè M., Di Florio M., Beaubois R., Buccelli S., Barban F., Brofiga M., Averna A., Bonacini F. *Neuromorphic-based neuroprostheses for brain rewiring: State-of-the-art and perspectives in neuroengineerin*g. Brain Sciences (2022) 12(11): 1578.

Chiappalone M., Levi T. *Advancing Neuroengineering with Neuromorphic Twins*. Nature Communications (2026) 17: 1938.

Chiappalone M., Pasquale V., Frega M. *In vitro neuronal networks: From culturing methods to neuro-technological applications*. Advances in Neurobiology 22. Cham: Springer; 2019.

Chiappalone M., Vato A., Berdondini L., Koudelka-Hep M., Martinoia S. *Network dynamics and synchronous activity in cultured cortical neurons*. International Journal of Neural Systems (2007) 17(02): 87-103.

Cho N., Squair J.W., Aureli V., James N.D., Bole-Feysot L., Dewany I., Hankov N., Baud L., Leonhartsberger A., Sveistyte K. *Hypothalamic deep brain stimulation augments walking after spinal cord injury*. Nature Medicine (2024) 30(12): 3676-3686.

D'Angelo E., Jirsa V. *The quest for multiscale brain modeling*. Trends in Neurosciences (2022) 45(10): 777-790.

Del Corso S., Barban F., Cota V., Chiappalone M. *Unveiling Changes in Sleep-Wake Neural Activity and Behavior After a Cortical Lesion In Vivo*. Paper presented at the 2025 47th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Copenhagen: Denmark; 2025. 1-6.

Dostrovsky J.O., Lozano A.M. *Mechanisms of deep brain stimulation*. Movement Disorders: official journal of the Movement Disorder Society (2002) 17(S3): S63-S68.

Feigin V.L., Vos T., Nichols E., Owolabi M.O., Carroll W.M., Dichgans M., Deuschl G., Parmar P., Brainin M., Murray C. *The global burden of neurological disorders: Translating evidence into policy*. The Lancet Neurology (2020) 19(3): 255-265.

Formento E., Minassian K., Wagner F., Mignardot J.B., Le Goff-Mignardot C.G., Rowald, A., Bloch, J., Micera, S., Capogrosso, M., Courtine, G. *Electrical spinal cord stimulation must preserve proprioception to enable locomotion in humans with spinal cord injury*. Nature Neuroscience (2018) 21(12): 1728-1741.

Frega M., Linda K., Keller J.M., Gümüş-Akay G., Mossink B., van Rhijn J.-R., Negwer M., Klein Gunnewiek T., Foreman K., Kompier N. *Neuronal network dysfunction in a model for Kleefstra syndrome mediated by enhanced NMDAR signaling*. Nature Communications (2019) 10(1): 4928.

Gandolfo M., Maccione A., Tedesco M., Martinoia S., Berdondini L. *Tracking burst patterns in hippocampal cultures with high-density CMOS-MEAs*. Journal of Neural Engineering (2010) 7(5): 056001.

George J.A., Kluger D.T., Davis T.S., Wendelken S.M., Okorokova E., He Q., Duncan C.C., Hutchinson D.T., Thumser Z.C., Beckler D. *Biomimetic sensory feedback through peripheral nerve stimulation improves dexterous use of a bionic hand*. Science Robotics (2019) 4(32): eaax2352.

Geva-Sagiv M., Mankin E.A., Eliashiv D., Epstein S., Cherry N., Kalender G., Tchemodanov N., Nir Y., Fried I. *Augmenting hippocampal-prefrontal neuronal synchrony during sleep enhances memory consolidation in humans*. Nature Neuroscience (2023) 26(6): 1100-1110.

Greenspon C.M., Valle G., Shelchkova N.D., Hobbs T.G., Verbaarschot C., Callier T., Berger-Wolf E.I., Okorokova E.V., Hutchison B.C., Dogruoz E. *Evoking stable and precise tactile sensations via multi-electrode intracortical microstimulation of the somatosensory cortex*. Nature Biomedical Engineering (2025) 9(6): 935-951.

Guggenmos D.J., Azin M., Barbay S., Mahnken J.D., Dunham C., Mohseni P., Nudo R.J. *Restoration of function after brain damage using a neural prosthesis*. Proceedings of the National Academy of Sciences (2013) 110(52): 21177-21182.

Hebb D.O. *Organization of Behavior*. New York: John Wiley & Sons; 1949.

Hodgkin A.L., Huxley A.F. *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve*. The Journal of Physiology (1952) 117(4): 500.

Jackson A., Mavoori J., Fetz E.E. *Long-term motor cortex plasticity induced by an electronic neural implant*. Nature (2006) 444(7115): 56-60.

Jun J.J., Steinmetz N.A., Siegle J.H., Denman D.J., Bauza M., Barbarits B., Lee A.K., Anastassiou C.A., Andrei A., Aydin C., Barbic M., Blanche T.J., Bonin V., Couto J., Dutta B., Gratiy S.L., Gutnisky D.A., Hausser M., Karsh B., Ledochowitsch P., Lopez C.M., Mitelut C., Musa S., Okun M., Pachitariu M., Putzeys J., Rich P.D., Rossant C., Sun W.L., Svoboda K., Carandini M., Harris K.D., Koch C., O'Keefe J., Harris T.D. *Fully integrated silicon probes for high-density recording of neural activity*. Nature (2017) 551(7679): 232-236. doi: 10.1038/nature24636

Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M., Siegelbaum S., Hudspeth A.J., Mack S. *Principles of Neural Science* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill; 2000.

Levi T., Bonifazi P., Massobrio P., Chiappalone M. *Closed-loop systems for next-generation neuroprostheses*. Front. Neurosci. (2018) 12(26).

Magisetty R., Park S.-M. *New era of electroceuticals: Clinically driven smart implantable electronic devices moving towards precision therapy*. Micromachines (2022) 13(2): 161.

Majid A. (ed.). *Electroceuticals. Advance in Electrostimulation Therapies*. New York: Springer; 2017.

Opris, I. *Electrical stimulation for modification of memory and cognition*. In: Majid A. (ed.). *Electroceuticals: Advances in Electrostimulation Therapies* New York: Springer; 2017. 283-316.

Panuccio G., Semprini M., Natale L., Buccelli S., Colombi I., Chiappalone M. *Progress in Neuroengineering for brain repair: New challenges and open issues*. Brain and Neuroscience Advances (2018) 2. doi: 10.1177/2398212818776475.

Pasquale V., Martinoia S., Chiappalone M. *A self-adapting approach for the detection of bursts and network bursts in neuronal cultures*. Journal of Computational Neuroscience (2010) 29(1-2): 213-229.

Pasquale V., Martinoia S., Chiappalone M. *Stimulation triggers endogenous activity patterns in cultured cortical networks*. Scientific Reports (2017) 7(1): 9080.

Pasquale V., Massobrio P., Bologna L., Chiappalone M., Martinoia S. *Self-organization and neuronal avalanches in networks of dissociated cortical neurons*. Neuroscience (2008) 153(4): 1354-1369.

Paulk A.C., Kfir Y., Khanna A.R., Mustroph M.L., Trautmann E.M., Soper D.J., Stavisky S.D., Welkenhuysen M., Dutta B., Shenoy K.V. *Large-scale neural recordings with single neuron resolution using Neuropixels probes in human cortex*. Nature Neuroscience (2022) 25(2): 252-263.

Perlmutter J.S., Mink J.W. *Deep brain stimulation*. Annu. Rev. Neurosci., (2006) 29(1): 229-257.

Petrini F.M., Bumbasirevic M., Valle G., Ilic V., Mijović P., Čvančara P., Barberi F., Katic N., Bortolotti D., Andreu D. *Sensory feedback restoration in leg amputees improves walking speed, metabolic cost and phantom pain*. Nature Medicine (2019) 25(9): 1356-1363.

Phillips A.A., Gandhi A.P., Hankov N., Hernandez-Charpak S.D., Rimok J., Incognito A.V., Nijland A.E., D'Ercole M., Watrin A., Berney M. *An implantable system to restore hemodynamic stability after spinal cord injury*. Nature Medicine (2025) 31(9): 2946-2957.

Potter S.M. *Closing the loop between neurons and neurotechnology*. Frontiers in Neuroscience (2010) 4: 15.

Powell M.P., Verma N., Sorensen E., Carranza E., Boos A., Fields D.P., Roy S., Ensel S., Barra B., Balzer J. *Epidural stimulation of the cervical spinal cord for post-stroke upper-limb paresis*. Nature Medicine (2023) 29(3): 689-699.

Prat-Ortega G., Ensel S., Donadio S., Borda L., Boos A., Yadav P., Verma N., Ho J., Carranza E., Frazier-Kim S. *First-in-human study of epidural spinal cord stimulation in individuals with spinal muscular atrophy*. Nature Medicine (2025) 31(4): 1246-1256.

Reardon S. TECHNOLOGY: *Electroceuticals spark interest: Industry and academia invest in treating diseases by delivering electrical charges to nerves*. Nature (2014). 511(7507): 9.

Semprini M., Laffranchi M., Sanguineti V., Avanzino L., De Icco R., De Michieli L., Chiappalone M. *Technological approaches for neurorehabili-*

*tation: From robotic devices to brain stimulation and beyond*. Frontiers in Neurology (2018) 9: 212.

Steinmetz J.D., Seeher K.M., Schiess N., Nichols E., Cao B., Servili C., Cavallera V., Cousin E., Hagins H., Moberg M.E. *Global, regional, and national burden of disorders affecting the nervous system, 1990-2021: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021*. The Lancet Neurology (2024) 23(4): 344-381.

Steinmetz N.A., Aydin C., Lebedeva A., Okun M., Pachitariu M., Bauza M., Beau M., Bhagat J., Böhm C., Broux M. *Neuropixels 2.0: A miniaturized high-density probe for stable, long-term brain recordings*. Science (2021) 372(6539): eabf4588.

Steinmetz N.A., Koch C., Harris K.D., Carandini M. *Challenges and opportunities for large-scale electrophysiology with Neuropixels probes*. Curr. Opin. Neurobiol. (2018) 50: 92-100. doi: 10.1016/j.conb.2018.01.009

Takahashi K., Tanabe K., Ohnuki M., Narita M., Ichisak, T., Tomoda K., Yamanaka S. *Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors*. Cell (2007) 131(5): 861-872.

Takahashi K., Yamanaka S. *Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors*. Cell (2006) 126(4): 663-676.

Takahashi K., Yamanaka S. *Induced pluripotent stem cells in medicine and biology*. Development (2013) 140(12): 2457-2461.

Valle G., Alamri A.H., Downey J.E., Lienkämper R., Jordan P.M., Sobinov A.R., Endsley L.J., Prasad D., Boninger M.L., Collinger J.L. *Tactile edges and motion via patterned microstimulation of the human somatosensory cortex*. Science (2025) 387(6731): 315-322.

Vassanelli S., Mahmud M. *Trends and Challenges in neuroengineering: Toward "intelligent" neuroprostheses through brain-"brain inspired systems" communication*. Frontiers in Neuroscience (2016) 10: 438.

**Laura Cornara*** – **Gabriele Ambu****

# *La riscoperta del manoscritto "Selva Botanica" di padre Vincenzo Celesia, Cappuccino*

**Sommario**: La riscoperta di "Selva Botanica", manoscritto ottocentesco del frate cappuccino Vincenzo Celesia, offre un raro sguardo etnobotanico sugli usi tradizionali delle piante in Liguria. Fondendo osservazione scientifica e tradizione orale, l'opera documenta oltre 270 applicazioni in ambito medicinale, ornamentale e domestico di piante spontanee e/o coltivate. Ricco di illustrazioni botaniche e annotazioni culturali, il manoscritto crea un ponte tra il sapere monastico e la saggezza rurale, costituendo una fonte preziosa per lo studio dell'etnobotanica storica e della fitoterapia popolare. Una edizione anastatica commentata rende oggi il testo accessibile sia agli studiosi sia al grande pubblico.

**Parole chiave**: etnobotanica storica; tradizione monastica; usi popolari delle piante; piante medicinali, Liguria.

**Abstract**: *The Rediscovery of the Manuscript "Selva Botanica" by Father Vincenzo Celesia, Capuchin*

The rediscovery of "Selva Botanica", a 19th-century manuscript by Capuchin Friar Vincenzo Celesia, offers a rare ethnobotanical insight into traditional plant uses in Liguria. Blending scientific observation and oral tradition, the work documents over 270 applications across medicinal, ornamental, and domestic contexts. Rich in botanical illustrations and cultural annotations, the manuscript bridges monastic knowledge and rural wisdom, making it a valuable source for the study of historical ethnobotany and popular phytotherapy. A commented anastatic edition of the manuscript now makes it accessible to scholars and the public alike.

**Keywords**: historical ethnobotany; monastic tradition; traditional plant uses; medicinal plants, Liguria.

---

* Accademica laura.cornara@unige.it
** Frate cappuccino, biologo gabrieleambu1976@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.343-363

Il manoscritto "Selva Botanica" di Vincenzo Celesia è un'opera che restituisce una visione integrata del sapere botanico ed etnografico nella Liguria di fine Ottocento. La sua recente riscoperta e valorizzazione apre nuove prospettive per approfondire l'etnobotanica legata al contesto monastico e contadino del territorio ligure. Il testo, infatti, non è solo un catalogo di piante, ma una testimonianza culturale, un documento in cui l'Autore raccoglie ed espone, con rigore e passione, un rilevante patrimonio di conoscenze legate agli usi tradizionali delle piante, con particolare riferimento a quelli medicinali e ornamentali.

Vincenzo Celesia fu una delle personalità più eclettiche degli ultimi due secoli di storia dei Frati Cappuccini liguri: fu artista autodidatta e botanico appassionato (fig. 1), incarnando lo spirito dell'approccio olistico al sapere tipico dell'Ottocento e del primo Novecento (Zaverio 1912).

In quest'epoca già molti ecclesiastici si erano impegnati sul fronte della ricerca scientifica: il monaco Gregor Mendel (1822-1884), il sacerdote milanese Giuseppe Mercalli (1850-1914), l'abate Antonio Stoppani da Lecco (1824-1891), considerato da tutti il padre della geologia e della paleontologia italiana, il celebre antropologo gesuita Pierre Teilhard de Chardin, che partecipò alla scoperta dell'Uomo di Pechino (*Homo erectus pekinensis*) (Zwart 2022).



Figura 1. *Padre Vincenzo Celesia da Gazzo (1864-1942).*

Nato nel 1864 a Gazzo, un piccolo borgo della Valle Arroscia, Vincenzo Celesia crebbe in un ambiente contadi-

no dove la conoscenza del mondo vegetale era parte integrante della vita quotidiana.

Giovanissimo entrò nell'Ordine dei Frati Minori Cappuccini e si appassionò alle scienze naturali. Durante la sua vita egli raccolse, dalla viva voce di contadini e confratelli, e documentò con attenzione sistematica le tradizioni relative agli usi delle piante nella Liguria del suo tempo. Un'esperienza importante nella vita del Celesia fu quella di cappellano presso l'ospedale civile Pammatone di Genova. Qui entrò in contatto con gli ambienti scientifici d'avanguardia del tempo, stringendo amicizia con medici, chimici e botanici. In quell'epoca i Frati Cappuccini genovesi gestivano una farmacia dove brevettavano preparati medicinali a base di piante officinali, e tra questi erano particolarmente rinomate le "pillole emmenagoghe" di fra Petronio da Genta, utilizzate per regolarizzare il ciclo mestruale e come ricostituenti, la cui formulazione includeva alcune piante le cui virtù medicinali sono riferite anche in "Selva Botanica".

Il periodo in cui visse il Celesia corrisponde allo sviluppo in Liguria, specie nel Ponente, della floricoltura moderna, soprattutto a seguito dell'inaugurazione nel 1872 del tratto ferroviario Genova-Ventimiglia. Questo fatto trasformò il mercato dei fiori, a carattere prettamente locale e caratterizzato dalle cosiddette "mazzerie" (mazzetti di fiori recisi da vendere localmente), in un mercato con respiro internazionale, proprio grazie alla possibilità di rapidi trasporti anche a lunghe distanze.

Su questa scia nacquero anche i giardini e gli orti botanici intesi come veri e propri laboratori a cielo aperto, ossia centri di sperimentazione e di acclimatazione per la coltivazione delle piante esotiche. Questo periodo fu, infatti, caratterizzato da nuove acquisizioni di palme ornamentali nel Ponente ligure e dalla sperimentazione di nuove tecniche di coltivazione di fiori e di piante. Tra i più celebri giardini botanici della zona si possono annoverare i Giardini Hanbury, i Giardini Winter (creati dal giardiniere e paesaggista tedesco Ludwig Winter) e i Giardini Moreno di cui oggi non sopravvive pressoché nulla, se non il ricordo all'interno dei Giardini Monet di Bordighera. I Giardini Moreno erano infatti celebri non solo per la coltivazione di piante esotiche e rare, ma perché ispirarono la fantasia di molti artisti, tra i quali lo stesso Monet.

In questo stesso periodo, così ricco di fermento scientifico e artistico, il manoscritto "Selva Botanica", pur nella sua semplicità, indica

come lo studio delle scienze naturali si fosse diffuso anche in contesti religiosi lontani dall'ambiente accademico.

Tra i personaggi significativi che vissero e operarono in Liguria nel XIX secolo, occupandosi di temi botanici, oltre a Federico Delpino, studioso chiavarese considerato il padre della biologia vegetale moderna, merita un posto d'onore il pastore anglicano Clarence Bicknell, che si trasferì a Bordighera e lì passò buona parte della sua vita studiando la flora ligure, con un particolare interesse per quella delle Alpi (Barale e Bicknell 2024). Tra le sue interessanti annotazioni va ricordata la riscoperta di un'orchidea molto rara, *Cypripedium calceolus* L., che era stata osservata l'ultima volta circa un secolo prima da un altro religioso, il micologo Ugo Maria Miceli.

Il tempo in cui visse il Celesia fu quindi un periodo caratterizzato da una serie di scoperte e dibattiti scientifici di cui, grazie alla stampa, venne a conoscenza anche il grande pubblico.

Il frontespizio (fig. 2) del volume II di Paul Knuth, *Handbuch der Blütenbiologie*, mostra la figura centrale di Charles Darwin tra coloro che furono i suoi più attivi collaboratori nello studio dell'evoluzione naturale. Tra questi, in basso a sinistra, è presente Federico Delpino che ebbe fitti scambi epistolari con Darwin in relazione alla teoria dell'evoluzione e ai rapporti tra gli insetti (in particolare le formiche) e le piante.

Il Celesia fu anche un appassionato d'arte e raggiunse ottimi risultati soprattutto nella pirografia, come dimostrano le incisioni su legno da lui realizzate per il coro della chiesa dei Frati Cappuccini di Genova Quarto, Nostra Signora degli Angeli. Nei pannelli sono riprodotte diverse scene a sfondo religioso, circondate da rappresentazioni della flora locale. Una particolarità è costituita dalle pirografie raffiguranti i conventi liguri di quel tempo, ognuno contornato da diverse specie vegetali descritte dallo stesso autore, in una guida artistica pubblicata nel 1912 (Celesia 1912). Nella figura 3, come esempio, sono mostrate le pirografie relative ai conventi di Santa Margherita Ligure e di Sestri Ponente con le corrispondenti didascalie che descrivono alcune delle piante rappresentate. Tra queste, si distinguono facilmente le foglie di elleboro e *Asplenium trichomanes* L., quelle della passiflora e la pianta di *Centaurea scabiosa* L. Il Celesia manifesta così la sua notevole capacità di osservare la natura e, in particolare, le piante sia spontanee sia coltivate presenti in ogni convento. Nella sua arte egli riflette quello che da

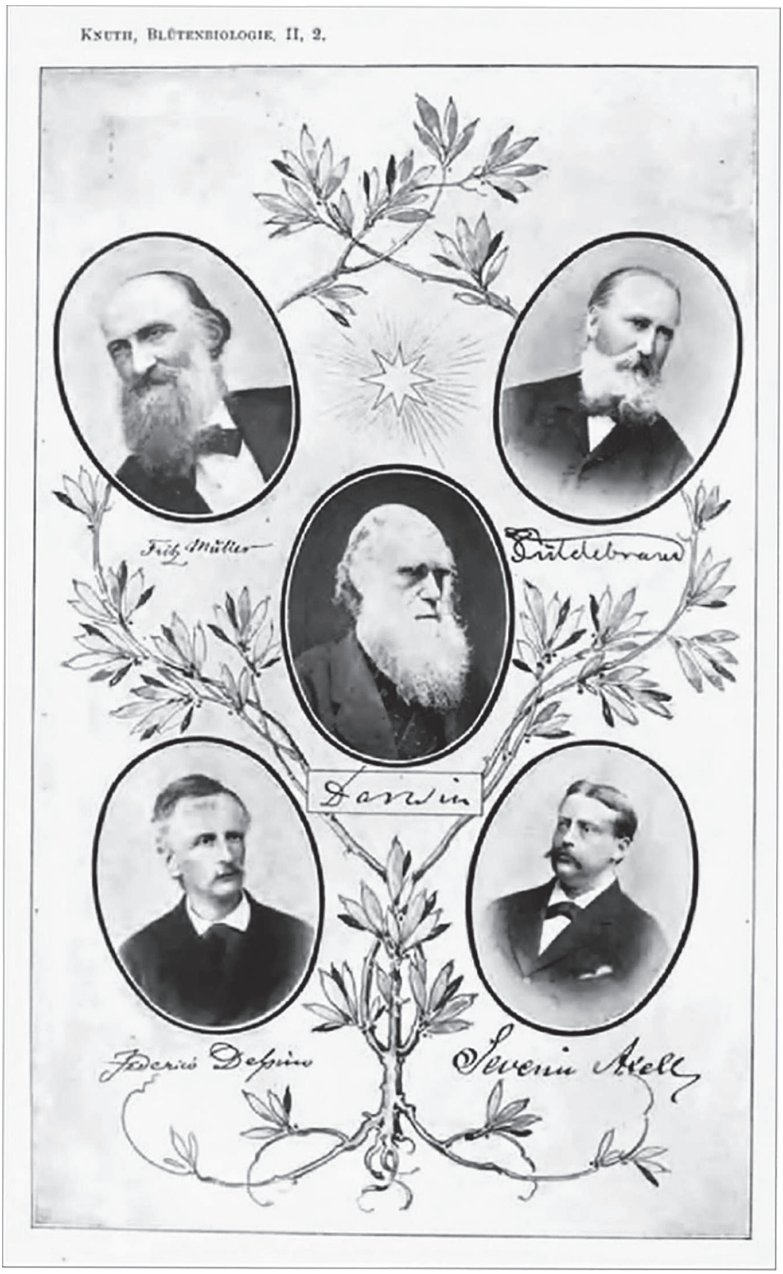



Figura 2. *Frontespizio del volume* Handbuch der Blütenbiologie *(1898-1904) (fonte: https://www.researchgate.net/figure/Charles-Darwin-in-the-middle-surrounded-by-Federico-Delpino-Severin-axell-Fritz-mueller_fig1_51048843).*



Figura 3. *Sopra, Convento di Santa Margherita Ligure: "Felci, Smilax aspera, Graminacee, Helleborus". Sotto, Convento di Sestri Ponente: "Felci, Scabbiosa, Avena, Passiflore, Geranium cimicinum, Tricomanes, Setaria viridis".*

sempre è la caratteristica dei conventi francescani, ossia l'essere immersi in un ambiente naturale (Benocci e Horowski 2025).

Anche in campo artistico il Celesia, dunque, documentò la sua passione per la botanica e le scienze naturali e, sebbene la sua formazione non fosse di tipo accademico, un'innata curiosità lo portò a saper ascoltare e osservare con attenzione le persone e la natura, traendone importanti informazioni per il suo manoscritto.

Tale interesse fu supportato anche da una vivace intelligenza e dalla lettura di opere fondamentali di botanica presenti nelle biblioteche conventuali (Galante 2013). All'interno di tali libri sono infatti tuttora

presenti le cosiddette "note di possesso" (oggi conservate nell'archivio storico dei Cappuccini) da cui è possibile risalire alle letture e ai testi su cui il Celesia poté approfondire e perfezionare le sue conoscenze. Fra tutti, il più celebre cui attinse fu *I Discorsi* del medico senese Pietro Andrea Mattioli, commento all'opera originale di Dioscoride (I sec. a.C.), che rappresentò la pietra miliare della botanica per tutto il Rinascimento (Mattioli 1557). Tuttavia, la maggior parte delle informazioni sull'uso delle piante riportate in "Selva Botanica" furono ricavate dal Celesia attraverso l'ascolto della viva voce dei contadini, dei frati e dei cerusici incontrati nel suo ministero sacerdotale.

"Selva Botanica" rappresenta quindi una sintesi di tutte queste conoscenze, fra cultura popolare e sapere erudito, che il Celesia fece confluire in questa opera, inizialmente di due volumi manoscritti e di cui purtroppo oggi è rimasto soltanto il primo, perché il secondo è andato perduto in circostanze non note.[1]

"Selva Botanica" si può considerare un manoscritto ritrovato grazie al lavoro dei direttori del Museo dei Cappuccini Liguri, i dottori Luca Piccardo e Dafne Ferrero, e dei bibliotecari e degli archivisti che hanno messo a disposizione il testo, prima per due mostre allestite al Museo (Nepori e Zagatti 2010) e, in seguito, per studi universitari, tra cui la stesura di una tesi di laurea (Venere 2022).

Sulla scia dell'interesse suscitato dal lavoro del Celesia, fonte davvero preziosa non solo di curiosità, ma pure di interessanti dati etnobotanici, si è quindi deciso di far uscire il manoscritto dalla nicchia museale e degli addetti ai lavori e renderlo disponibile al grande pubblico tramite la realizzazione di una copia anastatica commentata (Milano, Erboristeria Domani-Libri, 2025).

L'opera si presenta come una raccolta sistematica illustrata di circa 150 taxa, corredata da osservazioni sugli usi delle piante in svariati ambiti, come indica lo stesso frontespizio: "nella medicina, nella farmacia, nella veterinaria, nell'orticoltura, nell'agricoltura, nell'industria e nel commercio", sebbene una particolare attenzione venga riservata ai fiori usati a scopo ornamentale e religioso e alle piante medicinali. Il manoscritto si distingue per la sua precisione descrittiva e per

[1] https://manus.iccu.sbn.it/risultati-ricerca-manoscritti/-/manus-search/detail/723987?-monocampo=selva+botanica&n=v&monocampo%3Atipo=OR&




Figura 4. *Foto dei Congressisti con le loro famiglie (1892) (fonte: https://archive.org/details/Congresso-botanico-internazionale-PHAIDRA_o_4642).*

l'integrazione dei nomi scientifici e dei nomi locali in uso all'epoca, spesso collegati a particolari credenze o tradizioni. Si tratta quindi di un vero e proprio compendio di botanica popolare, di grande valore per coloro che studiano la fitoterapia storica, l'etnobotanica o anche solo la storia della scienza. Il valore di quest'opera fu riconosciuto già all'epoca. Infatti, su segnalazione del celebre botanico tedesco Otto Penzig, prefetto dell'Orto e dell'Istituto botanico della Regia Università di Genova, questo testo ricevette una menzione d'onore al Primo Congresso Internazionale di Botanica che si tenne a Genova nel 1892, in occasione del quarto centenario della scoperta dell'America. Il testo riportato negli Atti del Congresso (Penzig 1893) riferisce che:

> Il professor Penzig presenta all'assemblea a nome dell'autore Padre Vincenzo Celesia di Genova, due grossi volumi manoscritti in quarto grande, intitolati Selva Botanica che contengono la descrizione e l'illustrazione in tavole eseguite a penna o a lapis, di un grandissimo numero di piante indigene e coltivate nei campi e nei giardini di Liguria, con svariate notizie sulle loro proprietà, loro usi, la cultura eccetera […] E dice alcune parole

> d'encomio per il lavoro eseguito con molta diligenza che lascia sul banco della presidenza per chi voglia esaminarlo più minutamente. (p. 168)

Una foto di gruppo ormai molto sbiadita (fig. 4) ritrae i partecipanti al Congresso con le loro famiglie; in basso sono riportati i loro nomi. Tra i tanti: Delpino, Bicknell e altre personalità come Hanbury, Issel e altri autorevoli studiosi, molti dei quali dirigevano i principali Orti e Giardini botanici dell'epoca.

Il valore dell'opera fu quindi riconosciuto anche nell'ambiente accademico, pur essendo il Celesia un botanico autodidatta.

Quello che colpisce subito, sfogliando il volume, è la bellezza dei dettagli, cioè un'attenzione particolare all'aspetto artistico ed estetico. Il binomio arte e natura, infatti, accompagnò sempre la vita del Celesia. Una particolarità che esemplifica questo aspetto del testo sono i capilettera illustrati, dove, per esempio, la prima lettera F è rappresentata come un bambino a testa in giù (fig. 5 in alto con, a destra, inserto ingrandito), oppure la P trasformata in un anziano monsignore con il suo cappello (chiamato "saturno"), che si appoggia faticosamente al bastone




Figura 5. *Esempi di capilettera illustrati in due delle schede del manoscritto (tavole n. 85 e n. 86).*

(fig. 5 in basso con, a destra, inserto ingrandito). In quest'ultimo caso, all'aspetto artistico si unisce anche un "suggerimento visivo" all'utilità della pianta, *Iva artetica* (*Ajuga chamaepitys* [L.] Schreb.), rimedio popolare contro l'artrite. Lo stile artistico del Celesia riflette quindi la sua capacità di osservazione e il suo amore per la natura, ma anche la sua vicinanza all'essere umano.

Ogni scheda contiene l'illustrazione della pianta, realizzata a matita o inchiostro o colorata con i pastelli, il suo nome comune, il nome scientifico e la famiglia (ovviamente secondo i criteri tassonomici dell'epoca), seguiti da una breve descrizione botanica. Numerose sono le curiosità e i diversi usi etnobotanici riferiti, spesso anche originali e inediti. Non è infrequente che in alcune schede compaiano anche degli animali che accompagnano le piante, come nel caso del cavolo (tavola n. 41) su cui è visibile una farfalla adulta della famiglia delle Nottuidi (probabilmente *Mamestra brassicae*) e la sua fase larvale (il bruco).

Un'altra caratteristica che colpisce il lettore è indubbiamente la forma di scrittura a cuneo, detta a *cul-de-lampe*, scelta dall'Autore. Si tratta di una tecnica rinascimentale usata però solo occasionalmente per la chiusura di un capitolo o per riempire eventuali spazi bianchi rimasti nelle pagine.[2] Qui il Celesia la usa, invece, nell'intero testo e questo, unitamente ai motivi floreali che incorniciano ciascuna scheda, sembra una scelta indotta dal suo profondo senso artistico, che suggerisce un legame ininterrotto con le tradizioni dei manoscritti medievali.

In "Selva Botanica" il Celesia fa confluire anche le sue conoscenze relative alle tradizioni etnobotaniche dei Cappuccini liguri, raccolte dalla voce dei suoi confratelli. In una delle pirografie del convento di Genova Quarto il frate inginocchiato in preghiera (san Francesco Maria da Camporosso) presenta ai suoi piedi una "sporta da questuante" (fig. 6) piena di erbe. L'immagine è un chiaro riferimento alla famosa "misticanza" dei frati. Questo miscuglio di erbe commestibili, spontanee e coltivate, era sapientemente preparato seguendo un'antica ricetta tradizionale per essere poi consumato dai frati, ma anche offerto ai benefattori. Nell'antico testo del 1626 *De Sacris Ritibus* di padre Zaccaria Boverio si trovano le indicazioni della ricetta originale: sono descritte quelle erbe che il frate ortolano non deve mancare di coltivare, per pre-

[2] https://www.ucm.es/quidestliber/cul-de-lampe

parare questo miscuglio, detto anche "acetaria". Fra queste piante la più famosa è il *coronopum*, ovvero *Plantago coronopus* L., una *Plantaginacea* conosciuta a Genova e in Liguria con il nome di "Insalata dei Cappuccini" (v. fig. 5, in alto). Questo uso tradizionale citato in "Selva Botanica" ha dato recentemente spunto a uno studio (Cornara *et al.* 2022) che ha analizzato le caratteristiche e le proprietà salutistiche dei quattro ingredienti principali di questa mescolanza di erbette: *Plantago coronopus* L., *Rumex acetosa* L., *Cichorium intybus* L. e *Artemisia dracunculus* L. Tutte queste piante hanno mostrato delle proprietà antiossidanti e antinfiammatorie che hanno confermato la loro valenza come alimenti salutari. Questo tipo di ricerca è un classico esempio di come un dato tradizionale, che ci arriva dalle memorie del passato, può diventare il punto di partenza per un approfondimento scientifico attuale, aprendo nuove e interessanti prospettive per il futuro.

Sebbene l'opera sia costituita da 147 schede botaniche, come si evidenzia dall'indice finale del testo, in molti casi, parlando di un genere o di una determinata specie, il Celesia fa spesso riferimento anche ad altre specie affini. Quindi, in realtà, il numero complessivo di taxa citati è molto più alto. Le famiglie alle quali appartengono i taxa elencati sono 48 e, fra queste, le più rappresentate sono *Asteraceae* (note anche con il nome di *Compositae*) e *Fabaceae* (o *Leguminosae*), seguite da *Caryophyllaceae*, *Rosaceae* e *Lamiaceae* (o *Labiatae*).



Figura 6. *Sporta per la questua, usata in passato dai Frati Cappuccini (fonte: Archivio fotografico Museo dei Beni Culturali dei Frati Cappuccini di Genova).*

L'aspetto più interessante del manoscritto è la raccolta di oltre 270 usi etnobotanici delle piante in 12 diversi settori tra i quali prevalgono l'uso domestico, che comprende anche il ruolo ornamentale di piante coltivate per

abbellire la casa, il chiostro dei conventi o la chiesa, seguito dall'uso in campo agropastorale e medicinale.

Tuttavia, bisogna precisare che spesso una stessa pianta è citata per diversi utilizzi e quindi rientra a far parte di più settori. Un chiaro esempio è rappresentato da *Iris florentina* L., il giaggiolo, che il Celesia indica adatto a diverse tipologie di utilizzo: quello ornamentale/domestico, giustificato dalla bellezza dei suoi fiori, l'uso medicinale nel caso di problemi di idropisia (presenza di liquido in alcune cavità sierose come pleura o peritoneo) e per trattare il cosiddetto "mal di pietra", termine usato in quel tempo per indicare la calcolosi renale. Infine, un ulteriore uso citato, che rientra nella categoria domestica, riguarda il rizoma della pianta impiegato all'epoca dalle lavandaie, soprattutto nella zona di Napoli, per profumare la biancheria. Questo particolare impiego riferito dal Celesia è ancora oggi attuale: i rizomi di iris sono infatti inseriti in prodotti presenti in commercio come "essenze per il bucato". Va precisato, a questo proposito, che questi rizomi, dopo la raccolta, devono subire una specifica preparazione, in quanto vengono frammentati ed esposti a un lungo processo di essiccazione e fermentazione, affinché si sviluppino gli ironi, i composti responsabili del gradevole profumo simile a quello della viola mammola (Bruni e Nicoletti 2003). Oggigiorno nelle preparazioni cosmetiche (nelle ciprie soprattutto) e nei profumi delle più famose *maisons* francesi e italiane, l'iris è ancora un componente fondamentale.

Fra le piante spontanee citate va ricordata la Calcatreppola, ovvero *Centaurea calcitrapa* L. (fig. 7), una specie che cresce abbondante sulle colline e sulle montagne dell'entroterra ligure. Questa pianta, nonostante sia estremamente spinosa, era molto appetita dagli asini e quindi rappresentava all'epoca del Celesia una preziosa pianta foraggera, entrando a pieno diritto in un'altra categoria di uso, quella agropastorale. Questa specie era anche usata per diversi scopi terapeutici, come in caso di febbre alta, problemi digestivi e dolori di stomaco. È interessante una nota che il Celesia fa a questo proposito, precisando di come avesse ricevuto queste informazioni sull'utilità della pianta direttamente dal padre ormai ottuagenario, dimenticandone, purtroppo, molte altre essendo all'epoca soltanto un bambino. Questa considerazione è una conferma che molti dei dati riferiti dall'Autore nella sua opera sono stati appresi per via diretta dalla famiglia e dal contesto contadino in cui viveva.




Figura 7. *Calcatreppola (*Centaurea calcitrapa *L.), illustrata dal Celesia in "Selva Botanica" (tavola n. 21).*

È interessante evidenziare che gli usi terapeutici che il padre del Celesia aveva trasmesso al figlio a fine Ottocento sono stati riportati in seguito anche in studi etnobotanici molto più recenti, come nel fondamentale testo sull'etnobotanica sarda del dottor Atzei (2003), che cita l'uso di *Centaurea calcitrapa* L. per il trattamento della febbre, compresa quella malarica, oltre che per varie problematiche di infezioni agli occhi e alla pelle.

Studi recentissimi sugli estratti di questa specie (Mekky *et al.* 2024) hanno evidenziato il suo elevato potere antiossidante e le sue proprietà antibatteriche, attive nei confronti di una vasta gamma di batteri sia Gram-negativi che Gram-positivi, responsabili di varie patologie infettive. Ciò dimostra che, prendendo spunto dalla medicina tradizionale, la recente ricerca scientifica condotta con metodiche moderne può confermare l'efficacia attribuita in passato a una data pianta medicinale, implementando le conoscenze a riguardo, e in alcuni casi aprendo la strada allo sviluppo di nuove formulazioni terapeutiche.

In altre schede botaniche vengono riportate osservazioni curiose e persino inedite, come nel caso del trifoglio, a proposito del quale il Celesia riporta un aneddoto sull'uso che i contadini dei paesi di montagna – spesso invasi dalla nebbia – facevano di queste specie:

> Per conoscere se l'ora è tarda oppure al contrario, osservandone i medesimi, le sue foglie, imperciocché se queste si van poco a poco restringendo, è segno certo che il sole è pressoché al suo tramonto; se invece quelle mantengono uno stato naturale, allora giudichiamo che quell'astro abbia ancora da percorrere molto sull'orizzonte.

Va notato che questo particolare uso del trifoglio (*Trifolium pratense* L. e *Trifolium montanum* L.) non risulta presente neppure nel testo fondamentale di Guarrera (2006), che rappresenta la più completa raccolta di dati sui diversi usi etnobotanici delle piante riferiti all'Italia.

È suggestivo immaginare i contadini di fine Ottocento, che probabilmente usavano l'orologio da taschino solo nei giorni di festa, mentre erano al lavoro nei campi e calcolavano lo scorrere del tempo osservando le foglie del trifoglio: se queste erano distese, mancavano ancora molte ore al tramonto e quindi potevano continuare il duro lavoro; se, invece, le foglie si richiudevano su sé stesse la sera era vicina e dovevano incamminarsi verso casa.

Va qui ricordato che le prime osservazioni sul movimento delle foglie in relazione alle diverse ore della giornata furono condotte nel 1729 da un astronomo francese, Jean-Jacques Dortous de Mairan, che, incuriosito dal movimento delle foglie di *Mimosa pudica* L., volle verificare se ci fosse un ritmo che regolava questo fenomeno. Con le sue osservazioni de Mairan (1678-1771) suggerì per primo l'esistenza di un "orologio interno" in questi organismi vegetali e gettò così le basi della cronobiologia moderna. Poco dopo, anche il famoso botanico svedese Carlo Linneo, basandosi sull'osservazione che molte piante aprono e chiudono i loro fiori in orari precisi, ideò un "orologio dei fiori", annotando l'orario in cui sbocciavano le corolle di 24 specie diverse (Linneo 1751).

Il movimento delle foglie in relazione alle ore di luce e buio è invece oggigiorno ben noto per molte piante, come *Oxalis triangularis* A.St.-Hil. (Kang *et al.* 2009), nota con il nome di "pianta ballerina" per le sue foglie che si chiudono di notte e si aprono di giorno con la luce, effettuando movimenti che assomigliano al battito d'ali di una farfalla.

Tornando all'opera del Celesia, grande interesse dell'Autore è rivolto a quelle piante che trovavano impiego in campo religioso e che, nei giardini dei conventi, venivano appositamente coltivate per diverse solennità religiose e, in particolare, per la preparazione dei Sepolcri. Numerosi sono gli esempi riferiti, tra cui cineraria e iberide. Quest'ultima pianta era chiamata anche "fior del verno" per la sua fioritura invernale e "nevina" per il colore bianco splendente dei fiori che ricordano quello della neve. *Tagetes erecta* L., detta fiorone, con un'infiorescenza giallo-arancio molto decorativa, per il suo acceso colore era utilizzata per abbellire gli altari, posizionandola in mezzo agli "umili candelabri". Questa espressione usata dall'Autore sottolinea che i candelabri e gli altari stessi delle chiese dei Cappuccini erano all'epoca intagliati dagli stessi frati nel legno, un materiale povero, che rispecchiava il loro voto di povertà e il loro modo di sentire (Cargnoni 1988).

Altri fiori che all'epoca erano comunemente usati per abbellire le chiese, ma anche terrazzi, giardini e parchi cittadini, erano diverse specie di geranio, salvia, rosa, giglio e molte *Malvaceae*, *Asteraceae* e *Convolvulaceae*. Non va poi dimenticato, come ci ricorda lo stesso Autore, che grandi e vistosi fiori erano anche coltivati e venduti alle signore eleganti, che li utilizzavano per abbellire i loro cappelli, secondo la moda diffusa in epoca vittoriana (fig. 8). I fiori usati a questo scopo, infatti, dovevano essere quasi

tutti i giorni sostituiti affinché la composizione restasse sempre fresca e mantenesse il suo aspetto decorativo. Tra questi, il Celesia cita nella tavola n. 63 dedicata al "fil di spada" (*Gladiolus italicus* Mill.) una specie originaria del Capo di Buona Speranza, *Gladiolus campanulatum* Andrews, particolarmente apprezzata a questo scopo.



Figura 8. *Signora con cappello ornato con fiori freschi, uso diffuso in epoca vittoriana (fonte: https://www.thevintagenews.com/2018/10/14/gilded-ag).*

Tra le specie più apprezzate a scopo ornamentale l'Autore cita l'amaranto (*Amaranthus caudatus* L.), pianta che oggigiorno non compare quasi più sui terrazzi e nei giardini di Genova e della Liguria. All'epoca, invece, l'uso dell'amaranto era molto apprezzato dai giardinieri, che lo piantavano diffusamente sfruttando la sua lunga fioritura, estesa da giugno a ottobre. Inoltre, il colore rosso purpureo delle sue lunghe infiorescenze pendule, mosse anche dal più lieve alito di vento, dava ai giardini un aspetto molto suggestivo. Il nome comune con il quale la pianta era nota era "disciplina delle monache" per la somiglianza delle lunghe infiorescenze con il flagello, una sorta di piccolo frustino utilizzato in passato per le penitenze corporali sia nei conventi femminili che in quelli maschili. Tale pratica è storicamente documentata e ancora oggi riproposta da alcune confraternite, come accade nella processione del Venerdì Santo dei Battenti o Flagellanti a San Lorenzo Maggiore (Benevento).

Un'altra pianta ornamentale che era invece utilizzata soprattutto nelle cerimonie religiose appartiene al genere *Maurandya*, che include diverse specie originarie del Messico e degli Stati Uniti sud-occidentali. Il Celesia narra che "maurandia a fiori d'antirrino" era una pianta

rampicante appositamente coltivata in modo da ottenere delle forme piramidali che poi venivano portate in processione:

> I frati coltivano le piante in vaso per esporle durante le solennità sulle balaustre della Chiesa della Santissima Annunziata di Portoria suscitando così l'ammirazione delle gentili signorie nel vedere questa pianta coltivata a forma di piramide tutta carica e gremita di graziosissime trombette celesti.

Anche di questa pianta si sono persi completamente la tradizione e l'utilizzo nei nostri giardini, nonostante diverse specie di questo genere compaiano in studi botanici di fine Novecento, finalizzati ad annotare le diverse specie esotiche da poco introdotte nei giardini italiani (Di Gioia 2024). Attualmente in Italia solo una specie, tra quelle elencate nelle raccolte sopra citate, *Maurandya barclayana* Lindl., risulta ancora presente come alloctona casuale, sebbene sia riferita solo per l'Emilia-Romagna.[3]

Fra le tante altre piante citate nel manoscritto meritano almeno un breve accenno le orchidee spontanee, che all'epoca si trovavano facilmente sui pendii erbosi attorno ai Forti di Genova. Talvolta i frati ne raccoglievano alcune, prelevando il bulbo/tubero che veniva poi piantato a dicembre per ottenere nella primavera-estate successiva piante fiorite che abbellivano i loro chiostri. Una delle orchidee di maggior pregio illustrata nel testo è quella chiamata "calabrone" (fig. 9) per il suo labello peloso che simula il corpo di un insetto apoideo, attirando l'impollinatore e favorendo così la riproduzione della pianta.

Fra le piante alla quali era attribuito un profondo significato religioso è riferito l'issopo, simbolo di purezza e nota con i nomi di "*gratia dei*" o "graziola" perché considerata pianta sacra. In un canto gregoriano (il salmo 50) viene infatti esaltata la sua virtù di lavare l'anima dal peccato: *Asperges me, Domine, hyssopo et mundabor, lavabis me, et super nivem dealbabor*. Tuttavia, il Celesia ne cita anche le importanti proprietà medicinali contro il malcaduco (epilessia) e per la cicatrizzazione delle ferite.

A comprovare queste informazioni riferite dall'Autore, recenti studi – basandosi sull'uso tradizionale di questa pianta nel trattamento delle

[3] https://www.actaplantarum.org/flora/flora_info.php?id=12020.

convulsioni – hanno testato le proprietà del suo estratto idralcolico su animali da laboratorio. Queste ricerche hanno validato gli effetti antiepilettici attribuiti già in passato alla pianta e hanno, inoltre, indicato le sue proprietà benefiche contro i danni neuronali dell'ippocampo e le sue capacità di miglioramento della memoria (Fatahinezhad *et al.* 2022).




Figura 9. *Orchidea "calabrone",* Ophrys speculum *Link. (tavola n. 22).*

Fra le tante applicazioni dell'uso delle piante di cui si occupa il testo del Celesia non va tralasciata l'orticultura, anche in relazione al periodo storico nel quale la floricultura in pieno sviluppo si stava sempre più specializzando, soprattutto nella provincia di Imperia. A questo proposito, parlando della "primavera della China" (*Primula praenitens* Ker Gawl.) il Celesia racconta che i giardinieri, facendo "diverse seminagioni ripetute", erano riusciti a ottenere tre bellissime varietà: una a fiori candidissimi, una rubra con i fiori rossi, e una quadricolor con i fiori variegati.

Altra pianta ornamentale di grande pregio, soprattutto le sue varietà persiane, era il lillà (*Syringa vulgaris* L.), utile anche a scopo medicinale contro malattie del sistema nervoso, contro l'epilessia e per la cura di ferite e piaghe. In questo caso il Celesia coglie in più anche il ruolo ecologico delle piante, sottolineando l'importanza di avere il lillà nei giardini essendo questa una delle poche piante le cui bacche, durante l'inverno, forniscono alimento agli uccelli selvatici, garantendone la sopravvivenza.

Infine, nei giardini non poteva mancare la gardenia (*Gardenia jasminoides* J.Ellis), pianta molto pregiata e con un profumo meraviglioso, tanto da essere nota come "gelsomino del Malabar". Nella relativa

tavola (n. 70) sono riportate notizie utili alla sua non facile coltivazione, per la quale l'Autore suggeriva già l'uso di uno specifico terriccio, come quello di castagno. È interessante ricordare che coltivazione e cura delle gardenie – argomento di notevole complessità – è stato in seguito affrontato da famosi specialisti del settore, come il compianto dott. Viacava, per molti anni direttore del Servizio Giardini e Foreste del Comune di Genova.

Un'altra annotazione interessante sulla gardenia riportata dal Celesia – e ciò ribadisce quanto la sua formazione culturale, sebbene raggiunta da autodidatta, fosse vasta – è che dai frutti di questa pianta si otteneva un colorante giallo molto prezioso. Diverse specie di gardenia furono intensamente coltivate in Cina durante le dinastie Qin (221-207 a.C.) e Han (202 a.C.-220 d.C.), essendo la principale fonte di un preziosissimo colorante giallo, usato non solo per tingere la seta ma anche per i documenti imperiali. Il principio colorante, la crocina, si estrae proprio dai frutti della gardenia. È possibile ipotizzare che padre Celesia sia venuto a conoscenza di questo specifico uso della pianta, poco noto in Occidente, dai suoi stessi confratelli di ritorno dalle missioni in Estremo Oriente (Messa 2001).

In conclusione, il testo "Selva Botanica" è un interessante pool di informazioni sia sui diversi usi tradizionali delle piante nella Liguria di fine Ottocento sia sul valore spirituale che i Frati Cappuccini attribuivano a piante e fiori da utilizzare nelle varie cerimonie, per adornare la chiesa o per allestire i Sepolcri.

Colpisce, soprattutto nel caso degli usi ornamentali, che molte piante – che in "Selva Botanica" sono descritte per la loro notevole bellezza e il grande valore ornamentale – oggigiorno sono pressoché scomparse nei giardini della Liguria e nel genovesato. Probabilmente, anche in questo campo, la globalizzazione ha influito sui nostri gusti e le nostre scelte e piante che avevano una grande potenzialità estetica e/o un valore tradizionale sono state in gran parte dimenticate per lasciare spazio a nuove specie e nuove mode.

Al termine di questa breve rassegna sull'opera che, dopo oltre 130 anni di "silenzio", ha finalmente ricevuto la dignità di stampa, non ci resta che condividere con padre Celesia l'appello con il quale apre il suo manoscritto: "Ho ferma speranza che questo mio giovane lavoro non andrà del tutto inutile".

*Bibliografia*

Atzei A.D. *Le piante nella tradizione popolare della Sardegna*. Sassari: Carlo Delfino Editore; 2003.

Barale L., Bicknell M. *Clarence Bicknell (1842-1918): Botanist, Archaeologist, Esperantist, and… Citizen Geologist*. Rendiconti online della Società Geologica Italiana (2024) 62: 160-190.

Benocci C., Horowski A. *Preludio del paradiso. Giardini, orti e vigne dei benedettini e dei francescani in area romana dalle radici medioevali all'età moderna*. Roma: Istituto Storico dei Cappuccini; 2025.

Boverio Z. *De sacris ritibus iuxta Romanam regulam vsui fratrum minorum s. Francisci, qui vulgo Capuccini nuncupantur*. Napoli: Tipografia Lazzaro Scoriggio; 1626.

Bruni A., Nicoletti M. *Dizionario ragionato di Erboristeria e di Fitoterapia*. Padova: Piccin; 2003.

Cargnoni C. (a cura di). *I Frati Cappuccini. Documenti e testimonianze del primo secolo* (vol. I). Perugia: Edizioni Frate Indovino; 1988.

Celesia V. *Guida artistica illustrata del coro dei RR. PP. Cappuccini di Quarto dei mille.* Genova: Tipografia G.B. Rolla-Voltri; 1912.

Cornara L., Ambu G., Alberto A., Trombetta D., Smeriglio A. *Characterization of Ingredients Incorporated in the Traditional Mixed-Salad of the Capuchin Monks*. Plants (2022) 11: 301.

Di Gioia L. *"L'ordine e il metodo" da I giardini d'Italia (1904) di Luigi Paolucci. Edizione, studio e commento*. Aldrovandiana (2024) 3, 2: 53-144.

Fatahinezhad N. *et al*. *Effects of Hyssopus Officinalis Hydroalcoholic Extract on Pentylenetetrazol-Induced Convulsive Seizures in Rat*. Neurochem Res. (2022) 47, 12: 3792-3804.

Galante V. *La sezione di medicina naturale nella Biblioteca Provinciale dei Cappuccini di Genova*. Notiziario della Sezione Ligure dell'Associazione Italiana Biblioteche (2013) 2, 23: 70-73.

Guarrera P.M. *Usi e tradizioni della flora italiana. Medicina popolare ed etnobotanica*. Roma: Aracne Editrice; 2006.

Kang J.H., Chon Y.S., Choi K.O., Yun J.G. *Leaf Movement Regulated by Light Condition in Oxalis triangularis*. Horticulture Environment and Biotechnology (2009) 50: 371-375.

Knuth P. *Handbuch der Blütenbiologie*. Leipzig: Engelmann; 1898-1904.

Linneo C. *Philosophia botanica in qua explicantur fundamenta botanica cum definitionibus partium, exemplis terminorum, observationibus rariorum. Adiectis figuris aeneis*. Stoccolma: Godofr. Kiesewetter; 1751.

Mairan J.J. de. *Observation botanique. Histoire de l'Académie royale des sciences avec les mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de cette Académie*. Paris: Imprimerie Royale; 1729.

Mattioli P.A. *I discorsi di Pietro Andrea Matthioli*. Venezia: Bottega d'Erasmo, presso Vincenzo Valgrisi e Baldassar Costantini; 1557.

Mekky A.E. *et al. Phytochemical Analysis of Centaurea calcitrapa L. Aerial Flowering Parts Serial Solvent Extracts and Its Antibacterial and Antioxidant Activities*. Life (2024) 14: 900.

Messa P. (a cura di), *I francescani e la Cina: 800 anni di storia. Atti della Giornata di studio in preparazione alla canonizzazione dei martiri cinesi. Santa Maria degli Angeli-Assisi, 9 settembre 2000*. Assisi: Edizioni Porziuncola; 2001.

Nepori F., Zagatti S. *La biblioteca dei Cappuccini. Incunaboli, cinquecentine e preziose edizioni a stampa*. Genova: San Giorgio Editrice; 2010.

Penzig O.A.J. *Atti del Congresso botanico Internazionale di Genova 1892*. Genova: Tipografia dell'Istituto Sordomuti; 1893.

Venere E. *Dalla revisione del manoscritto di Padre Celesia da Gazzo Selva Botanica al ripristino dell'*Hortus simplicium *del Convento di San Barnaba*. Tesi di laurea Triennale in Scienze Ambientali e Naturali (2022). Relatori L. Cornara e G. Ambu, DISTAV, Università di Genova.

Zaverio F. *I Cappuccini Genovesi. Note biografiche* (vol. I). Genova: Tipografia della gioventù; 1912.

Zwart H. *Pierre Teilhard de Chardin's Phenomenology of the Noosphere*. In: *Continental Philosophy of Technoscience*. Philosophy of Engineering and Technology (2022) 38: 207-227.

Marco De Montis*

# *La Regia Aeronautica nel decennio 1933-1943: dall'eccellenza mondiale alla tragedia della guerra. Le ragioni del declino e il confronto con gli Alleati*

**Sommario**: La Regia Aeronautica fu istituita nel 1923, cinque anni dopo la Royal Air Force britannica e come tale è la seconda al mondo per anzianità. Benito Mussolini volle costituirla come simbolo del regime fascista e sotto l'egida di Italo Balbo acquisì fama e prestigio internazionali in virtù dei numerosi primati mondiali di velocità, distanza e quota conquistati negli anni venti e trenta. Nel 1940, all'entrata in guerra contro gli Alleati, tale patrimonio svanì e nei vari teatri di guerra l'Arma Aerea un tempo vanto mondiale collezionò una serie impressionante di sconfitte e di perdite umane per la visione miope dei vertici fascisti. Questa relazione illustra e spiega le grandi conquiste e il successivo declino della Regia Aeronautica nel decennio 1933-1943 e la contemporanea inarrestabile ascesa delle forze aeree alleate e delle loro industrie.

**Parole chiave**: Crociera aerea del decennale; Regia Aeronautica; fascismo; RAF; Seconda guerra mondiale.

**Abstract**: *The Royal Italian Air Force in the Decade 1933-1943: From World-Class Excellence to the Tragedy of War. The Reasons for its Decline and the Confrontation with the Allies*
The Regia Aeronautica (Royal Italian Air Force) was the 2nd oldest air arm in the world. Established in 1923 by the dictator Benito Mussolini "Il Duce" and driven to expansion by the Air Marshal Italo Balbo, distinguished itself as a renowned organization, especially for the impressive series of world records (speed, altitude, range) conquered during the Twenties and Thirties that gave Italy a worldwide prestige. Then in 1940, when Italy declared war to the Allies, this respected heritage fell into pieces and the harsh combat scene demonstrated the many shortcomings and insanity of the fascist headquarters that destroyed too many lives, marking the end of their own regime. This paper illustrates and explains the reason of the rise and fall of the once prestigious Italian air arm and the intermeshed rise of the impressive Allied Air Forces and their aeronautical industries.

**Keywords**: Balbo's transatlantic cruise; Royal Italian Air Force; fascism; Allied air power; World War II.

---

* Ingegnere de_montis@libero.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.365-394

La Regia Aeronautica fu la seconda forza aerea nel mondo, dopo la britannica Royal Air Force istituita nel 1918. Fondata nel 1923 per volontà di Benito Mussolini, divenne in breve tempo una potente ed efficace arma propagandistica del regime. Sotto l'egida di Italo Balbo, uno dei quadrumviri del duce dotato di indubbio carisma, sfrenata ambizione e altrettanto spiccato talento per l'organizzazione, divenne una delle forze aeree più in vista tra gli anni venti e trenta.

Tra il 1930 e il 1938, l'Italia conquistò i primati mondiali di durata e distanza (nel 1930, con 67 ore e 13 minuti, percorrendo 8.188 km), velocità (nel 1934 con 709 km/h, primato tuttora imbattuto per la categoria idrovolanti a pistoni), altitudine (nel 1938, con la quota di 17.083 metri, imbattuto anch'esso per i velivoli a pistoni) e si distinse anche per le trasvolate. La più celebre fu la crociera aerea del decennale, impresa memorabile compiuta da Balbo nel 1933 con 24 idrovolanti S.55X che attraversarono l'Atlantico settentrionale e giunsero a New York e Chicago fra tripudi di folla e l'ammirazione del presidente Franklin Delano Roosevelt, e il raid Parigi-Damasco-Istres dei Sorci Verdi, intrapreso nel 1937 da tre SIAI S.79 che sbaragliarono la concorrenza, aggiudicandosi i primi tre posti su un percorso di quasi 6.200 km, un exploit amplificato pochi mesi più tardi (gennaio 1938) con una trasvolata ancora più eclatante sulla rotta atlantica Roma-Dakar-Rio de Janeiro.

Per comprendere appieno la valenza delle imprese aeronautiche di quel periodo è opportuna una premessa: sin dai primordi, l'aviazione acquisì una valenza strategica in ambito militare e civile e quindi divenne un autentico patrimonio nazionale, attirando ingenti finanziamenti statali e privati. Nacquero di conseguenza concorsi e competizioni, tra cui la Coppa Schneider, istituita nel 1911 dal finanziere francese Jacques Schneider e conquistata nel 1931 dalla Gran Bretagna. È impossibile rendere oggi la vastissima popolarità di questa e altre analoghe competizioni, ma basti dire che nell'edizione del 1929 all'isola di Wight gli spettatori raggiunsero addirittura il milione. La coppa Schneider contribuì in particolare ad affinare gli studi aerodinamici e quelli su materiali e propulsori, consentendo un balzo incredibile nelle prestazioni.

*Il lampo rosso, il favoloso Macchi C.72*

Dopo la beffa dell'edizione della Coppa del 1931 (assegnata alla Gran Bretagna che corse da sola, dopo aver rifiutato una proposta di rinvio dall'Italia), il regime fascista si impegnò per conquistare l'altrettanto ambito primato di velocità. Il R.A.V. della Regia Aeronautica (Reparto Alta Velocità, basato a Desenzano del Garda) e l'apparato industriale si impegnarono al massimo nella messa a punto di un aeroplano estremamente critico sotto ogni punto di vista, l'idrovolante Macchi C.72 progettato dal celebre ingegner Castoldi, già autore di diversi idrocorsa ai vertici delle prestazioni.

Il nuovo gioiello del burbero e geniale progettista lombardo si caratterizzò innanzitutto per il propulsore, il poderoso Fiat AS.6 a 24 cilindri lungo 4 metri e pesante 930 kg, nato dall'accoppiamento di due tradizionali V12 AS.5. L'ingegner Tranquillo Zerbi, direttore della pro-



Figura 1. *Il Macchi C.72 con il pilota Agello.*

gettazione Fiat, scelse questa soluzione per abbreviare i tempi di sviluppo e scongiurare i problemi di affidabilità insiti in queste applicazioni estreme. Una geniale intuizione dei due progettisti fu l'applicazione di un gruppo riduttore/invertitore azionante una coppia di eliche coassiali e controrotanti (all'epoca denominata "elica birotativa") atte ad annullare le coppie di reazione generate dall'elica e il conseguente effetto giroscopico. Con tale soluzione si ridussero le dimensioni e le masse dei galleggianti, ottenendo notevoli benefici dal punto di vista della resistenza indotta e delle masse. Si noti che tale dispositivo comparve in anticipo di almeno dieci anni rispetto alle analoghe realizzazioni implementate sui velivoli alleati.

Il C.72 si caratterizzava per la lunghissima fusoliera anteriore e l'estesa superficie dei radiatori laminari, disseminati praticamente in ogni angolo dell'aeroplano, ivi compresi gli scarponi e i relativi montanti (fig. 1). I collaudi a Desenzano evidenziarono fin dall'inizio detonazioni e ritorni di fiamma ai regimi più elevati, indici di un flusso di alimentazione assai problematico, esacerbato dalla scarsa qualità dei carburanti italiani. Questo dei carburanti sarà un *punctum dolens* che si ripresenterà anche nel conflitto e porterà a penalizzazioni di potenza nei motori dell'Asse quantificabili tra il 25% e il 30% rispetto a quelli degli Alleati, un divario decisivo alle quote operative più elevate, ove la detonazione è più frequente. Gli inconvenienti riscontrati mobilitarono i migliori tecnici dell'epoca, fra i tanti il britannico Rodney Banks sul fronte delle miscele antidetonanti e l'ingegner Armando Palanca, geniale artefice del carburatore "RAV 26", con cui garantì il flusso corretto al complesso impianto d'alimentazione. Con tali interventi il V24 Fiat superò finalmente la mitica soglia dei 3.000 CV al decollo, scevro dai pericolosi ritorni di fiamma.

Risolte le traversie del propulsore, il C.72 poté intraprendere l'ambiziosa missione di stabilire il nuovo record mondiale di velocità. Il primo segnale incoraggiante fu il risultato di 682 km/h, conseguito il 10 aprile 1933 sul Lago di Garda dal maresciallo Francesco Agello, l'unico sopravvissuto fra i valorosi pionieri del RAV assegnati all'idrocorsa Macchi. Da quel momento la corsa del filante Macchi divenne inarrestabile: il 9 ottobre 1933 il ten. col. Guglielmo Cassinelli stabilì con 629,37 km/h il nuovo primato di velocità sul circuito di 100 km, ribadito con la vittoria della prestigiosa coppa Bleriot pochi giorni dopo

(21 ottobre) dal cap. Pietro Scapinelli. Tuttavia, il capolavoro fu il record assoluto conseguito nuovamente da Agello il 23 ottobre 1934 a 709,202 km/h, primato tuttora imbattuto e meritato tributo al valente team italiano (fig. 1).

*Gli "Atlantici" di Italo Balbo*

Altra impresa memorabile fu la Crociera del decennale, ultimo epilogo di una serie di trasvolate a lungo raggio in formazione, tutte preparate da Italo Balbo con cura meticolosa e un addestramento severissimo, requisiti indispensabili per assicurare il successo di imprese così ardite.

Gli equipaggi destinati a coronare questa nuova impresa, i cosiddetti "Atlantici", rappresentavano l'élite dei piloti non solo a livello nazionale, ma mondiale. Al di là della propaganda, questa "Centuria Alata" (per ognuno dei 24 idrovolanti SIAI S.55X erano necessari due piloti, un navigatore e un meccanico) era infatti costituita da uomini addestrati alla navigazione di precisione a lungo raggio, in condizioni meteo impossibili e capaci di governare i loro mezzi aerei con i soli strumenti, tipica situazione del volo in nube, tuttora una condizione di volo critica.

La grande impresa, articolatasi dal 1° luglio al 12 agosto 1933 lungo la rotta Orbetello-Chicago e ritorno, ebbe una risonanza mondiale, tanto da essere definita dal "Times" «la più grande impresa della Storia dell'Aeronautica» e stimolare il sindaco di Chicago dell'epoca a intitolare a Balbo uno dei grandi viali della città, la "Balbo Avenue", che nonostante ripetuti tentativi di alienazione storica mantiene tuttora il nome originale.

Al di là della propaganda e dell'enfatizzazione, la doppia traversata dell'Atlantico può essere considerata il preludio ai servizi aerei di linea a lungo raggio, soprattutto dal punto di vista delle procedure di navigazione, l'addestramento degli equipaggi e le infrastrutture. In pochi giorni cento aviatori italiani volarono da Orbetello a Chicago, raddoppiando in un sol colpo il numero di quanti avevano trasvolato l'Atlantico e percorrendo complessivamente 20.000 km in circa 100 ore di volo.

È importante poi rilevare l'altrettanto metodico e efficace processo di ottimizzazione svolto sugli idrovolanti, già sperimentati da anni di servizio in ambito militare e civile. La versione "X" del catamarano



Figura 2. *I SIAI S.55X a Orbetello.*

volante dell'ingegner Alessandro Marchetti (fig. 2) si distinse per un affinamento progettuale finalizzato al volo sulle lunghe distanze. Tutto ciò denota un approccio moderno e in stile euristico, molto vicino alla scuola anglosassone di cui peraltro Balbo fu sempre un fervido ammiratore e che purtroppo rimarrà lettera morta negli anni successivi, proprio nel momento decisivo dello scontro armato con le grandi potenze alleate.

*Gli Sparvieri da corsa*

A confermare tale attitudine, è opportuno analizzare l'epopea di un'altra icona della Regia Aeronautica: il bombardiere/aerosilurante trimotore SIAI S.79, perfetta metafora del potere aereo fascista. L'aeroplano mostrò ottime prestazioni, certificate grazie a numerosi primati e trofei mondiali, ma non fu altrettanto efficace come macchina da combattimento, vuoi per gli inesorabili limiti progettuali, vuoi per la

mancata volontà di svilupparlo secondo i dettami e i requisiti emersi fin dagli albori dell'impiego bellico.

Reinterpretando l'idea base del progetto con gli occhi attuali, lo Sparviero originariamente ipotizzato si potrebbe definire un executive destinato al trasporto di una clientela facoltosa e di membri dell'establishment militare (Balbo fu tra i principali fautori del nuovo trimotore), nel pieno comfort e ad alta velocità, su tratte fino a 2.000 km. Il concetto di aeroplano da combattimento emerse molto più in là nel tempo, con i primi prototipi già in fase di collaudo e quindi i tecnici di Sesto Calende dovettero correre ai ripari con adattamenti piuttosto estemporanei e inefficaci.

Dopo il primo volo effettuato dal prototipo I-MAGO l'8 ottobre 1934 con l'equipaggio Biseo – Merizzi, si susseguirono numerosi test, spesso afflitti da surriscaldamenti ai motori, perciò si decise di sostituire i radiali Piaggio P.IX Stella RC.40 da 610 CV con i più affidabili Alfa Romeo 125 RC.35 a 9 cilindri da 680 CV, con cui lo Sparviero raggiunse un connubio perfetto.

Il 23 settembre 1935 il trimotore dimostrò platealmente le qualità dei nuovi motori battendo sei record mondiali di velocità sui 1.000 e 2.000 chilometri e con carichi utili di 500, 1.000 e 2.000 kg. Dal 1935 al 1936 l'I-MAGO scorrazzò nei cieli africani, inanellando primati su primati lungo le tratte tipiche dell'Africa Orientale Italiana, da Roma verso le principali città in Eritrea, Etiopia, Libia ed Egitto. In virtù degli echi positivi riverberatesi nei vertici militari durante i collaudi sulle rotte africane, nel dicembre 1935 la direzione SIAI propose al Ministero dell'Aeronautica lo studio per la conversione a bombardiere dell'S.79 e senza attendere l'autorizzazione ufficiale, si spinse a redigere un preventivo per 24 esemplari. Tale pratica risultava piuttosto usuale all'epoca e definisce bene la sudditanza dell'Aeronautica alle mire dei vari costruttori, uno dei tanti fattori alla base dell'incapacità di sviluppare su larga scala progetti paragonabili alla concorrenza estera.

La riprogettazione del trimotore fu sostanziale, particolarmente per la fusoliera che vide la cabina passeggeri adattata a ricavare il vano bombe. I test al poligono di Furbara del maggio 1936 evidenziarono infatti uno spostamento del centraggio rispetto a quello originale, dovuto alle modifiche sulla cellula e alle armi impiegate. Le manchevolezze riscontrate nella precisione di bombardamento si affiancarono a

un pilotaggio piuttosto impegnativo oltre i 5.000 metri, conseguenza dell'aumentato carico alare. Gli aeroplani di serie, ridesignati S.79M (Militare o Modificato), adottarono i più potenti Alfa Romeo 126 RC.34 da 750 CV a 3.400 metri di quota, con cui il trimotore volava in crociera a 370 km/h, un valore superiore a gran parte dei concorrenti e paragonabile addirittura a quello del ben più sofisticato quadrimotore Boeing XB-17, il prototipo della celebre Fortezza Volante.

*Il trionfo dei Sorci Verdi*

L'ottima prova fornita nei primi collaudi stimolò il regime fascista a lanciare sul mercato mondiale il nuovo aeroplano SIAI attraverso imprese di risonanza mondiale. L'occasione si concretizzò nel 1936 con la gara organizzata dalla FAI (Fédération Aéronatique International) sul percorso Istres-Damasco-Parigi, concepita come una vera e propria gara di velocità su un percorso di circa 6.000 km, pari a una rotta transatlantica. Nel gennaio 1937 lo Stato Maggiore dell'Aeronautica istituì allo scopo il Nucleo Addestrativo Nastro Azzurro (N.A.N.A.) che già nella denominazione richiamava il prestigioso trofeo marittimo conquistato pochi anni prima dal transatlantico *Rex*, un'altra icona del fascismo. Gli S.79 destinati all'impresa furono identificati col suffisso "CS". Gli esemplari destinati alla competizione mantenevano ben poco dello Sparviero originale, per via della massa incrementata di ben 3 tonnellate rispetto alla variante militare, a causa degli 8.000 litri di benzina, un quantitativo doppio rispetto all'S.79M di serie.

Gli equipaggi del 12° Stormo (i "Sorci Verdi"), si impegnarono a fondo per ottimizzare i profili di volo, alla ricerca della massima efficienza prestazionale attraverso un elaborato connubio fra aerodinamica, apparato propulsivo e navigazione. Il risultato fu decisamente all'altezza delle aspettative: decollati da Istres il 20 agosto 1937, gli equipaggi italiani ai comandi degli Sparvieri tagliarono il traguardo il giorno successivo, conquistando i primi tre posti (fig. 3). I Sorci Verdi replicarono il successo tra il 24 e 25 gennaio 1938 con un'impresa ancora più ambiziosa: tre S.79 T (dove T stava per "Transatlantico") completarono la tratta transatlantica da Roma/Guidonia a Rio de Janeiro via Dakar, una rotta da 9.150 km percorsa alla ragguardevole media di 404 km/h.




Figura 3. *Poster celebrativo del raid dei "Sorci Verdi".*

In contemporanea all'exploit della prestigiosa unità vi fu il battesimo del fuoco nel corso della guerra di Spagna. Una flotta di circa 150 S.79M, inquadrati nei reparti dell'Aviazione Legionaria in appoggio al regime franchista, a partire dal 1937 si impegnò per due anni nelle azioni di bombardamento, volando per oltre 20.000 ore senza subire alcuna perdita. Ciò indusse la falsa sicurezza negli equipaggi e nei vertici della Regia Aeronautica di considerare il "gobbo" immune dalla caccia nemica, un falso mito perpetrato negli anni e comunque appannaggio di gran parte delle aeronautiche dell'epoca, illuse dalle ottime prestazioni teoriche dei vari B-17, Wellington, Blenheim, Do-17 e He-111, che, come l'S.79, pagarono a caro prezzo il battesimo del fuoco nei cieli europei durante il secondo conflitto mondiale.

Lo Sparviero si rivelò invece più efficace come aerosilurante, almeno nella prima fase del conflitto. Complice un'efficace azione di propaganda, le gesta degli equipaggi inquadrati nei reparti aerosiluranti divennero leggendarie: i vari Faggioni, Buscaglia e Muti si ammantarono di un'aura eroica che colpì l'immaginario collettivo e fino al 1942 inflissero sensibili perdite alla Royal Navy e ai convogli mercantili alleati.

*La conquista degli oceani e della stratosfera*

I primati di distanza e durata conquistati da Arturo Ferrarin e Carlo Del Prete ebbero grande valenza dal punto di vista tecnico e strategico, pur se meno eclatanti a livello mediatico degli exploit di Balbo, Agello e dei Sorci Verdi. Ebbero poi il merito di dimostrare le potenzialità del potere aereo e dei collegamenti di linea a grande distanza. L'indissolubile duo Del Prete/Ferrarin era il nocciolo di una squadra coesa e vincente, allestita con cura e rigore e integrata perfettamente dal velivolo SIAI S.64, appositamente concepito dal costruttore varesino e dalle valide equipe dei centri sperimentali di Guidonia e Montecelio

L'ingegner Alessandro Marchetti progettò il nuovo velivolo come una evoluzione estrema del celebre S.55. Dal predecessore mutuò infatti l'originale formula definibile come "monoplano tuttala controbilanciato", con l'imponente ala lignea monolitica trilongherone da circa 22 metri, al cui interno erano alloggiati 27 serbatoi dalla capacità totale di ben 5.000 litri, mentre la fusoliera si riduceva a una minuscola

navicella ovoidale ricavata frontalmente all'ala e gli impennaggi erano collegati alla cellula tramite due esili travi.

Il primo volo avvenne a Cameri (Novara) il 3 aprile 1928 con Ferrarin e Passaleva, cui seguì un serrato programma di collaudo con molteplici assetti, pesi e configurazioni atti a simulare dapprima le condizioni dei voli da record in circuito chiuso e successivamente sui percorsi transatlantici. Alla ricerca del record di distanza, l'S.64 si trasferì sul campo di Montecelio, presso Tivoli, dotato di una lunga pista in discesa atta a favorire i decolli dei velivoli da record a pieno carico. Dopo un sofferto decollo avvenuto il 31 maggio 1928, Ferrarin e Del Prete volarono lungo il circuito chiuso triangolare Montecelio-Torre Flavia-Faro di Anzio fino al 2 giugno, aggiudicandosi il nuovo primato con 7.666,617 km percorsi in 58 ore, 43 minuti e 26 secondi. Nonostante il grande successo (il precedente primato fu battuto di ben 3.000 km), l'inossidabile duo considerò questa impresa solo un preludio all'obiettivo più ambizioso, vale a dire il volo transatlantico senza scalo Italia-Brasile. È opportuno rilevare come il famigerato braccio di mare tra le Isole di Capo Verde e l'Equatore fosse fra i più temuti dai trasvolatori per la formazione di giganteschi cumulonembi, estesi fino a 14.000 metri di quota e generatori di turbolenze tali da disintegrare anche i più robusti aeroplani, a maggior ragione l'esile e lento S.64.

La sera del 3 luglio 1928 alla presenza del Duce e di Italo Balbo, il monomotore decollò da Montecelio percorrendo la rotta Gibilterra-Isole Canarie-Isole del Capo Verde-Bahia (fig. 4), assai ostica per le elevate temperature incontrate sull'Algeria, che costrinsero a monitorare costantemente le condizioni del motore, messo decisamente a dura prova. Ferrarin e Del Prete lottarono poi contro forti turbolenze nel lungo tratto oceanico dopo Capo Verde, ma superarono con grande perizia anche questo ostacolo, per atterrare fortunosamente su una spiaggia in prossimità di Port Natal il 5 luglio, dopo aver percorso 7.188 km in 49 ore e 19 minuti. In realtà le lunghe digressioni finali alla ricerca di un campo di volo con buone condizioni di visibilità, aumentarono la distanza realmente percorsa ad oltre 8.100 km, ma la regolamentazione FAI prescriveva il calcolo sulla rotta ortodromica Montecelio-Natal e il record fu omologato su tale percorrenza, comunque sufficiente a stabilire il nuovo primato mondiale.




Figura 4. *Manifesto celebrativo del raid Italia-Brasile.*

*Sempre più in alto*

Una frontiera largamente inesplorata per molti anni fu la stratosfera, il secondo dei 5 strati in cui è convenzionalmente suddivisa l'atmosfera terrestre. Estesa in media dai 12 km (8 km ai poli e 20 km all'equatore) ai 50 km di quota, fu per molti anni un universo sconosciuto e affascinante, oggetto di ricerche da parte degli enti militari per la sua notevole valenza strategica, sia per missioni offensive che per le ricognizioni. I primi a intuire la valenza ai fini pratici del volo ad alta quota furono gli statunitensi, nei primi anni trenta: in virtù di una rete di collegamenti di linea capillare e in continua espansione, l'industria del trasporto a stelle e strisce fu la più conscia dei benefici conferiti dal volo "Above the weather" (traducibile come "Al di sopra delle intemperie"). L'aria rarefatta consentiva una netta riduzione della resistenza aerodinamica, con ovvi benefici su velocità di crociera e consumi, e in parallelo aumentavano la sicurezza e il comfort di bordo, per la possibilità di lasciare sotto di sé le fastidiose turbolenze e i temibili fenomeni temporaleschi.

Intuendo le potenzialità militari dei voli ad alta quota, i paesi europei accelerarono lo sviluppo di aeroplani ed equipaggiamenti atti a

conquistare altitudini sempre più elevate e l'Italia si dimostrò fra i più qualificati contendenti in questa nuova competizione.

*Mario Pezzi, un italiano in cima al mondo*

Il protagonista di questa nuova avventura fu il tenente colonnello Mario Pezzi, arruolato nel 1918 dapprima nel Regio Esercito e poi inquadrato nella neonata Aeronautica. Nel 1934 assunse il ruolo di comandante del reparto per il volo d'alta quota, una sezione della Direzione Superiore Studi ed Esperienze (DSSE) con sede all'Aeroporto di Guidonia. Dopo le imprese di Post, la corsa al primato di altitudine accelerò il suo passo e nel 1936 fu proprio Pezzi a battere il primato britannico stabilito il 28 settembre di quell'anno dallo Squadron Leader Francis Ronald Downs Swain. La sfida con la RAF proseguì fino al 22 ottobre 1938, data in cui Pezzi stabilì il primato definitivo, raggiungendo i 17.083 metri ancora col Caproni Ca.161, ma questa volta nella versione 161 bis pesantemente modificata dall'ingegner Verduzio grazie a una cabina completamente stagna (o pressurizzata secondo la dizione odierna), una vera primizia per l'epoca. Il primato restò imbattuto per quasi sessant'anni, per la precisione fino al 4 agosto 1995, quando un bimotore in compositi Grob G 850 Strato 2C progettato *ad hoc* e con propulsione ibrida pistoni-turboelica (i due motori a pistoni Continental erano sovralimentati dal compressore della turboelica P&W PW127) se lo aggiudicò con la quota di 18.552 metri.

*Eccellenza italiana*

Il primato del ten. col. Pezzi fu il frutto di una virtuosa sinergia fra il DSSE di Guidonia, il *know-how* del comparto aeronautico industriale e la grande esperienza dello staff della Regia Aeronautica. Il Caproni Ca.161 (fig. 5) non era certamente un aeroplano all'avanguardia, essendo derivato dal Ca.113, un biplano monomotore da addestramento acrobatico del 1931, ma l'accurata messa a punto di ogni suo componente e i rigorosi collaudi a terra e in volo permisero di raggiungere l'ambizioso obiettivo sfuggito alle altre potenze occidentali. Per esempio, il motore radiale Piaggio P.XI fu ottimizzato per l'alta quota (versione P.XI RC.100/2v) con un



Figura 5. *Il Caproni Ca.161 di Mario Pezzi.*

compressore bistadio in grado di assicurare una quota di ristabilimento pari a 10.000 metri, dotato pure di arricchitore d'ossigeno, l'impianto d'alimentazione e di accensione furono pressurizzati e schermati per evitare gli inconvenienti dovuti alla rarefazione e alla ionizzazione della stratosfera (rispettivamente detonazione e scariche elettrostatiche) e l'elica quadripala a passo fisso fu realizzata su profili concepiti appositamente per la bassa densità del flusso di quelle altezze.

Un altro componente di alta ingegneria fu la cabina pressurizzata, concepita come una capsula stagna simile a un batiscafo e con un piccolo visore esterno per assicurare una pur minima visibilità al pilota.

## *Un patrimonio disperso*

I risultati ottenuti con tanto impegno e sacrificio nella conquista dei primati di distanza e quota furono cancellati dalle scellerate campagne in Etiopia e Spagna, costosissime e perciò responsabili della soppressione dei fondi destinati al rinnovamento delle linee di volo e all'addestramento intensivo, fattori indispensabili a mantenere l'Arma Azzurra adeguata al

passo del rapido progresso aeronautico caratteristico di quel periodo. La già citata ritrosia all'innovazione da parte dell'industria fece il resto e il tragico risultato fu mandare al macello un'intera generazione di giovani.

### *La Direzione Superiore Studi ed Esperienze (DSSE) di Guidonia*

Un importante contributo ai primati conquistati da parte della Regia Aeronautica fu elargito dai centri sperimentali di Guidonia e Montecelio.

La Direzione Superiore Studi ed Esperienze (DSSE) istituita nel 1927 a Montecelio, nei pressi di Roma, nacque come centro di sperimentazione aeronautica dalle ceneri di analoghe istituzioni, sorte dopo la Grande Guerra. L'installazione inizialmente mise a fattor comune gli impianti e le maestranze impiegati dall'Esercito e dall'Aeronautica, *in primis* la galleria del vento e di fatto originò la stessa città di Guidonia, così battezzata in onore del Generale Alessandro Guidoni, primo comandante del Genio Aeronautico.

Il suo ruolo istituzionale era accentrare in un unico organismo statale la ricerca aeronautica, con l'importante compito di indirizzare e integrare anche le ricerche private in questo campo, mettendo a fattore comune le competenze e le conoscenze, ottimizzandone i risultati attraverso innovazioni radicali da trasferire all'industria e ai reparti operativi.

Il DSSE si distinse come centro di eccellenza a livello mondiale nella sperimentazione aeronautica, disponendo di attrezzature, impianti e installazioni ai vertici della tecnologia, tra cui la vasca idrodinamica da 250 metri per sperimentare le carene degli idrovolanti (fig. 6), la galleria del vento a doppio ritorno, la galleria "stratosferica ultrasonora" per lo studio dei flussi supersonici a Mach 2, un apparato per simulare le prove d'alta quota, noto con l'appellativo di "cassone pneumatico per l'alta quota" e una centrifuga per lo studio del disorientamento spaziale.

### *Un simbolo d'eccellenza*

La profonda connotazione ideologica del centro fu testimoniata dalla cerimonia d'inaugurazione, presidiata da Benito Mussolini in persona il 27 aprile 1935, settimo anniversario della morte del Generale



Figura 6. *La vasca idrodinamica di Guidonia.*

Guidoni. Montecelio quindi si tramutava in Guidonia, a sancire in maniera simbolica un'altra tappa del cammino fascista verso il progresso.

Dal punto di vista disciplinare, il DSSE includeva tutti i settori della ricerca aeronautica dell'epoca: radiotecnica, armamento, tecnologia dei materiali, propulsione, aerodinamica, ottica, fotografia, strumentazione e ausili alla navigazione. Il concetto di fondo era infatti creare un patrimonio comune con le industrie del settore, realizzando così quel progresso in campo aeronautico tanto agognato e decantato dal regime del duce, quanto illusorio nella realtà. Per l'ennesima volta, le teorie alla base della lodevole iniziativa rimasero lettera morta e il DSSE non divenne mai il catalizzatore di innovazione per cui era stato ideato.

Fatali da questo punto di vista risultarono la mancanza di obiettivi chiari e misurabili da parte dei vertici militari da un lato e il boicottaggio da parte dell'industria dall'altro; un'industria si dovrebbe dire refrattaria "per statuto" all'innovazione e orientata unicamente a facili profitti. La conseguenza pratica fu che dal centro non scaturirono i grandi progressi

realizzati invece all'estero dal RAE britannico o dalla NACA statunitense, quali le benzine a elevato numero di ottani, i turbocompressori, le leghe metalliche per le alte temperature, gli autopiloti sui tre assi, i giroscopi, la strumentazione per la radionavigazione e il volo cieco.

*L'industria aeronautica italiana*

Come analizzato in precedenza, l'Italia aeronautica fino a metà anni trenta si proiettò ai vertici mondiali e tutto lasciava presagire che il patrimonio tecnologico, operativo e anche strategico maturato in quel fulgido periodo si concretizzasse in un salto di qualità sia nel campo civile che in quello militare. Così non fu, per via dei seguenti fattori:

- La connotazione artigianale della nostra industria aeronautica, foriera di una filosofia progettuale poco orientata alla praticità d'uso e alla produzione in grande serie, bensì all'ottimizzazione di soluzioni consolidate, se non talvolta obsolete.
- Una naturale ritrosia all'innovazione e alle scelte di rottura col passato da parte dei progettisti, ancorché validi, ma sovente ossessionati dall'intraprendere scelte troppo ardite e come tali facilmente soggette al rifiuto da parte del committente.
- La mancata evoluzione, dopo il disimpegno dall'aeronautica di Balbo alla fine del 1933, della Regia Aeronautica verso dottrine e strategie moderne ed evolute, nonostante i primati precedenti avessero indicato con chiarezza le rotte da seguire per creare un potere aereo efficace, ben prima di tante forze aeree estere.

Particolarmente grave fu la dissipazione dell'invidiabile patrimonio tecnico-operativo degli "Atlantici" e del relativo sistema di supporto, indice di una perfetta organizzazione interforze che avrebbe potuto rendere i reparti dell'Arma Azzurra un modello di efficienza e prontezza operativa. Basti pensare a cosa sarebbero state le missioni effettuate a fine 1940 dal C.A.I. nel difficile contesto operativo nordeuropeo, se solo i nostri piloti avessero avuto la stessa "airmanship" degli equipaggi di Balbo ed equipaggiamenti analoghi, quali radio e apparati di navigazione che rappresentarono la salvezza per i membri della "Centuria Alata".



Figura 7. *Il caccia Reggiane RE.2005.*

Altro punto cruciale, la mancanza di validi propulsori italiani con cilindri disposti in linea e raffreddati a liquido. Il campo motoristico è da sempre il suggello fondamentale per assicurare il successo di un aeroplano e tale carenza impedì ai nostri costruttori di realizzare progetti analoghi ai caccia stranieri quali Supermarine Spitfire, Messerschmitt Bf.109 e North American P-51. Vi fu l'eccezione dei validi Macchi C.202 e Reggiane RE.2001 e dei caccia della serie 5 (Macchi C.205, Fiat G.55 e Reggiane RE.2005 [fig. 7]) equipaggiati con gli ottimi V12 tedeschi Daimler Benz DB601 e DB605 raffreddati a liquido e costruiti su licenza da Alfa Romeo e Fiat, altrettanto validi rispetto ai rivali alleati, benché disponibili sempre in numero insufficiente. In più, la politica fascista col passare degli anni divenne sempre più opprimente, con l'ossessione di assicurare la continuità produttiva alle industrie di ogni ordine e grado, mantenendo la pace sociale per poter stroncare ogni scintilla sediziosa.

Sul fronte industriale e imprenditoriale, vi fu poi la vocazione a ottenere il massimo profitto col minimo investimento. Tutto ciò confluì a creare un'attitudine retrograda e conservatrice, propria di una élite e priva di una visione industriale moderna.

*La situazione della "perfida Albione" e degli Stati Uniti d'America*

Per troppo tempo l'agiografia e la propaganda anglosassone del secondo dopoguerra hanno alimentato il mito di aeroplani eccezionali, efficienti e dal facile pilotaggio, nonché organizzazioni militari e industriali perfette e all'avanguardia.

La realtà fu ben diversa: almeno nella fase iniziale del conflitto, gli Alleati rimasero totalmente spiazzati dalla preparazione e dal coraggio dei piloti dell'Asse e spesso si ritrovarono a pilotare velivoli ancora acerbi, difficili da produrre e affetti da gravi manchevolezze.

Con altrettanto distacco vi è da rimarcare la presa di coscienza della situazione da parte dei vertici alleati, e la rapida reazione, grazie a cui l'ultimo grande impero della storia e la prima potenza economica e industriale dell'epoca crearono un'impressionante macchina da guerra e un sistema produttivo tuttora da prendere a modello per le sue incontestabili capacità. In tal modo, Gran Bretagna e Stati Uniti recuperarono il tempo perduto e si concentrarono con grande pragmatismo su requisiti militari focalizzati all'efficienza operativa e alle prestazioni, imprimendo una svolta decisiva verso la vittoria.

È davvero stupefacente rilevare quanto peso ebbe la valorizzazione del lavoro d'equipe, dell'etica e della meritocrazia in questa rapida e profonda metamorfosi sia in Gran Bretagna che negli Stati Uniti d'America. Tutto ciò fu possibile grazie alla pronta reazione dell'intera società civile e dell'apparato militare, giacché entrambi seppero, con coraggio e determinazione, rivoluzionare tradizioni e prassi consolidate. Solo così si possono spiegare le repentine quanto sorprendenti metamorfosi degli aeroplani simbolo della RAF e dell'USAAF: durante la battaglia d'Inghilterra, lo Spitfire Mk I (fig. 8) rivelò surriscaldamenti del motore, inceppamento delle armi (sia le mitragliatrici Browning cal. 7,7 mm e ancor più i cannoni Hispano cal. 20 mm risultarono inservibili alle alte quote e durante le virate ad alti G) e soprattutto inadeguato alla produzione in grande serie. Ma ad appena un anno dagli scontri dell'estate 1940, la versione Mk V aveva risolto brillantemente ogni inconveniente ed era prodotta in più varianti al frenetico ritmo di trecento esemplari mensili nella "Shadow Factory" di Castle Bromwich. Un caso ancor più eclatante fu l'Avro Lancaster, considerato da molti analisti il miglior bombardiere del conflitto e certamente il più versatile. Sviluppato in emergenza tra-



Figura 8. *Il caccia britannico Supermarine Spitfire Mk. I.*

sformando in quadrimotore il fallimentare bimotore Manchester, ebbe un immediato successo, grazie agli eccellenti V12 Rolls-Royce Merlin che con 6.500 CV complessivi lo trasformarono in una piattaforma universale per ogni arma, anche le più bizzarre o terribili quali la "bouncing bomb" (bomba rimbalzante) realizzata per gli attacchi alle dighe della Ruhr o la gigantesca "Grand Slam" da 10.000 kg. Da notare anche la lodevole iniziativa britannica di far crescere le aziende, esemplificato da Supermarine, Short e Avro che intrapresero ambiziosi progetti, forse al di là della loro portata, ma realizzati con successo grazie alla capacità di mettere a fattor comune le conoscenze e le competenze della RAF, RAE incluso, e dell'intero comparto industriale.

Attraversando l'Atlantico, la metamorfosi fu ancor più radicale e profonda, con aeroplani dal gran potenziale, rimasto inizialmente inespresso. È il caso del mitico Boeing B-17, concepito già nei primi anni trenta e sostanzialmente coevo del nostro S.79. Benché il confronto col nostro trimotore sia impietoso, vi è da rilevare che fino alla versione F, comparsa nel 1942, la Fortezza Volante si rivelò fallimentare nel teatro europeo, tanto che la RAF la impiegò sporadicamente e preferì puntare sui suoi

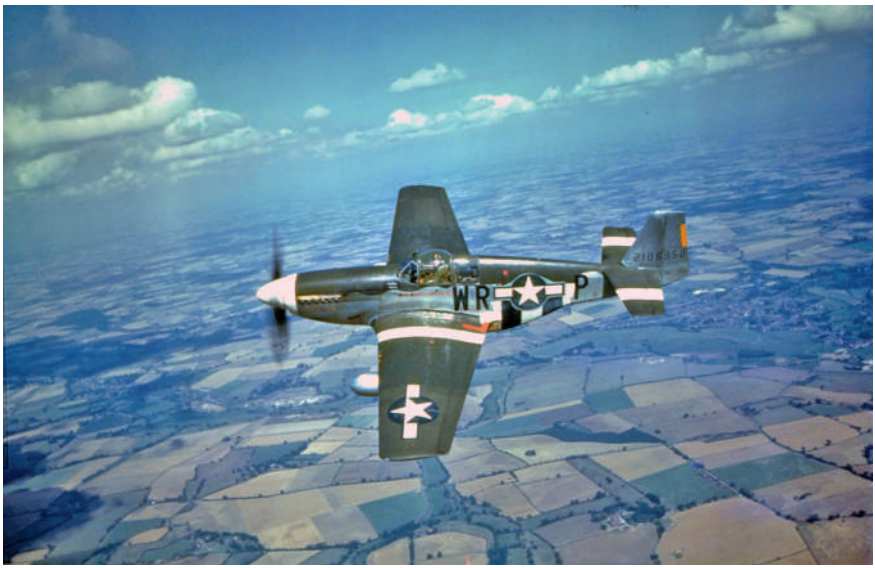


Figura 9. *Il caccia statunitense North American P-51B Mustang.*

"heavies". Solo dopo una radicale rivisitazione delle tattiche e delle formazioni, nonché l'introduzione del P-51B Mustang nei primi mesi del 1944, le perdite di B-17 si ridussero a un numero più accettabile rispetto a quelle del 1943, che per un certo periodo oscillarono al terrificante valore compreso tra 20% e 25%, tanto da indurre nei vertici dell'epoca alla radicale decisione di sospendere le missioni per diversi mesi.

Proprio il Mustang costituì un ulteriore esempio di eccellente "product development": nato con una cellula all'avanguardia, non supportata da un propulsore altrettanto valido (il V12 Allison V-1710 sviluppato in patria), con l'adozione del Rolls-Royce Merlin (prodotto su licenza dalla Packard a Detroit) nelle versioni dalla B in poi (fig. 9), divenne il miglior caccia del conflitto, in virtù della perfetta combinazione fra velocità, armamento, autonomia e maneggevolezza, riuscendo a proteggere le imponenti formazioni di bombardieri nelle lunghe missioni fin oltre Berlino e ritorno.

*Dulcis in fundo*, sia la "perfida Albione" che gli Stati Uniti ebbero una scuola motoristica di tutto rispetto e una formidabile potenza industriale: la produzione totale dell'industria aeronautica italiana dal 1940 al 1945 assommò a 13.000 velivoli, mentre Gran Bretagna (incluse

le colonie) e Stati Uniti ne realizzarono rispettivamente 177.000 e 295.000, una vera "valanga di metallo" impossibile da contrastare.

*Conclusioni*

Il decennio 1930-1940 fu tra i più cruciali per lo sviluppo aeronautico: in questa trattazione si è voluto evidenziare quali e quanti progressi si succedettero in pochi anni, e che furono essenziali per trasformare l'aeroplano in un mezzo dall'incredibile efficacia, sia in campo civile che militare. In quest'ultimo ambito si passò da caccia biplani strettamente derivati dai tipi omologhi sviluppati durante la Prima guerra mondiale a monoplani interamente metallici da oltre 600 km/h con otto mitragliatrici o quattro cannoni, mentre nel campo dei bombardieri vi fu una vera e propria rivoluzione, una profonda metamorfosi da aeroplani con una struttura ancora arcaica agli autentici "incrociatori del cielo" preconizzati dal generale Douhet, sotto forma di quadrimotori da 30 tonnellate in grado di trasportare un carico bellico di 3 o 4 tonnellate a 3.000 km, che nel caso del B-29 avrebbero raggiunto 60 tonnellate di peso massimo e 9 tonnellate di bombe.

Vi è poi da rimarcare un aspetto fondamentale, vale a dire la nascita della propulsione a reazione, probabilmente il fattore tecnologico più importante nella storia dell'aviazione, nato in sordina e in segreto col primo volo del minuscolo monoreattore Heinkel He.178, effettuato il 27 agosto 1939, a pochi giorni dall'invasione della Polonia da parte delle forze naziste.

In questo tumultuoso contesto purtroppo il Regno d'Italia perse rapidamente la sua posizione di prestigio conquistata a cavallo fra gli anni venti e trenta. Appena dopo la Crociera del Decennale del 1933 e la conquista nel 1934 del primato mondiale di velocità con Agello, iniziò infatti una parabola discendente, brevemente interrotta dalla vittoria conseguita nel 1937 dai "Sorci Verdi" nella Istres-Damasco-Parigi e dal primato di quota di Mario Pezzi nell'anno successivo.

Le ragioni sono molteplici e strettamente intersecate con la politica del periodo. Innanzitutto, pur con i limiti dovuti al suo ego smisurato e ad ambizioni altrettanto sfrenate, Italo Balbo improntò l'Arma Azzurra a un modello di efficienza e modernità, particolarmente dal lato addestrativo.

Dal momento in cui il Maresciallo dell'Aria venne esautorato da Mussolini dal comando dell'Arma Azzurra, per essere relegato nell'esilio dorato libico, la grande lezione della "Centuria Alata" e del suo eccellente esempio di "airmanship" fu semplicemente accantonata dal successore Valle e l'ambiente aeronautico italiano piombò in un lungo sonno, il cui risveglio nel contesto bellico fu drammatico e lacerante.

Un altro contributo deleterio per i reparti della Regia Aeronautica e l'industria venne dalle sciagurate avventure etiopiche e spagnole che depauperano un'enorme quantità di risorse finanziarie, tecnologiche e industriali, con l'aggravante di installare la convinzione della superiorità italiana in campo aeronautico.

Oltre Manica e oltre Oceano la situazione fu diametralmente opposta: agli albori degli anni trenta, l'Impero britannico e gli Stati Uniti si crogiolarono in uno "splendido isolamento" per ragioni diverse, ma con l'effetto di ritrovarsi impreparati alla soglia del conflitto. La RAF e l'industria britannica ebbero comunque sentore del precipitare degli eventi già intorno al 1933, con l'ascesa al potere di Adolf Hitler le cui mire espansionistiche non lasciavano adito ad alcun dubbio. Infatti, la forza aerea britannica varò due requisiti fondamentali proprio nel 1934 e nel 1936, rispettivamente rivolti a un caccia monoplano a elevate prestazioni (il cosiddetto "eight gun fighter", da cui nacquero l'Hurricane e lo Spitfire) e a un bombardiere pesante, che diede origine allo Short Stirling e con successive rielaborazioni a Manchester, Halifax e finalmente al Lancaster.

Da rilevare l'acuta lungimiranza con cui la Gran Bretagna puntò sulle nuove e decisive tecnologie delle radiocomunicazioni, sia sul fronte delle radio di bordo, diffusamente impiegate ben prima del conflitto, sia su quello del radar, il cui contributo con le stazioni di rilevamento "Chain Home" si rivelò decisivo nello sventare gli attacchi della Luftwaffe durante la battaglia d'Inghilterra.

Nonostante ciò, i primi anni di guerra furono assai duri per le isole britanniche, sostanzialmente per l'impiego di tattiche superate e per l'impreparazione dell'apparato industriale. La reazione fu comunque assai pronta ed efficace e coincise con la nomina di Winston Churchill a Primo Ministro, nel maggio 1940. Il 14 di quello stesso mese, il nuovo premier istituì appositamente un nuovo ministero, denominato "Ministry of Aircraft Production", proprio allo scopo di potenziare e ottimizzare il comparto industriale aeronautico, con risultati immediatamente tangibili.

Esaminando la situazione degli Stati Uniti, emerge un ancor più radicato isolazionismo, perpetrato ben oltre lo scoppio del conflitto in Europa. Vi è però da rilevare come l'industria aeronautica statunitense fosse all'avanguardia dal punto di vista tecnologico, particolarmente nel campo dei plurimotori. La ragione risiede nel grande sviluppo del trasporto aereo in quel continente e nella vivace concorrenza fra le varie compagnie aeree, già a partire dai primi anni trenta. Le grandi distanze, la vastità di un territorio ostile con ampie variazioni climatiche, orografiche e meteorologiche, la necessità di assicurare profitti e conquistare una fama di affidabilità, scatenarono una sana competizione fra i vari costruttori di cellule ed equipaggiamenti, col brillante risultato di sviluppare tecnologie vincenti in ogni campo. I vari Douglas DC-3, Boeing 247 e Lockheed Electra già nel 1935 disponevano di carrelli retrattili a comando idraulico, flap, strutture monoguscio con rivestimento metallico lavorante, impianti antighiaccio, eliche a passo variabile e dispositivi avanzati per il pilotaggio automatico e la navigazione a lungo raggio, rivelatisi poi indispensabili nei bombardieri medi e pesanti impiegati dall'USAAC e dall'USAAF.

Il colossale programma di riarmo varato dal presidente Roosevelt nel 1938, a seguito della crisi dei Sudeti, trovò quindi terreno fertile in un'industria già matura per il cambiamento, che attendeva solo i finanziamenti necessari per ampliare e ottimizzare le infrastrutture produttive. L'Arsenal of Democracy fu perciò reso possibile da un apparato industriale, sociale e finanziario che agì subito da catalizzatore e dalla volontà politica di sconfiggere il nemico non solo dal punto di vista militare, ma anche da quello ideologico.

Ad esempio, il P-51 Mustang (fig. 9), nonostante la cellula e l'aerodinamica superlative, senza il V12 Merlin sarebbe rimasto un oscuro comprimario. Sull'altro fronte, gli Stati Uniti fornirono migliaia di aeroplani alla RAF, dai caccia P-40 ai bombardieri B-24 Liberator, decisivi per la sconfitta dell'Asse.

È sconfortante confrontare tutto ciò con la realtà italiana, in cui lo strapotere dell'industria spesso impose alla Regia Aeronautica aeroplani mediocri se non addirittura pericolosi, per non parlare delle rendite di posizione acquisite da ogni costruttore. Altro aspetto cruciale fu l'inadeguatezza dell'apparato produttivo nel suo complesso, inteso come l'assieme dei subfornitori di componenti, equipaggiamenti, dispositivi e strumenti indispensabili per realizzare un aeroplano.

Il valore e l'abnegazione dei nostri equipaggi e dei tecnici della Regia Aeronautica spesso seppero riscattare le inefficienze dei reparti e le drammatiche carenze logistiche e organizzative, ma tutto ciò fu reso vano da un conflitto logorante e devastante per la sua vastità nel tempo e nello spazio, totalmente fuori portata per il nostro paese.

*Produzione velivoli nella Seconda guerra mondiale (1939-1945)*

*Nota generale*
I dati di produzione spesso sono discordanti a seconda delle fonti, in quanto basati sui lotti produttivi, in certi casi cancellati senza essere registrati ufficialmente. Tuttavia, sono significativi per tracciare l'attività industriale dei vari belligeranti nel corso del conflitto.

| Paese belligerante | 1939 | 1940 | 1941 | 1942 | 1943 | 1944 | 1945 | Totale | Note |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stati Uniti | 2.141 | 6.086 | 26.277[1] | 47.836 | 85.898 | 96.318 | 49.761[1] | 324.750[1] | [2], [3] |
| Germania | 8.295 | 10.826 | 11.776 | 15.596[4] | 25.527 | 39.807 | 7.540 | 119.371 | [3],[5] |
| URSS | 10.382 | 10.565 | 15.735[1] | 25.436 | 34.245[1] | 40.246[1] | 20.052[1] | 157.261[1] | |
| Gran Bretagna | 7.940 | 15.049 | 20.094 | 23.672 | 26.263 | 26.461 | 12.070 | 131.549 | [2], [3] |
| Giappone | 4.467 | 4.768 | 5.088 | 8.861 | 16.693 | 28.180 | 8.263 | 76.320 | [3] |
| Italia | 1.692 | 2.142 | 3.503 | 2.818 | 967 | Dati non reperibili | | 11.122 | |
| Francia | 3.163 | 2.113 | | | | | | 5.276 | |
| **Totale** | 38.080 | 51.531 | 76.256 | 124.179 | 190.218 | 231.852 | 97.577 | 809.693 | |

[1] AA.VV., *The World War II Data Book*.
[2] AA.VV., *Out-Producing the Enemy: American Production During WWII*. National World War II Museum.
[3] Wesley Frank Craven, *The Army Air Forces in World War II*, Volume 6. *Men and Planes*. Chicago: University of Chicago Press/Office of Air Force History; 1984.
[4] AA.VV., *The United States Strategic Bombing Surveys*, Maxwell Air Force Base, Alabama: Air University Press; 1987.
[5] Jonathan Zeitlin, *Flexibility and Mass Production at War: Aircraft Manufacture in Britain, the United States, and Germany, 1939-1945*. Technology and Culture (1995), 36, 1: 46-79.




Le immagini e il testo sono tratti dal volume di Marco De Montis, *Dal lampo rosso ai bagliori di guerra. Dall'Italia dei record aeronautici alle esigenze belliche. Industria italiana e anglosassone a confronto, 1933-1943*, Vicchio di Mugello, LoGisma, 2024.

*Bibliografia*

Apostolo G. *Aer.Macchi C.202* - Ali d'Italia, vol. 3. Torino: Ed. La Bancarella Aeronautica; 1995.
Apostolo G. *Aer.Macchi C.205* - Ali d'Italia, vol. 27. Torino: Ed. La Bancarella Aeronautica; 2008.
Apostolo G., Cattaneo G. *Idrocorsa Macchi* - Ali d'Italia, vol. 26. Torino: Ed. La Bancarella Aeronautica; 2007.
Apostolo G. *Reggiane Re.2001* - Ali d'Italia, vol. 3. Torino: Ed. La Bancarella Aeronautica; 1996.
*Assalto alla Velocità*. GAVS (Gruppo Amici Velivoli Storici). Ali Antiche (gennaio 2019) 119/120: 2.
*Avidi di Orizzonti*, Roma: Edizioni Rivista Aeronautica; 2013.
Balbo I. *La centuria alata*. Montepulciano (SI): Le Balze editore; 2004.
Birch D. *Rolls-Royce and the Mustang*. Derby, UK: Rolls-Royce Heritage Trust; 1987.
Caliaro L. *Savoia-Marchetti S.79 Sparviero: From Airliner and Record-Breaker to Bomber and Torpedo-Bomber 1934-1947*. Manchester, UK: Crecy Publishing; 2022.
Caliaro L. *Macchi Fighters: MC.200 Saetta, MC.202 Folgore, MC.205 Veltro*. Manchester, UK: Crecy Publishing; 2024.
Cole L. *Secrets of the Spitfire: The Story of Beverley Shenstone the Man Who Perfected the Elliptical Wing*. Barnsley, South Yorkshire, UK: Pen & Sword Aviation; 2012.
Corum J.S. *Legion Condor 1936-1939. Air Campaign 16*. Oxford, UK: Osprey; 2020.
De Montis M. *I motori radiali americani Pratt & Whitney e Wright*. Rivista Italiana Difesa (2015) 6: 82-97.
De Montis M. *I V12 della vittoria: l'Allison V-1710 ed il Rolls Royce Merlin*. Rivista Italiana Difesa (2016) 4: 80-97.
De Montis M. *I V12 dell'Asse*. Rivista Italiana Difesa (2017) 1: 74-91.
De Montis M. *Da 100 a 1000 un poeta nel cielo*. Tradate (VA): Ed. Gli archivi ritrovati (collana Le Piume Nere); 2018.
De Montis M. *Il Fiat AS.8, una gemma dimenticata*. Rivista Italiana Difesa (2020) 5: 91-93.
De Montis M. *Un'elica nel cielo, la storia dei motori avio BMW*. Rivista Italiana Difesa (2021) 8: 82-91.
Di Martino B. *L'Aviazione Italiana nella Grande Guerra*. Milano: Mursia; 2011.

Di Martino B. *Il Dominio Aereo del Rimland. La proiezione geostrategica nella pianificazione della Regia Aeronautica*. In: SISM (Società Italiana di Storia Militare). *Italy on the Rimland. II: Suez*. Roma: Nadir Media; 2019. 213-224.

Di Martino B. *L'ombra del bombardiere 1919-1939. L'interpretazione del potere aereo nell'Europa fra le due guerre*. Roma: Aeronautica Militare; 2024.

Dibbs J., Holmes T., Riley G. *Hurricane, Hawker's fighter legend*. Oxford, UK: Osprey; 2015.

Dibbs J., Holmes T. *Victory 1940. The Battle of Britain as Never Seen Before*. Stamford (Lincolnshire), UK: Key Publishing; 2016.

Filippi F. *Dall'elica al getto. Breve storia dei propulsori aeronautici*. Torino: EDA: 1983.

Gabrielli G. *Una vita per l'aviazione*. Milano: Bompiani; 1982.

Garello G. *Piaggio P. 108* - Ali d'Italia, vol. 15. Torino: Ed. La Bancarella Aeronautica; 1998.

Gentilli R. *Guerra aerea sull'Etiopia 1935-1939*. Firenze: EDAI; 1992.

Greco F. *Il Motore Aeronautico FIAT 1908-1945*. Tradate (VA): Ed. Gli archivi ritrovati (collana Le Piume Nere); 2018.

Gueli M. *Velivoli Militari Italiani 1923-1936*. Roma: Aeronautica Militare Ufficio Storico; 2019.

Gueli M. *Velivoli Storici Italiani - Guerra 1940-43*. Roma: Aeronautica Militare Ufficio Storico; 2019.

Harvey-Bailey A. *The Merlin in Perspective: The Combat Years*. Derby, UK: Rolls-Royce Heritage Trust; 1995.

Jones L. *Sectioned Drawings of Piston Aero Engines. Rolls-Royce Historical Series*. Derby, UK: Rolls-Royce Heritage Trust; 1995.

Lardas M. *Battle of the Atlantic 1942-45, the Climax of World War II's Greatest Naval Campaign (Air Campaign 21)*. Oxford, UK: Osprey; 2021.

Lazzati G. *I soliti quattro gatti*. Milano: Ugo Mursia Editore; 2008.

Marchi O. *Il superamento del primato di Agello*. Rivista Aeronautica (1980) 5: 52-61.

Marshall J.W. "Bill", Lowell F.F. *P-51B Mustang: North American's Bastard Stepchild that Saved the Eighth Air Force*. Oxford, UK: Osprey; 2021.

Marshall L.M. III, *Schweinfurt-Regensburg 1943: Eighth Air Force's Costly Early Daylight Battles (Air Campaign 14)*. Oxford, UK: Osprey; 2020.

Mattioli M. *Savoia-Marchetti S.79 Sparviero Torpedo-Bomber Units. Combat Aircraft 106*. Oxford, UK: Osprey; 2014.

Mattioli M. *Savoia-Marchetti S.79 Sparviero Bomber Units. Combat Aircraft 122*. Oxford, UK: Osprey; 2018.

Miana P., Keranen J., Brioschi A. *Storia della SIAI raccontata per immagini*. Tradate (VA): Gli Archivi Ritrovati; 2015. Capitolo I: *I Sorci Verdi*.
Miana P., Keranen J., Gandini M. (a cura di). *SIAI S.64*. Tradate (VA): Gli Archivi Ritrovati; 2017.
Morgan E.B., Shacklady, E. *Spitfire: The History*. Stamford (Lincolnshire), UK: Key Publishing; 1987.
NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) overview. www.history.nasa.gov
Norton B. *American Bomber Aircraft Development in World War 2*. Hinckley (Leicestershire), UK: Midland Counties Publishing; 2012.
O'Leary M. *North American Aviation P-51 Mustang: No. 1 (Production Line to Flightline S.)*. Oxford, UK: Osprey; 1998.
Pezzi M. *Come sono giunto a 15.655 metri*. Le Vie dell'Aria (15 maggio 1937) 20.
Postlethwaite M. *Supermarine Spitfire Mk I in RAF Service: 1936 to the Battle of Britain*. Wingleader Photo Archive Number 1. Liverpool, UK: Wing Leader Ltd.; 2020.
Ricci C. *Il Corpo Aereo Italiano (C.A.I.) sul fronte della Manica (1940-1942)*. Roma: Ufficio Storico Stato Maggiore Aeronautica (USSMA); 1980.
Rocca G. *I disperati. La tragedia dell'aeronautica italiana nella Seconda guerra mondiale*. Milano: Arnoldo Mondadori; 1991.
Rood G. *The Royal Aircraft Establishment Farnborough. 100 Years of Innovative Research, Development and Application*. Journal of Aeronautical History (2020) 4: 38-98.
Rubbra A.A. *Rolls-Royce Piston Aero Engines. A Designer Remembers*. Derby, UK: Rolls-Royce Heritage Trust; 1990.
Santoro G. *L'Aeronautica italiana nella Seconda guerra mondiale*. Milano-Roma: Edizioni Esse; 1966.
Sgarlato N. *Regia aeronautica. Storia, uomini e macchine di un'aviazione immortale*. I e II. Parma: Delta Editrice; 2014.
Sgarlato N. *Saetta, storia e tecnica del Macchi C.200. Dimensione cielo*. Parma: Delta Editrice; 2017.
Sgarlato N. *La spy story dietro al Reggiane Re 2000*. VFR Aviation (aprile 2021) 70: 48-57.
Sguerri F. *Evoluzione tecnico-operativa degli aerei secondo le esigenze della Seconda Guerra Mondiale (1939-1945)*. Vicchio (FI): LoGisma Ed.; 2023.
Sinnott C.S. *The RAF and Aircraft Design: Air Staff Requirements 1923-1939*. London: Frank Cass Publishers; 2001.
Spaggiari L., D'Agostino C. *SM-79 il gobbo maledetto*. Cornaredo (MI): Il Castello Editore; 1979.

*U.S. Aviation Research Helped Speed Victory*. www.nasa.gov
Valdonio G.C. *Frecce, Saette, Folgori e Veltri. Storia critica dei caccia italiani della Seconda guerra mondiale*. Roma: Edizioni Rivista Aeronautica; 2019.
White G. *Allied Aircraft Piston Engines of World War II*. Warrendale (Pennsylvania), USA: SAE International; 1995.
Wrynn V.D. *Forge of Freedom: American Aircraft Production in World War II*. Minneapolis (Minnesota), USA: Motorbooks International; 1995.
Yenne B. *The American Aircraft Factory in World War II*. Grand Rapids (Michigan), USA: Zenith Press; 2006.
Yenne B. *America's Round-Engine Warbirds: Airframes and Powerplants at the Close of the Military Prop Era*. North Branch (Minnesota), USA: Specialty Press; 2022.

**Patrizia Ginesi***

# *Intrecci fra gli esseri umani e gli altri animali*

**Sommario**: Il rapporto tra esseri umani e animali costituisce un intreccio antico e complesso che attraversa la storia dell'umanità e coinvolge dimensioni biologiche, culturali, filosofiche e morali. Dalle origini di questo rapporto in epoche antichissime arriviamo, seppur in maniera sintetica, alla questione dei diritti e della giustizia per gli animali tra Ottocento e Novecento; ineludibile il riferimento alle principali questioni contemporanee: allevamento, ricerca e tecnologie per poi concludere con una riflessione sulla presenza degli animali nei teatri di guerra. La "questione animale" non può essere considerata marginale e parlare degli animali significa, inevitabilmente, parlare dell'essere umano.

**Parole chiave**: intrecci; filosofia; etica; diritti; guerra.

**Abstract**: *Interconnections Between Humans and Other Animals*
The relationship between humans and animals is an ancient and complex interconnection that spans the history of humanity and encompasses biological, cultural, philosophical, and moral dimensions. Starting from the origins of this relationship in ancient times, we arrive – albeit briefly – at the issue of rights and justice for animals between the nineteenth and twentieth centuries. An unavoidable reference is made to the main contemporary issues: animal husbandry, research, and technologies, concluding with a reflection on the presence of animals in theatres of war. The animal question cannot be considered marginal and speaking of animals inevitably means speaking of human beings.

**Keywords**: interconnections; philosophy; ethics; rights; war.

* Dottoressa in Metodologie Filosofiche gipatrizia@gmail.com

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.395-414

L'esistenza di intrecci tra gli esseri umani e gli animali presuppone che ci siano stati degli incontri e questi incontri, così antichi, si perdono nella notte dei tempi. Non abbiamo documentazione scritta, ovviamente, di quello che accadde, ma abbiamo qualche strumento di conoscenza.

Ci sono rimaste pitture rupestri che sono un po' come delle istantanee di quell'epoca. I Paesi del bacino del Mediterraneo – Italia compresa – conservano numerosi esempi di queste testimonianze che ci mostrano la raffigurazione dell'animale nel contesto della scena di caccia.

Stiamo parlando dell'essere umano quando si va definendo quella che chiamiamo la fase del "nomadismo" risalente al Paleolitico. Si tratta di cacciatori e raccoglitori, dediti a un'economia di prelievo: le risorse necessarie alla sopravvivenza venivano ricavate direttamente dall'ambiente. Si pensa che questi gruppi fossero costituiti da 15-20 individui, perché dovevano proteggersi da animali che, inizialmente, erano percepiti come un pericolo e dai quali era necessario proteggere anche i bambini e le donne. Al tempo stesso, un numero adeguato di persone era indispensabile per attività collettive come la caccia e la macellazione degli animali. Il nomadismo dipendeva dalla ricerca di rifugi più idonei visto che gli animali si spostavano e, di conseguenza, gli esseri umani erano costretti a seguire le mandrie.

Disponiamo anche di un altro strumento interessante per la conoscenza di quell'epoca, l'archeozoologia, quel settore dell'archeologia che va a ricercare e a studiare i resti di animali all'interno di siti con interesse archeologico. Possono essere frammenti ossei, larve, oppure coproliti, che sono la trasformazione nel tempo degli escrementi animali. Ebbene, questi resti vengono studiati con sistemi di datazione che permettono di capire, fra le altre cose, se si trattasse di animali che già vivevano accanto all'uomo o se si trattasse di animali selvatici.

Questi studi forniscono informazioni anche su un'epoca successiva, cioè il momento del passaggio a un'economia di produzione: la cosiddetta "rivoluzione neolitica", risalente a circa 10.000 anni fa.

Il fenomeno, però, che costituì un vero cambiamento, un salto culturale, e che poi ha definito il destino di tutta l'umanità e anche delle specie animali, è la "domesticazione". Con questo termine ci riferiamo alla domesticazione delle piante – in particolare la Mezzaluna fertile dimostra tutto ciò che l'essere umano ha saputo trarre da determinate specie vegetali – e alla domesticazione degli animali. Si pensa che possa

essere avvenuta in maniera fortuita: per esempio, gruppi di animali che si erano staccati dal branco rimanendo isolati venivano facilmente catturati e recintati per poi instaurare con essi un nuovo tipo di rapporto.

Gli animali che sono stati addomesticati in questa fase – ovini, bovini, suini, caprini, equini, pollame, cani e gatti – dovevano possedere dei "requisiti" che sono stati definiti nella realtà della convivenza tra uomo e animali.

Quali erano questi requisiti? Dovevano essere robusti, quindi in grado di sopravvivere al distacco dalla madre, al fatto che dovevano adattarsi a un altro ambiente, passare a nuove diete e così via. Dovevano anche essere animali con un'inclinazione verso l'uomo, essere cioè in grado di accettare che l'essere umano diventasse il leader del loro gruppo; animali di indole tranquilla, non inclini alla fuga immediata. Poi dovevano costituire un'utilità per gli esseri umani: per esempio, essere fonte di cibo. Inoltre, dovevano avere un veloce tasso di crescita, ovviamente con una riproduzione in cattività e facilità di accudimento. Tutte queste caratteristiche hanno fatto sì che le specie prima citate diventassero gli animali che ancora oggi sono più vicini a noi.

Quali erano i vantaggi di questa vicinanza? Forza motrice per gli aratri – ovviamente in un'agricoltura che era agli albori –, concimazione, latte e carne.

Le conseguenze della domesticazione nel corso dei secoli sono state importantissime perché sono state biologiche, fisiche, genetiche sulle specie animali, che si sono evolute come frutto di selezioni naturali e anche di interventi umani; ma ci sono state anche conseguenze culturali per l'uomo, perché con questo passaggio, da una fase sociale a un'altra, l'essere umano ha cambiato anche il proprio comportamento.

Chi sono gli animali domestici? Secondo il dizionario Treccani: "Sono animali che vivono permanentemente con l'uomo, il quale li nutre, li protegge, ne regola la riproduzione e li utilizza nella loro capacità di offrire aiuto, lavoro e prodotti vari".

Questa definizione è valida anche per i nostri animali da compagnia: il cane o il gatto che ospitiamo nelle nostre case sono frutto di questa domesticazione; il cane deriva dall'antico progenitore lupo-sciacallo, il gatto ha come antico progenitore il gatto selvatico.

Molto spesso parlando di questi animali li si definisce "addomesticati", ma vale la pena di fare una precisazione. L'animale addomesticato

è un animale – l'esempio tipico sono gli animali del circo – che viene avvicinato all'uomo; pensiamo all'elefante, alla tigre, al leone, alla scimmia, addestrati a compiere determinati esercizi. Quando finisce, diciamo così, il suo ciclo lavorativo, l'esemplare viene restituito agli zoo o a bioparchi ma difficilmente torna nel suo habitat naturale, perché spesso è nato addirittura in cattività e non ha mai visto l'habitat che ospita i suoi consimili selvatici. Pertanto, questo tipo di animale non subisce le modifiche specifiche della domesticazione, perché esse necessitano di molto tempo: l'animale addomesticato rimane un animale selvatico che poi verrà restituito ad altra vita.

Sul cane e sul gatto abbiamo dei riferimenti cronologici relativamente più precisi. In Germania è stato trovato un frammento di mandibola di cane risalente a 14.000 anni fa circa. Per il gatto i resti più antichi, rinvenuti a Creta, risalgono a circa 6.000 anni fa.

Nel panorama della domesticazione il gatto è un caso un po' particolare perché si ipotizza che si sia avvicinato all'uomo attirato dai topi che infestavano i granai e i depositi di derrate alimentari e questo è avvenuto un po' in tutte le antiche civiltà del Mediterraneo. Poi, gradatamente, l'essere umano ha compreso l'utilità di questo animale, perché risolveva un problema o, comunque, lo aiutava a controllarlo; successivamente si è instaurato un certo tipo di contatto anche con gli abitanti dei villaggi e delle città poiché il gatto è un animale territoriale, opportunista, che sa stare vicino all'uomo. Nonostante ciò, è un animale che non ha mai perso del tutto la sua natura selvatica e l'essere umano non ha mai inciso più di tanto su di essa, come invece è avvenuto con il cane, perché il gatto fondamentalmente manca di una caratteristica importante: non è un animale da lavoro. A tal proposito nel notissimo libro di George Orwell, *La fattoria degli animali*, in quelle poche righe dedicate al gatto, veniamo a sapere che quando nella fattoria si organizzava la giornata lavorativa, il felino si rendeva irreperibile e poi tornava per i pasti o alla sera ma adduceva delle scuse in modo così suadente che non era possibile non credergli. Quindi diremmo: un "simpatico fannullone". Chi vive con un gatto sa che non è certamente un animale da lavoro. E questa è la sua specificità all'interno del processo di domesticazione.

Inizialmente gli insediamenti con agricoltori e allevatori erano dei villaggi ma col passare del tempo sono diventati città vere e proprie. Pensiamo alla civiltà greca, nello specifico. Si trattava di città organizzate in

forma statuale e dotate di una precisa struttura politica, la cui economia si basava sull'agricoltura, sull'allevamento e su attività commerciali. Nei secoli queste comunità hanno sviluppato una cultura molto articolata in diversi campi: la scultura, la pittura, l'architettura, la letteratura e, in questo contesto, ha origine anche il pensiero filosofico. In questa sede non prendiamo in considerazione la filosofia in quanto disciplina complessa e autonoma, ma solo come una riflessione che l'essere umano comincia a fare su di sé, sul mondo che lo circonda. E, naturalmente, in questo mondo rientrano gli animali che non sono più solo degli esseri viventi utili per il lavoro e l'alimentazione, ma diventano vero e proprio oggetto di riflessione filosofica.

Se osserviamo l'evoluzione del pensiero filosofico, dall'antichità fino a oggi, ci accorgiamo che all'interno della sua riflessione è sempre presente anche il rapporto tra esseri umani e animali.

E allora vedremo che in questo *excursus* (che in questo contesto non potrà essere altro che sintetico) si delineano due linee di pensiero sostanzialmente parallele. La prima, più longeva, inizia – o perlomeno viene fatta iniziare – con Aristotele (IV secolo a.C). Nelle *Opere biologiche* lo Stagirita scrive: "In effetti mansuetudine, selvatichezza, mitezza, aggressività, coraggio, viltà, paura, sicurezza e una certa capacità di comprensione intellettuale presentano in molti animali delle similarità con l'uomo". Il filosofo individua negli animali parecchie caratteristiche positive che li rendono simili agli esseri umani. In Aristotele non c'è disprezzo per gli animali ma egli ritiene, convintamente, che gli animali manchino di almeno tre caratteristiche fondamentali: la stazione eretta, la possibilità di ragionamento e il *logos*, cioè la parola, e questo li pone inevitabilmente al di sotto dell'essere umano, con un atteggiamento che, successivamente, verrà definito "antropocentrico". Anche nei secoli successivi, fino al Medioevo e oltre, si andrà a focalizzare, partendo da Aristotele, un'immagine della natura che verrà poi definita *scala naturae*, in cui c'è un vertice occupato dall'essere umano e tutte le altre specie viventi sono collocate a livelli sottostanti.

Accanto a questa visione antropocentrica ve ne furono altre più simpatetiche nei confronti degli animali. Un esempio lo troviamo in Plutarco di Cheronea (vissuto tra il I e il II secolo d.C.) che considerava gli animali virtuosi per natura, mentre gli uomini erano tendenti al vizio e a ogni tipo di abuso. Nel suo discorso Plutarco poneva al centro

l'uomo, in quanto la pietà e l'amorevolezza verso gli animali erano in realtà mezzi utili a sviluppare l'amore verso gli altri esseri umani.

Plutarco è decisamente contrario all'alimentazione a base di carne, ma non fu il primo: già prima di lui i pitagorici avevano praticato un'alimentazione vegetariana. Nel suo trattato *Sul mangiar carne* Plutarco scrive che noi esseri umani abbiamo cominciato con l'uccidere gli animali selvatici, poi abbiamo iniziato a uccidere la pecora che ci dà da vestire, il bue che tira l'aratro, il gallo che ci controlla la casa e abbiamo imparato, quindi, a spargere sangue e questo ci ha poi indotti a essere violenti anche contro altri esseri umani.

Inoltre, l'uomo, secondo Plutarco, non è carnivoro per natura, non ha artigli, non ha becco, non ha denti aguzzi come gli animali predatori. A coloro che, comunque, vogliano continuare a mangiar carne si rivolge con queste parole: "Va bene, puoi continuare a mangiare carne se lo vuoi, però uccidilo tu l'animale, uccidilo con le mani, però non utilizzare coltelli e altre armi, uccidilo come fanno gli animali". Secondo lui il mangiar carne è facilitato dal fatto che noi cuciniamo la carne, la insaporiamo, cerchiamo con questi metodi di renderla gradevole per il nostro organismo che non sarebbe naturalmente portato a cibarsene.

Secondo Plutarco l'animale è dotato di razionalità, al contrario di quanto diceva Aristotele, perché ha delle capacità per capire, per decidere quali sono le situazioni che lo porteranno a un vantaggio o a uno svantaggio, cioè è in grado di discernere come comportarsi in base all'ambiente in cui vive.

Nel Medioevo Tommaso d'Aquino riprende la tradizione aristotelica, convinto che la natura abbia creato dei meccanismi che non vanno assolutamente messi in discussione: le piante servono perché gli animali se ne cibino, gli animali servono come cibo dell'uomo. Gli animali non vanno maltrattati, ma quando riflette sui nostri doveri morali egli ritiene che possano essere rivolti solo ad altri esseri umani e non ad animali. Qualsiasi danno si faccia a un animale che appartiene a un nostro consimile, non sarà importante tanto per il fatto che l'animale sia stato rubato o ucciso: il fatto grave è che noi abbiamo peccato, sbagliato, contro un altro essere umano. L'animale, quindi, non è destinatario di diritti morali, se non in maniera indiretta, perché appunto non ne è il destinatario principale.

Nella stessa epoca, però, Francesco d'Assisi ci propone un'altra visione. Lo vediamo anche nei bellissimi affreschi di Giotto: il suo rapporto con gli animali e con tutti gli altri elementi del creato rivelano l'idea di un'armonia, senza gerarchia e senza sfruttamento da parte dell'essere umano. Quindi il Santo esprime un altro modo di guardare gli animali. Nelle Fonti Francescane l'*Ammonimento V* recita: "E tutte le creature che sono sotto il cielo, ciascuna secondo la sua natura, servono e conoscono e obbediscono al loro Creatore meglio di te, o uomo".

Nel Seicento Cartesio sostiene l'idea dell'animale-macchina: l'animale non sarebbe altro che una macchina con i suoi ingranaggi. Secondo Cartesio gli animali sono molto ben congegnati dalla natura ed essendo macchine non hanno alcuna capacità di sentire, cioè non hanno possibilità di provare piacere né dolore, quindi non sono, come diciamo noi oggi, esseri senzienti.

Cartesio riteneva che l'essere umano fosse composto da corpo, *res extensa*, mente, *res cogitans*, e anima, mentre l'animale è solamente pura *res extensa*, cioè solo materia. Questa distinzione aveva importanti conseguenze perché nel Seicento stava crescendo l'interesse per lo studio dell'anatomia e, mentre per l'anatomia umana ci si avvaleva soprattutto di cadaveri umani che venivano sezionati nelle università, sugli animali si praticava la vivisezione che, secondo Cartesio, non poteva avere nessuna controindicazione perché gli animali, essendo delle macchine, non potevano soffrire.

Malebranche, filosofo e scienziato francese, più o meno suo contemporaneo, appoggia la visione cartesiana perché ritiene che non abbiamo elementi per sostenere che gli animali siano meritevoli né immeritevoli; si tratta di esseri incolpevoli, quindi non possiamo pensare che un Dio buono li abbia creati per farli soffrire e quindi questo ci basta per pensare che essi non soffrano. La vivisezione, però, era una pratica che lasciava perplessi molti studiosi, perché alcuni si rendevano conto del fatto che l'animale aveva reazioni che rivelavano la sua sofferenza.

Ci fu chi, invece, si oppose all'idea cartesiana. Nel Settecento Voltaire nel *Dizionario filosofico* si rivolge al filosofo "meccanicista" con queste parole:

> Che vergogna, che miseria aver detto che le bestie sono macchine prive di conoscenza e di sentimento, che fanno sempre tutto alla stessa maniera,

> che non imparano niente e non si perfezionano. […] I barbari uomini prendono il cane che accoglie il suo padrone con salti, carezze e mugolii e lo inchiodano su una tavola e lo sezionano vivo per mostrare le vene mesenteriche.[1]

Il Settecento è un secolo molto importante per questo nostro percorso, perché è in questo periodo che si manifestano i prodromi di importanti novità che nei secoli successivi a partire dall'Ottocento, connoteranno la relazione tra esseri umani e animali.

In particolare, in Inghilterra, tra Cinque, Sei e Settecento, i maltrattamenti verso gli animali erano molto diffusi. Esiste vasta documentazione sul tasso di crudeltà manifestato nei confronti degli animali; nel Seicento il filosofo John Locke si sente in dovere di fare un appello affinché l'educazione dei bambini venga modificata, perché essi, fino dall'età scolare, erano invitati, proprio all'interno della scuola, a compiere atti crudeli nei confronti degli animali; si trattava di crudeltà gratuite, per cui i piccoli animali venivano uccisi per diventare "bottino" da portare a casa. D'altra parte, nel Settecento avviene quello che si può definire un "ingentilimento dei costumi" della società inglese che riguardò soprattutto le classi più abbienti, borghesia e aristocrazia, ma purtroppo non toccò le classi popolari, che continuarono in questo tipo di atteggiamento verso gli animali e in particolare verso il bestiame, la tipologia di animali più maltrattata.

Alla fine del Settecento Jeremy Bentham fu tra i primi pensatori a porre il problema della considerazione etica degli animali in un periodo favorevole all'estensione dei diritti ad altri soggetti, come donne e schiavi, basandosi sul riconoscimento della loro sofferenza. Nell'*Introduzione ai principi della morale e della legislazione* scrisse:

> Verrà il giorno in cui il resto degli esseri animali potrà acquisire quei diritti che non gli sono mai stati negati se non dalla mano della tirannia. I francesi hanno già scoperto che il colore nero della pelle non è un motivo per cui un essere umano debba essere irrimediabilmente abbandonato ai capricci di un torturatore. Si potrà un giorno giungere a riconoscere che il numero delle gambe, la villosità della pelle o la terminazione dell'osso sacro sono motivi egualmente insufficienti per abbandonare un

[1] Voltaire, *Dictionnaire philosophique*, s.v. *Bêtes*.

> essere sensibile allo stesso destino. Che altro dovrebbe tracciare la linea invalicabile? La facoltà della ragione, o forse quella del linguaggio? Ma un cavallo o un cane adulti sono senza paragone animali più razionali, e più comunicativi, di un bambino di un giorno, o di una settimana, o persino di un mese. Ma anche ammesso che fosse altrimenti, cosa importerebbe? Il problema non è: "Possono ragionare?", né: "Possono parlare?", ma: "Possono soffrire?".[2]

La grande novità sta nella domanda "Possono soffrire?" che, effettivamente, segna proprio un cambio culturale nel modo di guardare agli animali, da quel momento e nei secoli successivi.

Nel 1792 venne pubblicato *Rivendicazione dei diritti delle donne* di Mary Wollstonecraft, la quale sostenne, contro l'opinione prevalente della sua epoca, che le donne non sono inferiori agli uomini per natura ma è la loro educazione che le pone in condizione di inferiorità nella società. Auspicò una partecipazione femminile alla vita politica e sociale, fuori dal solo ambito familiare, di cui godevano in rari casi.

Nello stesso anno Thomas Taylor, filosofo aristotelico fortemente contrario all'emancipazione femminile, rispondeva provocatoriamente con il saggio *Rivendicazione dei diritti dei bruti* nel quale sosteneva che se si fossero riconosciuti diritti alle donne, allora si sarebbe dovuto riconoscerli anche agli animali. Pensava di risultare provocatorio, di suscitare sconcerto o ilarità, proprio come divertito e sconcertato era evidentemente lui stesso davanti all'ipotesi che le donne potessero aspirare a diventare portatrici di diritti.

Nel titolo della prima opera leggiamo che la parola "diritti" è accostata alla parola "donne", mentre nel secondo la parola "diritti" è associata ai bruti, agli animali. Quindi la provocazione, da parte dell'autore, apre una nuova strada perché suggerisce – anche se lui lo nega apertamente – che la parola "diritto" possa in qualche modo riguardare anche gli animali.

Nell'Ottocento finalmente la parola "diritto" diventa sinonimo di legge, di norma con cui cominciare a regolare i rapporti con gli animali. Nel 1822 soprattutto con il Martin's Act – Martin era il nome del politico che lo promosse – finalmente si cerca di stabilire una norma per

[2] J. Bentham, *Introduzione ai principi della morale e della legislazione*, pp. 421-422.

tutelare il bestiame e proibire i combattimenti tra animali. In Inghilterra, nel 1824, nasce una Società per la prevenzione contro la crudeltà verso gli animali; nel 1847 nasce la Società Vegetariana. Quindi il paese che era stato, come abbiamo visto, nei secoli precedenti un esempio documentato di crudeltà verso gli animali, diventa il paese di maggiore apertura e sensibilità sul tema.

Ne abbiamo un'ulteriore prova alla fine del XIX secolo quando Henry S. Salt, pensatore inglese amico di Gandhi, scrive *I diritti degli animali*, un testo rivoluzionario nel quale sostiene che, se anche gli animali non possono rivendicare i loro diritti in maniera esplicita, ciò non significa che non li possiedano. Salt è il filosofo inglese che ha sviluppato una specifica ideologia animalista, riconducibile a varie tradizioni di pensiero, come l'utilitarismo benthamiano. Secondo Salt è compito dell'umanità riconoscere e rispettare gli animali. Infatti, provare solo pietà e compassione è limitante perché sottovaluta tutto quello che potremmo fare per gli animali e impedisce una dimensione di giustizia universale che vada oltre al senso di pietà.

Nel Novecento la "questione animale" è arrivata all'attenzione della ricerca filosofica e del grande pubblico in occasione della pubblicazione nel 1975 di *Liberazione animale* di Peter Singer. Si tratta di un'opera fondamentale che si presta a diverse chiavi di lettura. Il testo è una vibrante denuncia delle condizioni degli animali nel sistema economico e produttivo occidentale, con un resoconto delle agghiaccianti condizioni in cui vengono a trovarsi gli animali sfruttati da esseri umani convinti di poterli utilizzare liberamente per i propri scopi. Per questo motivo *Liberazione animale* è diventato una sorta di "manifesto programmatico" che ha ispirato la nascita di molteplici forme di attivismo in tutto il mondo, è un invito all'azione, alla liberazione degli oppressi non umani.

Lo scopo del libro è quello di mostrare la necessità di un nuovo movimento di liberazione che, dopo quelli per la liberazione di neri, omosessuali, Indiani d'America o dalle discriminazioni sessuali, si occupi degli animali in quanto oggetto di pregiudizi umani. Singer ritiene che il principio etico si cui si fonda l'eguaglianza tra gli uomini si debba estendere anche agli animali. Critica, inoltre, il pregiudizio chiamato "specismo" che, violando il principio di uguaglianza, conduce a operare delle discriminazioni tra il modo di trattare gli esseri umani e quello di trattare gli animali. L'idea che "gli umani vengono prima" e che nessu-

na questione riguardante gli animali sia comparabile non solo è indice di un atteggiamento specista ma diventa anche una scusa per non fare nulla né per gli uni né per gli altri. Per confutare la tesi secondo la quale soltanto gli esseri dotati di ragione e capaci di usare il linguaggio sono soggetti morali Singer fa ricorso all'argomento dei "casi marginali". Tale argomento mette in discussione l'idea per cui l'attribuzione dello status morale dipende dal possesso di facoltà superiori come la coscienza di sé, la razionalità o l'uso del linguaggio. L'argomento evidenzia come la mancanza di tali capacità non sia sufficiente per negare il rispetto morale ad esseri umani quali, ad esempio, gli individui gravemente disabili dal punto di vista mentale. Alla luce di tale constatazione, l'argomento sottolinea l'incoerenza di chi attribuisce status morale ad esseri umani privi di capacità superiori e, contemporaneamente, lo nega ad animali non umani egualmente privi di tale facoltà. Pertanto, se riteniamo che l'essere umano sia superiore perché possiede determinate caratteristiche cadiamo in contraddizione nel momento in cui consideriamo l'essere umano come moralmente superiore pur in assenza di queste caratteristiche e invece consideriamo l'animale sempre e comunque inferiore pur in presenza delle stesse caratteristiche. Un bovino adulto, per fare un esempio, è assai più intelligente e cosciente di un essere umano in coma vegetativo. Stando dunque alla giustificazione che, secondo Singer, lo specismo offre per sostenere la superiorità degli esseri umani, dovremmo nutrire maggiore considerazione morale sia per il bovino che per l'umano.

Nonostante le azioni indecenti messe in atto dagli esseri umani verso gli animali siano numerose, Singer si sofferma su due forme di comportamento ispirate allo specismo; in particolare, la sperimentazione sugli animali e l'allevamento di animali a scopo alimentare perché esse hanno a che fare con le politiche dei governi e con le nostre abitudini alimentari. Nel primo caso rivendica l'importanza di un'azione politica incisiva e non risparmia critiche a varie associazioni protezionistiche, mentre per il settore industriale che produce carne per l'alimentazione umana si schiera a favore di una scelta vegetariana, pur consapevole degli interessi in gioco.

Il pensiero di Peter Singer ha contribuito a sensibilizzare l'opinione pubblica nel mondo definito "avanzato" in cui distinguiamo almeno quattro principali tipi di relazioni che ci legano agli animali: lo sfruttamento, l'utilizzo, la cooperazione e il rapporto personalizzato.

Nello sfruttamento troviamo tutte quelle relazioni in cui gli animali vengono utilizzati in maniera puramente strumentale con totale asimmetria sia sul piano del potere sia per la considerazione degli interessi. Non si può parlare di vera e propria interazione perché gli animali sono mere risorse materiali e strumentali. La loro vita non ha alcun valore e il loro benessere ha scarsa rilevanza morale intrinseca. Tipici esempi di tale contesto sono le condizioni degli animali negli allevamenti intensivi o il loro uso per combattimenti in competizioni cruente.

I rapporti di utilizzo sono quelli in cui gli animali vengono utilizzati al fine di ottenere un certo fine senza che esso sia conforme agli interessi e ai caratteri etologici dell'animale. A differenza dei rapporti di sfruttamento, in questo caso il tema del benessere degli animali è preso in qualche considerazione ma in forma decisamente subordinata rispetto agli interessi umani. In questo contesto gli animali forniscono trasporto, cibo, soggetti per esperimenti scientifici.

Nei rapporti di cooperazione esseri umani e animali interagiscono con modalità che permettono di perseguire uno scopo, come controllare un gregge, svolgere compiti di vigilanza o fornire una guida a persone non vedenti o con disabilità. Nel caso di attività definite di "pet therapy" alcuni animali, come cani e cavalli in particolare, svolgono ruoli terapeutici nei confronti di persone con patologie fisiche e/o psichiche. In questi casi, a seconda del modo in cui vengono coinvolti gli animali si può pensare anche a rapporti di uso o di relazioni individualizzate in base a una trasformazione del rapporto stesso ma dove la soglia di ammissibilità è relativa al rispetto dell'etologia dell'animale.

Nel caso degli animali da laboratorio ci troviamo in quello che, filosoficamente, si definisce il dilemma morale: da un lato siamo consapevoli che la ricerca serve per nuove cure utili, se non addirittura indispensabili, per patologie umane e quindi gli animali devono essere usati. Al contrario salvaguardare l'interesse dell'animale vorrebbe dire rinunciare a dati che forniscono importanti informazioni per la nostra salute. Di fronte a questa situazione dilemmatica, nel 1959 William Russell e Rex Burch, rispettivamente uno zoologo e un microbiologo britannici, misero a punto un approccio per procedure più umane per la sperimentazione animale.

Venne così elaborato il principio delle 3R (*Replacement*, *Reduction*, *Refinement*).

*Replacement* significa "sostituzione". Quando è possibile ottenere gli stessi risultati è opportuno sostituire gli animali con metodi alternativi. Il *replacement* può essere parziale (*relative replacement*) o totale (*absolute replacement*). Un esempio del primo caso è la sostituzione di una specie animale con un'altra caratterizzata da un sistema nervoso meno complesso. Il secondo caso invece è la completa sostituzione del modello animale, ovvero nessun animale viene impiegato nel protocollo sperimentale, con un metodo alternativo come l'uso di colture cellulari o di modelli computerizzati.

*Reduction* è il concetto che prescrive la "riduzione" del numero di animali impiegati, tale comunque da ottenere una quantità di dati numericamente significativi. Nell'idea originale la riduzione doveva avvenire semplicemente raccogliendo il maggior numero possibile di dati e informazioni da ciascun caso di studio.

*Refinement* significa "rifinire". Questa azione viene intrapresa quando si è già compiuto ogni sforzo per trovare un'alternativa al modello animale e per ridurre il numero di vite utilizzate. Rifinire significa quindi ridurre il più possibile il disagio degli animali in laboratorio.

Questa definizione, generalmente valida ancora oggi, ha tuttavia subìto una serie di successive modifiche grazie ai recenti progressi nell'ambito della scienza del benessere animale e nel campo della filosofia morale, progressi che hanno informato e reso più stimolante il dibattito sui diritti degli animali.

Dopo aver dato spazio a un breve, e necessariamente incompleto, *excursus* sulla relazione tra essere umano e animali nel corso dei secoli alla ricerca di "intrecci" tra le nostre specie è doveroso soffermarsi sul tema dei "diritti" agli animali, molto dibattuto ma fondamentale per indagare gli "intrecci" nel mondo moderno.

Nel 1983 il filosofo americano Tom Regan pubblica *I diritti animali* in cui tenta di formulare una teoria filosofica di riferimento entro la quale collocare gli aspetti morali che toccano i nostri rapporti con gli animali. Come ben evidenziato da Salvatore Veca nell'introduzione al testo "la teoria di Regan è una teoria dei diritti morali. Essa è basata sull'idea centrale per cui qualsiasi individuo, animale umano o non umano, ha diritto a eguale rispetto in quanto è egualmente dotato di 'valore inerente'". Lo stesso Regan spiega che l'obiettivo principale dell'opera è quello di sostenere la causa dei diritti degli animali, ma

non è il solo poiché "non è in alcun modo possibile sostenere la causa del riconoscimento dei diritti degli animali senza sostenere la causa dei diritti degli esseri umani"; e questo, sottolinea Regan, dovrebbe mettere a tacere tutti coloro che definiscono come "antiumani" i sostenitori dei diritti degli animali:

> Essere "per gli animali" non significa essere "contro l'umanità". Esigere che gli altri trattino giustamente gli animali significa chiedere per essi né più né meno di quel che si chiede per qualsiasi essere umano: che siano trattati con giustizia.[3]

Il filosofo americano, dunque, elabora una teoria dei diritti fondata sull'idea che gli individui, siano uomini o animali, hanno valore in sé, un valore "inerente" che esula dai vantaggi che si possono trarre dal loro sfruttamento, un valore che è "indipendente dalle valutazioni o dai desideri, dagli interessi o dalle preferenze di altri".

L'approccio dei diritti si è affermato come il paradigma dominante dell'etica animale. Nonostante l'ampiezza dello spettro teorico anche l'approccio dei diritti deve affrontare formidabili obiezioni teoriche, oltre che la resistenza del senso comune diffuso che vorrebbe continuare a difendere la priorità umana.

Quando capita di parlare dei diritti degli animali viene obiettato che pretendere il riconoscimento di diritti in capo agli animali sia prematuro, considerando lo stato miserevole nel quale versano i diritti umani. Questo è il principale argomento addotto da chi è contrario al riconoscimento di diritti agli animali, ma non è l'unico.

Secondo molti la parola "diritto" si lega alla parola "dovere", e doveri non possono essere chiesti agli animali. Quindi diritti e doveri possono essere solo riferiti al consorzio umano, non possiamo applicarli come categorie morali ad altre specie viventi.

Sull'altro fronte, invece, chi è favorevole a riconoscere diritti agli animali sostiene che non è prematuro farlo, anzi è già abbastanza tardi, avremmo dovuto iniziare prima. Allargare la sfera morale in un cerchio più ampio, dove possono convivere gli esseri umani e gli animali, non toglie nulla ai primi. In caso contrario corriamo il rischio di ricadere in

[3] Tom Regan, *I diritti animali*, p. 20.

una prospettiva antropocentrica immaginando una sorta di ordine di priorità: i primi sono gli esseri umani e dietro ci sono quelli che hanno meno diritti, gli animali.

Questo potrebbe generare un'altra discriminazione pericolosa perché si potrebbe trasferire anche alla comunità umana. E allora ci sarebbero prima i maschi bianchi, poi quelli di colore; ci sono prima gli eterosessuali e poi gli omosessuali; e tutta una serie di discriminazioni di questo tipo che coinvolgerebbero altri gruppi umani.

Questa discussione sui diritti agli animali, iniziata nell'Ottocento e proseguita per tutto il Novecento, non ha trovato ancora un esito certo ma procede con l'evolversi della nostra società. Al di fuori del dibattito filosofico, in una società democratica, si possono utilizzare strumenti per tentare di dare concreta attuazione alla teoria dei diritti agli animali.

La tutela dell'ambiente e degli animali è entrata nella Costituzione italiana l'8 febbraio 2022 quando si è concluso l'iter parlamentare per approvare le nuove modifiche agli articoli 9 e 41. All'articolo 9 della Costituzione italiana è scritto: "La legge dello Stato disciplina i modi e le *forme di tutela degli animali*". All'articolo 41: "L'iniziativa economica privata è libera. Non può svolgersi in contrasto con l'utilità sociale o in modo da recare danno alla salute, all'*ambiente*, alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana".

Tale risultato mette in evidenza la sensibilità verso gli animali all'interno di una più vasta attenzione all'ambiente di cui essi fanno parte e sembra conseguente alla presa d'atto che, al di fuori dei tribunali, sempre più forti sono le pressioni dei movimenti e delle associazioni sociali che chiedono una sola cosa: tutele precise per gli animali. Pertanto una copertura costituzionale ai diritti animali, viste le copiose norme contrapposte in materia, risulta oggi doverosa, in quanto destinata a cristallizzare principi sociali di fatto già esistenti e potrebbe così supportare gli operatori giuridici nella serena applicazione delle norme già in vigore; tali norme vanno tutte nella direzione di una sempre maggiore tutela degli animali quali esseri senzienti, e sono utili per orientare il legislatore nazionale verso l'abolizione di attività ormai obsolete e inaccettabili che causano morte e dolore agli animali.

Infine, in questo nostro percorso non si può evitare una riflessione dettata dall'attualità in cui hanno fatto irruzione scenari di guerra. Come

convivono e hanno convissuto uomini e animali nei teatri di guerra? Quali intrecci hanno legato le nostre specie in un comune tragico destino?

Per tentare di rispondere si deve tornare al passato anche molto lontano. Eserciti antichi, come quello romano, addestravano cani molossi come guardiani degli accampamenti, sciami di api venivano lanciati contro l'esercito avversario, come armi batteriologiche *ante litteram*.

Il cavallo, dall'antichità a oggi, è stato un costante protagonista delle guerre scatenate dagli esseri umani: pensiamo alla lunga storia della cavalleria. Ma la storia del rapporto tra uomo e cavallo non è solo storia di eserciti. La diade cavallo-cavaliere è molto rappresentata, oltre che con statue equestri, anche in ambito pittorico, dove spesso il cavallo rampante esprime quella bellezza e quella forza che nobilitano l'immagine del suo cavaliere. Anche la letteratura ci parla di questo animale. Possiamo leggere delle belle pagine del famosissimo *Niente di nuovo sul fronte occidentale*, in cui E.M. Remarque descrive l'agonia dei cavalli feriti durante la Prima guerra mondiale. Lo scrittore parla al lettore attraverso un suo personaggio con queste parole: "Vorrei sapere che colpa hanno loro. Abbiamo fatto nella guerra qualcosa di tremendo, che è coinvolgere anche gli animali nella nostra tragedia".

Durante la Prima guerra mondiale, accanto ai soldati non c'erano solo muli che si inerpicavano sui sentieri, in qualsiasi condizione climatica, trascinando some pesanti, pezzi d'artiglieria, viveri. È meno noto il fatto che il cane è stato l'animale che ha dato un enorme contributo alla guerra; tutti gli eserciti in campo selezionavano le razze canine alla ricerca di quelle ritenute più idonee per i compiti assegnati. Il cane è stato utilizzato raramente come animale d'attacco perché, per utilizzarlo con questa finalità, sarebbe stato indispensabile usare sistemi violenti. In realtà si utilizzavano tipi di addestramento con metodi premiali che non infliggessero sofferenza all'animale. Furono proprio i militari italiani a mettere a punto tecniche molto efficaci di addestramento, diffuse anche presso eserciti stranieri. L'utilizzo del cane in questo conflitto fu molto vario: dal cane cacciatopi al cane guida, dal cane da trasporto al cane soldato. Una parola va spesa sul cane sanitario addestrato per individuare soldati vivi in mezzo a cumuli di cadaveri e permettere, così, il loro recupero e salvataggio.

Negli odierni scenari di guerra, come il conflitto in Ucraina, molte persone in fuga sono riuscite a portare con sé gli animali domestici. Na-

turalmente non tutti hanno potuto farlo. Molti animali sono stati purtroppo abbandonati e sono morti perché, se lasciati soli, sono condannati al randagismo o poi alla morte. Le associazioni animaliste europee, o più prossime alle zone di guerra, sono fonte di molte informazioni sulla condizione degli animali. La loro costante azione è stata quella di aiutarli, rifocillarli, ma non solo; si sono prodigate per lo smaltimento e la semplificazione di pratiche burocratiche necessarie perché questi animali "fuggiaschi", che entravano nell'Unione Europea, avevano bisogno di uno "status giuridico".

Appare chiaro, in conclusione, che parlare degli animali e del nostro rapporto con loro non è argomento "minore", perché parlare degli animali è parlare dell'essere umano, dato l'intreccio che ci lega a loro in maniera indissolubile non solo sul piano morale. Gli "intrecci", complessi e indissolubili, con gli animali ci hanno reso ciò che siamo sul piano della nostra stessa evoluzione.

*Appendice*
*Riconoscimento dei diritti degli animali*

L'atto ufficiale che segna la nascita della considerazione morale delle specie animali è la "Dichiarazione dei Diritti dell'Animale", proclamata di fronte all'Unesco dalle leghe protezioniste europee il 15 ottobre 1978 presso la sede di Parigi. Ecco il testo:

DICHIARAZIONE UNIVERSALE DEI DIRITTI DELL'ANIMALE
Unesco, Parigi, 15 ottobre 1978

Premessa:
Considerato che ogni animale ha dei diritti; considerato che il disconoscimento e il disprezzo di questi diritti hanno portato e continuano a portare l'uomo a commettere crimini contro la natura e contro gli animali; considerato che il riconoscimento da parte della specie umana del diritto all'esistenza delle altre specie animali costituisce il fondamento della coesistenza delle specie nel mondo; considerato che genocidi sono perpetrati dall'uomo e altri ancora se ne minacciano; considerato che il rispetto degli animali da parte degli uomini è legato al rispetto degli uomini tra loro; considerato che l'educazione deve insegnare sin dall'infanzia ad osservare,

comprendere, rispettare e amare gli animali.
Si proclama:
Articolo 1. Tutti gli animali nascono uguali davanti alla vita e hanno gli stessi diritti all'esistenza.
Articolo 2. a) Ogni animale ha diritto al rispetto; b) l'uomo, in quanto specie animale, non può attribuirsi il diritto di sterminare gli altri animali o di sfruttarli violando questo diritto. Egli ha il dovere di mettere le sue conoscenze al servizio degli animali; c) ogni animale ha diritto alla considerazione, alle cure e alla protezione dell'uomo.
Articolo 3. a) Nessun animale dovrà essere sottoposto a maltrattamenti e ad atti crudeli; b) se la soppressione di un animale è necessaria, deve essere istantanea, senza dolore, né angoscia.
Articolo 4. a) Ogni animale che appartiene ad una specie selvaggia ha il diritto di vivere libero nel suo ambiente naturale terrestre, aereo o acquatico e ha il diritto di riprodursi; b) ogni privazione di libertà, anche se a fini educativi, è contraria a questo diritto.
Articolo 5. a) Ogni animale appartenente ad una specie che vive abitualmente nell'ambiente dell'uomo ha diritto di vivere e di crescere secondo il ritmo e nelle condizioni di vita e di libertà che sono proprie della sua specie; b) ogni modifica di questo ritmo e di queste condizioni imposta dall'uomo a fini mercantili è contraria a questo diritto.
Articolo 6. a) Ogni animale che l'uomo ha scelto per compagno ha diritto ad una durata della vita conforme alla sua naturale longevità; b) l'abbandono di un animale è un atto crudele e degradante.
Articolo 7. Ogni animale che lavora ha diritto a ragionevoli limitazioni di durata e intensità di lavoro, ad un'alimentazione adeguata e al riposo.
Articolo 8. a) La sperimentazione animale che implica una sofferenza fisica o psichica è incompatibile con i diritti dell'animale sia che si tratti di una sperimentazione medica, scientifica, commerciale, sia d'ogni altra forma di sperimentazione; b) le tecniche sostitutive devono essere utilizzate e sviluppate.
Articolo 9. Nel caso che l'animale sia allevato per l'alimentazione deve essere nutrito, alloggiato, trasportato e ucciso senza che per lui ne risulti ansietà e dolore.
Articolo 10. a) Nessun animale deve essere usato per il divertimento dell'uomo; b) le esibizioni di animali e gli spettacoli che utilizzano degli animali sono incompatibili con la dignità dell'animale.
Articolo 11. Ogni atto che comporti l'uccisione di un animale senza necessità è un biocidio, cioè un delitto contro la vita.

Articolo 12. Ogni atto che comporti l'uccisione di un gran numero di animali selvaggi è un genocidio, cioè un delitto contro la specie; b) l'inquinamento e la distruzione dell'ambiente naturale portano al genocidio.
Articolo 13. a) L'animale morto deve essere trattato con rispetto; b) le scene di violenza di cui gli animali sono vittime devono essere proibite al cinema e alla televisione salvo che non abbiano come fine di mostrare un attentato ai diritti dell'animale.
Articolo 14. a) Le associazioni di protezione e di salvaguardia degli animali devono essere rappresentate a livello governativo; b) i diritti dell'animale devono essere difesi dalla legge come i diritti dell'uomo.

La Dichiarazione Universale dei Diritti dell'Animale, redatta dalla Lega Internazionale dei Diritti dell'Animale, è stata presentata a Bruxelles il 26 gennaio 1978 e sottoscritta da personalità del mondo filosofico, giuridico, scientifico; successivamente è stata proclamata a Parigi, presso la sede dell'Unesco il 15 ottobre 1978, presenti Remy Chauvin, etologo e scrittore, Alfred Kastler, premio Nobel per la fisica, S.E. Hamza Boubakeur, rettore dell'Istituto Mussulmano della Moschea di Parigi, il prof. Georges Heuse. La delegazione italiana era costituita dalla dr. Laura Girardello, dal dr. Giovanni Peroncini, dal prof. Mario Girolami e dalla prof. Clara Genèro.

*Bibliografia*

Allegri F. *Gli animali e l'etica*. Milano: Mimesis; 2015.
Aristotele. *Opere biologiche*. Torino: Utet; 1971.
Barreca G. *Animali non umani: Responsabilità e diritti. Un percorso storico filosofico*. Milano: Unicopli; 2003.
Battaglia L. *Etica e diritti degli animali* Roma-Bari: Universale Laterza; 1997.
Bentham J. *Introduzione ai principi della morale e della legislazione* (1789). Torino: Utet; 1998.
Castignone S., Lombardi Vallauri L. (a cura di). *Trattato di Biodiritto. La "Questione animale"*. Milano: Giuffrè; 2012.
Coetzee J.M. *La vita degli animali*. Milano: Adelphi; 2008.
*Dichiarazione universale dei diritti dell'animale*. Parigi: Unesco; 1978.
Donaldson S., Kymlicka W. *Zoopolis. A Political Theory of Animal Rights*. Oxford-New York: Oxford University Press; 2011.
Francesco d'Assisi. *Ammonimento V*. In: *Fonti Francescane*. Assisi: Consorzio Editrici Francescane, 1977.

Francione G.L. *Animals as Persons. Essays on the Abolition of Animal Exploitation*. New York: Columbia University Press; 2008.
Legge di Revisione Costituzionale n. 1 del 2022, di modifica agli art. 9 e 41 in tema di tutela dell'ambiente.
Lombardi Vallauri L. *Animali: istruzioni per il non uso*. Credere oggi (2007) 27.
Massaro A. *Alle origini dei diritti degli animali* Milano: Edizioni Universitarie di Lettere Economia Diritto; 2018.
Malebranche N. *Colloqui sulla metafisica* (1688). Bologna: Zanichelli; 1963.
Mill J.S. *La Libertà. L'Utilitarismo. L'asservimento delle donne*. Milano: Rizzoli; 1999.
Orwell G. *La fattoria degli animali*. Milano: Arnoldo Mondadori; 1947.
Plutarco. *Gli animali usano la ragione*. In: *Del mangiar carne (Trattati sugli animali)*. Milano: Adelphi; 2001.
Pollo S. *L'etica animale*. APhEx. Portale italiano di filosofia analitica. Giornale di filosofia network (2011) 13.
Pollo S. *Umani e animali: questioni di etica*, Roma, Carocci, 2016.
Pollo S. *Progresso scientifico e progresso morale. Sentimentalismo*, *oggettività e scienza*. Rivista di filosofia (2016) 2: 219-239.
Pollo S. *Manifesto per un animalismo democratico*. Roma: Carocci; 2021.
Regan T. *Animal Rights, Human Wrongs. An Introduction to Moral Philosophy.* Oxford: Rowman & Littlefield; 1980.
Regan T. *Diritti animali, obblighi umani*. Torino: Gruppo Abele; 1987.
Regan T. *I diritti animali*. Milano: Garzanti; 1990.
Remarque E.M. *Niente di nuovo sul fronte occidentale*. Milano: Arnoldo Mondadori; 1931.
Russell W., Burch R. *The Principles of Humane Experimental Technique*. London: Methuen & Co.; 1959.
Ryder R.D, *Victims of Science. The Use of Animals in Research*. London: Davis-Poynter; 1975.
Safran Foer J. *Se niente importa. Perché mangiamo gli animali?* Parma: Guanda; 2010.
Salt H.S. *I diritti degli animali* (1892). Napoli: Edizioni Scientifiche Italiane; 2015.
Singer P. *The Expanding Circle: Ethics and Sociobiology*. New York: Farrar, Straus & Giroux; 1981.
Singer P. *Etica pratica*. A cura di S. Maffettone. Napoli: Liguori Editore; 1989.
Singer P. *Liberazione animale*. Milano: il Saggiatore; 2009.
Voltaire (F.M. Arouet). *Dictionnaire philosophique*, s.v. *Bêtes*. Trad. it. Milano: Mondadori; 1964.
Zuolo F. *Etica e animali. Come è giusto trattarli e perché*. Bologna: Il Mulino; 2018.

**Paolo Guidetti***

# *The Mediterranean Sea: Ecology, Biodiversity Conservation, and Sustainability*

**Abstract**: The Mediterranean Sea, with its high biodiversity and numerous endemic species, is one of the most human-impacted marine regions in the world. Pollution, destructive fishing, coastal urbanisation and climate change have severely compromised its health. To protect it, Marine Protected Areas (MPAs) are key tools, as they promote conservation and the resilience of marine ecosystems along with local small-scale fisheries. The success of MPAs depends on the enforcement of regulations and cooperation between authorities and fishers. The effectiveness of MPAs, as shown by studies, is linked to proper management and fishers' involvement in the decision-making process.

**Keywords**: marine protected areas; reserve effect; sustainability; equity; ethics.

**Sommario:** *Il Mar Mediterraneo: ecologia, conservazione della biodiversità e sostenibilità*
Il Mar Mediterraneo, con la sua elevata biodiversità e numerose specie endemiche, è una delle regioni marine più impattate dall'uomo al mondo. L'inquinamento, la pesca distruttiva, l'urbanizzazione costiera e i cambiamenti climatici hanno gravemente compromesso la sua salute. Per proteggerlo le Aree Marine Protette (AMP) sono strumenti chiave, in quanto promuovono la conservazione e la resilienza degli ecosistemi marini insieme alla piccola pesca locale. Il successo delle AMP dipende dal rispetto delle norme e dalla cooperazione fra autorità e pescatori. L'efficacia delle AMP, come dimostrato da studi, è legata alla corretta gestione e all'inclusione dei pescatori nel processo decisionale.

**Parole chiave**: aree marine protette; effetto riserva; sostenibilità; equità; etica.

* Stazione Zoologica Anton Dohrn, Genoa Marine Centre paolo.guidetti@szn.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.415-422

*The general context*

The Mediterranean Sea is one of the largest and deepest semi-enclosed seas on Earth. It accounts for less than 1% of the global marine surface area, yet it is estimated to host between approximately 8-17,000 described marine species. Remarkably, it contributes more than 10% to global marine biodiversity and exhibits a high proportion of endemic species, *i.e.* taxa that occur exclusively within the basin (Coll *et al*. 2012).

The Mediterranean Sea and humankind share an ancient history of interaction. Indeed, the Mediterranean is among the most densely populated, urbanized, visited, fished, and exploited seas worldwide, serving as a major route for navigation as well as for the extraction of minerals and natural gas. Furthermore, it represents the marine region most heavily invaded by non-native species on a global scale (currently exceeding 1,000), a phenomenon largely driven by climate change and, in particular, the warming of its waters (Micheli *et al*. 2013).

The Mediterranean Sea also constitutes a complex mosaic with respect to the regulatory frameworks governing the management and conservation of marine spaces and resources. It is not only divided into EU (northern) and non-EU (southern and eastern) sectors, but is further partitioned according to the territorial waters belonging to the various states bordering the basin. From a historical and cultural perspective, the Mediterranean likewise represents a rich mosaic: across the centuries, major civilizations and cultures – including Greek, Roman, and Arabic – have flourished. Beyond this intricate legislative-regulatory and historical-cultural context, the Mediterranean is additionally characterized, at least in certain areas, by a complex geopolitical situation that exerts a profound influence on policies for the management and conservation of marine environments and resources.

Today, the Mediterranean Sea is subject to a considerable variety of human-induced pressures, which often generate negative effects both directly – through impacts on species and habitats – and indirectly, via environmental alterations that may trigger cascading mechanisms. These cascades, in turn, affect biological components (including resources utilized by humans) and ultimately human well-being. As an example of direct impact, one may consider all forms of de-

structive fishing, including bottom trawling, which directly affects the seabed and thus the habitats, in addition to both target species and non-commercial species that end up in the so-called "bycatch" (Lucchetti *et al*. 2021). Among the indirect impacts, particular attention must be given to the progressive warming of marine waters. Elevated temperatures have facilitated the establishment and success of numerous thermophilic species originating from the Red Sea via the Suez Canal, including the lionfish (*Pterois miles*), which is currently expanding its distribution westward and northward within the Mediterranean (Kleitou *et al*. 2021). Both direct impacts, such as fishing, and indirect ones, such as those associated with climate change, are generating significant repercussions on biodiversity, resource availability, habitat condition, and ecosystem functioning, together with detrimental effects on the provision of ecosystem services to society (Micheli *et al*. 2013). This results in an increased probability of extinction – whether total or ecological – for a number of species, particularly large-bodied animals such as sharks and marine mammals, which play crucial roles in the functioning of Mediterranean marine ecosystems (Chatzimentor *et al*. 2023). Hence arises the need to adopt solutions and instruments capable of safeguarding Mediterranean marine biodiversity from further impacts and erosion. Among the most successful tools available are Marine Protected Areas (MPAs), which constitute spatially explicit conservation measures designed to protect biodiversity, promote the health and resilience of marine ecosystems, and ultimately provide multiple benefits to society (Guidetti *et al*. 2014; Grorud-Colvert *et al*. 2021).

### *Marine Protected Areas: ecological effects and implications for small-scale local fisheries*

MPAs are classified into different categories: (1) partially protected areas (PPs), within which certain uses are prohibited while other human activities are permitted and regulated; (2) fully protected areas (FPs), within which all destructive/extractive activities are prohibited; and (3) multiple-use areas, which combine partially protected zones with fully protected zones (see Di Blasi *et al*. 2025 and references therein).

The effectiveness of conservation measures within MPAs is commonly assessed through the use of indicators such as fish fauna (Guidetti *et al*. 2014). Within the Cinque Terre MPA (Italy), for example, both the total fish biomass and the biomass of the dusky grouper (*Epinephelus marginatus*) are greater in zones A (FP) and B (PP) compared to those recorded in zone C (PP, but less strictly protected than zone B) and outside the MPA (Di Blasi *et al*. 2025). The available scientific literature also suggests that an important factor supporting conservation outcomes is the so-called "enforcement" (Guidetti *et al*. 2008), *i.e.* the level at which conservation measures are effectively implemented. In MPAs where conservation measures are strictly enforced, a recovery of fish communities and individual species populations can be observed, particularly those of commercial interest, which also correspond to high-trophic-level species that play vital roles in the balance and functioning of Mediterranean marine ecosystems. Among the indirect effects that fishing may cause there are the so-called "trophic cascades" in rocky-reef environments. This phenomenon manifests as an explosion of sea urchin populations which, released from the predatory pressure of some fish species (e.g., sea breams), increase in density and thereby cause a dramatic rise in herbivory on algal forests, ultimately leading to the desertification of rocky reefs. Within MPAs, and especially in FP zones, a recovery of predatory fish populations occurs; through the increased predatory pressure on sea urchins, their numbers decrease. This, in turn, facilitates the recovery of algal forests and, overall, the restoration of a healthy ecosystem state (Guidetti 2006).

The recovery of fish fauna within MPAs, together with more cautious management of fishing in PPs, can generate beneficial effects on local small-scale fisheries (Di Franco *et al*. 2016). This occurs because the recovery of fish fauna, for commercially important species, takes place not only through increased density but also through larger individual sizes. As a result, catches become more abundant and consist of larger individuals of commercial species. Such beneficial effects of management and conservation measures have, for example, been documented by local fishers in the Torre Guaceto MPA, in the province of Brindisi, Italy (Guidetti and Claudet, 2010).

Recent research has demonstrated that small-scale fisheries can benefit from the conservation measures implemented within MPAs

only – and most importantly – if management regulations are effectively complied with and enforced. Another critical factor is the nature of the relationship established between management authorities and small-scale fishing operators: it is essential that constructive dialogue be fostered and that fishers are meaningfully involved in decision-making processes (Di Franco *et al.* 2020). The greater the recognition and appreciation that fishers hold for the MPA, the stronger their support will be. Indeed, the perception of small-scale fishers in shaping support for MPAs is sometimes more influential than the actual abundance and recovery of fishery resources triggered by protection (Bennett *et al.* 2020; 2024).

The concept of "equity" plays a crucial role in this context, where environmental components are intrinsically linked to social dimensions. Several dimensions of equity can be identified: the "recognitional" equity, referring to the acknowledgment of fishers' roles by management authorities; the so-called "procedural" equity, which entails the establishment by management authorities of procedures that are easily understandable and implementable by small-scale fishing operators; and "distributional" equity, associated with the economic benefits generated by protection, which should be fairly distributed (Bennett *et al.* 2020). Another factor of paramount importance is the notion of "well-being", which should not be understood solely in economic terms. Well-being derived from sound conservation policies within an MPA should encompass not only economic profits but also improvements in occupational safety, social relations, decision-making power, sense of freedom and identity, and connection with nature, while simultaneously reducing distortive phenomena such as corruption and crime. In addition, effective management and conservation policies within MPAs should explicitly define access rights to fishery resources, taking into account the actual capacities of small-scale fishing operators to exercise such access (Bennett *et al.* 2024).

All the aspects previously discussed are holistically connected to the concepts of sustainability and blue economy. Both sustainability and blue economy encompass the three fundamental components that constitute their essence: the environmental, the social, and the economic dimensions (Bennett *et al.* 2019).

In conclusion, MPAs represent the foremost instrument for conservation and management policies aimed at safeguarding biodiversity and natural resources, while benefiting human societies inhabiting the

Mediterranean coasts as well as those of other seas and oceans worldwide (Sala *et al.* 2021). Their success depends on multiple factors, but central to this is the body of moral and ethical values that we adopt as a reference framework. Conservation measures, in fact, cannot be fully effective if their sole purpose is to protect and preserve what is considered "useful" to humans. It is therefore essential to embrace moral and ethical values that recognize the intrinsic worth of life itself – an absolute value akin to a Kantian categorical imperative (Kant 1875). Within such a framework, biodiversity and the life of every living being, humans included, constitute an absolute value to be protected and not subject to negotiation.

*References*

Bennett N.J., Cisneros-Montemayor A.M., Blythe J., Silver J.J., Singh G., Andrews N., Calò A., Christie P., Di Franco A., Finkbeiner E.M., Gelcich S., Guidetti P., Harper S., Hotte N., Kittinger J.N., Le Billon P., Lister J., Lopez de la Lama R., McKinley E., Scholtens J., Solås A.-M., Sowman M., Talloni-Álvarez N., Teh L.C.L, Voyer M., Sumaila U.R. *Towards a sustainable and equitable blue economy*. Nature Sustainability (2019) 1-3.

Bennett N.J., Calò A., Di Franco A., Niccolini F., Marzo D., Domina I., Dimitriadis C., Sobrado F., Santoni M.C., Charbonnel E., Trujillo M., Garcia-Charton J., Seddiki L., Cappanera V., Grbin J., Kastelic L., Milazzo M., Guidetti P. *Social equity and marine protected areas: Perceptions of small-scale fishermen in the Mediterranean Sea*. Biological Conservation (2020) 244: 108531.

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. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106328

Chatzimentor A., Doxa A., Katsanevakis S., Mazaris A.D. *Are Mediterranean marine threatened species at high risk by climate change?*. Global Change Biology (2023) 29: 1809-1821. https://doi.org/10.1111/gcb.16577

Coll M., Piroddi C., Albouy C., Ben Rais Lasram F., Cheung W.W.L., Christensen V., Karpouzi V.S., Guilhaumon F., Mouillot D., Paleczny M., Palomares M.L., Steenbeek J., Trujillo P., Watson R., Pauly D. *The Mediterranean Sea under siege: spatial overlap between marine biodiversity, cu-*

*mulative threats and marine reserves*. Global Ecology and Biogeography (2012) 21: 465-480.

Di Blasi D., Poli F., Bava S., Desiderà E., Guidetti M., Guidetti P. *Changes in rocky reef fish assemblages across a protection gradient in the NW Mediterranean Sea*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom (2025) 105: e121, 1-16.

Di Franco A., Thiriet P., Di Carlo G., Dimitriadis C., Francour P., Gutiérrez N.L., Jeudy de Grissac A., Koutsoubas D., Milazzo M., del Mar Otero M., Piante C., Plass-Johnson J., Sainz-Trapaga S., Santarossa L., Tudela S., Guidetti P. *Five key attributes can increase marine protected areas performance for small-scale fisheries management*. Scientific Reports (2016) 6: 38135.

Di Franco A., Hogg K.E., Calò A., Bennett N.J., Sévin-Allouet M.A., Esparza Alaminos O., Lang M., Koutsoubas D., Prvan M., Santarossa L., Niccolini F., Milazzo M., Guidetti P. *Improving marine protected area governance through collaboration and co-production*. Journal of Environmental Management (2020) 269: 110757.

Grorud-Colvert K., Sullivan-Stack J., Roberts C., Constant V., Horta e Costa B., Pike E.P., Kingston N., Laffoley D., Sala E., Claudet G., Friedlander A.M., Gill D.A., Lester S.E., Day J.C., Gonçalves E.J., Ahmadia G.N., Rand M., Villagomez A., Ban N.C., Gurney G.G., Spalding A.K., Bennett N.J., Briggs J., Morgan L.E., Moffitt R., Deguignet M., Pikitch E.K., Darling E.S., Jessen S., Hameed S.O., Di Carlo G., Guidetti P., Harris J.M., Torre J., Kizilkaya Z., Agardy T., Cury P., Shah N.J., Sack K., Cao L., Fernandez M., Lubchenco J. *The MPA Guide: A framework to achieve global goals for the ocean*. Science (2021) 373: 1-10.

Guidetti P. *Marine reserves reestablish lost predatory interactions and cause community changes in rocky reefs*. Ecological Applications (2006) 16 (3): 963-976.

Guidetti P., Milazzo M., Bussotti S., Molinari A., Murenu M., Pais A., Spanò N., Balzano R., Agardy T., Boero F., Carrada G., Cattaneo-Vietti R., Cau A., Chemello R., Greco S., Manganaro A., Notarbartolo di Sciara G., Russo G.F., Tunesi L. *Italian marine reserve effectiveness: does enforcement matter?* Biological Conservation (2008) 141: 699-709.

Guidetti P., Claudet J. *Co-management practices enhance fisheries in marine protected areas*. Conservation Biology (2010) 24: 312-318.

Guidetti P., Baiata P., Ballesteros E., Di Franco A., Hereu B., Macpherson E., Micheli F., Pais A., Panzalis P.A., Rosenberg A.A., Zabala M., Sala E. *Large-scale assessment of Mediterranean Marine Protected Areas effects on fish assemblages*. PLoS ONE (2014) 9 (4): e91841.

Kant I. *Groundwork of the Metaphysics of Morals*. Riga: Rigaer Verlag Ed; 1875.

Kleitou P., Hall-Spencer J.M., Savva I., Kletou D., Hadjistylli M., Azzurro E., Katsanevakis S., Antoniou C., Hadjioannou L., Chartosia N., Christou M., Christodoulides Y., Giovos I., Jimenez C., Smeraldo S., Rees S.E. *The case of lionfish (*Pterois miles*) in the Mediterranean Sea demonstrates limitations in EU legislation to address marine biological invasions*. Journal of Marine Science and Engineering (2021) 9 (3): 325.

Lucchetti A., Virgili M., Vasapollo C., Petetta A., Bargione G., Li Veli D., Brcic J., Sala A. *An overview of bottom trawl selectivity in the Mediterranean Sea*. Mediterranean Marine Science (2021) 22 (3): 566-585.

Micheli F., Halpern B.S., Walbridge S., Ciriaco S., Ferretti F., Fraschetti S., Lewison R., Nykjaer L., Rosenberg A.A. *Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: Assessing current pressures and opportunities*. PLoS ONE (2013) 8 (12): e79889.

Sala E., Mayorga J., Bradley D., Cabral R.B., Atwood T.B., Auber A., Cheung W., Costello C., Ferretti F., Friedlander A.M., Gaines S.D., Garilao C., Goodell W., Halpern B.S., Hinson A., Kaschner K., Kesner-Reyes K., Leprieur F., McGowan J., Morgan L.E., Mouillot D., Palacios-Abrantes J., Possingham H.P., Rechberger K.D., Worm B., Lubchenco J. *Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate*. Nature (2021) 592: 397-402.

**Mario Petrillo**[*]

# *Dall'uomo all'uomo, storie di plastiche e microplastiche*

**Sommario**: Per il comportamento irresponsabile dell'uomo, pochi decenni sono stati sufficienti a trasformare una risorsa preziosa in un problema ambientale planetario. Dal petrolio, formatosi in natura centinaia di milioni di anni fa nelle profondità marine e riportato in superficie da poco più di 150 anni, sono stati estratti numerosi tipi di plastica di sintesi. Differenti per formula, hanno trovato ottima applicazione in ogni campo delle attività umane ma, se dispersi nell'ambiente, non si degradano, come accade alle materie plastiche naturali, e rimangono in circolo come macro- e micro-plastica, fino a interagire drammaticamente anche all'interno degli organismi viventi, uomo compreso.

**Parole chiave**: polimeri; petrolio; microplastiche; bioaccumulo; neurotossicità.

*From Man to Man: Stories of Plastics and Microplastics*

**Abstract**: Due to the irresponsible behavior of man, a few decades have been enough to transform a precious resource into a global environmental problem. From oil, formed in nature hundreds of millions of years ago in the depths of the sea and brought to the surface just over 150 years ago, numerous types of synthetic plastic have been extracted. Different in formula, they have found excellent application in every field of human activity but, if dispersed in the environment, they do not degrade, as happens to natural plastic materials, and remain in circulation as macro- and microplastic, to the point of interacting dramatically even within living organisms, including humans.

**Keywords**: polymers; petroleum; microplastics; bioaccumulation; neurotoxicity.

---

[*] già Professore nell'Università degli Studi di Genova mario.petrillo@alice.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.423-440

Già, la plastica, inventata, prodotta, utilizzata e infine dispersa nell'ambiente dall'uomo… all'uomo ritorna come minaccia.

Poco più di cento anni fa l'uomo ha iniziato a ricavare economicamente dal petrolio le molecole dalla cui polimerizzazione derivano gli ormai numerosi e onnipresenti diversi tipi di plastica, più correttamente definiti "polimeri" sintetici.

Ma i polimeri non sono solo sintetici: semplificando, dal punto di vista chimico si definiscono polimeri sostanze organiche, cioè contenenti carbonio, costituite da macromolecole formate da catene di piccole unità ripetute, chiamate monomeri. In natura i monomeri sono rappresentati dagli amminoacidi, costituenti le proteine (una fra tutte: la caseina). Altri monomeri naturali, ancora più semplici, sono i carboidrati, cosiddetti perché formati solo da carbonio e acqua $(CH_2O)_n$ e le materie plastiche che derivano dalla polimerizzazione di questi zuccheri semplici sono i polisaccaridi (uno su tutti: la cellulosa).

Il chimico scozzese Thomas Graham nel 1861 coniò, per indicare i polimeri naturali, il termine "colloide" (cioè, "simile alla colla") a causa dell'alta viscosità delle loro soluzioni e della lentezza di diffusione nei solventi (Flory 1953).

Sono naturali alcuni polimeri utilizzati fin dai tempi antichi per diversi scopi. Si tratta di resine di origine animale, come ad esempio il corno dei bovini, il carapace delle tartarughe, l'avorio degli elefanti e la gommalacca, oppure di origine vegetale, come l'ambra, la gomma arabica e il caucciù.

Il corno è composto principalmente di cheratina, proteina filamentosa ricca di zolfo: scaldandolo assume una plasticità tale da poterlo appiattire o piegare fino all'indurimento finale una volta raffreddato.

Anche il carapace è composto principalmente di cheratina e risulta nello stesso tempo flessibile e rigido.

L'avorio delle zanne degli elefanti è composto da dentina, tessuto connettivo mineralizzato costituito da una proteina strutturale, il collagene, che forma una vera e propria impalcatura di sostegno che ingloba cristalli di idrossiapatite e si solidifica in tubuli che conferiscono porosità ed elasticità alla materia.

La gommalacca è un polimero naturale, sempre di origine animale, secreto dalle larve di un emittero (*Kerria lacca*). Queste succhiano la linfa di una pianta ospite restando inglobate all'interno di concrezioni

di lacca che rimangono ad avvolgere i rami. Con la sigla E904 è utilizzata per lucidare pillole e caramelle, ma è più comune l'utilizzo nella lucidatura di mobili di pregio.

Tra i polimeri naturali di origine vegetale è nota l'ambra, resina (principalmente acido succinico) prodotta da diverse specie di conifere estinte (ad esempio *Pinus succinifera*) ed emessa per riparare ferite sul tronco e sui rami. Piccoli artropodi, presenti nelle vicinanze dei tronchi, potevano rimanere imprigionati prima della solidificazione e successiva fossilizzazione della resina.

Come l'ambra, anche la gomma arabica è una particolare resina vegetale emessa per rimarginare ferite superficiali sui rami, in questo caso di due acacie subsahariane (*Acacia senegal* e *Acacia seyal*). Si tratta di una miscela di polisaccaridi e glicoproteine, utilizzata come eccipiente alimentare E414 in farmaceutica e cosmetica.

E infine, in questa breve e non esaustiva lista di polimeri naturali, è da ricordare il caucciù, o gomma naturale: si tratta di idrocarburo polimerico (poliisoprene 1,4-cis) estratto come lattice da diverse piante tropicali (ad es. *Hevea brasiliensis*). La vulcanizzazione, cottura a vapore in presenza di zolfo, produce legami-ponte fra le molecole conferendo capacità elastiche.

Si tratta dunque di sostanze biologiche adatte a essere modellate e pertanto "plastiche" a tutti gli effetti, assolutamente simili nel comportamento alle resine sintetiche, quelle ormai oggi a noi più familiari, ricavate principalmente dal petrolio – anch'esso peraltro di origine naturale.

Tra i due grandi gruppi di resine, naturali e sintetiche, si inseriscono le resine artificiali, derivate ancora da polimeri naturali, come

- gli zuccheri (la cellulosa dei vegetali) e
- le proteine (la caseina del latte),

che vengono sottoposti prima a particolari operazioni di dissoluzione e rigenerazione e in seguito a trattamenti finali di filatura, calandratura, laminazione o stampaggio, che restituiscono il prodotto finito.

La storia chimica della plastica non inizia con il petrolio, la cui prima estrazione dal sottosuolo è avvenuta in Pennsylvania nel 1859 ad opera di Edwin Drake (dieci anni dopo nasce la prima compagnia petrolifera – la Standard Oil – fondata da J.D. Rockefeller); le prime materie "plastiche" artificiali erano state "inventate" diversi decenni prima dell'impiego del petrolio come materiale per produrre plastiche di sintesi.

Addirittura, la prima idea sulla possibilità di produrre un materiale dal comportamento plastico risale indietro nei secoli. Già nel 1664 il fisico inglese Robert Hooke (famoso per aver coniato il termine "cellula" dopo aver osservato al microscopio una sezione sottile di sughero) intuì che si sarebbe potuto produrre un filo artificiale, simile alla seta, da una massa liquida viscosa che solidificava per coagulazione. L'idea di Hooke rimase un'utopia per quasi duecento anni, fino a quando, nel 1855, fu scoperto il nitrato di cellulosa, la soluzione viscosa di partenza immaginata dallo scienziato.

La cellulosa, polisaccaride con formula $(C_6H_{10}O_5)_n$, è il costituente principale della parete delle cellule vegetali indagate da Hooke. Il suo derivato nitrato, la nitrocellulosa, ottenuto con l'aggiunta di quantità variabili del radicale $-NO_2$, viene utilizzato come base per le prime materie plastiche artificiali. Questo materiale può essere modellato, cioè si comporta "plasticamente" e, dopo la coagulazione, si può ottenere ad esempio una fibra tessile a partire dalla cellulosa vegetale.

È quanto riuscì ad ottenere nel 1883 il conte Hilaire Bernigaud de Chardonnet, chimico e industriale francese, intento a studiare una possibile risposta alla pebrina, malattia che, uccidendo i bachi da seta, metteva in difficoltà la fiorente industria tessile francese. Egli osservò al microscopio la formazione del filo di seta e scoprì che viene generato da due ghiandole parallele all'interno del corpo del baco, i seritteri, ripiene di fibroina, una proteina liquida viscosa. Due fili appaiati, rivestiti da una seconda proteina gommosa e trasparente, la sericina, venivano estrusi da un orifizio vicino alla bocca del baco e subito si formava la seta finita. Quindi, anche la seta è un polimero naturale! Il conte de Chardonnet applicò le sue osservazioni al trattamento della nitrocellulosa che, trafilata e coagulata, formò artificialmente sottili filamenti del tutto simili per aspetto e lucentezza alla seta naturale… e molto più economici!

La sua seta artificiale venne presentata all'Esposizione universale di Parigi nel 1889, ma fu ritirata dal mercato perché gravata di un serio problema: il prodotto ottenuto risultava estremamente infiammabile! Diversi anni prima, nel 1845, Christian Friedrich Schönbein, un chimico tedesco, aveva inventato, forse per caso, la prima polvere da sparo senza fumo, il cosiddetto "fulmicotone". Accade che la semplice cellulosa, estratta dai filamenti che avvolgono i semi del cotone, quando

viene trattata con -$NO_2$ in eccesso nella miscela solfonitrica, diventa trinitrocellulosa, altamente esplosiva.

Il problema dell'infiammabilità della nitrocellulosa era già stato affrontato circa vent'anni prima dell'invenzione della seta artificiale del conte de Chardonnet. Nel 1863, la Phelan&Collander, azienda americana leader nella produzione di palle da biliardo, offrì una ricompensa di 10.000 dollari a chi fosse stato in grado di inventare un materiale atto a sostituire l'avorio, sempre più difficile e costoso da procurare… a causa della sempre più pesante penuria di elefanti selvatici!

Come molto spesso accade – e similmente è stato per la ricerca sulla malattia del baco da seta – la motivazione economica fu certamente più importante della salvaguardia… in questo caso dei pachidermi. Non risulta con certezza che abbia vinto l'agognato premio, ma dopo molti tentativi falliti e incendi riusciti, il tipografo americano John Wesley Hyatt, insieme a suo fratello, fece di meglio: fondò un'azienda per la produzione della celluloide. Nel 1868 i fratelli Hyatt brevettarono un procedimento con il quale il nitrato della cellulosa, estratta dal cotone, veniva unito alla canfora (sostanza cerosa derivata originariamente dagli oli dell'albero di canfora asiatico, *Cinnamomum camphora*). Una volta stampato a caldo nella forma giusta, il composto rimaneva stabile perdendo le proprietà plastiche. Non solo, ma Hyatt iniziò anche la remunerativa produzione di lastre di celluloide che i dentisti potevano utilizzare per gli stampi delle protesi dentarie (precedentemente prodotte con gomma dura, la guttaperca, altra sostanza plastica naturale di origine vegetale!). In seguito, la Kodak adottò questo nuovo materiale per la sua pellicola fotografica flessibile. Si scoprì infatti che il medesimo nitrato di cellulosa, miscelato con alcol, etere e olio di ricino, formava la dinitrocellulosa, o collodio, che rimaneva flessibile dopo essersi asciugato, dando forma a una striscia di celluloide adatta alle pellicole cinematografiche. Anche queste notoriamente molto infiammabili, almeno fino a quando non venne utilizzato prima il triacetato di cellulosa e, più recentemente, il poliestere (PET, polietileneterefталato), cioè la materia plastica delle attuali bottiglie d'acqua.

Appena prima delle prove "incendiarie" del tipografo americano Hyatt, l'inglese Alexander Parkes, professore di Scienze Naturali a Birmingham, soprannominato "nonno della plastica", aveva brevettato con malcelato orgoglio la "parkesine", presentata prima all'International

Exhibition di Londra del 1862 e in seguito all'Exposition Universelle di Parigi (1867), ben ventidue anni prima del conte de Chardonnet. Si trattava sempre di un materiale organico derivato proprio dalla cellulosa, una celluloide plastica semisintetica, trasparente, dura ma anche flessibile, prodotta sciogliendo la nitrocellulosa in solventi come alcol o nafta, il tutto mescolato con oli vegetali plastificanti (di nuovo canfora e… olio di ricino). Se riscaldato poteva essere modellato e manteneva la forma una volta raffreddato. Il nuovo materiale veniva utilizzato per stampare piccoli oggetti rigidi, come manici, oppure flessibili, come polsini e colletti di camicie.

Nel 1867 il socio in affari di Parkes, Daniel Spill, brevettò la xylonite, un materiale plastico migliore della parkesine perché più stabile una volta raffreddato, e iniziò a produrre oggetti modellati, ad esempio pezzi degli scacchi oppure manici di posate di aspetto ancora più simile all'avorio… gli elefanti superstiti ringraziarono! Si trattava dunque di plastiche economiche… ed ecologiche!

La necessità di prodotti plastici tecnologicamente superiori spinse i ricercatori ad abbandonare il nitrato di cellulosa e iniziò l'interesse per il petrolio e in particolare per la formaldeide. Così trent'anni dopo la xylonite i chimici trovano il modo di utilizzare la caseina, proteina del latte che, mescolata con la formaldeide, si trasforma in materiali plastici, con il nome commerciale di galalite (erinoid nel Regno Unito), utile ancora solo per piccoli oggetti come pettini, bottoni o gioielli che imitano nell'aspetto materiali più preziosi (ad esempio tartaruga).

All'inizio del Novecento si mette in luce il chimico belga Leo Baekeland. Nel 1907, come Parker aveva fatto quarantacinque anni prima, brevetta orgogliosamente la sua invenzione, che prende il nome di "bachelite", prima resina termoindurente, completamente di origine sintetica, ottenuta per condensazione tra fenolo e formaldeide. Contrariamente a quanto accade ai materiali citati prima (xylonite e celluloide che, dopo l'indurimento a freddo hanno lo svantaggio di ammorbidirsi con il calore), una volta stampata a caldo, la bachelite mantiene la sua forma rigida e definitiva anche se successivamente viene riscaldata nell'uso (ad esempio come manico di pentola o come lampada). Per la sua particolare resistenza il nuovo materiale resterà per molti anni la materia plastica più diffusa e utilizzata, in particolare nel settore dei materiali elettrici, grazie alle sue proprietà isolanti. L'inventore fece poi fortuna producendo carta

per stampa fotografica e diventò talmente noto da finire sulla copertina di "Time" senza che fosse necessario indicare il suo nome in didascalia.

L'utilizzo dei derivati del petrolio prosegue e, nel 1912, è la volta del "PVC", polivinilcloruro, scoperto per caso già nel 1800. Il chimico tedesco Fritz Klatte prova a impiegarlo per produrre i dischi fonografici, ancora troppo rigidi e fragili; solo in seguito verranno aggiunte sostanze plastificanti per rendere utilizzabile il PVC (per la sua tossicità, in Italia è vietato dal 1999 nelle bottigliette d'acqua, negli imballaggi, nei giocattoli e in altri oggetti).

Un ulteriore derivato della cellulosa, il "cellophane", viene inventato nel 1913 dallo svizzero Jacques Edwin Branderberger e trova subito applicazione nel campo dell'imballaggio, che rappresenta ora uno dei settori di attività umane più impattanti. Per rimediare in parte, da alcuni anni vengono noleggiati imballaggi ad alta protezione per i grossi produttori di elettrodomestici: dopo il trasporto al cliente, l'imballo viene recuperato e ricondizionato per altre decine di trasporti.

Negli anni venti la "plastica" trova anche una rigorosa base teorica. Hermann Staudinger, dell'Università di Friburgo, incomincia gli studi sulla struttura e le proprietà dei polimeri naturali e sintetici.

E finalmente il petrolio prende il sopravvento: tra le due guerre diventa la principale materia prima per la produzione di polimeri sintetici. Durante il secondo conflitto mondiale le ingenti richieste di materie prime naturali necessarie per soddisfare le attività belliche spingono l'attenzione verso la ricerca di nuovi materiali sintetici per sostituire quelli naturali, sempre meno disponibili. Ad esempio, la gomma, ottenuta dal caucciù, viene sostituita dalla gomma artificiale, il neoprene, sintetizzato dai chimici della DuPont.

L'azienda americana DuPont, leader nella ricerca, inizia a produrre nei suoi laboratori nuovi tipi di plastica di sintesi, derivata dal petrolio. Nel 1938 Roy Plunkett scopre il teflon: resina molto scivolosa utilizzata in seguito come superficie antiaderente. E prima ancora, nel 1935, il "nylon" (poliammide), viene sintetizzato da Wallace Carothers, capo del dipartimento di chimica organica della DuPont: è la prima fibra sintetica e presto sostituisce, per praticità e costi, le fibre naturali (seta) o ricostruite (rayon, o seta artificiale, un altro derivato della cellulosa, la cui produzione in Italia risultò particolarmente inquinante nell'area del lago d'Orta).

Con l'inizio della Seconda guerra mondiale la seta, che veniva utilizzata anche per le calze da donna, viene completamente assorbita dall'industria bellica per produrre i paracadute. Durante la guerra, quindi, le calze di seta diventano un lusso inarrivabile e le ragazze si dipingono la riga delle calze sulle gambe! Ma ecco che arriva il nylon: la seta dei paracadute viene sostituita da questo nuovo materiale e viene praticamente dismessa perché troppo costosa rispetto al nuovo filato sintetico… via le righe dipinte sulle gambe e calze di nylon per tutte!

Nel 1941 gli inglesi Rex Whinfield e James Tennant Dickson sintetizzano il "PET", polietilene tereftalato, un polyestere utilizzato per produrre nuove fibre tessili (terylene, o dacron) con caratteristiche diverse dal nylon (il "pile" è PET in fibra).

Ma è dopo la guerra che la ricerca sulle possibilità offerte dal petrolio accelera: non si cerca più un prodotto adatto a una precisa funzione, come avevano fatto Hyatt e Baekeland quando idearono e brevettarono la celluloide e la bachelite, ma si sperimentano nuove materie plastiche comunque sia, preoccupandosi di trovarne gli usi in un secondo momento.

Nella ricerca c'è anche l'Italia. Nel 1963 Karl Ziegler e Giulio Natta vincono il premio Nobel per le loro indagini nei primi anni cinquanta sul polietilene (PE), polimero termoplastico e sul polipropilene isotattico (Moplen). Il polietilene è uno dei pochi materiali che l'attuale normativa italiana classifica come adatto all'uso alimentare, assolutamente innocuo per la salute della persona.

Dopo la Seconda guerra mondiale la ricerca si rivolge nuovamente all'utilizzo della formaldeide già usata nella bachelite: la "fòrmica", resina melammina-formaldeide, diventa un materiale particolarmente sfruttato nell'arredamento (negli anni sessanta) sotto forma di laminato.

Nel 1973, la "plastica" diventa un problema con l'avvento del "vuoto a perdere": l'ingegnere americano Nathaniel Wyeth (ovviamente della DuPont), si mette alla ricerca di un materiale che possa sostituire il pesante e fragile vetro delle bottiglie ("vuoto a rendere") utilizzate per l'acqua minerale e le bibite gassate. Non può impiegare il polipropilene da poco inventato da Natta: adatto a contenere detersivi liquidi, è però troppo morbido e si gonfia per la pressione interna con l'acqua gassata. Decide di utilizzare il PET inventato trent'anni prima dagli inglesi per farne fibre: malgrado l'impennata del prezzo del petrolio, in seguito alla

guerra del Kippur, si apre così l'era dello sperpero della plastica con il nuovo "vuoto a perdere".

Attualmente vengono studiati e preparati i tecnopolimeri, adatti ad applicazioni quanto mai disparate e sofisticate, ad esempio particolari resine termoindurenti, come le poliammidi, che sostituiscono materiali come metalli o ceramica in produzioni aeronautiche e automobilistiche quando viene richiesta una elevata resistenza termica e meccanica.

Le materie plastiche hanno quindi sfidato i materiali tradizionali… e hanno vinto, sostituendo l'acciaio delle automobili, la carta degli imballaggi, il vetro delle bottiglie e il legno dei mobili. Certamente la plastica ha trasformato la vita di tutti i giorni: sono evidenti i numerosi benefici sociali e un saggio futuro utilizzo consentirà progressi tecnologici, in particolare in campo medico. Tuttavia, l'imponente uso di questi materiali sintetici (da circa 2 milioni di tonnellate prodotte nel 1950, si stima una produzione di 34 miliardi di tonnellate nel 2050) alimenta le preoccupazioni relative allo smaltimento degli oggetti al termine della loro vita, che prevede principalmente l'accumulo di rifiuti nelle discariche e negli habitat naturali. Un complesso recupero ambientale dovrà essere avviato per rimediare al degrado causato dalla dispersione in natura di un materiale sintetico progettato per essere "quasi" eterno. Dalla metà del secolo scorso i rifiuti plastici sintetici hanno invaso ormai tutti gli ambienti naturali: i detriti che ne derivano si stanno accumulando sulla superficie terrestre e in particolare negli habitat marini attraverso gli apporti fluviali.

Come in una sorta di "ritorno alle origini" il petrolio torna così in mare. Dobbiamo infatti tenere presente in quale modo, centinaia di milioni di anni fa, si sono formati, proprio nell'ambiente marino, gli idrocarburi di partenza, risultato della degradazione biologica, chimica e fisica di innumerevoli spoglie di organismi marini, prevalentemente fito e zooplancton. Questi resti, mescolati a sedimenti terrigeni, si sono stratificati e accumulati in potenti giacimenti sul fondale e, sottoposti a particolari temperature ed elevatissime pressioni, hanno dato vita ai giacimenti petroliferi.

E ora rifiuti di plastica di ogni dimensione, dispersi direttamente dalle imbarcazioni o trascinati in mare dai corsi d'acqua, vanno ad accumularsi in particolari aree marine, laddove il gioco delle correnti superficiali determina l'addensamento degli oggetti galleggianti in

vortici oceanici, tanto da condurre alla formazione delle cosiddette "isole di plastica", ben visibili dallo spazio attraverso le immagini raccolte dai satelliti.

Anche luoghi reali lontani da fonti di inquinamento subiscono l'aggressione dei rifiuti plastici rilasciati nell'ambiente. Una delle isole più remote del mondo, l'isola di Henderson, atollo corallino disabitato nel Pacifico meridionale, distante 5.500 km dalle coste neozelandesi e da quelle peruviane, è investita da un ininterrotto afflusso di oggetti plastici galleggianti trasportati dal vortice oceanico e provenienti da decine di nazioni costiere: l'isola è diventata una sorta di discarica naturale a cielo aperto o, se vogliamo individuare un aspetto positivo, un involontario "depuratore" delle acque del vortice.

Se macroscopicamente il danno ambientale è visibile addirittura dallo spazio, meno evidente ma molto più grave è l'insidia che deriva dal carattere "quasi eterno" del materiale sintetico, proprietà fortemente ricercata dai ricercatori/inventori. Con il tempo si assiste infatti alla progressiva alterazione e frammentazione in unità sempre più piccole dei materiali dispersi, sottoposti all'azione fotochimica della radiazione solare e all'azione fisico-meccanica dovuta sia ai continui urti fra gli oggetti sotto l'effetto delle onde, sia all'attività chimico-biologica operata dai microrganismi marini che aderiscono a questi particolari "mezzi di trasporto" per ricavarne energia e nutrimento.

Per convenzione l'EFSA, Autorità europea per la sicurezza alimentare, definisce "microplastica" una miscela eterogenea di materiali di forma diversa (frammenti, fibre, sferoidi, granuli, pellet, scaglie o perline) di dimensioni comprese tra 0,1 e 5.000 micrometri (μm). Trasportata dal vento, riportata a terra dalla pioggia, frammentata nel mare o prodotta come tale direttamente dalle industrie, la frazione microscopica della plastica può arrivare ovunque e neppure la regione più remota del continente antartico ne è immune: particelle e microfibre si rinvengono sulla superficie e in carote effettuate nel ghiaccio terrestre, presenti probabilmente a seguito dell'incremento del traffico marittimo turistico lungo le coste ghiacciate o in seguito alle attività di ricerca scientifica.

Oltre all'ubiquità nell'ambiente va scoprendosi sempre più l'ubiquità delle microplastiche negli esseri viventi, contaminati attraverso la respirazione e l'alimentazione. In laboratorio sono evidenti micropla-

stiche fluorescenti ingerite volontariamente da organismi planctonici, costituendo in tal modo la prima tappa di un lungo viaggio all'interno delle reti alimentari degli oceani. Plastica di dimensioni ancora più ridotte (nanoplastica: da 0,001 a 0,1 μm) è stata ritrovata all'interno di collemboli (artropodi tipici del terreno) campionati lungo la costa su detrito spiaggiato: questa presenza artificiale quale impatto può avere sugli organismi della catena alimentare?

Mentre sono evidenti i problemi causati alla fauna selvatica in seguito all'ingestione oppure allo sfortunato incontro con la macroplastica, meno noto è il pericolo e ancora occulti sono i danni legati alla lisciviazione di sostanze chimiche costituenti questi materiali di sintesi.

L'ingestione di microplastica può determinare il trasferimento di inquinanti agli organismi, sotto forma di monomeri e additivi plastici, con conseguenze incerte per la salute, tenendo conto del fatto che le sostanze tossiche possono bioaccumularsi nell'organismo e biomagnificarsi lungo la catena trofica.

La ricerca scientifica si sta occupando da anni della capacità mostrata da diversi organismi (tipicamente batteri e funghi, ma anche larve di lepidotteri) in grado di utilizzare volontariamente a scopo alimentare non solo il petrolio originario, ma anche i materiali plastici con esso prodotti. Già nel 2017 le cosiddette tarme della cera (*Galleria mellonella*), parassiti che vivono nei favi delle api, sono diventate famose in quanto un'apicultrice dilettante ma esperta biochimica italiana, Federica Bertocchini, ha casualmente scoperto che possono nutrirsi di plastica (Bombelli *et al.* 2017). Diversi ceppi batterici sopravvivono alle sostanze chimiche tossiche e cancerogene che possono essere rilasciate dalla plastica (come le persistenti sostanze perfluoroalchiliche, o Pfas), in particolare da PVC e poliuretano, materiali plastici per i quali è ormai appurato un elevato livello di tossicità. Attraverso i passaggi nella catena trofica la tossicità può raggiungere livelli mortali nei consumatori terminali.

Le acciughe che peschiamo nei nostri mari non sono esenti da microplastiche. All'interno dei loro stomaci si possono rinvenire sotto forma di microfibre, che si ritiene in gran parte possano derivare dalle acque reflue degli scarichi domestici come conseguenza del lavaggio dei vestiti, oppure microframmenti derivanti dalla degradazione chimica e meccanica di oggetti di plastica, soprattutto monouso, così

massicciamente dispersi nell'ambiente, oppure microsfere, dalla superficie più o meno liscia, che nascono già di dimensioni ridotte, prodotte dall'industria dei cosmetici, delle creme esfolianti e delle paste dentifricie per assolvere una specifica funzione abrasiva. Si possono rinvenire addirittura sotto forma di grandi "perle" di circa 0.5 cm di diametro, certamente non preziose come quelle delle ostriche: si tratta di sfere lipidiche che inglobano frammenti plastici dagli spigoli vivi. Si ipotizza che la difficoltà di evacuazione di oggetti aguzzi e di discrete dimensioni tramite un lume intestinale di limitato diametro costringa l'acciuga a sopportare il loro blocco protettivo all'interno dello stomaco, con possibili alterazioni della normale crescita ponderale.

Monitoraggi eseguiti negli ultimi anni nel Mar Ligure circa lo stato di salute dello stock di acciughe hanno permesso di evidenziare negli stomaci degli organismi campionati la prevalenza di microframmenti trasparenti e quasi esclusivamente di polypropilene e polyethylene a bassa densità (fig. 1). Questa particolarità può essere spiegata prendendo in considerazione diversi fattori.

Un primo fattore è di tipo biologico/etologico: è noto che l'acciuga può scegliere tra due modalità di alimentazione a spese del plancton di cui è ghiotta: la filtrazione indifferente, attuata in bocca con le bran-

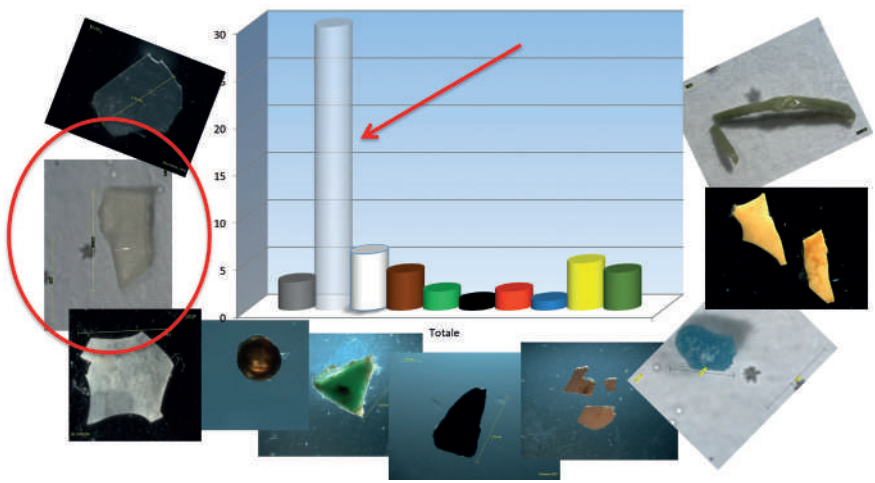



Figura 1. *Prevalenza di microplastiche trasparenti rinvenute negli stomaci delle acciughe.*

chiospine, una sorta di setaccio formato da cinque archi branchiospinali, oppure la predazione selettiva, grazie ai piccoli denti di cui è fornito il margine della bocca. L'acciuga decide, a seconda del momento, la modalità più adatta: la prima struttura è utilizzata quando, durante le normali migrazioni, gli esemplari nuotano di giorno in banchi compatti in prossimità del fondo, cosa che impedisce loro di "scegliere" cosa mangiare. Nuotando fianco a fianco gli esemplari in pratica filtrano quello che capita loro di incontrare.

Quando però risalgono di notte per seguire gli spostamenti verticali del plancton, i piccoli pesci azzurri si disperdono in prossimità della superficie e possono dedicarsi alla predazione del cibo più promettente per dimensioni e gusto.

Un secondo fattore è legato al fenomeno fisico della trasmissione della luce nell'acqua che avviene diversamente per i diversi colori: il bianco perde rapidamente le sue componenti rosso, arancione e giallo in pochi metri. Prima di raggiungere le profondità del buio totale restano visibili solo il verde e l'azzurro. Durante le ore di luce le acciughe rimangono presso il fondale, quindi praticamente al buio, e possono solo filtrare indifferentemente frammenti e fibre di tutti i colori senza poterli riconoscere o scegliere. Con la risalita notturna la fioca luce della luna in superficie consente loro di individuare il riflesso solo di frammenti trasparenti e questo giustifica la loro prevalenza negli stomaci, ed esclude un'attiva selezione di frammenti di altri colori certamente non visibili.

Il terzo fattore, di natura chimica, spiega la frequenza quasi esclusiva di polypropilene e polyethylene a bassa densità negli stomaci analizzati: si tratta di materie plastiche che, con densità inferiore all'acqua, possono galleggiare a lungo in superficie prima di coprirsi di microorganismi e affondare, restando così più tempo a disposizione per la predazione dei pesci.

Rimane da chiarire perché le acciughe, che si nutrono normalmente di zooplancton, siano invogliate a cercare e ingerire microplastiche. Risulta presumibile una sorta di inganno trofico in cui cadono soprattutto gli organismi femminili quando, nel periodo fertile, le necessità energetiche della fase riproduttiva inducono una frenesia alimentare che le porta a scambiare particolari forme di frammenti plastici per gli organismi planctonici abitualmente predati e tipicamente trasparenti (fig. 2).

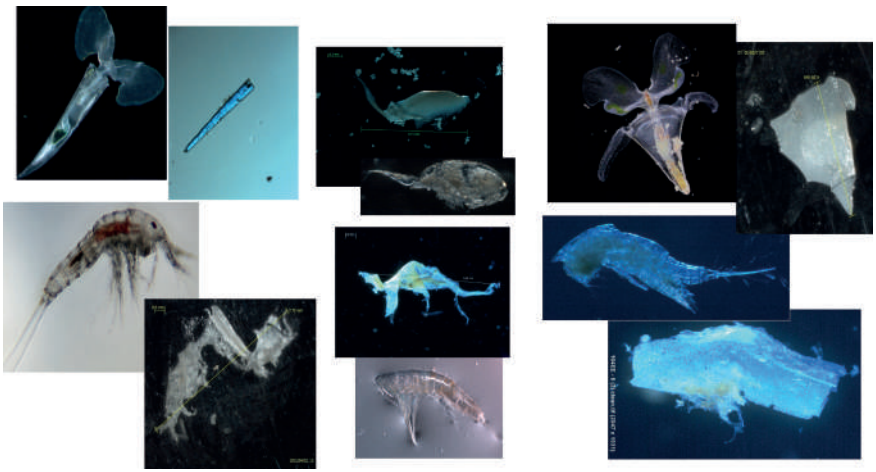


Figura 2. *Somiglianze ingannevoli tra organismi planctonici e frammenti microplastici.*

Negli anni è stato rilevato un aumento della presenza di microplastiche negli stomaci delle acciughe con possibili conseguenze per lo stato dello stock.

Pur tenendo in debito conto sia la responsabilità della pesca eccessiva a carico dei piccoli pelagici, sia le variazioni quali-quantitative del plancton legate agli sconvolgimenti climatici che influiscono sui nutrienti presenti nel mare, l'inganno alimentare in cui cadono le acciughe può giustificare in parte la riduzione di taglia che viene registrata da anni nel loro stock (fig. 3).

Se la plastica comunque ingerita dalle nostre acciughe può essere considerata una delle cause di riduzione delle dimensioni degli esemplari e della conseguente diminuzione della biomassa a disposizione per l'attività alieutica, il problema per l'uomo non si limita all'insufficienza delle quantità pescate: deve essere ancora chiarito il possibile danno per la salute legato all'introduzione, certamente "involontaria" da parte dei consumatori, di sostanze tossiche (pesticidi, metalli pesanti, inquinanti organici persistenti ecc.) presenti sulla superficie dei microframmenti ingoiati dai pesci.

Un'ulteriore fonte di preoccupazione è rappresentata dalla conferma sperimentale che questi pesci tendono a predare di proposito i

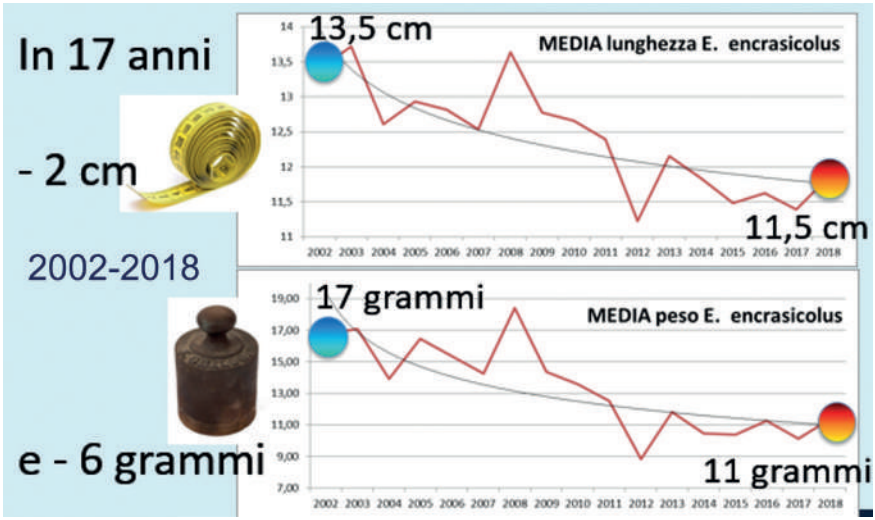



Figura 3. *Riduzione dal 2002 al 2018 delle taglie medie dello stock di acciughe liguri.*

frammenti plastici flottanti in acqua perché rivestiti da una "appetitosa" patina batterica superficiale creatasi nel lungo tempo di permanenza in mare: questo biofilm batterico, carico di sostanze tossiche accumulate, è solo il primo "anello" della rete trofica che termina proprio con gli umani consumatori.

Inoltre, la ricerca medica ha già evidenziato che, oltre alla nocività di queste eventuali sostanze tossiche introdotte attraverso il film batterico, esiste anche una pericolosa azione diretta delle minute particelle plastiche che possono "viaggiare" nel corpo e depositarsi nei vari organi:

- possono entrare fin nella parte più profonda dei polmoni attraverso l'aria che respiriamo, causando problemi respiratori;
- possono essere ingerite oltre che con gli alimenti anche con l'acqua da bere, per quanto potabile;
- si rinvengono nella circolazione sanguigna che li trasporta, ad esempio nel fegato o addirittura nella placenta (e finiscono anche nel latte materno);
- si fermano nel sangue a livello delle placche aterosclerotiche delle arterie, placche di colesterolo che, così "inquinate" dalle microplastiche, risultano più infiammate e aumentano il rischio di infarto e ictus;

- vengono trovate perfino nelle urine e, solo se i reni funzionano bene e si è fortunati, finalmente ci si libera di loro.

Recentemente è stato rilevato da Elena Del Favero e Giulia Rossi (Bochicchio *et al.* 2022) un possibile ulteriore pericolo per la salute legato alle particelle di nanoplastica (di polistirene PS o di polipropilene PP o di polietilene PE) poste a contatto in laboratorio con le proteine di modelli di pareti cellulari, sono in grado di

- influenzare la struttura e la dinamica delle membrane, modificandone la flessibilità;
- alterare potenzialmente il funzionamento complessivo della cellula nel tempo;
- favorire la morte cellulare programmata (per apoptosi).

Le nanoparticelle si "camuffano" con un guscio di colesterolo così da poter attraversare la barriera emato-encefalica (come avviene per altre sostanze liposolubili: alcool e nicotina, ad esempio). Possono così accumularsi nei tessuti cerebrali, provocando veri "ingorghi" nei vasi sanguigni e possibili effetti neurotossici, come patologie neuro-degenerative (Alzheimer, Parkinson e decadimento cognitivo).

Per terminare, una nota di speranza… se possibile.

Nel 2020 l'Italia ha vietato l'uso di microplastiche in tutti i cosmetici prodotti e commercializzati nel nostro paese e da quest'anno anche numerosi tipi di nanomateriali saranno finalmente vietati nei prodotti cosmetici. Dal 14 gennaio 2022 è entrata ufficialmente in vigore anche in Italia la direttiva europea SUP (*Single Use Plastics*) che si pone come obiettivo quello di ridurre l'uso della plastica monouso, non biodegradabile e non compostabile, tipicamente i comuni piatti, posate e cannucce a perdere, ma questi oggetti non sono scomparsi totalmente dal mercato perché le industrie produttrici li hanno posti nuovamente in vendita aggiungendo nelle confezioni il termine "riutilizzabile"!

Per evitare, per quanto possibile, la frammentazione delle macroplastiche, è stata vietata la vendita di prodotti "oxo-degradabili", ovvero contenenti particolari additivi che, attraverso l'ossidazione, comportano la decomposizione chimica dell'oggetto di plastica o la sua frantumazione in microframmenti.

La domanda che si deve porre l'uomo è dunque "cosa posso fare per liberare l'ambiente da questa forma di inquinamento di cui sono responsabile?".

Qualcosa è possibile a livello della macroplastica.

- Consentire e premiare il recupero da parte degli operatori della pesca di quanto raccolto in mare accidentalmente calando i diversi attrezzi di cattura;
- Semplificare e favorire il recupero degli oggetti plastici già dispersi negli oceani, galleggianti o depositati sul fondale. Diverse imbarcazioni sono opportunamente modificate per procedere alla raccolta degli oggetti galleggianti; Boyan Slat, inventore e imprenditore olandese, ha fondato l'organizzazione no-profit "The Ocean Cleanup", progettando un sistema di raccolta in mare aperto che consente di trattenere con opportune barriere almeno una porzione degli oggetti che potrebbero confluire nelle "isole di plastica".
- Impedire il deflusso in mare dei rifiuti plastici trasportati dai corsi d'acqua utilizzati impropriamente per il loro allontanamento.
- Incentivare la raccolta volontaria nell'ambiente a fronte di un compenso proporzionato. Un esempio pratico è quanto realizzato da David Katz con la sua Plastic Bank, una rete globale di mercati di micro-riciclaggio, finora presenti a Haiti, nelle Filippine e in Brasile, dove le persone bisognose hanno la possibilità di acquistare beni e servizi di prima necessità, come wi-fi, traffico dati per lo smartphone, combustibili sostenibili per la cucina, ma anche pagare le rette scolastiche o attivare una forma di assistenza sanitaria usando come moneta di scambio la plastica. Questa, invece di essere trattata come rifiuto, viene poi smistata e venduta a imprese che la riutilizzano nella propria filiera produttiva come "social plastic", plastica solidale. Il sistema è in grado di ridurre l'impronta ambientale della plastica e fornire il giusto compenso a chi si impegna a raccoglierla, evitando che si trasformi in rifiuto.

Resta il fatto che le dimensioni estremamente ridotte di microplastiche e nanoplastiche disperse nella colonna d'acqua oceanica rendono le operazioni di bonifica dell'ambiente praticamente impossibili.

I "depuratori" purtroppo… siamo proprio noi, che finiamo per trattenere nel nostro corpo le microplastiche trasmesse attraverso la rete alimentare!

*Bibliografia*

Bochicchio D., Cantu L., Cadario M.V., Palchetti L., Natali F., Monticelli L., Rossi G., Del Favero E. *Polystyrene perturbs the structure, dynamics and mechanical properties of DPPC membranes: An experimental and computational study.* Journal of Colloid and Interface Science (January 2022) vol. 605: 110-119. doi.org/10.1016/j.jcis.2021.07.069

Bombelli P., Howe C.J., Bertocchini F. *Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth Galleria mellonella.* Curr.Biol. (2017) 27 (8): R292-R293. doi:10.1016/j.cub.2017.02.060

Flory P.J., *Principles of Polymer Chemistry*, Ithaca: Cornell University Press; 1953.

**Walter Riva**[*]

# *La cometa dei Magi. Indagine astronomica su un mistero lungo duemila anni*

**Sommario**: La cosiddetta "Stella di Betlemme" rappresenta uno dei più affascinanti enigmi della storia dell'astronomia. Attraverso l'analisi delle fonti evangeliche, delle testimonianze storiche e delle conoscenze astronomiche dell'antichità, il contributo indaga la possibilità che il fenomeno osservato dai Magi sia stato reale. Escluse le ipotesi più comuni – comete, meteore, eclissi o supernove – emerge come più plausibile la tripla congiunzione tra Giove e Saturno del 7 a.C., evento raro e carico di significati simbolici per gli astronomi mesopotamici. Un segno discreto, interpretabile solo da pochi, capace di trasformarsi in racconto universale.

**Parole chiave**: cometa; Magi; stella; Natale; Betlemme.

**Abstract**: *The Star of Bethlehem. An Astronomical Investigation into a Two-Thousand-Years Old Mystery*
The so-called "Star of Bethlehem" represents one of the most fascinating mysteries in the history of astronomy. Through an analysis of the Gospel accounts, historical evidence and the astronomical knowledge of antiquity, this paper explores the possibility that the phenomenon observed by the Magi was a real event. Once the most common hypotheses – comets, meteors, eclipses or supernovae – have been ruled out, the triple conjunction of Jupiter and Saturn in 7 BC emerges as the most plausible explanation, a rare event laden with symbolic significance for Mesopotamian astronomers. A subtle sign, interpretable only by a few, capable of becoming a universal narrative.

**Keywords**: comet; Magi; star; Christmas; Bethlehem.

[*] Università di Genova wriva@balbi.unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.441-458

## 1. *Una stella nel racconto evangelico: cronaca, simbolo o fenomeno naturale?*

Ogni anno, con l'avvicinarsi del Natale, il cielo diventa teatro di una suggestione ricorrente: il passaggio di una cometa viene subito ribattezzato come "la cometa dei Magi". È accaduto più volte negli ultimi anni e accade regolarmente da oltre un secolo, segno di quanto l'iconografia natalizia abbia profondamente modellato l'immaginario collettivo. È sufficiente che una cometa si renda visibile nei nostri cieli – magari timida, appena percepibile prima dell'alba, oppure abbastanza luminosa da guadagnarsi qualche titolo sui giornali – e immancabilmente l'accostamento si realizza. È successo nel 2018 con la Wirtanen, è accaduto nel 2020 con Borisov – una cometa addirittura proveniente da un altro sistema stellare – ed è successo ancora nel 2021 con la Leonard (fig. 1). E succederà ancora, perché quell'associazione ormai è radicata nel nostro immaginario. È un riflesso quasi automatico, una specie di scorciatoia culturale che ci porta a collegare immediatamente qualsiasi cometa natalizia con quella stella misteriosa che, secondo il Vangelo, guidò i Magi fino a Betlemme.

Eppure, se ci fermiamo un momento a riflettere, la domanda che dovremmo porci è un'altra, molto più semplice e allo stesso tempo molto più scomoda: la Stella di Betlemme era davvero una cometa? Oppure siamo noi, moderni, a vedere una cometa dove forse non c'è mai stata? Di più: è stato davvero un fenomeno astronomico – cometa o no – ad aver guidato i Magi fino a Betlemme? I credenti ferventi possono pensare che si sia trattato di un vero e proprio miracolo, un atto voluto dal Creatore e quindi disposto *ad hoc* in quel tempo e in quello spazio e pertanto irripetibile per definizione. Qualcuno potrebbe anche pensare che sia solo un'azzeccata allegoria, una sorta di licenza poetica: quale paragone migliore se non quello di accostare la nascita di Gesù alla comparsa di una nuova stella o, più in generale, di un nuovo fenomeno celeste? Un artificio narrativo per indicare che qualcosa di straordinario stava accadendo nella storia umana. Se ci fermiamo a una di queste due ipotesi la nostra indagine è già terminata e sembrerebbe non valere la pena di andare avanti. Perché indagare allora con gli strumenti della scienza e della ragione? Perché potrebbe essersi trattato davvero di un fenomeno astronomico che, casualmente, venne interpretato in un certo modo, attribuendogli un significato che sicuramente non poteva avere dal punto di vista scientifico. Occorre, quindi, rifarsi alle fonti.

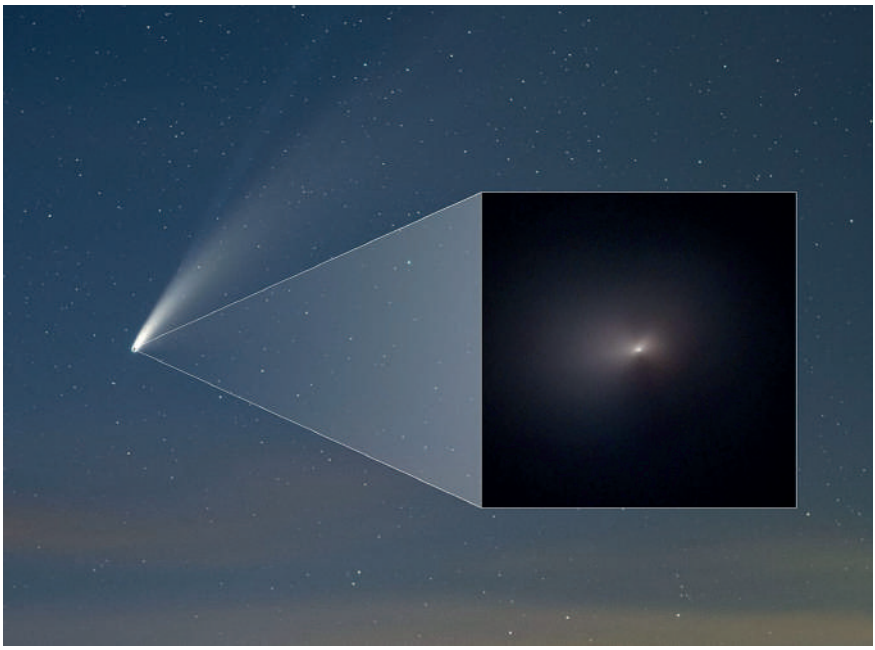


Figura 1. *Una cometa recente (qui la C/2021 A1 Leonard) osservata nei cieli terrestri: esempi come questi vengono spesso identificati dai media come la "cometa dei Magi". (NASA / NOIRLab / NSF / AURA / amateur astronomy community).*

Chi parla di un qualcosa che avvenne in cielo? Il testo più antico che narra della cosiddetta "Stella di Betlemme" – il Vangelo di Matteo, redatto intorno al 50 d.C. – è sorprendentemente parco di dettagli astronomici. Matteo scrive semplicemente che i Magi "videro sorgere la sua stella" e che questa li "precedeva" fino a fermarsi sopra il luogo dove si trovava il bambino. Il termine utilizzato è *astér*, "stella", non *kométēs*. Nessun accenno a una coda, a un moto rapido o a un'apparizione spettacolare. Inoltre, il racconto compare esclusivamente in questo Vangelo: Luca, Marco e Giovanni non ne fanno menzione. Già questo basterebbe a suggerire cautela. Matteo può aver rielaborato da par suo un fenomeno celeste reale, raro e significativo, osservato e interpretato da uomini esperti di astronomia?

Indagare questa possibilità non significa "spiegare" il Vangelo, ma applicare il metodo storico-scientifico a un testo antico, distinguendo ciò che è simbolico da ciò che potrebbe avere un fondamento naturale. Inutile dire che quello della cosiddetta "Cometa dei Magi" rappresenta

un vero e proprio *cold case* astronomico. Forse il più affascinante, insieme a quello dell'asteroide che (forse) causò l'estinzione dei dinosauri circa 66 milioni di anni fa.

## 2. *I Magi, il viaggio e i vincoli imposti dall'astronomia*

Per capire che cosa i Magi possano aver visto, occorre prima capire chi fossero. La tradizione li ha trasformati in tre re dai nomi noti, ma nulla di tutto ciò compare nel testo evangelico. Più probabilmente erano sacerdoti-astronomi di tradizione mazdeista, provenienti dalla Media o dall'Assiria, regioni in cui l'osservazione sistematica del cielo, così come il culto del Sole, erano praticate da secoli. Più probabile che non fossero singoli individui ma una carovana. Una vera e propria spedizione diplomatica.

Se i Magi venivano davvero da Oriente, come scrive Matteo, per arrivare a Betlemme hanno percorso almeno 900 chilometri. Un viaggio del genere, anche nelle migliori condizioni, all'epoca richiedeva diverse settimane. Ne deriva un primo vincolo fondamentale: la "stella" non poteva essere un fenomeno istantaneo o di una notte soltanto. Doveva durare nel tempo, oppure ripresentarsi, ed essere osservabile per un periodo sufficiente a giustificare un viaggio lungo, faticoso e rischioso in mezzo al deserto.

C'è poi un altro elemento cruciale: Erode, re dei giudei. Una cometa luminosa, appariscente, visibile a chiunque, difficilmente sarebbe sfuggita al re di Giudea e alla sua corte. Eppure, Matteo racconta che Erode viene a conoscenza della stella solo attraverso i Magi, e che chiede loro "con esattezza il tempo in cui era apparsa". Insomma, non ne ha sentito parlare, non l'ha osservata, non la cita. Un dettaglio rivelatore: il fenomeno doveva essere reale, ma non clamoroso. Visibile agli esperti, non necessariamente alla popolazione. Un fenomeno astronomico ma non tale da attirare l'attenzione generale. Nemmeno in un'epoca senza la minima parvenza di inquinamento luminoso, quindi con la volta celeste sempre ben visibile e soverchiante, almeno nelle notti serene.

E qui nasce il primo vero dubbio: se si fosse trattato di una cometa luminosa e persistente, visibile per settimane nel cielo, sarebbe davvero passata inosservata? Non parrebbe possibile.




Figura 2. *I Magi nel mosaico di Sant'Apollinare Nuovo, Ravenna (VI secolo): la stella è rappresentata come un astro puntiforme, privo di coda (Basilica di Sant'Apollinare Nuovo, Ravenna / Wikimedia Commons).*

Anche l'iconografia antica va nella stessa direzione. Perché – ed è un dettaglio tutt'altro che secondario – l'idea della stella con la coda non nasce con il Vangelo di Matteo, ma con la storia dell'arte. Nasce, più precisamente, con Giotto.

Se torniamo indietro nel tempo e osserviamo le rappresentazioni più antiche della Natività, scopriamo infatti un'immagine molto diversa da quella a cui siamo abituati. Nel mosaico della Basilica di Sant'Apollinare Nuovo a Ravenna (fig. 2), datato al VI secolo, i Magi avanzano verso il Bambino sotto una stella luminosa, sì, ma assolutamente priva di coda. È un punto nel cielo, un segno essenziale, quasi astratto. E lo stesso accade in molte altre raffigurazioni medievali: ancora alla fine del XIII secolo, nella lunetta dell'Abbazia di San Mercuriale a Forlì, la stella che guida i Magi c'è, ma non è una cometa: è un astro senza coda.

Altro dettaglio da non trascurare: quando gli artisti medievali dovevano raffigurare una cometa, la coda non mancava mai, come dimostra l'arazzo di Bayeux (fig. 3), che racconta con grande realismo il passaggio della cometa del 1066, alla vigilia della cruciale battaglia di Hastings fra "Harold the Barrel" e "William the Conqueror".




Figura 3. *La cometa dell'arazzo di Bayeux (1066): quando gli artisti medievali rappresentavano una cometa, la coda era sempre chiaramente visibile. (Musée de la Tapisserie de Bayeux / Wikimedia Commons).*

L'associazione fra la Natività e una cometa nasce più tardi, nel 1303, quando Giotto affresca la Cappella degli Scrovegni a Padova (fig- 4). Probabilmente l'artista fu suggestionato dal passaggio della cometa di Halley nel 1301. Oppure da un'altra cometa osservata in quegli anni, segnalata dai Cinesi, forse ancora più appariscente, passata alla storia come la "grande Cometa del Trecento". Un evento spettacolare (o forse due) che non poteva (non potevano) lasciare in-

differente il grande artista che così decide di dipingere la Stella di Betlemme come una cometa, con una lunga coda luminosa che sembra indicare la strada ai Magi. Da allora in poi, la cometa diventa "la stella di Natale" nell'immaginario occidentale, quindi più per tradizione artistica che per fedeltà al testo biblico.



Figura 4. *Giotto, Cappella degli Scrovegni, Padova (1303). Per la prima volta la stella di Betlemme viene raffigurata come una cometa, probabilmente ispirata al passaggio della cometa di Halley del 1301 o a quello di un'altra cometa particolarmente luminosa che avvenne in quegli anni. (Cappella degli Scrovegni, Padova / Wikimedia Commons).*

## 3. *La data della nascita di Gesù*

Un altro passaggio fondamentale riguarda la cronologia. Gesù non è nato nell'anno zero – che, peraltro, non è mai esistito. Il computo effettuato nel VI secolo da Dionigi il Piccolo è quasi certamente errato. Fonti storiche indipendenti, come quelle attribuibili a Giuseppe Flavio, ci informano che Erode morì poco dopo un'eclisse di Luna, avvenuta il 13 marzo del 4 a.C. (fig. 5). Subito dopo, al trono di Giudea salì il figlio Archelao.

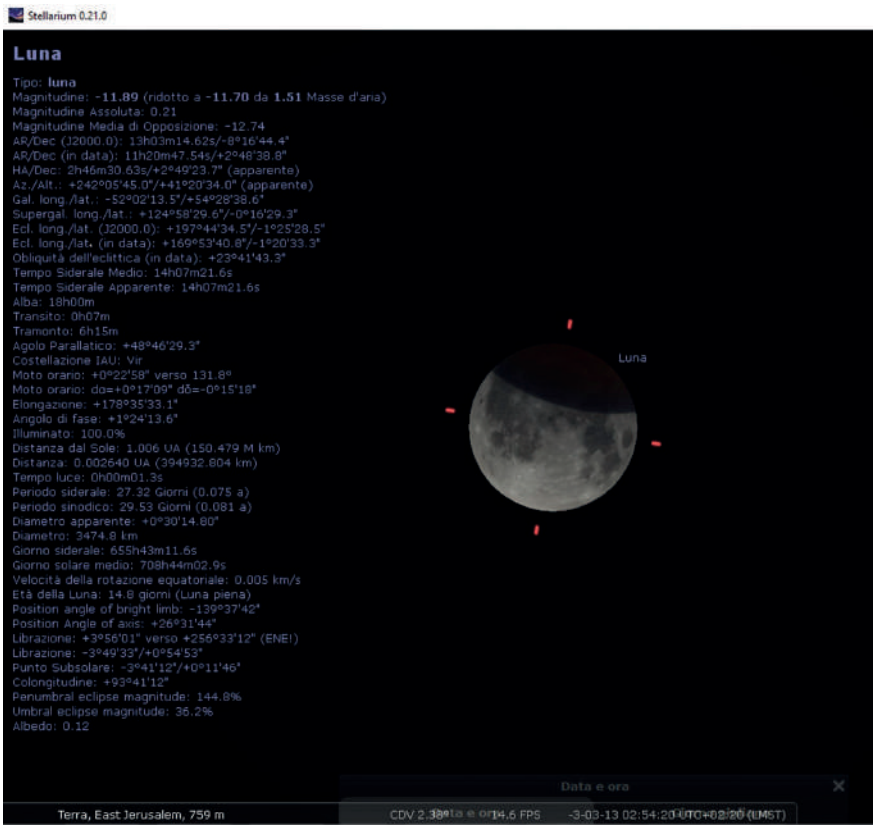



Figura 5. *Simulazione dell'eclisse lunare (parziale) della notte del 13 marzo 4 a.C. vista da Gerusalemme, probabilmente quella citata da Giuseppe Flavio, utilizzata come riferimento per datare la morte di Erode (Elaborazione dell'autore con software Stellarium).*

Matteo colloca la visita dei Magi prima della morte di Erode e collega la strage degli innocenti a un intervallo di tempo che arriva fino a due anni prima, "secondo il tempo di cui si era informato dai Magi". Questo restringe l'intervallo utile della nascita di Gesù e lo spinge molto più indietro, grossomodo fra l'8 e il 4 a.C., con maggiore probabilità agli anni centrali di questo intervallo, quindi fra il 7 e il 6 a.C.

Se la Stella di Betlemme è stata davvero un fenomeno astronomico, dobbiamo cercarla in quel breve intervallo di tempo.

Ma per provare a capire davvero cosa videro i Magi dobbiamo cambiare completamente prospettiva. Dobbiamo smettere di guardare al cielo con i nostri occhi moderni e provare a guardarlo con i loro. E questo significa spostarsi, idealmente, dalla Giudea alla Mesopotamia. Perché è lì che nasce la prima grande tradizione astronomica della storia.

Tra il secondo e il primo millennio avanti Cristo, nelle città di Babilonia, Uruk e Sippar, i sacerdoti-scribi osservavano il cielo con una sistematicità che oggi definiremmo scientifica. Notte dopo notte, generazione dopo generazione, registravano i movimenti degli astri, annotavano le eclissi, seguivano i pianeti. Il cielo, per loro, non era solo uno spettacolo affascinante: era un linguaggio.

Le tavolette della serie *Enūma Anu Enlil* ne sono una testimonianza straordinaria. Raccolgono centinaia di osservazioni, ma soprattutto di interpretazioni. Ogni fenomeno celeste era collegato a un evento terrestre, spesso di natura politica. Un'eclissi poteva annunciare la morte di un sovrano, una particolare configurazione planetaria o l'avvento di una cometa, di una "stella nuova", poteva essere letta come segno di cambiamento o di crisi.

Non si trattava di superstizione caotica, ma di un sistema coerente, condiviso, tramandato nel tempo.

Con testi come il *MUL.APIN*, redatto intorno al VII secolo a.C., questa conoscenza raggiunge un livello ancora più alto. Si tratta di un vero e proprio catalogo del cielo, che elenca costellazioni, cicli astronomici, levate eliache. I Babilonesi conoscevano i moti dei pianeti, erano in grado di prevedere eclissi, avevano una visione del cielo sorprendentemente precisa.

Quando Matteo parla di Magi venuti da Oriente, non si riferisce a figure vaghe o leggendarie. Parla di uomini formati in questa tradizione, specialisti del cielo, capaci di leggere i fenomeni celesti

come segni dotati di un significato ben preciso. Che gli uomini devono imparare a decifrare.

E per comprendere quanto fosse serio questo rapporto tra cielo e potere basta considerare un aspetto molto concreto della cultura mesopotamica: il rituale del "re sostituto". Quando si verificava un'eclissi lunare ritenuta pericolosa, si temeva che il presagio colpisse direttamente il sovrano. Per proteggerlo, si metteva temporaneamente un altro uomo sul trono, destinato a subire simbolicamente le conseguenze dell'evento. Terminato il periodo critico, il vero re tornava al potere.

Ciò che accadeva nel cielo, dunque, non era solo un fatto meramente contemplativo. I fenomeni celesti non erano eventi neutri. Avevano e comportavano conseguenze reali.

## 4. *La scelta e l'eliminazione degli "indiziati"*

A questo punto è possibile passare in rassegna i principali fenomeni astronomici candidati a essere stati la "stella" descritta dal Vangelo di Matteo. E provare a "interrogarli" sulla base delle loro caratteristiche, verificando se hanno o meno degli "alibi".

Riassumiamo schematicamente quali dovrebbero essere le caratteristiche del fenomeno "colpevole":

- Essere avvenuto negli anni "giusti", in particolare fra il 6 e il 7 a.C.
- Capacità di indicare una direzione (l'Ovest) ai Magi che provenivano da Oriente.
- Non essere un fenomeno transiente ma avere una certa durata.
- Avere un aspetto stellare (secondo la descrizione del Vangelo di Matteo).
- Non essere un fenomeno particolarmente appariscente (altrimenti Erode non avrebbe avuto la necessità di chiedere delucidazioni ai Magi).
- Poter essere interpretato simbolicamente come messaggero della venuta del nuovo Re dei Giudei, così da convincere i Magi a intraprendere il loro lungo viaggio.

Ed ecco, altrettanto schematicamente, i fenomeni astronomici "indiziati":

- comete
- meteore/piogge meteoriche
- aurore
- eclissi
- occultazioni
- stelle "novae"
- supernovae
- congiunzioni planetarie

Vedremo sinteticamente che ogni "indiziato" presenta almeno un alibi convincente (e molti più di uno). Tutti, tranne uno.

- *Comete?* Potremmo fare un parallelismo con i libri gialli e avvicinarle ai maggiordomi. Un classico che siano i colpevoli. Non del tutto convincenti però: negli anni giusti non sono documentate comete particolarmente luminose, e comunque una cometa non ha un aspetto stellare. Se vogliamo dirla tutta, una cometa compare nelle cronache cinesi in quegli anni ma più probabilmente si trattava di una cometa senza coda, cioè una cometa che sviluppa soltanto la chioma. Può capitare nel caso di una cometa "vecchia", che abbia esaurito quasi del tutto le sue riserve di gas e polveri o anche nel caso di una cometa che venga vista sotto un angolo che ci nasconde la coda. Recentemente, nell'ottobre del 2007, la cometa Holmes ha assunto queste caratteristiche particolari. Generalmente però le comete non hanno aspetto stellare. E ricordiamo sempre che una cometa luminosa visibile per un paio di mesi in cielo – è il caso, per esempio, della cometa Hale-Bopp passata nella primavera del 1997 – non sarebbe passata inosservata. Insomma, meglio che la cometa "non lasci la città", perché potrebbe essere sottoposta a un supplemento di indagine, ma ha comunque degli alibi.
- *Meteore e/o piogge meteoriche?* Sono dovute all'ingresso in atmosfera di corpuscoli (meteoroidi) che vagano nello spazio e che sono residui di asteroidi o di comete. A volte sono altamente spettacolari (fig. 6); ci sono notizie di vere e proprie "piogge" di meteore, per esempio nel 1833 o nel 1866. Sono fenomeni brevi e imprevedibili. Pertanto, il requisito della durata e della ripetibilità non è rispettato anche se il fenomeno poteva benissimo passare inosservato per



Figura 6. *Pioggia di meteore "leonidi" del 1866 (Wikimedia Commons).*

Erode (o chi per lui). Però non sono in grado di indicare una direzione precisa e non avrebbero un significato simbolico particolare agli occhi dei Magi, al di là della loro eccezionalità e spettacolarità. Quanto all'aspetto stellare, si tratta di scie che attraversano il cielo ad alta velocità… In definitiva, possiamo congedare le meteore senza farci troppi scrupoli.

- *Aurore?* Sono dovute all'interazione delle particelle di vento solare con l'alta atmosfera, in particolare ad alte latitudini (fig. 7). Sono del tutto prive di direzionalità e di aspetto stellare nemmeno a parlarne. Possono anche capitare per periodi prolungati (quando il Sole è al massimo del suo ciclo solare undecennale, come sta avvenen-



Figura 7. *Una spettacolare immagine di un'aurora boreale (Wikimedia Commons).*

do in questi ultimi anni) ma non alle latitudini di interesse. Certo, Erode poteva non essersene accorto. Aspetto simbolico? Possiamo ripetere lettera per lettera quanto detto per le meteore. Congediamo pertanto le aurore, scusandoci perfino per averle convocate.

- *Eclissi?* Sono forse il fenomeno astronomico più spettacolare ma, soprattutto quelle di Sole, sono di brevissima durata e ben visibili a tutti. Si potrebbe pensare che il maltempo abbia impedito l'osservazione in Palestina, ma manca del tutto il requisito della ripetibilità: per questioni legate al moto reciproco di Terra, Luna e Sole è molto raro che un'eclissi totale avvenga nelle stesse località dopo breve tempo. Ci sarebbe un aspetto che merita un approfondimento: le due eclissi di Sole del 6 a.C. (una totale e una anulare, avvenute il 29 aprile e il 23 ottobre) erano visibili a quelle latitudini come parziali, una praticamente radente. Da solo, però, questo elemento non sembra sufficiente. Simbolicamente, il parallelismo fra il Sole e l'avvento di un nuovo re sta in piedi, ma non si capisce perché dovrebbe riguardare espressamente il popolo ebraico.

- *Occultazioni?* Si tratta di fenomeni difficilmente percepibili a occhio nudo che avvengono quando la Luna, nel suo moto attorno alla Terra, transita dinanzi a un corpo celeste luminoso come un pianeta. Certamente ciò rispetta il requisito di non essere particolarmente appariscente. I pianeti hanno sicuramente un aspetto stellare e nel periodo considerato ci sono state alcune occultazioni interessanti, fra la Luna e Venere e fra la Luna e Giove. Non indicano necessariamente una direzione, a meno che non avvengano vicino all'orizzonte. Il requisito della durata però non è molto rispettato, vero che ce ne sono state un paio in quegli anni ma ciascuna con una durata di un paio d'ore al massimo. Certo, Giove era da sempre considerato come un re ma più in contesto ellenico. Sembra troppo poco per convincere i Magi a intraprendere un lungo viaggio da Oriente.
- *Nove o supernove?* L'apparizione di una nuova stella luminosa nel cielo è ovviamente un candidato credibile, anche dal punto di vista simbolico (anche se mancherebbe una stretta associazione con il popolo ebraico). Stelle molto più grandi del Sole terminano la loro "esistenza" in modo spettacolare, esplodendo come supernove. Altre stelle hanno esplosioni più ricorrenti e moderate, soprattutto in sistemi binari, dovuti all'accumulo di materiale rubato alla compagna. Sono chiamate "novae", meno brillanti e spettacolari delle supernove ma comunque capaci di aumentare di parecchi ordini di grandezza la loro luminosità e quindi di diventare visibili per qualche periodo come nuove stelle nel cielo. L'aspetto stellare è quindi garantito e anche la durata: alcune supernove del passato sono state visibili per mesi e anche di giorno per un paio di settimane (per esempio la supernova del 1054 apparsa nella costellazione del Toro). Difficile però che Erode (o chi per lui) non se ne fosse accorto. Soprattutto, non esistono testimonianze storiche affidabili di eventi di questo tipo nel periodo considerato. Anche l'apparizione di una nova (o, ancora di più, una supernova) presenta a malincuore degli alibi convincenti.
- Non resta, quindi, che l'ipotesi della *congiunzione planetaria*. A prima vista una delle meno probabili. Perché i pianeti sono sempre visibili, tranne quando si trovano prospetticamente troppo vicini al Sole. Eppure…



Figura 8. *Questa raffigurazione rupestre rinvenuta nei* pueblos *del New Mexico risalente al periodo degli Anasazi potrebbe essere la testimonianza della supernova apparsa nel luglio del 1054, in una mattina di Luna calante. La supernova sarebbe la stella raffigurata a sinistra della Luna (Brian Brondel, Wikimedia Commons).*

## 5. *La congiunzione fra pianeti: l'ipotesi più imprevedibile ma più solida*

I pianeti, pur non essendo stelle, sono ben visibili a occhio nudo e da sempre carichi di significati simbolici. Tra il 7 e il 6 a.C. si verificò un evento raro: una tripla congiunzione fra Giove e Saturno nella costellazione dei Pesci. Un fenomeno che si ripete con una periodicità di circa 800 anni (fig- 9).

Fu Johannes Kepler a rendersi conto dell'importanza di queste congiunzioni mentre osservava, nel 1603, a Praga un avvicinamento fra Giove e Saturno. Ricostruendo i moti planetari all'indietro, Keplero individuò la precedente tripla congiunzione proprio negli anni compatibili con la nascita di Gesù. Non si trattò di un singolo evento improvviso, ma di una sequenza: i due pianeti si avvicinarono tre volte, nell'arco di diversi mesi: maggio, settembre, dicembre. Una danza lenta, ripetuta, osservabile che avrebbe quindi permesso, in ipotesi, ai Magi

di pianificare il viaggio e di metterlo in pratica. Oggi sappiamo che quell'evento era stato registrato – e forse addirittura previsto – anche dagli astronomi babilonesi, come testimonia una tavoletta cuneiforme rinvenuta a Sippar.

Dal punto di vista simbolico, l'evento poteva essere carico di significati per dei sacerdoti-astronomi orientali: Giove come simbolo di regalità, Saturno associato alla giustizia e al tempo e, in alcune tradizioni, anche al popolo ebraico. La costellazione dei Pesci era legata, nella tradizione astrologica antica, al popolo ebraico e alle regioni occidentali, tra cui la Siria e la Palestina. Mettendo insieme tutti questi elementi, il messaggio poteva essere chiaro: la nascita di un sovrano in Giudea. Non un segno per tutti. Un segno per chi sapeva riconoscerlo e interpretarlo. Magari associandolo ad altri "segni" celesti di quegli anni come le occultazioni fra Luna e Giove, le eclissi solari parziali, quella cometa che appare nelle cronache cinesi. Un messaggio complesso, non spettacolare, ma sufficiente a motivare un viaggio.

Una congiunzione planetaria non abbaglia, non colpisce tutti. È un segnale sottile, riconoscibile solo da chi sa osservare e interpretare il cielo. Proprio per questo si accorda sorprendentemente bene con il racconto di Matteo: una stella vista da pochi, compresa da pochissimi, ma capace di cambiare il corso della storia.

E a questo punto anche un altro dettaglio del Vangelo (su cui abbiamo finora volutamente sorvolato) acquista un significato nuovo: la stella che "si ferma". Nel moto apparente dei pianeti esiste infatti una fase, chiamata "stazionaria", in cui il pianeta visto da Terra sembra rallentare, arrestarsi e poi invertire la direzione. Per un osservatore antico, questo arresto poteva sembrare reale. Improvvisamente, il racconto evangelico non appare più ingenuo o simbolico, ma coerente, per quanto possibile, con un fenomeno astronomico reale.

Naturalmente non possiamo avere una certezza assoluta. La Stella di Betlemme rimane, in parte, un mistero. Ma fra tutte le ipotesi proposte, quella della tripla congiunzione del 7 a.C. è senza dubbio la più elegante, la più coerente, la più plausibile.

E forse è proprio questo il punto.

Forse la Stella dei Magi non fu uno spettacolo abbagliante nel cielo, ma un segno sottile, leggibile solo da chi possedeva le chiavi per interpretarlo.




Figura 9. *Ricostruzione del cielo del 7 a.C.: la tripla congiunzione tra Giove e Saturno nella costellazione dei Pesci (Elaborazione dell'Autore realizzata con software Stellarium).*

E forse, in fondo, è proprio questo che continuiamo a fare anche oggi.

Ogni volta che alziamo lo sguardo verso il cielo e cerchiamo in esso un significato, non stiamo facendo qualcosa di così diverso da ciò che fecero quei misteriosi viaggiatori di duemila anni fa. Cerchiamo risposte.

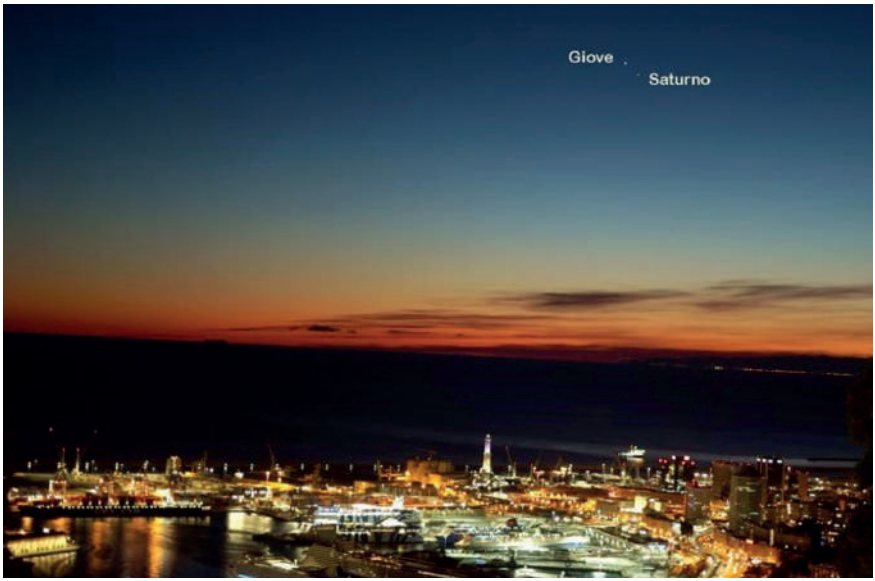



Figura 10. *Congiunzione fra Giove e Saturno avvenuta a dicembre 2020 (ma nella costellazione del Capricorno, non in quella dei Pesci) ripresa dall'Osservatorio Astronomico del Righi da Marina Costa e Walter Riva.*

*Bibliografia*

Caspar M. *Kepler*. London: Abelard-Schuman; 1959.
Chapman-Rietschi P.A.L. *Venus and the Star of Bethlehem*. Quarterly Journal Royal Astronomical Society (1996) 37: 843-844.
Dworetsky M.M., Fossey J. *Lunar occultations of Jupiter and Saturn, and the Star of Bethlehem*. The Observatory (1998) 118: 22-24.
Gingerich O. *The Great Copernicus Chase*. Cambridge: Sky Publishing Corp.; 1992.
Molnar M.R. *The Star of Bethlehem. The Legacy of the Magi*. London: Rutgers University Press; 2013.
Moore P. *The Star of Bethlehem*. Bath: Canopus Publishing Limited; 2001.
Mosley J. *The Christmas Star.* Los Angeles: Griffith Observatory; 1987.
Musarra A. *I Magi e la stella. Viaggio a Betlemme*. Bologna: Il Mulino; 2024.
Schaefer, B.E. *Dating the Crucifixion*. Sky and Telescope (1989) April: 374.

**Giuseppe Rosolini**[*]

# *Una passeggiata tra gli infiniti*

**Sommario**: Dalla lettura del testo di approfondimento matematico, *Three Infinities in Mathematics*, di Marco Panza e Daniele Struppa, si sviluppano alcuni argomenti collegati a tre astrazioni matematiche del concetto di infinità: la geometria proiettiva, ovvero l'infinito delle rette parallele; l'analisi infinitesimale, ovvero l'infinitamente piccolo; la teoria degli insiemi, ovvero l'infinito del contare.

**Parole chiave**: infinito; geometria proiettiva; analisi infinitesimale; teoria degli insiemi; metodo diagonale di Cantor.

**Abstract**: *A Walk around Infinities*
After reading the book *Three Infinities in Mathematics* by Marco Panza and Daniele Struppa, we develop various topics related to three mathematical abstractions of the concept of infinity: projective geometry, that is the infinity of parallel lines; infinitesimal analysis, that is the infinitely small; and set theory, that is the infinity of counting.

**Keywords**: infinite; projective geometry; infinitesimal analysis; set theory; Cantor's diagonal method.

[*] Accademico rosolini@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.459-472

L'argomento per la conferenza nasce durante la lettura di un bel testo di approfondimento matematico recentemente pubblicato da Springer: *Three Infinities in Mathematics. Projective Geometry, Infinitesimal Analysis, Set Theory* (Tre infinità in matematica. Geometria proiettiva, analisi infinitesimale, teoria degli insiemi), dove gli autori Marco Panza e Daniele Struppa presentano tre astrazioni matematiche del concetto di infinità: la geometria proiettiva, ovvero l'infinito delle rette parallele; l'analisi infinitesimale, ovvero l'infinitamente piccolo; la teoria degli insiemi, ovvero l'infinito del contare.

Non sono le uniche astrazioni matematiche del concetto di infinito, ma saranno le sole che svilupperemo nello spazio disponibile. E le tratteremo con lo stesso stile proposto nella conferenza presso l'Accademia Ligure di Scienze e Lettere, senza entrare nei dettagli tecnici – fortunatamente, il libro di Panza e Struppa fornisce in modo molto chiaro e preciso, moltissime informazioni; rimandiamo a quello il lettore interessato.

È opportuno indicare da subito che filosofi e scienziati del mondo occidentale antico trovarono grandi difficoltà a sviluppare il concetto di infinito, probabilmente in base anche a certe interpretazioni del pensiero aristotelico. È a partire dai filosofi scolastici, in particolare con Agostino di Ippona (354-430), che si risveglia l'interesse per lo studio dell'infinito, di ciò che non si può descrivere, e se ne approfondiscono le possibili intuizioni.

## 1. *La geometria proiettiva: il punto che non c'è*

Gli artisti italiani del primo Rinascimento introducono l'idea di prospettiva nelle rappresentazioni artistiche. Riportando le pareti di una stanza tridimensionale su un dipinto bidimensionale, si nota che l'appiattimento della visualizzazione tridimensionale costringe a tracciare linee che non mantengono il parallelismo (ad esempio, degli spigoli delle mattonelle quadrate che coprono il pavimento). I primi esperimenti condotti da Filippo Brunelleschi (1377-1446) e Leon Battista Alberti (1404-1472) portarono allo sviluppo delle teorie prospettiche. In particolare, Piero della Francesca (1420-1492) produsse studi tecnici in cui spiegava come trasportare un soggetto reale su foglio in rappresentazione prospettica.



Figura 1. *Piero della Francesca,* Flagellazione di Cristo *(1450 ca.).*

Esempi eccellenti della sua teoria sono i quadri che dipinse, come la *Flagellazione di Cristo*, realizzato intorno al 1450. È riportato in figura 1 – a destra, sono state evidenziate molte tracce che, nella scena reale, dovrebbero essere parallele tra loro, allontanandosi dall'osservatore. Per ottenere tale effetto sulla tavola bidimensionale, Piero della Francesca fa in modo che tali tracce convergano tutte verso uno stesso punto: quello che, in teoria della prospettiva, è denominato *punto di fuga* del fascio di rette parallele.

È il punto dove si "incontrano" rette che sono parallele, quelle rette che hanno in comune la direzione. Come si vede nella figura 1, il punto "comune" ai prolungamenti delle tracce che si allontanano dall'osservatore si trova sulla parete nera dietro al Cristo. Si può anche pensare che Piero intenda nascondere quel punto nel muro nero perché, in effetti, quel punto non esiste!

O meglio, quel punto non è esistito fino al 1639, l'anno in cui Girard Desargues (1591-1661) distribuisce il suo manoscritto *Brouillon project d'une atteinte aux événements des rencontres d'une cone avec un plan* (Bozza di progetto su ciò che si ottiene sezionando un cono con un piano), una nuova proposta per lo studio delle coniche – cioè cerchi, ellissi, parabole, iperboli. Il testo offre una visione della geometria sicuramente rivoluzionaria per il tempo, arrivando a proporre un sistema geometrico più generale di quello euclideo, che si sarebbe rivelato di importanza fondamentale per gli sviluppi successivi con le geometrie non-euclidee: nasce la *geometria proiettiva*.

Nella geometria proiettiva si aggiunge un punto per ogni direzione, chiamato punto *all'infinito* della direzione. E, per un punto all'infinito,

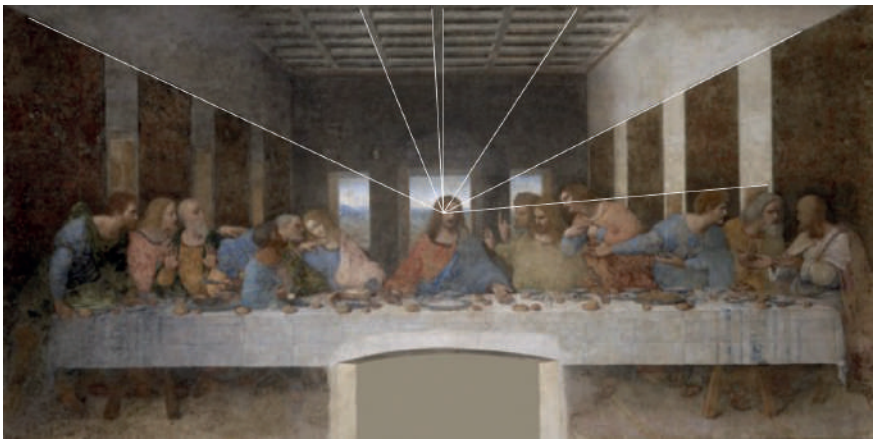


Figura 2. *Leonardo da Vinci,* Cenacolo *(1498).*

si dichiara che passino tutte le rette che hanno quella direzione. In altre parole, due rette parallele, cioè due rette che hanno la stessa direzione, si intersecano nel loro punto *all'infinito*.

L'intuizione di Desargues può sembrare controintuitiva, ma la geometria proiettiva offre una quantità di semplificazioni inaspettate. Ed è perfettamente in linea con la teoria della prospettiva degli artisti rinascimentali. Addirittura, è interessante osservare come la gestione del punto di fuga sia stata interpretata in modi diversi da altri artisti: un esempio è quello del *Cenacolo* di Leonardo da Vinci (1452-1519) (fig. 2).

## 2. *L'analisi infinitesimale: l'infinitamente piccolo*

Forse si può attribuire la prima intuizione della geometria dell'infinitamente piccolo ad Archimede (287-212 a.C.) quando calcola l'approssimazione di "pi greco" che usiamo ancora oggi: $\pi \approx 3{,}14$.

Il metodo che Archimede presenta, chiamato in seguito *metodo di esaustione*, consiste di vari passi. Ricordiamo prima di tutto che, nel libro XII degli *Elementi*, Euclide dimostra che il rapporto tra circonferenza e diametro è costante: tale costante è quella che William Jones, nel 1706, chiamò $\pi$.

- A partire dalla lunghezza del lato di un poligono regolare circoscritto a una circonferenza – diciamo il lato di un quadrato –,

Archimede calcola la lunghezza del lato del poligono regolare circoscritto alla medesima circonferenza e con numero doppio di lati – il lato di un ottagono regolare.

- Archimede applica questo calcolo cinque volte a partire da una circonferenza e un esagono regolare circoscritto a essa. Perciò, conoscendo il lato dell'esagono, determina il lato del poligono regolare di 96 lati circoscritto alla circonferenza.
- Riesce così a valutare il rapporto tra il perimetro di tale poligono e il diametro della circonferenza, dimostrando che è inferiore a $\frac{22}{7} = 3 + \frac{1}{7}$
- A seguire, Archimede si occupa di determinare un'approssimazione inferiore per $\pi$. Il metodo è simile: a partire dalla lunghezza del lato di un poligono regolare inscritto in una circonferenza, determina la lunghezza del lato del poligono regolare inscritto e con numero doppio di lati.
- Dimostra così che il rapporto fra il perimetro di un poligono regolare di 96 lati e il diametro della circonferenza in cui il poligono è inscritto è superiore a $\frac{223}{71} = 3 + \frac{10}{71}$

Le scritture decimali delle due frazioni sono

$$\frac{10}{71} = 0,\overline{1408450704225352112676056338028169} \qquad \frac{1}{7} = 0,\overline{142857}$$

L'ampiezza dell'intervallo in cui Archimede inserisce il valore di $\pi$ è inferiore a 0,00203, poco più di due millesimi.

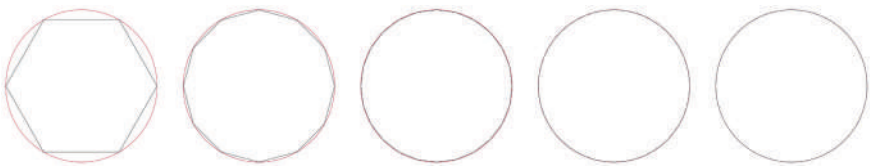


Figura 3. *La sequenza di poligoni regolari inscritti nella circonferenza.*

Nella figura 3 sono riprodotti i cinque poligoni regolari inscritti in una circonferenza, disegnata con una traccia rossa per evidenziarla. L'idea che il perimetro di un poligono inscritto approssima sempre meglio la lunghezza della circonferenza è evidente. Ma si può anche rove-

sciare l'idea e pensare che la circonferenza sia un poligono regolare con un numero infinito di lati, ciascun lato necessariamente di lunghezza infinitamente piccola.

Questa intuizione è probabilmente alla base della "quadratura del cerchio" proposta da Niccolò da Cusa (1401-1464). Egli suppone che un cerchio si possa dividere in tantissimi triangoli isosceli, tutti uguali: un vertice di ciascuno di tali triangoli è nel centro del cerchio; i lati obliqui sono raggi del cerchio; le basi sono piccoli archi sulla circonferenza. Gli archi sono così piccoli che non hanno curvatura, in altre parole sono tratti rettilinei.

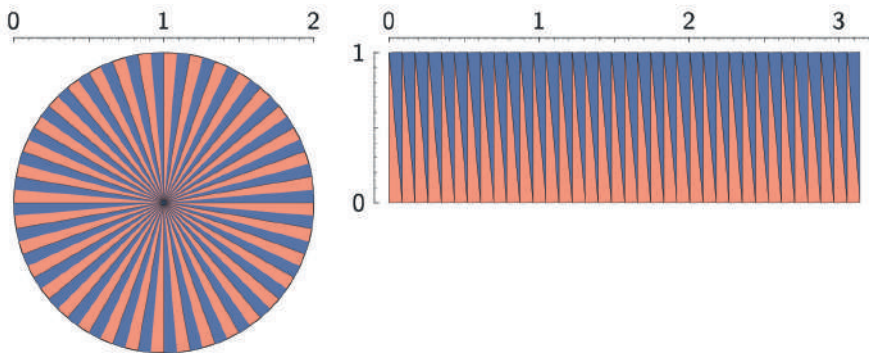



Figura 4. *Suddivisione in 72 triangoli isosceli e riorganizzazione a mo' di rettangolo.*

Se ora riorganizziamo tali triangoli isosceli, accostandoli uno all'altro alternandone il verso, come indicato nella figura 4, si ottiene una figura che è essenzialmente un rettangolo, con altezza uguale al raggio del cerchio e con base uguale a metà circonferenza (dato che soltanto le basi di metà dei triangoli che formavano il cerchio contribuiscono alla lunghezza della base). Nella figura 4 sono forniti due righelli per confrontare le lunghezze. Si può notare come la lunghezza della base del "rettangolo" è molto vicina al valore 3,14.

Nei secoli che seguirono le quantità infinitamente piccole, come si dice *infinitesime*, si dimostrarono uno strumento molto potente; vennero utilizzate in modo estremamente proficuo da Isaac Newton (1643-1727) e da Gottfried Leibniz (1646-1716) negli sviluppi del calcolo

infinitesimale, così come da molti altri, in particolare Leonard Euler (1707-1783). Ma, al tempo stesso, c'erano matematici – Carl Friedrich Gauss (1777-1885), tra questi – preoccupati nell'uso di numeri che, a seconda della necessità, erano in una parte di una dimostrazione diversi da 0, ma in un'altra parte della stessa identificati a 0. Uno dei primi testi a chiarire tali difficoltà fu *Instituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana* di Maria Gaetana Agnesi (1718-1799), che introduce al calcolo infinitesimale. Il testo venne tradotto e pubblicato in tutta Europa.

## 3. *La teoria degli insiemi: le infinite infinità*

Un altro caso di sviluppo inatteso e contrastato nella matematica è stato l'introduzione da parte di Georg Cantor del concetto di "conteggio", o meglio di *cardinalità*. L'introduzione di una definizione matematica per contare al di là dei numeri naturali, e più in là ancora, avviene in un articolo del 1874, *Über eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen* (Su una proprietà della collezione di tutti i numeri algebrici reali), dove Cantor risolve un problema in un modo che i contemporanei trovano sconcertante.

Ricordiamo che un numero reale è *algebrico* se è soluzione di un'equazione a coefficienti interi. I numeri razionali sono algebrici: ad esempio, $\frac{3}{5}$ è soluzione dell'equazione $5x - 3 = 0$. I numeri radicali sono algebrici: ad esempio, $\sqrt{2}$ è soluzione dell'equazione $x^2 - 2 = 0$.

Un numero reale che non è algebrico si dice *trascendente*. Joseph Liouville (1809-1882) aveva dimostrato nel 1844 l'esistenza di infiniti numeri reali trascendenti. Nel 1873, Charles Hermite (1822-1901) dimostra che il numero di Eulero $e$ è trascendente. E nel 1882 Ferdinand von Lindemann (1852-1939) dimostra che $\pi$ è trascendente.

Ma la proprietà che Cantor dimostra nell'articolo del 1874 è che la numerosità dei numeri trascendenti è superiore di quella dei numeri trovati da Liouville. Ottiene la dimostrazione in un modo assolutamente rivoluzionario: contando quanti sono i numeri algebrici e quanti sono i numeri trascendenti. Per farlo deve introdurre la definizione di conteggio, di *cardinalità* di una collezione di numeri. Ma lo fa senza definire nuovi numeri; introduce invece una definizione per confrontare la numerosità di due collezioni.

Il confronto fra due numerosità si fa utilizzando il concetto astratto (molto astratto!) di corrispondenza *biunivoca* tra i componenti delle due collezioni. Una corrispondenza *bi*-univoca è una corrispondenza tra i componenti che è univoca in entrambe le direzioni. Produciamo un esempio di corrispondenza biunivoca ogni volta che apriamo le nostre mani davanti a noi (la fig. 5 suggerisce un tale esempio). E ciascuna mano rappresenta lo stesso numero: "cinque".

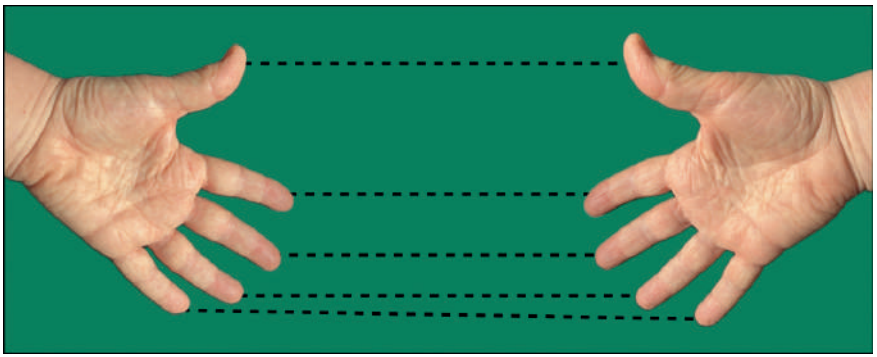


Figura 5. *Corrispondenza biunivoca tra le dita di una mano sinistra e le dita di una mano destra.*

L'associazione di un nome a ciascun numero è un esercizio che impariamo in tenera età, così come in seguito impariamo a generare nuovi numeri appena occorrono: basta aggiungere 1. Poi impariamo a fare operazioni con i numeri: la somma, il prodotto.

Cantor riesce a eseguire queste operazioni con il numero che conta i numeri interi positivi. Ed è proprio dall'esecuzione di tali operazioni che nasce la matematica moderna. Il passaggio alla base di tutto questo richiede un aumento vertiginoso del livello di astrazione. Evitiamo di affrontarlo, ma cercheremo di proporre comunque nel seguito le intuizioni di Cantor (e il suo fondamentale Teorema) in una versione surreale, che trae spunto da una proposta di David Hilbert (1862-1943).

La storia comincia con il Grand Hotel Hilbert che ha tante stanze quanti i numeri interi positivi; sono numerate usandoli tutti: la camera 1, la camera 2, la camera 3, la camera 4, e così via. Arriva un turista e chiede una camera. «Purtroppo siamo al completo», gli risponde l'albergatore, «però posso provare a liberare una stanza per lei». L'albergatore apre il citofono verso tutte le stanze e dice: «Prego ogni cliente di

lasciare la stanza dove si trova e di spostarsi nella camera successiva». Il cliente della camera 1 passa nella camera 2, il cliente della camera 2 passa nella camera3, il cliente della camera 3 passa nella camera 4, e così via. Tutti i clienti sono alloggiati dalla camera 2 in poi, e la camera 1 è libera, disponibile per il turista appena arrivato.

Usando una scrittura simile a quella usuale nell'aritmetica, introduciamo un nuovo segno $\aleph_0$ per il "numero" che conta tutti i numeri interi positivi. Con questa notazione, i clienti che sono sistemati nel Grand Hotel Hilbert sono $\aleph_0$, e il turista che arriva è un'unità che viene aggiunta, cioè i clienti e il turista in totale sono $\aleph_0 + 1$. Dato che, alla fine, i clienti e il turista sono tutti sistemati nelle camere, abbiamo calcolato che $\aleph_0 + 1 = \aleph_0$. Beh, abbiamo appena capito che $\aleph_0$ non è un numero come quelli a cui siamo abituati.

Ora, davanti al Grand Hotel Hilbert è parcheggiato un pullman con a bordo tanti passeggeri quanti i numeri interi positivi. L'autista chiede all'albergatore di sistemare tutti i passeggeri nel Grand Hotel. L'albergatore non ha problemi: apre il citofono verso tutte le stanze e dice: «Prego ogni cliente di lasciare la stanza dove si trova e di spostarsi nella camera che ha il numero doppio di quella che lascia». Tutte le camere con i numeri dispari sono libere e i passeggeri dell'autobus e l'autista vengono sistemati in quelle.

Questa volta a $\aleph_0$ (i clienti dell'albergo) è stato aggiunto un altro $\aleph_0$ (gli occupanti del pullman); il numero che risulta dalla somma è ancora $\aleph_0$: in simboli, $\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$. Sempre più strano. In figura 6 suggeriamo un modo grafico per visualizzare come vengono risistemati i clienti nelle stanze, immaginando di tracciare una singola linea che

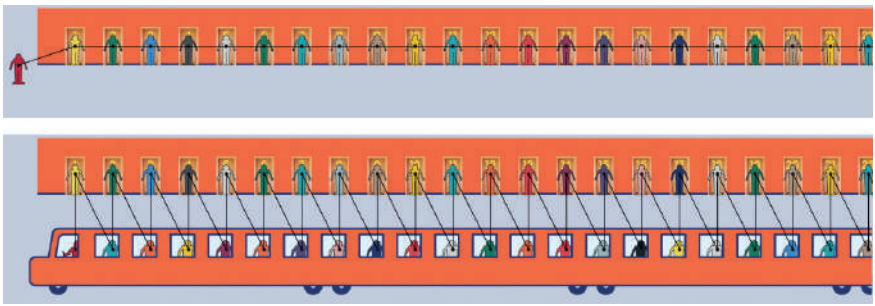


Figura 6. *Descrizioni grafiche delle distribuzioni nelle stanze.*

tocchi tutti i clienti. Nel primo caso la linea parte dal turista appena arrivato per passare poi a tutti i clienti nel Grand Hotel. Nel secondo caso la linea a zig-zag tocca alternativamente un cliente e un passeggero.

Avviene poi che dopo il primo pullman arrivino al Grand Hotel tanti pullman quanti i numeri interi positivi: il pullman 1, il pullman 2, il pullman 3, e così via; tutti con a bordo tanti passeggeri quanti i numeri interi positivi. Beh, l'albergatore riesce a sistemare anche tutti questi, ma stavolta tralasciamo i dettagli della comunicazione al citofono, e forniamo soltanto una descrizione grafica della distribuzione nelle stanze in figura 6: nel riquadro alto si vede come $\aleph_0 + 1 = \aleph_0$; nel secondo riquadro si vede come $\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$; in figura 7 si vede che $\aleph_0 \times \aleph_0 = \aleph_0$. Sembra proprio che per contare l'infinito basti aggiungere il numero $\aleph_0$.

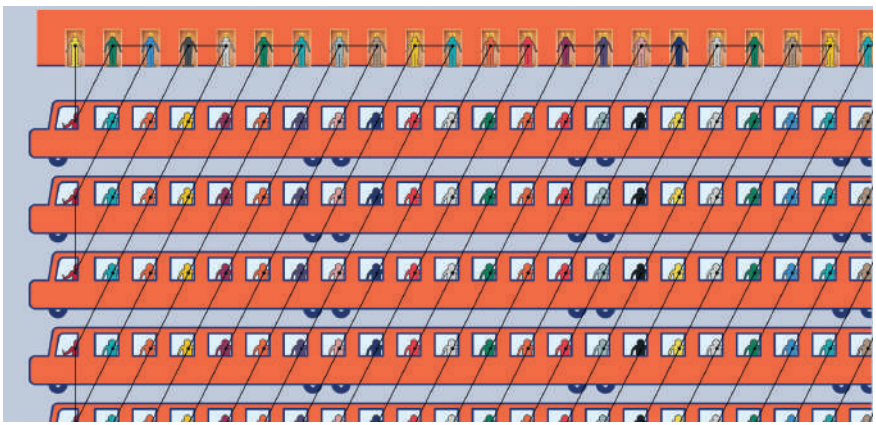


Figura 7. *Descrizione grafica della distribuzione nelle stanze.*

Così, dopo il successo del Grand Hotel Hilbert, i proprietari decidono di costruire il Motel Cantor. In un'enorme spianata davanti all'oceano sistemano bungalow che, come si vede dalla piantina in figura 8, possono essere facilmente raggiunti dal cliente con la propria automobile: basta che gli sia dato l'elenco delle svolte da fare a ciascun bivio.

Ad esempio, al cliente che è stato sistemato nel quarto bungalow da sinistra della terza fila è stato consegnato il percorso **SDD**; al cliente sistemato nel bungalow più a destra della quarta fila è stato consegnato il percorso **DDDD**.

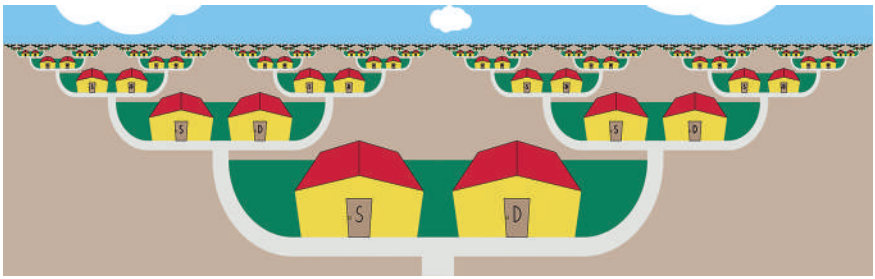



Figura 8. *Piantina del Motel Cantor.*

Ci sono bungalow anche in fondo a ciascun percorso in riva all'oceano. Il cliente nel bungalow più a sinistra deve fare il percorso **SSSS**…, svoltando a sinistra a ogni bivio – con una notazione simil-matematica si può pensare di abbreviare la notazione per questo percorso come $\overline{\mathbf{S}}$ che si può leggere "**S** periodo". Per raggiungere uno dei due bungalow essenzialmente al centro del fronte-oceano si devono fare le seguenti svolte:

- quello leggermente a sinistra del centro segue il percorso **SDDDDD**…, che può essere scritto abbreviato $\mathbf{S}\overline{\mathbf{D}}$;
- quello leggermente a destra del centro segue il percorso **DSSSSS**…, che può essere scritto abbreviato $\mathbf{D}\overline{\mathbf{S}}$.

Ce ne sono chiaramente tanti altri, molti dei quali non si possono abbreviare, come ad esempio il percorso **SDSDDSDDDSDDDDSDDDDDS**…, che è "senza periodo" – dopo una svolta a sinistra, le svolte a destra aumentano via via di 1.

Un giorno, mentre il Motel Cantor è al completo, arriva un avviso di tsunami: «Tutti i bungalow in riva all'oceano devono essere liberati. I clienti di quei bungalow devono rifugiarsi nel Grand Hotel Hilbert che, in questo momento, ha tutte le camere libere».

La gestione dei due alberghi ha predisposto un piano di riposizionamento che è riassunto nella tabella in figura 9. Naturalmente, dato che ogni percorso consiste di $\aleph_0$ svolte e le camere del Grand Hotel Hilbert sono pure $\aleph_0$, non è possibile visualizzare nella figura tutta la tabella.

C'è però un cliente che reclama segnalando un problema all'albergatore: non c'è una camera prevista per lui nel Grand Hotel. Il cliente dice: «Io ero sistemato nel bungalow individuato dal percorso **DSDSDSDSDSDSDSD**… Ma questo percorso è proprio quello che fa

| Nella camera | va il cliente del bungalow |
|---|---|
| 1 | S D S D S D S D S D S D S D S D S D D D D D D D S D |
| 2 | D D S D D S D D S D S D D S D D S D S D D S D D S D |
| 3 | D S S D S D D S D D S D D S D D S D D S D D S D D S |
| 4 | D S D D D S D D D D S D D D D S D D D D S D D D D S |
| 5 | D S D S S D D D S D D D S D D D S D D D S D D D S D |
| 6 | D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D D |
| 7 | S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S S |
| 8 | D D D D D D S D D D D D D S D D D D S D D D D S D D |
| 9 | D D D D D D D D S D D D D D D D D D D S D D D D D D |
| 10 | D D D D D D D D S D D D D D D D S D D D D S D D D D S |
| 11 | D D D D D D D D D D D S D D D D D D D D D D S D D D D |
| 12 | S D S D D S D D D S D D D D S D D D D S D D D D S D |

Figura 9. *Parte iniziale del piano di riposizionamento.*

le svolte contrarie rispetto a quelle che si leggono sulla diagonale della tabella. Non c'è una camera per me!».

L'albergatore è sorpreso. «Non capisco come sia possibile», dice «l'albergo ha infinite camere».

Il cliente insiste: «Ma $\aleph_0$ è soltanto il più piccolo infinito. E qui stiamo proprio dimostrando che l'infinito dei bungalow in riva all'oceano è un infinito superiore a $\aleph_0$. Ora le spiego meglio».

«Guardi qui!» e indica con il dito la prima svolta che compare nella riga della camera 1. «Chi va nella camera 1 era in un bungalow che si raggiunge svoltando a sinistra al primo bivio; io vado a destra al primo bivio; perciò non sono io quello che va nella camera 1».

«Stia attento ora!» e sposta il dito per indicare la seconda svolta che compare nella riga della camera 2. «Chi va nella camera 2 era in un bungalow che si raggiunge svoltando a destra al secondo bivio; io vado a sinistra al secondo bivio; perciò non sono io quello che va nella camera 2".

Poi sposta il dito a indicare la terza svolta che compare nella riga della camera 3 e continua: «Chi va nella camera 3 era in un bungalow che si raggiunge svoltando a sinistra al terzo bivio; io vado a destra al terzo bivio; perciò non sono io quello che va nella camera 3. E tutto continua in questo modo. La tabella non può sistemare tutti i clienti nei bungalow in riva all'oceano! Ma questo lo aveva dimostrato Cantor nel 1890».

In effetti, nell'articolo *Über eine elementare Frage der Mannigfaltigkeitslehre*, Cantor dimostra che, fissato un numero infinito, ce n'è sempre un altro più grande. L'articolo contiene il primo esempio di un metodo

dimostrativo divenuto famoso tra i matematici come *metodo diagonale di Cantor* – il metodo suggerito nel racconto dal cliente senza riposizionamento; per saperne di più, il lettore può consultare il libro sul Teorema di Cantor della collana "Rivoluzioni matematiche" de Le Scienze.

Gli infiniti non finiscono mai! Uno può pensare: beh, anche i numeri interi non finiscono mai. Ma gli infiniti di Cantor continuano in modo incredibilmente superiore a quello. È un infinito che supera l'immaginazione; in effetti, esce proprio dall'immaginazione e dall'intuizione reale. Ma è lì che oggi agisce la matematica.

*Ringraziamenti*

Gli argomenti sui tre tipi di infinità trattati nella conferenza sono stati alla base di una mostra progettata per il Festival della Scienza 2025, a Genova. Il progetto è stato portato a compimento, insieme a me, da tre studentesse del corso di laurea magistrale in matematica per l'indirizzo di Divulgazione e Didattica della Matematica presso UniGe, Cecilia Costanzo, Sonia Palazzi e Chiara Velari, da Luca Balletti dell'Unità Relazioni con il Pubblico e Comunicazione integrata del CNR, e da Mattia Crivellini, direttore della Festa della Scienza di Senigallia. A tutti loro vanno i miei più sinceri ringraziamenti, così come al Dipartimento di Matematica di UniGe, a Chapman University, al CNR e a Fosforo Scienza, che hanno sostenuto finanziariamente la preparazione della mostra.

*Bibliografia*

Agnesi M.G. *Istituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana*. 2 tomi. Milano: Nella Regia-Ducal Corte; 1748.

Cantor G. *Über eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen*. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik (1874) 77: 258-262.

Cantor G. *Über eine elementare Frage der Mannigfaltigkeitslehre*. Deutschen Mathematiker-Vereinigung (1890-91) 1: 75-78.

Desargues G. *Brouillon project d'une atteinte aux événements des rencontres d'une cone avec un plan*. Paris; 1639.

Panza M., Struppa D.C. *Three Infinities in Mathematics. Projective Geometry, Infinitesimal Analysis, Set Theory*. Undergraduate Texts in Mathematics. Cham: Springer; 2026.

Rosolini G. *Il Teorema di Cantor. Rivoluzioni matematiche: i grandi Teoremi da Pitagora a Nash*. Le Scienze. Torino: GEDI; 2024.

**Stefano Vanin**[*]

# *Insetti: dalle teche dei musei alle aule dei tribunali, dai laboratori ai libri di storia*

**Sommario**: Gli insetti rappresentano circa il 75% degli animali conosciuti e grazie alla loro estrema plasticità evolutiva hanno colonizzato tutte le nicchie ecologiche delle terre emerse. Svolgono ruoli fondamentali nei processi ecologici come l'impollinazione, la formazione del suolo e il riciclo della materia organica, cadaveri compresi. L'entomologia forense e l'archeo-entomologia funeraria offrono elementi utili per ricostruire gli eventi peri e post-mortali. Nell'entomologia forense gli insetti forniscono informazioni sul tempo minimo di morte, sullo spostamento del cadavere, sulla sua identità e su eventuali assunzioni di droghe. Nel contesto archeo-funerario gli insetti possono contribuire a farci comprendere le condizioni sanitarie del passato.

**Parole chiave**: archeo-entomologia funeraria; colonizzazione; entomologia forense; indagini; tempo del decesso.

**Abstract**: *Insects: From Museum Display Cases to Courtroom, from Laboratories to History Books*
Insects represent about 75% of the described animals, and thanks to their extreme evolutionary plasticity they have colonized all ecological niches of landmasses. They play fundamental roles in ecological processes such as pollination, soil formation and recycling of organic matter – cadavers included. Forensic and funerary archaeo entomology studying insects provide useful information for reconstructing peri- and post-mortem events. In forensic entomology, insects provide information about the minimum time of death, the movements of the corpse, its identity, and any drug use. In the archaeo-funerary context, insects can contribute to understanding the hygiene conditions of the past.

**Keywords**: funerary archaeo-entomology; colonization; forensic entomology; investigation; post-mortem interval.

[*] Università di Genova stefano.vanin@unige.it

Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere, s. VII, vol. VII, 2025
https://doi.org/10.82022/ALSL.2025.1.473-481

Gli insetti (*Insecta*), insieme ai batteri, sono gli organismi più diffusi sulla Terra e sono considerati i veri dominatori della vita sul nostro pianeta (Grandi 1966). Essi, infatti, hanno colonizzato quasi tutti gli ecosistemi del nostro pianeta, eccezion fatta per le profonde acque marine, dove comunque abbondano i crostacei (Crustacea), anch'essi comunque come gli insetti appartenenti al *phylum* degli artropodi (Arthropoda).

Grazie allo loro vasta diffusione, diversità e capacità di adattamento gli insetti sono tra gli organismi viventi con cui l'uomo interagisce maggiormente, sia in vita che in morte. Dal punto di vista ecologico gli insetti giocano ruoli chiave nel fornire importanti servizi ecosistemici. L'impollinazione e il riciclo della materia organica sono solo due esempi del loro contributo su aspetti della nostra vita che spesso passano inosservati o dati per scontati. I servizi ecosistemici "forniti" dagli insetti hanno valori economici stimati in miliardi di euro, a questo proposito basti pensare che il solo servizio di impollinazione negli Stati Uniti è stato valutato tra i 6 e i 14 miliardi di dollari (Hein 2009).

Come un Giano bifronte però gli insetti causano ingenti danni economici attaccando le colture agro-forestali e sono coinvolti nella trasmissione di numerosi patogeni, con importanti implicazioni mediche e veterinarie (Belluco *et al.* 2023; Stathas *et al.* 2023).

Anche storicamente lo studio degli insetti ha dato contributi determinanti: dalla formulazione della teoria dell'evoluzione e della coevoluzione, grazie a Darwin e Wallace, alla sociobiologia con Wilson, alla genetica con gli studi su Chironomidi e *Drosophila*, fino allo sviluppo della cronobiologia e alle ricerche su malattie neurodegenerative, come ad esempio il Parkinson e l'Alzheimer, per le quali questi insetti sono stati usati come modelli (Serebrovska *et al.* 2025).

L'uso degli insetti o dei loro derivati si perde nella notte dei tempi: ne sono testimonianza le prime otturazioni dentarie, realizzate con cera d'api più di 6.500 anni fa. La cera d'api infatti veniva usata per riempire carie o fratture dentali, come documentato dallo studio di denti di antichi abitanti del Neolitico in Slovenia (Bernardini *et al.* 2012). La prima rappresentazione degli insetti di cui si abbia documentazione risale a oltre 15.000 anni fa. Si tratta di una cavalletta di grotta incisa su un osso di bisonte e trovata all'interno della grotta dei Trois Frères in Francia (De Sonneville-Bordes 1963).

Negli ultimi anni, invece, lo studio degli insetti si è affermato anche nelle aule dei tribunali grazie all'entomologia forense, una disciplina in rapido sviluppo e riconosciuta come prova valida in indagini criminali, soprattutto in casi di omicidio, di abbandono o negligenza verso persone non autosufficienti. L'entomologia forense viene applicata anche in casi che coinvolgono reati contro gli animali: dal bracconaggio al maltrattamento.

L'entomologia forense può essere definita, nella sua accezione più ampia, come quella branca dell'entomologia che applica le conoscenze sugli insetti a contesti legali di tipo civile o penale. Essa, infatti, trova applicazione non solo nel caso di crimini contro uomini e animali ma anche in caso di infestazioni delle derrate alimentari o di edifici o altri manufatti umani (Amendt *et al.* 2007; Byrd e Tomberlin 2020; Smith 1986).

In un contesto di indagini gli insetti sono delle vere e proprie prove scientifiche, che contribuiscono alla ricostruzione a posteriori degli eventi accaduti al momento del crimine in quanto permettono di rispondere a cinque delle sei domande classiche di una investigazione: "Quando", "Dove", "Chi", "Che cosa", "Come". La sesta, il "Perché", viene valutata per altre vie.

Restringendo il campo all'entomologia forense di stampo medico (veterinario)-legale in passato si pensava che gli insetti potessero rispondere solo alla domanda "Quando" è avvenuto il decesso, cioè il periodo dalla morte detto anche *Post-Mortem Interval* o più comunemente PMI. Oggi, grazie a nuove tecnologie e studi sperimentali, lo studio degli insetti trovati su un cadavere o sulla scena del crimine permette di rispondere anche ad altre domande investigative quali: "Dove?", "Come?" e "Chi?".

I patologi forensi sono i primi a interrogarsi sul momento del decesso, analizzando i fenomeni che avvengono sul corpo dopo il decesso come l'*algor*, il *rigor* e il *livor mortis*. Il primo corrisponde al raggiungimento di un equilibrio della temperatura corporea con quella ambientale dopo il decesso – sarebbe riduttivo dire che un corpo dopo il decesso si raffredda –, il secondo è la rigidità muscolare dovuta all'esaurimento dell'ATP mentre nel *livor mortis* c'è la formazione di ipostasi post-mortem legate all'arresto dell'attività cardiaca e al conseguente accumulo del sangue nelle parti declivi del corpo. Tuttavia, queste valutazioni sono affidabili solo entro le prime 72-96 ore e in

condizioni in cui il corpo non è stato alterato da amputazioni (depezzamento), bruciature o esposizione ai raggi solari diretti (Henssge e Madea 2004). Dopo questo limite temporale l'entomologia forense diventa cruciale, permettendo di stimare il tempo minimo post-mortem (PMI min). Questo parametro, che corrisponde al tempo intercorso dall'inizio della colonizzazione al ritrovamento del corpo, viene stimato attraverso lo studio dello sviluppo degli insetti, in particolare delle larve delle mosche appartenenti alle famiglie Calliphoridae, Sarcophagidae, a volte Muscidae e Phoridae, che per prime colonizzano il cadavere. La conoscenza dello stadio di sviluppo degli insetti e del loro tasso di crescita, dipendente dalla temperatura, permette di stimare il PMI min, soprattutto per i primi giorni/settimane dopo il decesso. Per periodi più lunghi si analizzano le comunità di insetti e di altri artropodi, ad esempio gli acari, che si susseguono sul corpo nel corso della decomposizione (Smith 1986).

Le principali fasi della decomposizione di un cadavere possono essere riassunte in cinque momenti: cadavere fresco, fase enfisematosa, decomposizione attiva, decomposizione avanzata e scheletrizzazione. Gli insetti che per primi accedono al cadavere sono le mosche delle famiglie Calliphoridae e Muscidae, alle quali seguono tra la fase di cadavere fresco e la fase enfisematosa quelle appartenenti alla famiglia Sarcophagidae, comunemente note come mosche carnarie e facilmente riconoscibili per tre strie nere presenti sul torace. Durante la decomposizione attiva deporranno le uova sul cadavere sia altri tipi di mosche appartenenti alle famiglie Piophilidae, Muscidae e Fanniidae sia i coleotteri appartenenti alle famiglie Cleridae e Dermestidae. I coleotteri rappresentano una importante parte della comunità che si sviluppa su un cadavere in fase di decomposizione avanzata in cui ormai il corpo ha perso la maggior parte del suo contenuto di liquidi. Acari e lepidotteri della famiglia Tineidae sono anch'essi in grado di colonizzare i tessuti secchi di un cadavere nelle sue ultime fasi di decomposizione.

Le tracce del passaggio di differenti specie di mosche possono essere desunte dal ritrovamento sul corpo dei pupari all'interno dei quali è avvenuta la metamorfosi da larva ad adulto. Lo stesso vale anche per i frammenti di cuticola delle mute dei coleotteri (*exuviae*) e per i bozzoli di alcune farfalle. Talvolta, comunque, si possono trovare sul corpo anche i resti degli insetti adulti.

La composizione delle comunità che si susseguono sul corpo, se pur in linea generale ben codificate e prevedibili, dipende da numerosi fattori quali la stagione del decesso, l'area geografica, il clima e l'accessibilità del corpo.

Una dettagliata conoscenza dell'ecologia e della fenologia, ovvero i cicli annuali di attività delle specie, permette di stimare la stagione di colonizzazione, in *old/cold cases*, e permette di riconoscere lo spostamento o l'occultameno del corpo dopo il decesso. Ad esempio, la presenza di specie altamente sinantropiche, come ad esempio *Lucilia sericata* (Diptera, Calliphoridae) in un cadavere in un contesto agricolo o forestale può indicare un trasporto del cadavere in un'area diversa da quella dove è avvenuta la morte.

Queste inferenze si possono fare solo dove i contesti ambientali sono ben definiti, non ad esempio in Pianura Padana dove, a causa dell'*urban sprawl* – edificato diffuso –, vi è una commistione tra aree agricole, industriali e abitative (Vanin *et al.* 2008).

L'analisi dei pupari, che sono costituiti dall'irrigidimento della cuticola del terzo stadio larvale e all'interno dei quali avviene la metamorfosi, e degli escrementi dei coleotteri, chiamati nel mondo anglosassone *frass*, permettono di effettuare analisi tossicologiche in caso di ritrovamenti di cadaveri molti anni dopo il decesso dove non sono più presenti tessuti utili alla tossicologia. L'entomologia forense può così andare oltre le sole domande "Dove" e "Quando", offrendo anche informazioni sulla causa di morte, soprattutto in casi di intossicazioni e abuso di droghe.

Negli ultimi anni è emersa un'altra importante potenzialità dell'analisi degli insetti presenti sulla scena del crimine: quella di estrarre il profilo genetico della vittima o dell'eventuale autore del delitto dagli insetti che si sono nutriti del cadavere nel primo caso o che ne hanno assunto il sangue nel secondo (zanzare, cimici dei letti, pidocchi ecc). Questa metodologia ha rilevanti implicazioni, specialmente nel caso in cui il cadavere venga rimosso per depistare le indagini e/o mettere in discussione le testimonianze dei collaboratori di giustizia. Il ritrovamento di larve sviluppatesi sul corpo e poi rimaste sul terreno/pavimento dopo la rimozione del cadavere rappresenta non solo una prova della sua presenza, ma costituisce anche l'inizio di un'indagine molecolare volta ad

analizzare il DNA che permane nel tratto digestivo iniziale della larva, chiamato *crop*, per almeno 48 ore dall'ultimo pasto (Durdle 2020; Mukherjee *et al.* 2019; Wells e Stevens 2008).

Studi sulla possibilità di estrarre e analizzare il DNA umano sono stati condotti non solo sulle larve, ma anche sui pupari di calliforidi. I risultati ottenuti sono promettenti, seppur limitati ai pupari relativamente freschi, raccolti pochi giorni dopo l'emergenza dell'adulto (Marchetti *et al.* 2013). Positive sono risultate anche le estrazioni del DNA della vittima dai *flyspeck* – rigurgiti e defecazioni delle mosche sulle pareti – e da insetti ematofagi quali zanzare, cimici dei letti e pidocchi, i quali possono contenere il sangue dell'assalitore (Ahmed *et al.* 2023; Mumcuoglu *et al.* 2004).

L'indagine sugli insetti associati ai cadaveri trova applicazione anche nel campo dell'archeologia: infatti, lo studio degli insetti provenienti da sarcofagi, cripte, mummie e resti di soldati della Grande Guerra rappresenta il campo di interesse dell'archeo-entomologia funeraria (Huchet 1996). Fondata ufficialmente nel 1996 dal ricercatore francese Jean-Bernard Huchet, questa disciplina mira a ricostruire eventi del passato, come le pratiche funerarie o gli eventi peri-mortem e post-mortem partendo dai resti degli insetti che persistono nel tempo, grazie alla resistenza chimica e meccanica della chitina, la molecola che compone la cuticola degli insetti.

L'archeo-entomologia funeraria può inoltre offrire indicazioni sullo stato di salute delle popolazioni vissute secoli o millenni fa, analizzando parassiti come pulci e pidocchi trovati sui resti umani o animali. Un esempio emblematico è lo studio di resti ossei e frammenti di pidocchi raccolti a Vilnius (Lituania), appartenenti alle truppe napoleoniche in ritirata dalla Russia. Queste analisi hanno permesso di individuare all'interno degli insetti e nei denti dei soldati il DNA del patogeno responsabile della febbre delle trincee, offrendo così informazioni sulle condizioni sanitarie dell'esercito durante il ritiro (Raoult *et al.* 2006).

In Italia entrambe le discipline – l'entomologia forense e l'archeo-entomologia funeraria – sono in forte crescita, con risultati significativi sia nel campo giudiziario che in quello storico-archeologico (Tuccia *et al.* 2022). Un numero sempre maggiore di medici legali, magistrati e giudici riconosce l'importanza delle analisi sugli insetti come

strumenti di prova, anche in procedimenti di grande risonanza mediatica, e il mondo dell'archeologia ha iniziato a comprendere quanto le informazioni fornite dagli insetti possano contribuire alla ricostruzione del passato. Esempi emblematici di questa integrazione riguardano le mummie dell'appennino modenese, alcune cripte e tombe preistoriche in Sardegna e i sarcofagi di personaggi illustri, come la principessa Isabella d'Aragona (1470-1524) (Benelli *et al.* 2014; Pradelli *et al.* 2025; Tuccia *et al.* 2025). Una situazione particolare riguarda lo studio degli insetti associati ai resti di soldati della Grande Guerra ritrovati ad esempio nell'altipiano dei Sette Comuni (Veneto, Vicenza) (Vanin *et al.* 2009). In questo caso gli insetti hanno fornito indicazioni fondamentali sulla stagione del decesso, un dato cruciale per restringere la lista degli scomparsi e facilitare l'identificazione delle spoglie.

L'indagine sugli insetti provenienti da contesti archeologici e da casi forensi non è affatto estranea al contesto ligure. La Liguria infatti, per posizione geografica, presenza di porti e una lunga storia di ordini religiosi, soprattutto femminili, costituisce un buon banco di prova per chi si occupa di insetti legati ai cadaveri. Proprio lo studio dell'entomofauna prelevata da cadaveri nella città di Genova ha evidenziato la presenza di una specie di origine orientale quale il muscide *Synthesiomyia nudiseta* (Diptera, Muscidae). L'analisi genetica ha dimostrato che la popolazione di questa specie rinvenuta a Genova proviene dalla Cina. Inizialmente introdotta con materiale commerciale arrivato in porto, ha trovato le condizioni climatiche favorevoli, responsabile in questo anche il riscaldamento globale, che le stanno permettendo un ampliamento dell'areale (Lo Pinto *et al.* 2017).

Per quanto riguarda l'aspetto archeo-entomologico delle ricerche in Liguria sono da segnalare gli interessanti dati ottenuti dallo studio dei resti mortali di alcune religiose, il corpo di una delle quali riposa nella chiesa delle Brignoline in Genova.

In un'ottica pratica, è importante sottolineare come le due discipline siano interconnesse: infatti le informazioni acquisite in una possono tornare utili all'altra. Se da un lato le mummie del passato rappresentano un esperimento naturale per comprendere la colonizzazione su tempi storici che difficilmente potrebbe essere realizzato da un ricercatore per evidenti limiti temporali, dall'altro le informazioni acquisite nel campo forense forniscono dati per interpretare i rinvenimenti del passato.

Piccoli e numerosi, fastidiosi o affascinanti, gli insetti sono ovunque e, se esaminati correttamente, rappresentano fonti di notevole valore per importanti scoperte e approfondimenti che permettono di comprendere il presente e ricostruire il passato.

*Bibliografia*

Ahmed A.M., Alotaibi A.M., Al-Qahtani W.S., Tripet F., Amer S.A. *Forensic DNA analysis of mixed mosquito blood meals: STR profiling for human identification*. Insects (2023) 14(5): 467.

Amendt J., Campobasso C.P., Gaudry E., Reiter C., LeBlanc H.N., Hall M.J. *European Association for Forensic Entomology. Best practice in forensic entomology – Standards and guidelines.* Int. J. Legal Med. (2007) 121(2): 90-104.

Belluco S., Bertola M., Montarsi F., Di Martino G., Granato A., Stella R., Martinello M., Bordin F., Mutinelli F. *Insects and public health: An overview*. Insects (2023) 14(3): 240.

Benelli G., Canale A., Raspi A., Fornaciari G. *The death scenario of an Italian Renaissance princess can shed light on a zoological dilemma: Did the black soldier fly reach Europe with Columbus?* J. Archaeol. Sci. (2014) 49: 203-205.

Bernardini F., Tuniz C., Coppa A., Mancini L., Dreossi D., Eichert D., Turco G., Biasotto M., Terrasi F., De Cesare N., Hua Q., Levchenko V. *Beeswax as dental filling on a neolithic human tooth.* PLoS One (2012) 7(9): e44904.

Byrd J.H., Tomberlin J.K. (eds). *Forensic Entomology: The Utility of Arthropods in Legal Investigations*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2020.

De Sonneville-Bordes D. *Upper Paleolithic cultures in Western Europe.* Science (1963) 142: 347-355.

Durdle A. *Insects as vectors of DNA in a forensic context*. WIREs For. Sci. (2020) 2: e1355.

Grandi G. *Un mondo occulto di dominatori: gli insetti*. Bologna: Calderini; 1966.

Hein L. *The economic value of the pollination service, a review across scales*. Open Ecol. J. (2009) 2:74-82.

Henssge C., Madea B. *Estimation of the time since death in the early post-mortem period*. Forensic Sci. Int. (2004) 144 (2-3): 167-175.

Huchet J.B. *L'Archéoentomologie funéraire: une approche originale dans l'interprétation des sépultures.* Bull. Mém. Soc. Anthropol. Paris (1996) 3-4: 299-311.

Lo Pinto S., Giordani G., Tuccia F., Ventura F., Vanin S. *First records of* Synthesiomyia nudiseta *(Diptera: Muscidae) from forensic cases in Italy*. Forensic Sci. Inter. (2017) 276: e1-e7.

Marchetti D., Arena E., Boschi I., Vanin S. *Human DNA extraction from empty puparia.* Forensic Sci. Int. (2013) 229: e26-e29.

Mukherjee S., Singh P., Tuccia F., Pradelli J., Giordani G., Vanin S. *DNA characterization from gut content of larvae of* Megaselia scalaris *(Diptera, Phoridae).* Sci. Justice (2019) 59(6): 654-659.

Mumcuoglu K.Y., Gallili N., Reshef A., Brauner P., Grant H. *Use of human lice in forensic entomology*. J. Med. Entomol. (2004) 41(4): 803-806.

Pradelli J., Giordani G., Mazzarello V., Campus F.G.R., Vanin S. *Characterisation of the entomo-fauna from the mummies of Castelsardo (Sardinia, Italy) and considerations about the minimum number of individuals (MNI) in funerary archaeoentomology.* Archaeol. Anthropol. Sci. (2025) 17: 120.

Raoult D., Dutour O., Houhamdi L., Jankauskas R., Fournier P.E., Ardagna Y., Drancourt M., Signoli M., La V.D., Macia Y., Aboudharam G. *Evidence for louse-transmitted diseases in soldiers of Napoleon's Grand Army in Vilnius.* J. Infect. Dis. (2006) 193(1): 112-120.

Serebrovska Z., Xi L., Khetsuriani M., Protsenko O., Morozova N., Tolstun D.A., Maksymchuk O. *Utility of* Drosophila *for studying hypoxia-inducible factor (HIF) in neurodegenerative diseases: Advantages versus limitations*. Brain Research (2025) 1867: 149953.

Smith K.G.V. *A Manual of Forensic Entomology*. London: Trustees of the British Museum; 1986.

Stathas I.G., Sakellaridis A.C., Papadelli M., Kapolos J., Papadimitriou K., Stathas G.J. *The Effects of Insect Infestation on Stored Agricultural Products and the Quality of Food.* Foods (2023) 12(10): 2046.

Tuccia F., Rodriguez C., Giordani G., Subirà M.E., Mazzarello V., Vanin S. *Evaluation of a subsequent deposition of human bodies in a funerary site in Sardinia (Italy) using entomological evidence*. Heritage (2025) 8(2): 68.

Tuccia F., Giordani G., Vanin S. *State of the art of the funerary archaeoentomological investigations in Italy.* Archaeol. Anthropol. Sci. (2022) 14: 70.

Vanin S., Tasinato P., Ducolin G., Terranova C., Zancaner S., Montisci M., Ferrara P., Turchetto M. *Use of* Lucilia *species (Diptera: Calliphoridae) for forensic investigations in Southern Europe*. Forensic Sci. Int. (2008) 177: 37-41.

Vanin S., Turchetto M., Galassi A., Cattaneo C., *Forensic entomology and the archaeology of war*. Journal of Conflict Archaeology (2009) 5: 127-139.

Wells J.D., Stevens J.R. *Application of DNA-based methods in forensic entomology.* Annu. Rev. Entomol. (2008) 53: 103-120.