UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

Corso di Laurea Magistrale
Biologia Marina

CAMBIAMENTO A LUNGO TERMINE DELLA MACROFAUNA E DEGLI ECOSISTEMI NEL MAR EGEO PROFONDO

LONG-TERM CHANGES IN MACROFAUNA ASSEMBLAGES AND DEEP-SEA ECOSYSTEMS OF THE AEGEAN SEA

Tesi di Laurea Magistrale
di:
Filippo Marcucci

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Roberto Danovaro

Sessione: Autunnale Ottobre 2024

Anno Accademico: 2023-2024

INDICE

RIASSUNTO 3

ABSTRACT 4

1.**INTRODUZIONE** 5

1.1 PRESSIONI ANTROPICHE SULL'AMBIENTE MARINO 5

1.2 IL MAR MEDITERRANEO 8

1.2.1 MAR EGEO 11

1.3 L' AMBIENTE MARINO PROFONDO 13

1.3.1 BACINI PROFONDI IPERALINI E ANOSSICI 16

1.4 MACROFAUNA 19

2. **OBIETTIVI DELLA TESI** 22

3. **MATERIALI E METODI** 22

3.1 AREA DI STUDIO 23

3.2 STRATEGIA DI CAMPIONAMENTO 24

3.3 ATTIVITA' DI LABORATORIO 25

3.3.1 SORTING E ANALISI MACROFAUNA 25

3.3.2 SORTING E ANALISI DEI FRAMMENTI DI PLASTICA 25

3.4 ANALISI DEI DATI 28

4. **RISULTATI** 29

4.1 ASSEMBLAGGIO DELLA MACROFAUNA 29

4.2 PLASTICHE 38

5. **DISCUSSIONE** 43

5.1 MACROFAUNA 44

5.2 PLASTICA 47

6. **CONCLUSIONE** 49

7. **BIBLIOGRAFIA** 49

RIASSUNTO

L'ambiente marino di profondità è un ambiente unico che viene costantemente minacciato dalle pressioni antropiche che possono essere di tipo globale (attraverso i cambiamenti climatici) o locali (con l'eccessiva pesca o scarico delle industrie). Queste pressioni portano a modifiche nelle strutture delle comunità profonde. L'obiettivo di questa tesi è quello di andare a vedere dopo un arco temporale di 30 anni i cambiamenti che ci sono stati nella struttura dell'assemblaggio della macrofauna nel Mar Egeo profondo, andando anche a considerare la presenza di plastiche rinvenute in uno dei bacini ipersali profondi e anossici (DHAB) che si trovano nel Mar Mediterraneo. I risultati ottenuti hanno evidenziato come dal 1994 al 2023 l'assemblaggio della macrofauna ha mostrato un cambiamento dei taxa dominanti accompagnato a una riduzione generale dell'abbondanza degli individui. I policheti sono diventati minoritari rispetto ai sifunculidi che rappresentano il taxa più abbondante. Inoltre, è stato riscontrato come l'area del bacino sia caratterizzata da un'abbondante presenza di plastiche.

Tuttavia, non è possibile ascrivere i cambiamenti della macrofauna ai cambiamenti climatici con assoluta certezza, ulteriori studi sono necessari per confermare questa ipotesi.

ABSTRACT

The deep-sea environment is a unique environment that is constantly threatened by anthropogenic pressures that may be global (through climate change) or local (through overfishing or discharge from industries). These pressures lead to changes in deep-sea community structures. The aim of this thesis is to see after a time span of 30 years the changes that have been recorded in the composition of the macrofauna assemblages in the deep Aegean Sea, considering also the presence of plastics found in one of the deep anoxic hypersaline basins (DHAB) found in the Mediterranean Sea. The results obtained showed that from 1994 to 2023 the macrofauna assemblage showed a change in dominant taxa accompanied by a general reduction in the abundance of individuals. Polychaetes have become minority compared to siphunculids, which represent the most abundant taxa. In addition, it was found that the basin area is characterized by an abundance of plastics.

However, changes in macrofauna cannot be ascribed to climate change with absolute certainty; further studies are needed to confirm this hypothesis.

1.INTRODUZIONE

1.1 PRESSIONI ANTROPICHE SULL'AMBIENTE MARINO

Gli ecosistemi marini forniscono numerosi servizi ecosistemici essenziali per gli esseri umani quali ad esempio mitigazione del clima, risorse alimentari, protezione delle coste, riciclo dei nutrienti (Solé Figueras et al., 2024). Tuttavia, essi sono messi a repentaglio dalle diverse forme di pressioni antropiche (Solé Figueras et al., 2024). Con la rivoluzione industriale la produzione di CO2 da parte delle industrie è aumentata notevolmente, causando l'aumento della temperatura e all'incremento degli effetti dovuti al cambiamento climatico (Yang Cheng et al. 2024).

L'incremento della temperatura globale porta alla fusione dei ghiacciai che contribuisce, non solo all'aumento del livello dal mare mettendo in pericolo le numerose città costiere, ma anche il rilascio di un'enorme quantità di acqua dolce che va a modificare sia la stratificazione che la circolazione oceanica (Rignot et al., 2019).

Anche l'assorbimento della CO_2 viene modificato, in quanto l'aumento della CO_2 in atmosfera ne incrementa l'assorbimento da parte dell'oceano. Essa andando a reagire con l'acqua di mare va a formare acido carbonico, tramite una reazione in equilibrio chimico, che libera ioni H^+ causando così una diminuzione del pH. Conseguentemente, si assiste ad un'acidificazione dell'acqua di mare

con conseguenze negative per la vita marina; specialmente per gli organismi che producono scheletri o gusci calcarei. (Hancock et al., 2020).

Gli effetti del cambiamento climatico non sono solo gli unici fattori di stress di origine antropica per gli ecosistemi marini. Infatti, la crescente urbanizzazione ha comportato, e comporta tuttora una serie di impatti quali ad esempio la sovra-pesca, l'inquinamento chimico, l'eutrofizzazione, l'inquinamento acustico, immissione di materie plastiche (Chukwuemeka et al., 2024). Sebbene questi tipi di impatti antropici siano definiti "locali" alcuni si essi quali ad esempio la sovra-pesca e l'inquinamento da plastica sono ormai presenti a livello globale (Eriksen et al., 2014).

È opportuno considerare che le varie tipologie di impatto raramente agiscono singolarmente. Al contrario più frequentemente agiscono in maniera additiva (una dopo l'altra), sinergica (contemporaneamente) risultando più incisivi e più raramente in maniera antagonista (Wang et al., 2024).

Dal 1950 la produzione della plastica è incrementata notevolmente; infatti, ogni anno vengono scaricati in mare milioni di tonnellate di plastica, che si vanno ad accumulare in tutte le latitudini ed anche nelle regioni più remote (Munari et al., 2017; Sfriso et al., 2020). È stato stimato che più di 268,940 tonnellate di frammenti di plastica di varie dimensioni galleggi nel mare (Eriksen et al., 2014) e molti più frammenti siano depositati nei fondali (Patti et al., 2020). Tutti i macro-frammenti (>5 mm) e tutti i micro-frammenti (<5mm) prodotti con rifiuti hanno la possibilità di interagire in maniera negativa con l'ambiente portando

sia a danni ecologici che economici. L'interazione può essere sia diretta che indiretta. Per esempio, i frammenti possono essere ingeriti dagli organismi oppure rimanere incastrati negli apparati respiratori. Inoltre, le plastiche sono in grado di adsorbire inquinanti chimici e rilasciarli nell'ambiente marino (Napper and Thompson 2020). In aggiunta a ciò, gli oggetti di plastica vanno a costituire un substrato dove possono insediarsi specie invasive che vengono trasportate anche per lunghe distanze, rappresentando quindi un vettore di trasporto per specie aliene ed invasive (García-Gómez et al., 2021). L'ingresso delle plastiche in mare può avvenire sia dalle barche, dagli attrezzi per la pesca, oppure attraverso l'apporto fluviale e dagli scarichi di industrie e città (Sharifina et al., 2020) ma anche dalla circolazione atmosferica (Pryor et al., 2015; GESAMP, 2016.). Ovviamente durante questi processi la forma e la grandezza di questi frammenti si modifica diventando sempre più piccole. Grazie a processi come la circolazione oceanica la presenza di corridoi naturali come i canyon che vanno ad amplificare l'effetto delle Dense Shelf Water Cascade (DSWC) ovvero acque superficiali che raffreddandosi sprofondano verso il basso (Allen and Durrieu de Madron 2009), i frammenti di plastica riescono a raggiungere le profondità dei mari raggiungendo questi ambienti remoti e fragili, inoltre la composizione e forma delle plastiche in questi ambienti a causa dell'elevata stabilità rimane invariata per tanto tempo (Pierdomenico et al., 2020).

Una volta raggiunto il fondo le microplastiche vengono ingerite da organismi principalmente appartenenti ai phyla Cnidaria, Echinodermata, Artopoda (Tylor et al., 2016).

I principali tipi di plastiche che vengono ritrovante sono formate da poliestere (53.4%), poliammidi e acetati (34.1%) e acrilici (12.4%) (Woodall et al., 2014).

1.2 IL MAR MEDITERRANEO

Il Mar Mediterraneo si presenta come un bacino semichiuso, con un equilibrio idrico negativo in cui l'evaporazione supera l'apporto di acqua proveniente dai fiumi (quali il Po, Rodano, Nilo) e dagli oceani (attraverso lo Stretto di Gibilterra) (Parras-Berrocal et al., 2020). È caratterizzato da una temperatura superiore a quella di altri mari e un regime tidale di pochi centimetri; viene diviso in due sottobacini uno occidentale più produttivo e uno orientale più povero di nutrienti (Pisano et al., 2020). Inoltre, il Mediterraneo comparato con gli oceani è un mare poco profondo (circa 1450 contro i 3750 m rispettivamente) (Boero et al., 2008). Queste sue caratteristiche lo portano a rispondere molto velocemente ai vari fattori di stress causati dalle attività umane rendendolo estremamente vulnerabile.

Il Mar Mediterraneo è considerato un hot-spot di biodiversità con un'alta percentuale di endemismi (Myers et al., 2000).

Il Mar Mediterraneo presenta una struttura complessa con varie masse d'acqua sovrapposte, superficiali, intermedie e profonde, con temperature e salinità diverse. L'acqua atlantica, attraverso processi di evaporazione e rimescolamento, aumenta la salinità e si sposta verso est entrando nel Mar Mediterraneo. Nel Mediterraneo si formano acque intermedie come il Levantine Intermediate Water (LIW) nella zona levantina in corrispondenza di Rodi, e acque profonde come il Western Mediterranean Deep Waters e l'Eastern Mediterranean Deep Waters formate rispettivamente nel golfo del Leone (WMDW) e nel Adriatico meridionale (EMDW), mentre le acque più profonde Levantine Deep Water si possono formare nel gyre di Rodi o nel mare di Creta. (Ovchinnikov e Popv, 1994; Tsimplis et al., 1999).

La circolazione delle masse d'acqua del Mar Mediterraneo viene forzata da fattori naturali come venti e dai flussi di galleggiabilità proprio come accade in Oceano.

Il Mar Mediterraneo ha subito dal 1970 al 2010 un aumento esponenziale dell'urbanizzazione, passando da una popolazione di 152 milioni a 315 milioni di persone rispettivamente (UNEP/MAP, 2012), (Fig. 1).

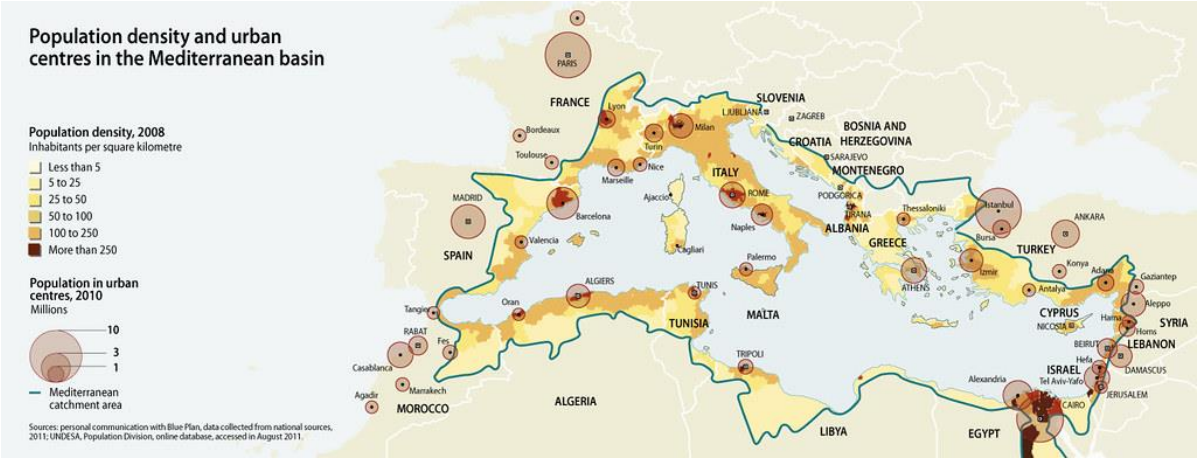


Figura 1 densità di popolazione vicino le coste. "Population Density and Urban Centers in the Mediterranean Basin," GRID Arendal, 2013. https://www.grida.no/resources/5900 (accessed October 24, 2021)

Per il 2030 il Mar Mediterraneo sarà l'hot-spot di biodiversità con più terre urbanizzate (Elmqvist et al., 2013). Ovviamente questa espansione aumenta la richiesta socioeconomica sia di terreno che di risorse andando a degradare e impattare il nostro ecosistema (García-Nieto et al., 2018).

Le ecoregioni del mediterraneo vengono influenzate sia dai fattori di tipo ambientale che antropico. Dopo l'apertura del Canale di Suez nel 1869 l'impatto che l'uomo aveva sul Mar Mediterraneo è aumentato notevolmente, grazie non solo all'incremento del numero di navi che entra nel mediterraneo, ma anche favorendo un canale di comunicazione tra il Mar Mediterraneo e il Mar Rosso per il passaggio di specie aliene (Polinov 2023).

Tra i diversi impatti locali che il Mar Mediterraneo subisce sono la pesca a strascico le trivellazioni e anche l'inquinamento luminoso (Polinov et al., 2022).

1.2.1 MAR EGEO

Il mar Egeo, è situato nel bacino orientale del Mar Mediterraneo. Queste aree sono considerate punti cruciali per la formazione delle acque levantine intermedie (LIW), a causa dell'interazione tra i gyres presenti nella zona e le LIW stesse che portano le acque levantine superficiali a sprofondare (Georgopoulos 1989; G. Zoditas 1993; Manimpire et al., 2023). Tutta via durante tutto l'anno sono presenti altre 5 masse d'acqua formate dall'unione delle Acque del Mar Nero e quelle del Mar Levantino: Black Sea Water (BSW), Aegean Intermediate Water (AgIW), Cretan Deep Water (CDW), North Aegean Deep Water (NAgDW) e Central Aegean Deep Water (CAgDW) che sono importanti per la circolazione delle acque nel Mediterraneo e il successivo rientro nell'Oceano (BEŞIKTEPE, Şükrü T 2015).

La maggior percentuale (85-90%) dei sedimenti marini in questa regione è costituita da argilla limosa, con potenziale redox (da 387 a 467 mV) che indica una buona ossigenazione dei sedimenti ma scarsa presenza di materia organica; la salinità media varia da 39.5‰ a 38.8‰, con una marcata stratificazione superficiale in estate, con temperature superficiali di 24.5°C che scendono a 14.5°C sotto i 100 metri. (Tselepides et al., 1992).

La distribuzione e la composizione della fauna bentonica viene influenzata dalla bassa produzione primaria, alte temperature, la forte stratificazione in estate e la

dominanza delle comunità batterio planctoniche che portano ad un basso flusso di materia organica verso il reparto bentonico (Tselepides e Eleftheriou, 1992).

Nel bacino cretese la produzione primaria rispecchia quella di tutto il bacino orientale con concentrazioni che variano dai 19 – 60 $mgCm^{-2}d^{-1}$ in comparazione ai 140 – 160 $mgCm^{-2}d^{-1}$ del bacino occidentale. Inoltre, la velocità delle correnti passa da 1.1 – 27 cm sec^{-1} a valori 3 volte più alti in estate portando a risospensione il sedimento (Danovaro et al. 1999).

Dal punto di vista delle pressioni antropiche, quest'area è molto importante in quanto rappresenta un punto cruciale per la comunicazione tra l'Oceano Indiano e l'Oceano Atlantico, portando il passaggio di numerose navi sia mercantili che turistiche (Fig. 2), incrementando l'impatto che l'uomo ha su questo ecosistema, già impattato dalla presenza di numerose specie aliene (Tsirintanis et al., 2023; Tsiamis 2024)

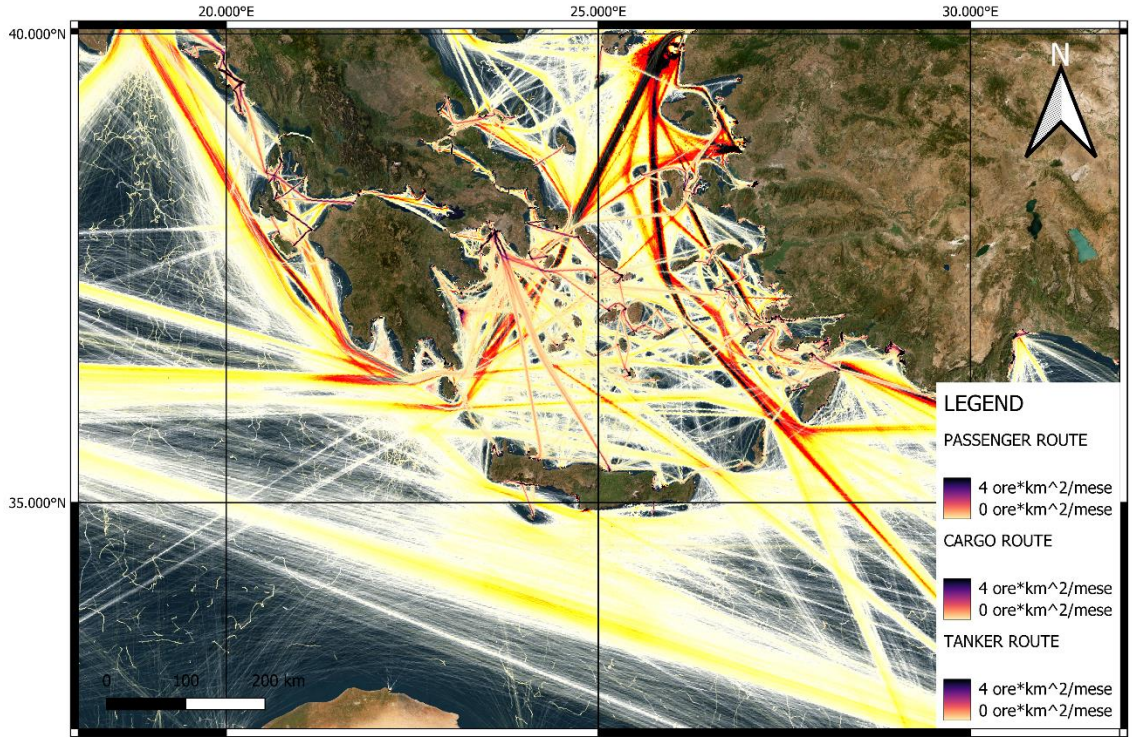


Figure 2 rotte navi Mar Egeo [source: EMOdnet]

1.3 L' AMBIENTE MARINO PROFONDO

Gli ambienti marini profondi costituiscono la più grande porzione dei nostri mari (~95%) (Danovaro et al. 2017). Essi rappresentano l'area oceanica con una profondità maggiore di 200 metri, dove la luce non è sufficiente per la fotosintesi. Questo ambiente costituisce l'ecosistema più grande del pianeta, con una profondità media di 4.2 km, e una superficie di fondale di 434 milioni di km^2 (Costello et al. 2010; Danovaro et al. 2014).

La vita è presente in tutti i mari fino agli 11000 metri di profondità (Fig. 3), anche se questi ambienti vengono considerati estremi a causa delle basse temperature (~4°) e, elevate pressioni (>400 atmosfere). A causa di queste

caratteristiche, la distribuzione degli organismi varia in maniera inversamente proporzionale con la profondità ovvero che all'aumentare della profondità la biomassa degli organismi diminuisce, fatta eccezione per batteri e archea (Danovaro et al., 2017). Nonostante ciò, esistono delle oasi come i canyon e montagne sottomarine dove la biomassa aumenta nonostante le elevate profondità (Danovaro et al., 2010; Rogers et al., 2015). Oltre a queste condizioni esistono anche ambienti particolari come le sorgenti idrotermali (con temperature che sfiorano i 400°) caratterizzate dalla presenza di organismi chemiosintetici, ovvero che non dipendono dalla luce solare, ma anche le zone ipossiche e quelle a minimo di ossigeno (dove le concentrazioni di ossigeno sono < 1,0 mg/L) (Van Doven 2000; Connelly et al 2012; Danovaro et al. 2014), ma anche reef corallini profondi e cold seeps (Danovaro et al., 2024). Qui gli animali hanno sviluppato adattamenti e meccanismi fisiologici per sopportare queste pressioni, viene stimato che la biodiversità del Mediterraneo profondo raggiunga circa 2805 specie dove il 66% rimane ancora sconosciuto (Danovaro et al., 2010, Danovaro et al., 2017), nonostante la ricerca stia sviluppando attrezzature sempre più all'avanguardia per la scoperta e lo studio di questi ambienti (Jing-Chun Feng et al., 2022).

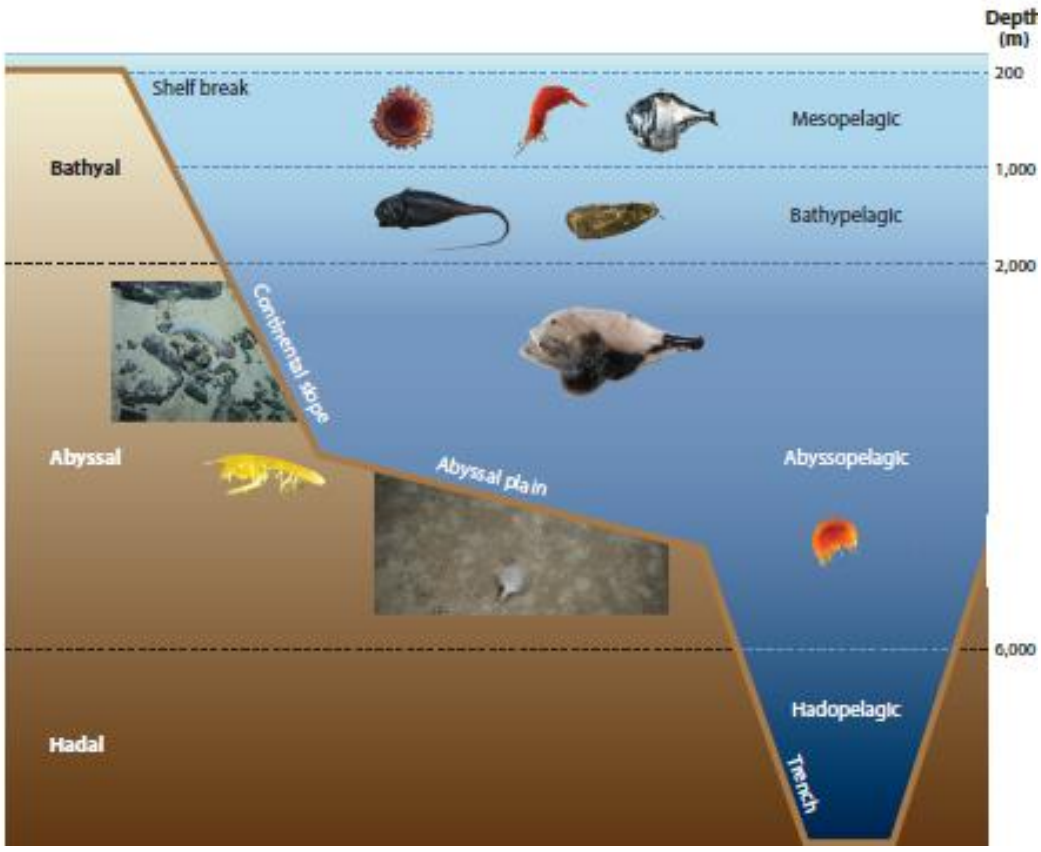


Figura 3 Divisione ecosistemi profondi del reparto planctonico e bentonico sotto I 200 metri. Photos © A.D. Rogers, International Union for Conservation of Nature Seamounts Project, ***http://www.iucn.org/about/work/programmes/marine/marine_our_work/marine_governance/gmpp_ocean_governance_projects/seamounts/****; O. Ashford, University of Oxford; P. Tyler, University of Southampton.*

I lunghi cicli vitali, la fragilità degli organismi e la stabilità di questi ecosistemi lo rendono uno deli ambienti più fragili e più a rischio da parte dei cambiamenti climatici e dall'attività antropica in generale. Considerando il fatto che le nostre conoscenze su come gli organismi possano rispondere a questi cambiamenti sono ancora molto limitate in quanto studiare questi organismi è molto difficile (Danovaro et al., 2017). I principali impatti che questi ambienti subiscono sono la pesca a strascico che va ad impattare le comunità con lunghi cicli vitali, introduzione di substrati duri, l'introduzione di sostanze chimiche provenienti dalle attività estrattive ma anche inquinamento acustico e luminoso (Roger 2015;

Rogers et al., 2024), ma anche diminuzione di ossigeno, acidificazione, cambi di temperatura e limitazione di cibo. Tutto ciò porta ad una riduzione della biodiversità, e della taglia degli organismi, con l'aumento delle specie opportuniste e delle comunità microbiche (Fig. 4) (Danovaro 2018).

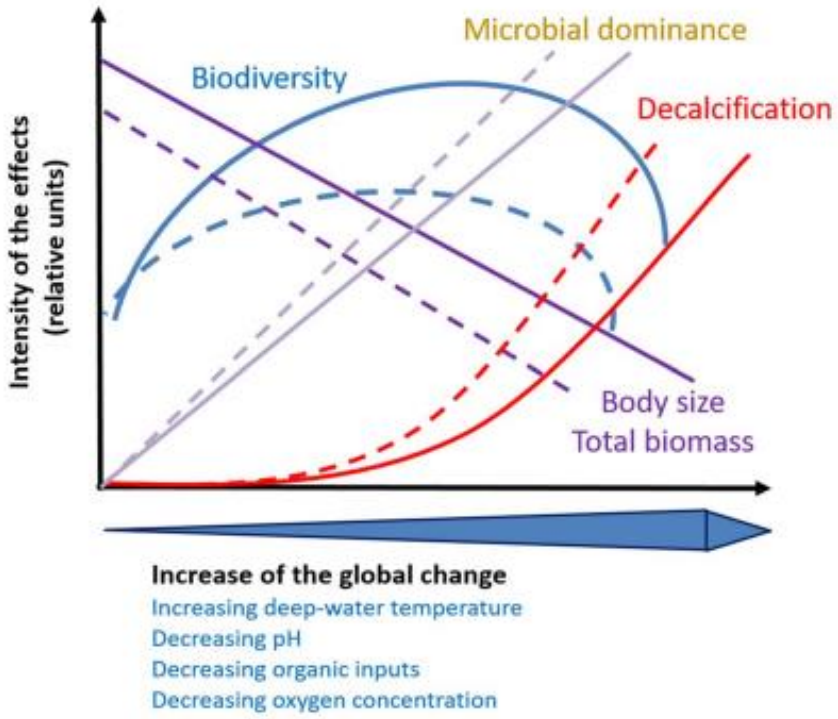


Figura 4 impatto degli effetti dovuti all'aumento del cambiamento climatico in Mediterraneo (tratteggiato) e in oceano (linea piena) Danovaro, R. Climate change impacts on the biota and on vulnerable habitats of the deep Mediterranean Sea. Rend. Fis. Acc. Lincei

1.3.1 BACINI PROFONDI IPERALINI E ANOSSICI

I bacini profondi iperalini e anossici rappresentano uno degli ambienti più estremi che si possano trovare in mare, questo è dovuto alla combinazione di diversi fattori come la completa anossia (concentrazione di ossigeno < di 0.2 mg/L), l'alto livello di sale (~ 7-10 volte più elevato delle condizioni normali)

(Barozzi et al 2018), che comporta stress osmotico, l'elevata pressione idrodinamica (~ 35Mpa), in oltre la concentrazione del Mg^{2+} è molto elevata mentre quella del N^{+} è molto bassa (Van Der Wielen et al., 2005).

Nel Mar Mediterraneo sono presenti diversi bacini profondi iperalini e anossici (DHAB): L'Atalante, Urania, Discovery, Bannock, Tyro e La Medee (Fig. 5), con una profondità compresa tra i 3200m e i 3600m, e tutti contengono lo strato chiamato "brine" (Fig. 6).



Figura 5 DHAB del Mediterraneo [Da Merlino 2018]

Questo strato si è formato durante il periodo di grande evaporazione avvenuto tra 5.9 e 5.3 milioni di anni fa, chiamata anche evaporazione Messiniana (Hsu¨ et al., 1977; Danovaro et al., 2010).

In queste aree sono riescono a vivere solo le comunità microbiche (Merlino et al., 2018).

Per adattarsi a vivere in queste condizioni estreme, i procarioti hanno sviluppato diversi adattamenti, tra cui l'equilibrio iso-osmotico attraverso l'ingresso di ioni K^+ e Cl^-, adattamenti per resistere alle elevate pressioni attraverso l'aggiustamento dello stato fisico della membrana e la scarsità di ossigeno (Fisher et al., 2021). Tuttavia, nel 2014 Naves (et al., 2014) scoprirono il primo organismo multicellulare a vivere in condizioni di completa anossia *Spinoloricus cinziae* un Loricifero che riesce a vivere in condizioni di completa anossia.

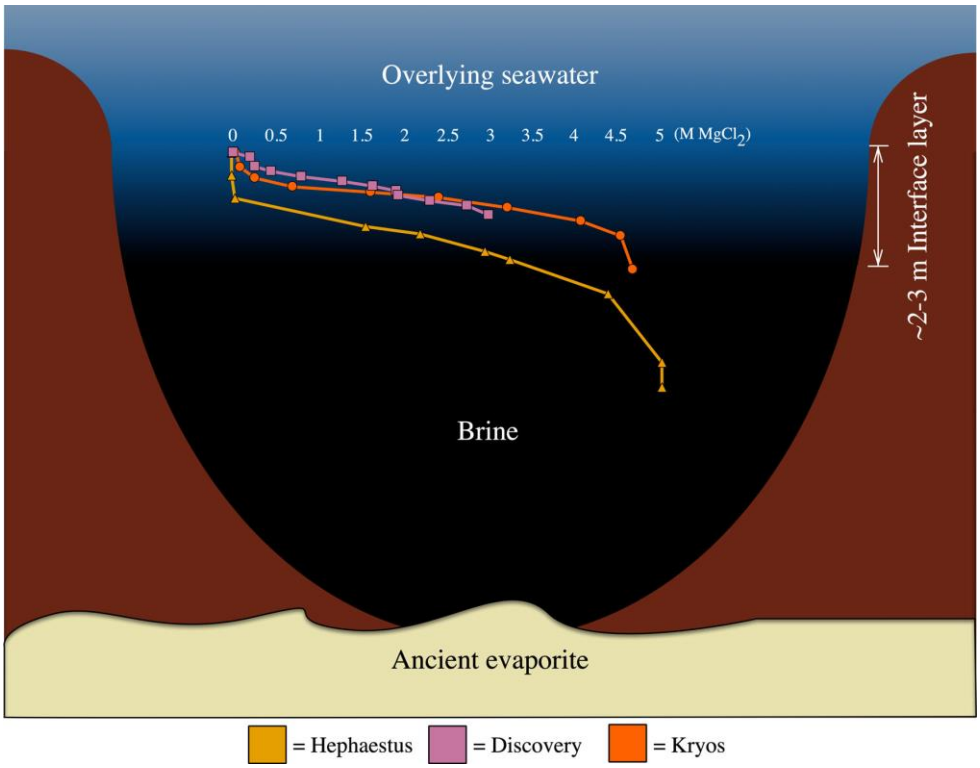


Figura 6 Basic diagram of a deep-sea hypersaline anoxic basin (DHAB). Eastern Mediterranean Sea DHABs are about 3300 mbsl with approximate brine depths ranging from 50 to 160 m and surface areas of 1.7–25 km2 (La Cono et al., 2019). The plot shows the concentration of MgCl2 in Molar with depth in meters within the Hephaestus, Discovery and Kryos basins. Values based on published data from La Cono et al. (2019), Hallsworth et al. (2007) and Yakimov et al. (2015). Data were depth corrected for better comparison of chemoclines. Note: the figure is not to scale. (Luke A. Fisher et al. 2021)

1.4 MACROFAUNA

I fondali molli rappresentano sistemi di grande interesse scientifico per la loro vasta distribuzione, la rilevanza e varietà delle comunità bentoniche che vi risiedono (Schratzberger e Ingels, 2018), tra le quali troviamo: comunità microbiche sia aerobiche che anaerobiche che costituiscono più di 5/6 della biomassa totale del pianeta e contribuiscono al riciclo di materia organica e inorganica ma anche per i cicli di C, S, N (Baker et al., 2020), comunità virali che controllano le comunità microbiche attraverso la lisi batterica (Heinrichs et al., 2020) e assemblaggi di macrofauna (Fig. 7) e meiofanua, questi ultimi

utilizzati come indicatori ambientali grazie alla loro ubiquità, variabilità, piccola taglia, sedentarietà e cicli vitali molto veloci (Jeong et al., 2023).



Figura 7 tipici animali della macrofauna "Microscope images of macrofauna. Upper row from left to right: Aplacophora indet, Anguillosyllis sp., Ledella sp., Echinodermata juvenile indet., Aglaophamus sp., Bryozoa indet. Middle row from left to right: Bryozoa indet., Glycera sp., Ophelina martinezarbizui Wiklund et al., 2019, Gastropoda indet., Sphaerodoridae indet., Laonice sp. Lower row from left to right: Dacrydium sp., Flabelligeridae indet., Myonera sp., Plenaster craigi Lim & Wiklund, 2017"

Per macrofauna si intende l'insieme di organismi che hanno dimensioni superiori ai 0.5 mm ed inferiore ai 5cm (Ramirez-Llodra et al., 2010), fa eccezione le comunità macrobentoniche profonde in quanto la dimensione del setaccio utilizzato diminuisce a 0.3 mm.

I fondali molli sono popolati da organismi di varie specie che attraverso il fenomeno del bioturbamento possono penetrare a diverse profondità nel

substrato, contribuendo all'ossigenazione tramite la costruzione di gallerie (Martinez-Garcia et al., 2015). Lo spessore colonizzato varia notevolmente tra gli ambienti marini e salmastri, in base alla granulometria del sedimento, al contenuto di sostanza organica e ad altri fattori, i principali taxa che si riscontrano sono: Policheti, Bivalvi, Anfipodi Decapodi ed Echinodermi (Fig. 8).

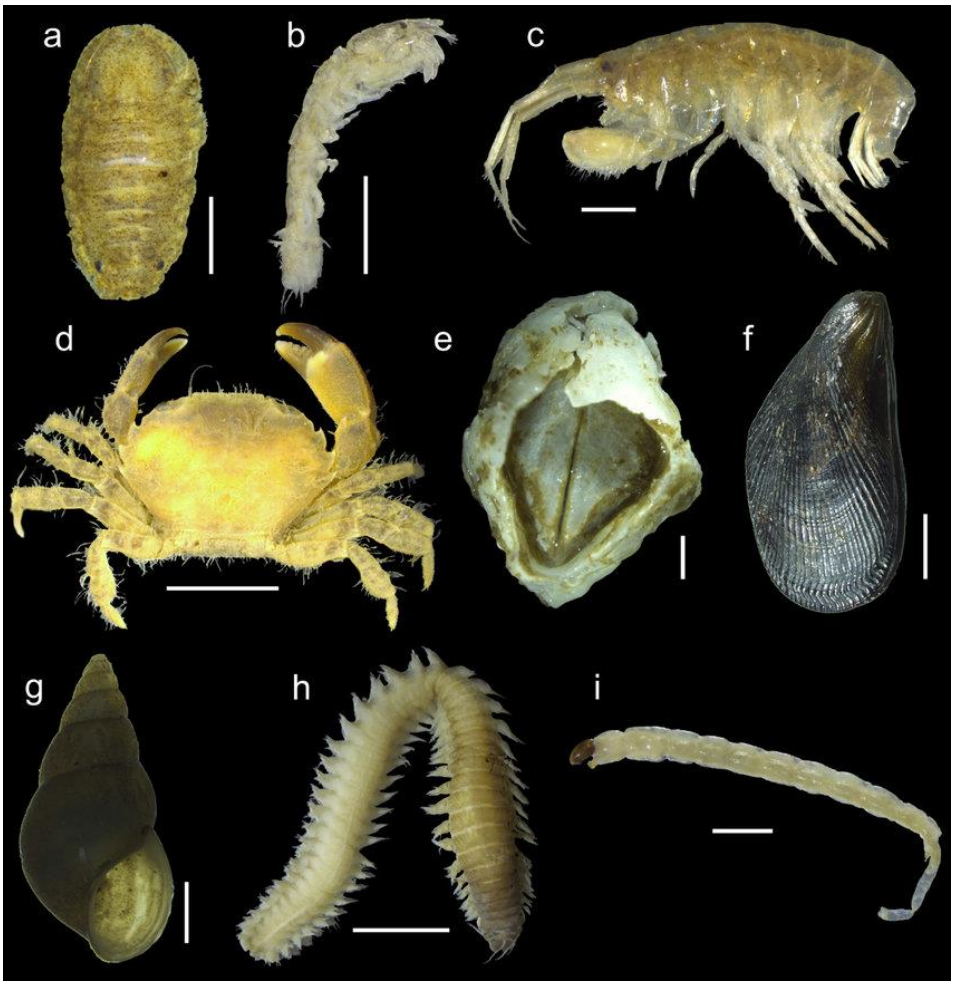


Figura 8 Composizione della macrofauna a. Cassidinidea fluminensis (Mañe-Garzón, 1944). b. Sinelobus stanfordi (Richardson, 1901). c. Melita mangrovi Oliveira, 1953. d. Eurypanopeus dissimilis (Benedict & Rathbun, 1891). e. Amphibalanus sp. f. Brachidontes darwinianus (d'Orbigny, 1842). g. Heleobia sp. H. Alitta succinea (Leuckart, 1847). i. Chironomidae larvae. Barra di scala: a-c, g, i, 1 mm; d, f, h, 5 mm; e, 2 mm. Rodrigues, Antonio & Fernandes, Mauricio & Miyahira, Igor & Neves dos Santos, Luciano & Caetano, Carlos. (2021). Anais da Academia Brasileira de Ciências. 93. 10.1590/0001-3765202120191221.

I Policheti rappresentano il taxon più abbondante nelle comunità a fondo molle, sia a livello di numero di specie, abbondanza e biomassa, inoltre forniscono una buona rappresentazione dell'attività e strategia di alimentazione e l'analisi di solo questo gruppo ci dà informazioni su tutta la comunità macrobentonica (Tselepides et al., 2000).

La comunità macrobentonica è molto spesso utilizzata come "indicatore" della qualità ambientale in quanto risponde molto velocemente e in maniera significativa ai cambiamenti ambientali (Afghan et al., 2020), ciò è dovuto al fatto che le comunità macrobentoniche di fondo molle sono strettamente correlate a molte caratteristiche biotiche e abiotiche, come idrodinamismo, granulometria, potenziale redox, presenza di materia organica e fonti di inquinamento (Martinez-Garcia et al., 2015).

2. OBIETTIVI DELLA TESI

Lo studio ha come obiettivo valutare il cambiamento della composizione e abbondanza della macrofauna nel Mar Egeo avvenuto nell'arco temporale dal 1994 al 2023 usando come dati del 1994 quelli raccolti da Tselepides et al., (2000), e valutare la presenza di plastica ritrovata sia nel bacino Cretese che all'interno del DHAB L'Atalante.

3. MATERIALI E METODI

3.1 AREA DI STUDIO

I campioni sono stati presi in tre aree del Mar Egeo: la zona tra la penisola del Peloponneso e l'isola di Creta, l'area antistante a Creta, l'area più profonda nelle DHAB dove sono stati presi sia campioni di controllo che di studio.

Queste aree differiscono molto sia per i parametri batimetrici che per gli altri parametri abiotici. Infatti, nell'area antistante a creta la granulometria è fango sabbioso, l'area tra creta e il Peloponneso è un misto tra fango sabbioso e fango fine mentre l'area del bacino anossico è prettamente a fango fine (Fig. 9).

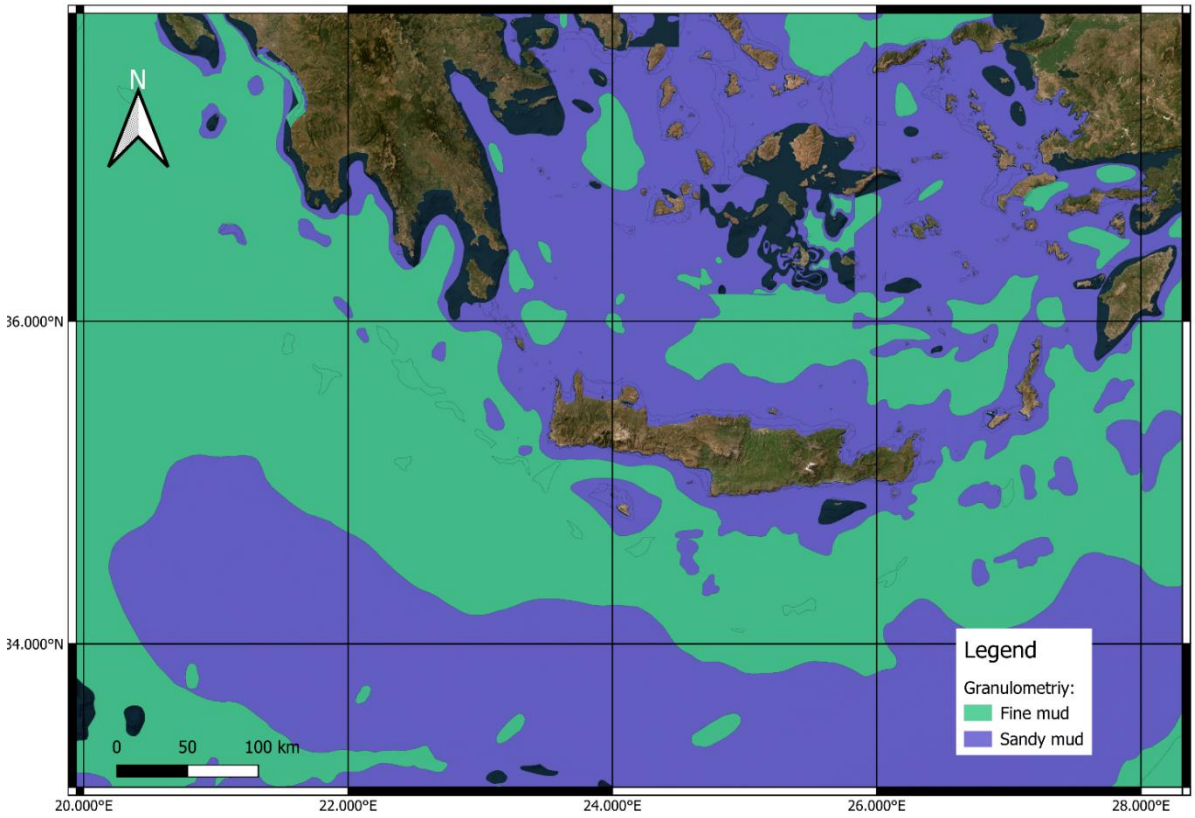


Figura 9 Granulometria aree di campionamento Mar Egeo [Fonte: EMODnet]

Nel bacino L'Atalante la concentrazione degli ioni Na^+ supera i 4 M (Merlino et al., 2018), inoltre le acque superiori sono separate da quelle del bacino

caratterizzate da una salinità totale > 30%, completa anossia, elevate concentrazioni di metano e idrogeno solforato e la clorosità e clorinità a 20°C è di 120 gl^{-1} rispettivamente (Danovaro et al., 2005).

3.2 STRATEGIA DI CAMPIONAMENTO

Il campionamento è stato effettuato nel periodo che va dal 22/04/2023 al 08/05/2023 a bordo della nave oceanografica Aegaeo, il campionamento è stato effettuato con un box corer con una superficie di 0.1 m^2.

Le aree di campionamento sono 3: una antistante l'isola di Creta con un transetto costa largo (Stazioni D3, D4, D5, D6, D7), un transetto tra l'isola di Creta e il Peloponneso (Stazioni A4, A5, A6, A6ALB, A7, A12, A14, A16, A18, A20, A21, A22), e all'interno del bacino profondo iperalino e anossico Atalante (Fig. 10).

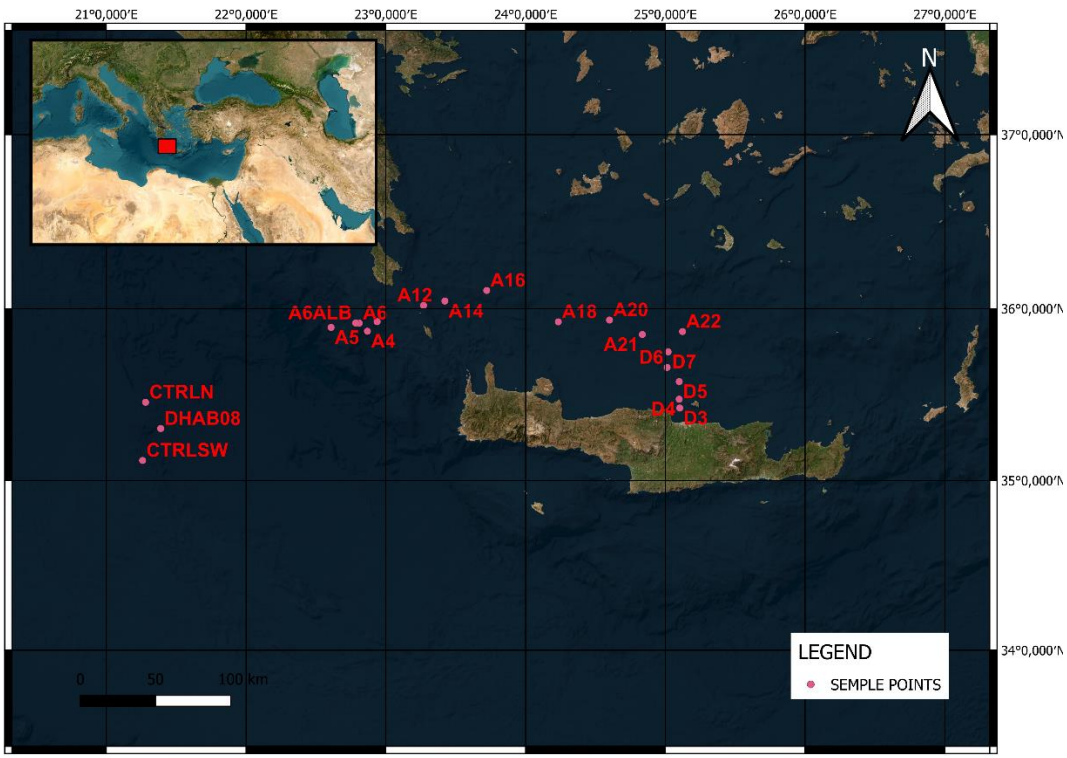


Figura 10 Punti di campionamento [EMOdnet]

3.3 ATTIVITA' DI LABORATORIO

3.3.1 SORTING E ANALISI MACROFAUNA

I campioni una volta raccolti attraverso il box corer sono stati passati su un setaccio con una maglia metallica di 300 μm, tutto ciò che è rimasto sopra il filtro è stato congelato a -20°C.

Successivamente in laboratorio i campioni sono stati fatti scongelare gradualmente in modo da evitare un brusco cambio di temperatura che poteva comportare la rottura di qualche organismo.

Per rendere più facile la fase di sorting i campioni sono stati colorati con il rosa bengala a concentrazione 0.5 gL^{-1} ed analizzati dopo almeno un giorno (Tselepides et al., 2000).

Successivamente i campioni sono stati analizzati allo lo stereomicroscopio per estrarre gli organismi appartenenti alla macrofauna. I quali sono stati ulteriormente analizzati per cercare di arrivare al più basso livello tassonomico possibile e poi ricongelati a -20°C in una eppendorf.

3.3.2 SORTING E ANALISI DEI FRAMMENTI DI PLASTICA

Durante la fase di sorting della macrofauna i frammenti di plastica che sono stati rinvenuti sono stati contati e messi da parte in una eppendorf.

Successivamente, sono stati trasferiti in una piastra petri in vetro e seccati in stufa a 30° per rimuovere l'acqua adesa sopra le plastiche ed essere pronte per la fase di caratterizzazione.

Questa fase ha permesso di capire la composizione chimica delle microplastiche rinvenute, inoltre è stato preparato un bianco lasciando aperta una petri in vetro all'aria così da poter standardizzare i nostri risultanti andando eventualmente a rimuovere la contaminazione da laboratorio.

La caratterizzazione chimica delle plastiche, in base alle loro dimensioni, è stata eseguita utilizzando due modalità: trasmissione e ATR (riflettanza totale attenuata). Nel caso della modalità di trasmissione, le microplastiche singole sono state posizionate su un filtro di ossido di alluminio (Whatman® Anodisc, diametro 25mm, porosità 0.2μ), successivamente montato su supporti specifici per il microscopio FT-IR (Fig. 11), per permettere l'analisi agli infrarossi in trasmissione.

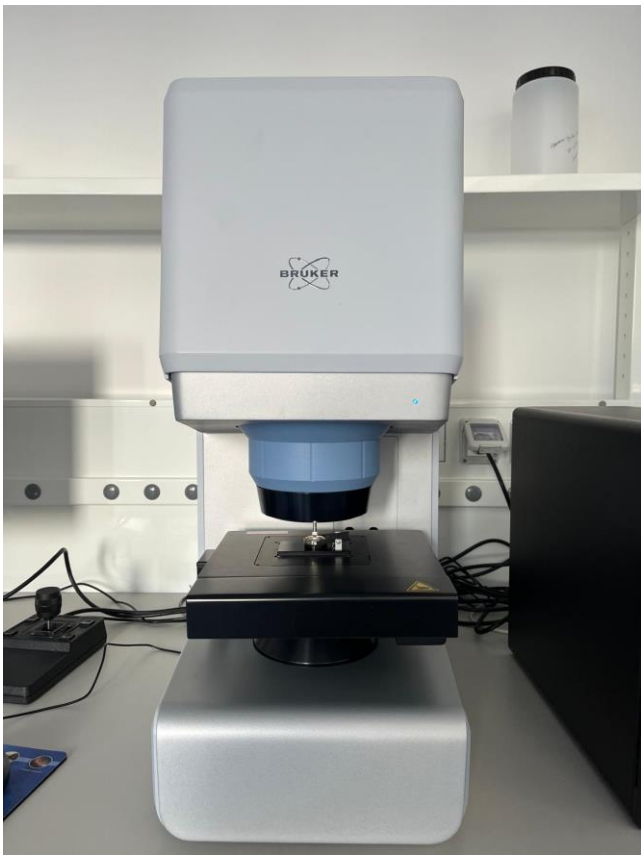


Figura 11 Microscopio FT-IR

Nella modalità ATR, invece, le microplastiche, troppo spesse per essere analizzate in trasmissione, sono state collocate direttamente su un supporto del microscopio FT-IR, garantendo un contatto diretto tra la microplastica e il cristallo di lettura del microscopio (Fig. 12). Gli spettri FT-IR ottenuti sono stati poi identificati mediante un confronto software con le librerie di riferimento, al fine di determinare con precisione la composizione chimica delle microplastiche rilasciate.

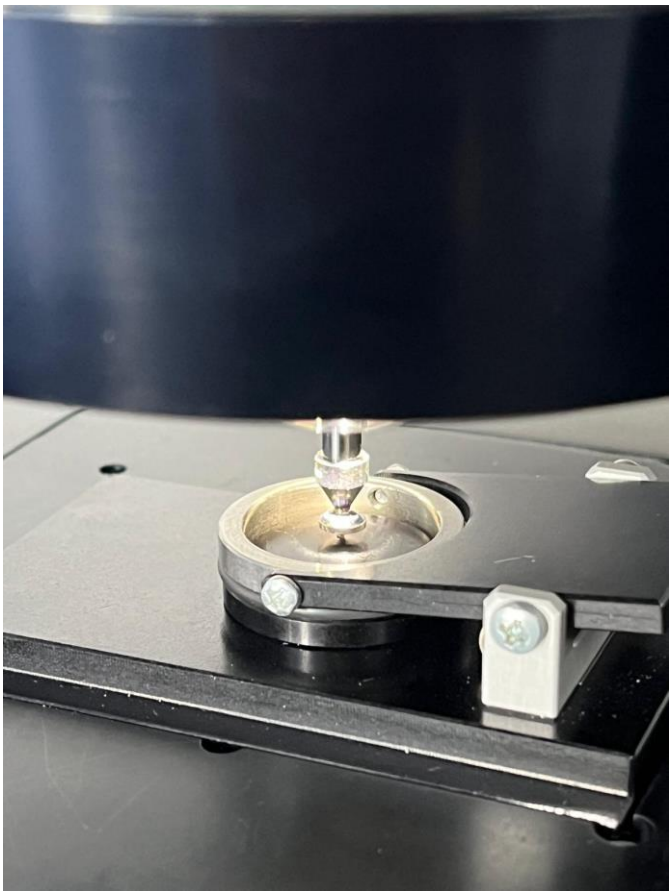


Figura 12 Cristallo per l'analisi ATR

3.4 ANALISI DEI DATI

Da entrambi i dataset finali dell'assemblaggio della macrofauna e della plastica, è stata ottenuta una matrice di similarità calcolata attraverso l'applicazione dell'indice Bray-Curtis sui dati trasformati attraverso la radice quadrata. Dalla matrice di similarità è stato ottenuto un'analisi MDS (multi dimensional scale analysis) al fine di visualizzare graficamente le differenze fra stazioni.

Successivamente, allo scopo di testare la significatività delle differenze fra le stazioni, è stata effettuata un'analisi PERMANOVA (permutation analisis of variance). Il disegno sperimentale includeva un unico fattore chiamato

"stazione", nell'analisi statistica sono state escluse le stazioni del DHAB in quanto non contenendo organismi non è stato possibile applicarci il Bray-Curtis così come non è stato possibile includerli nell'ANOVA parametrica.

La biodiversità della macrofauna è stata misurata attraverso l'utilizzo di diversi indici: 1) dominanza calcolata come 1- indice di Simpson che va da un range di 0 (tutti i taxa sono equamente presenti) a 1 (un taxa domina la comunità), 2) Simpson calcolato come 1-D, 3) Shannon in cui i valori variano da 0 per comunità con un solo taxa a valori più alti per comunità con diversi taxa, 4) evennes calcolato come e^H/S e 5) Margalef che viene calcolato come (S-1)/ln(n). Tutte le analisi statistiche e il calcolo dei vari indici sono stati effettuati con il software PAST.

4. **RISULTATI**

4.1 ASSEMBLAGGIO DELLA MACROFAUNA

L'abbondanza totale media degli organismi della macrofauna nell'area di studio varia da 5 ± 0.5 a 960 ± 350 individui al m^2 nelle stazioni A5 e D3 rispettivamente, nel DHAB L'Atalante non è stato trovato nessun organismo appartenete alla macrofauna (Fig. 13).

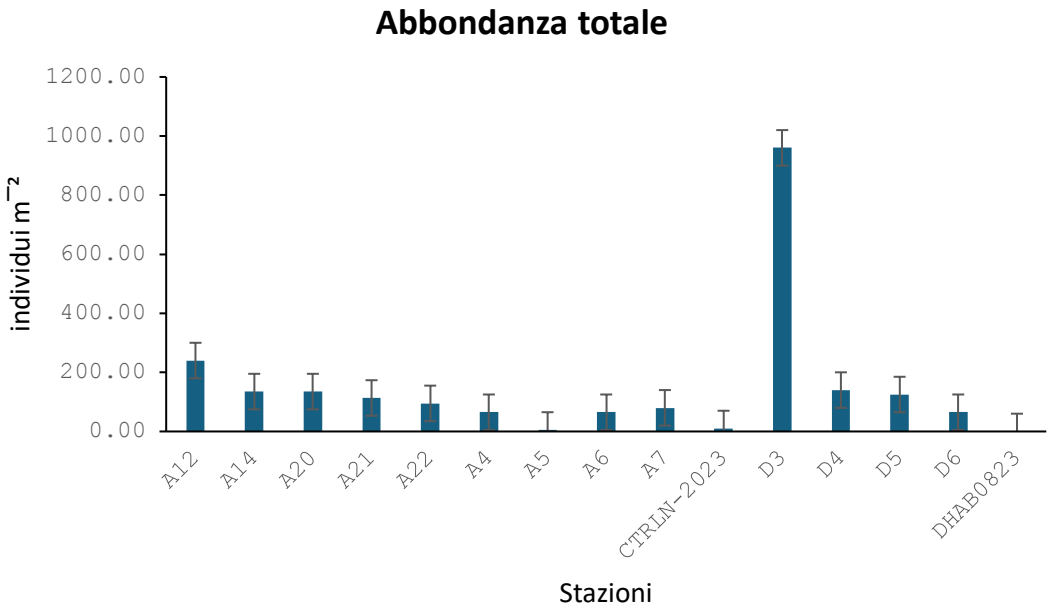


Figura 13 Abbondanza (media ± e.s) nelle stazioni campionate.

L'ANOVA ha indicato il fattore "stazione" come significativo ($p < 0.01$). il pair-wise test indica come significativamente differente la stazione D3 rispetto a tutte le altre ($p < 0.05$) ad eccezione delle stazioni A6 e A7 ($p = 0.07$) e la stazione D6 rispetto alla A4 ($p < 0.0001$).

Il numero di taxa nell'area di studio varia da 1 taxa a 7 taxa nelle stazioni A5 e D3 rispettivamente, mentre nel DHAB L'Atalante in numero di taxa è zero (Fig. 14).

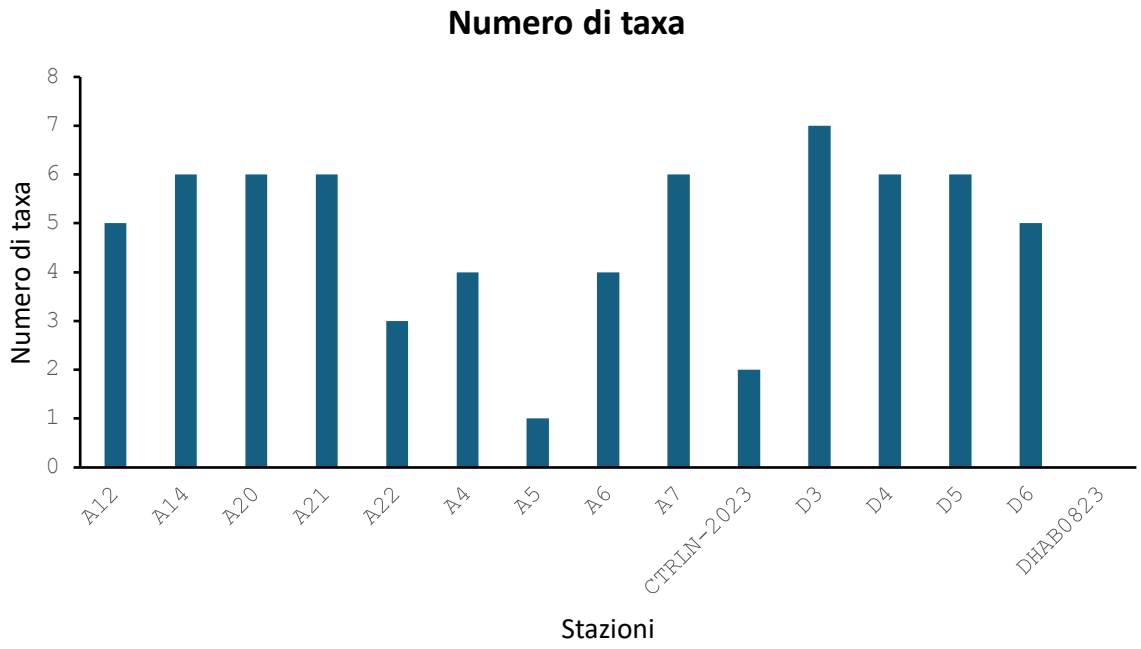


Figura 14 Diversità dell'assemblaggio della macrofauna nelle stazioni campionate, espresse come numero di taxa superiori.

L'assemblaggio della macrofauna investigato è composto da: Sipuncula, Crustacea, Isopoda, Nemerta, Scaphopoda, Copepoda, Acari, Nematoda, Bivalvia, Tanaidacea, Pycnogonida, Polychaeta, Ostracoda, Amphipoda, Ophiuroidea.

I taxa più abbondanti (più del 50% del totale per ogni stazione) sono risultati essere: Nematoda (Fig 15a), Sipuncula (Fig 15b) e Polycaeta, di quest'ultima sono state riconosciute 4 famigle: Syllidae, Sigalionidae (identificati i *Pholoides* (Fig. 15c) e *Sthenelais*), Eunicidae, Goniadidae (Fig. 16).



Figura 15a foto di un Nematoda allo stereomicroscopio.



Figura 15b foto di un Sipuncula allo stereomicroscopio.



Figura 15c foto di un Pholoides al microscopio ottico.

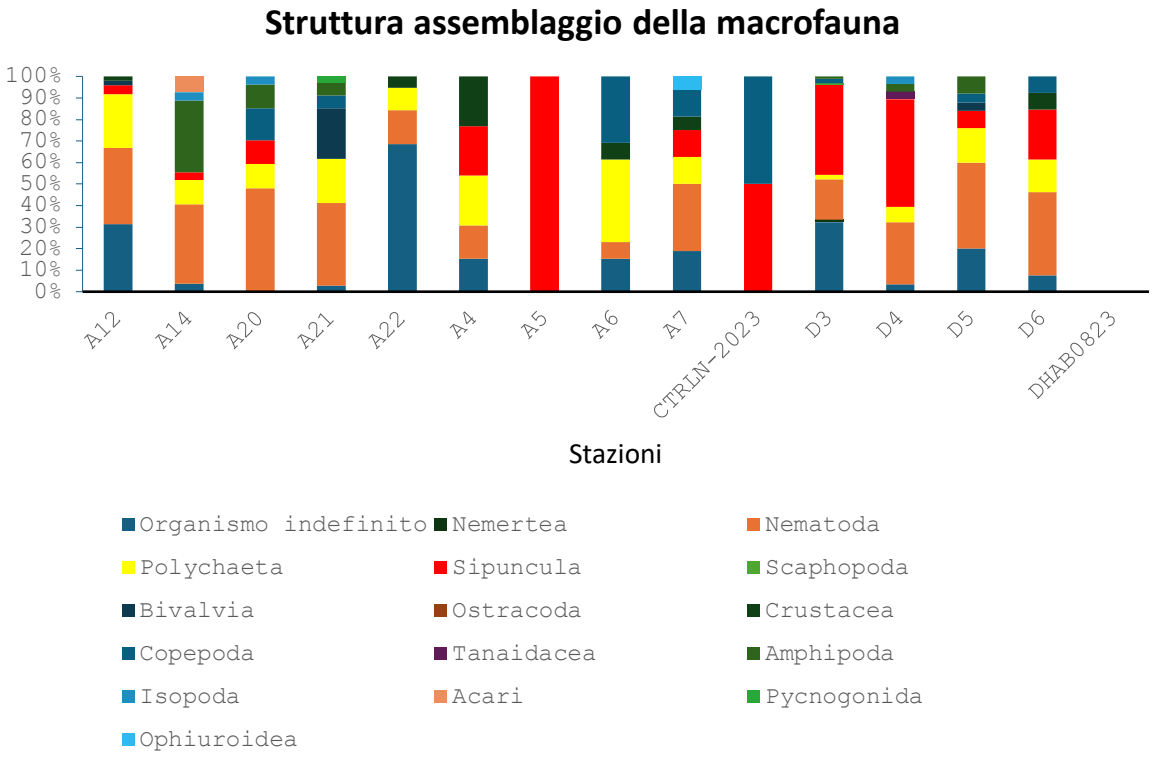


Figura 16 Struttura assemblaggio della macrofauna

L’indice di dominanza D mostra come nella stazione A5 (valore di D =1) sia dominante una sola specie mentre tutte le altre stazioni non esiste una specie che domina sulle altre (Fig. 17).

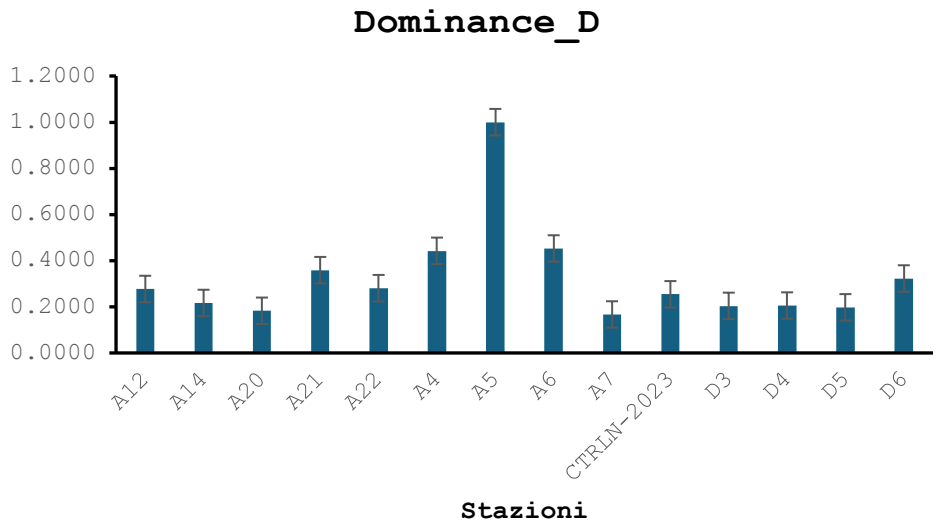


Figura 17 Indice di Dominanza D

L’indice di Simpson mostra come i valori di tutte le stazioni siano superiori di 0.4 fatta eccezione della stazione A5 dove il valore è = 0 (Fig. 18).

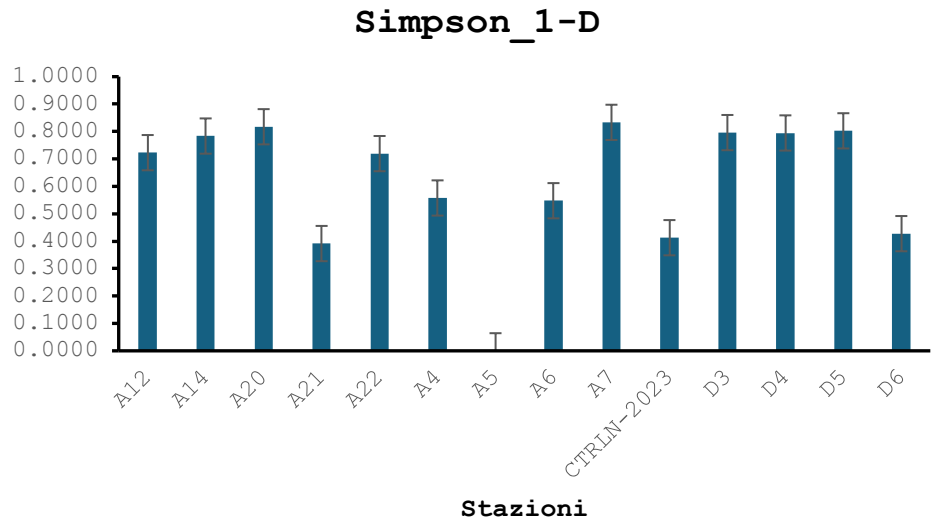


Figura 18 Indice di Simpson 1-D

L'indice di Shannon (H) mostra in tutte le stazioni valori prossimi o superiori all'1 ad eccezione della stazione A5 (dove il valore di H = 0), e delle stazioni A21 e CTRLN-2023 (con H superiori a 0.5) (Fig. 19).

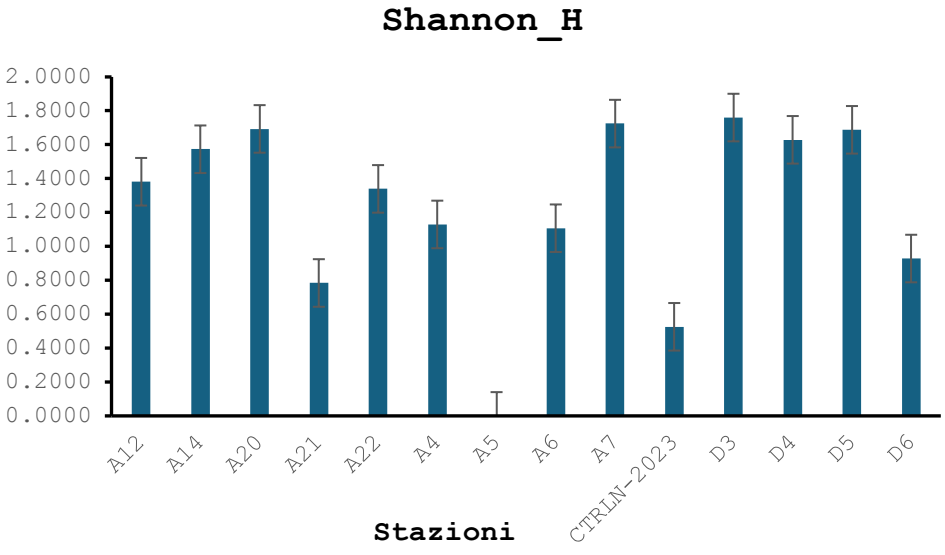


Figura 19 Indice di Shannon H

L’indice Evenness mostra valori uguali o superiori di 0.7 in tutte le stazioni (Fig. 20).

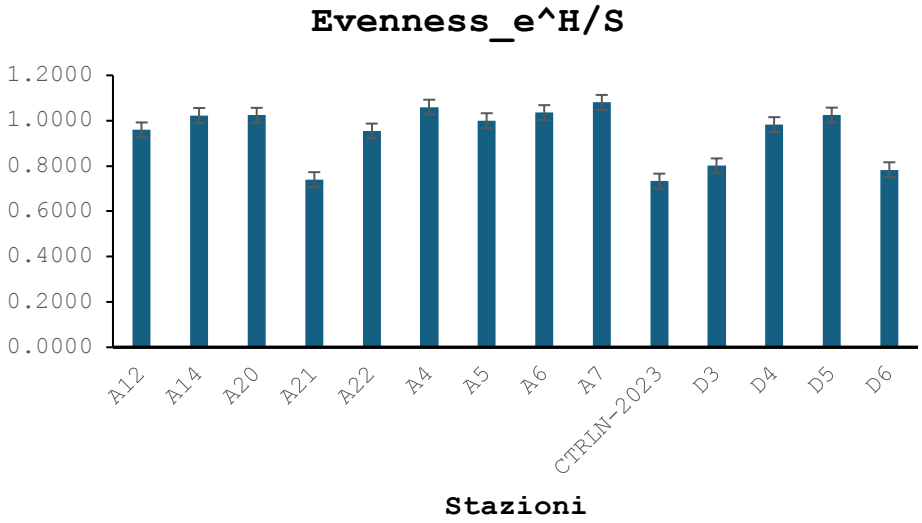


Figura 20 Evenness e^H/S

L’indice di Margalef mostra valori superiori a 0.8 in tutte le stazioni fatta eccezione delle stazioni A5, A21 e A7 dove si trovano valori inferiori a 0.7 (Fig.21)

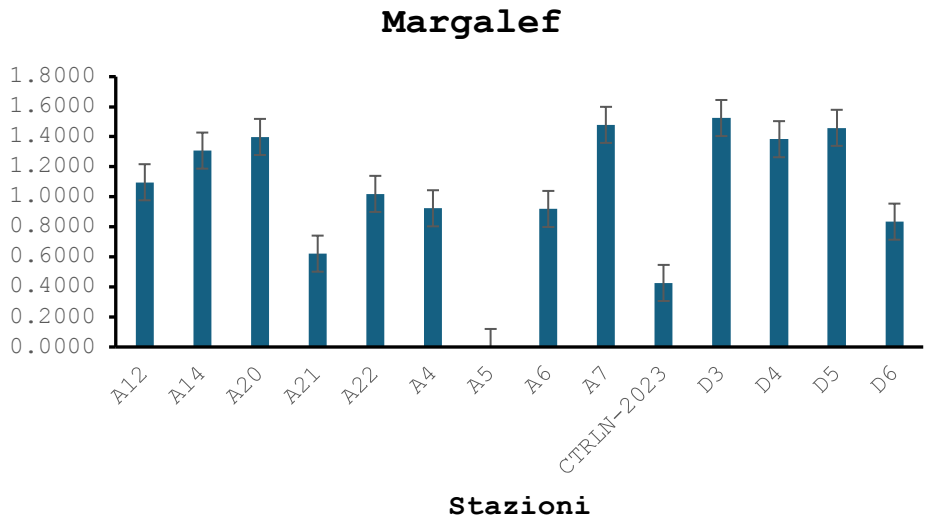


Figura 21 Indice di Margalef

Nel MDS le repliche delle varie stazioni appaiono concentrate un vicino all'altra ad eccezione di una replica di A22, A5 e CTRLN-2023 (Fig. 22).

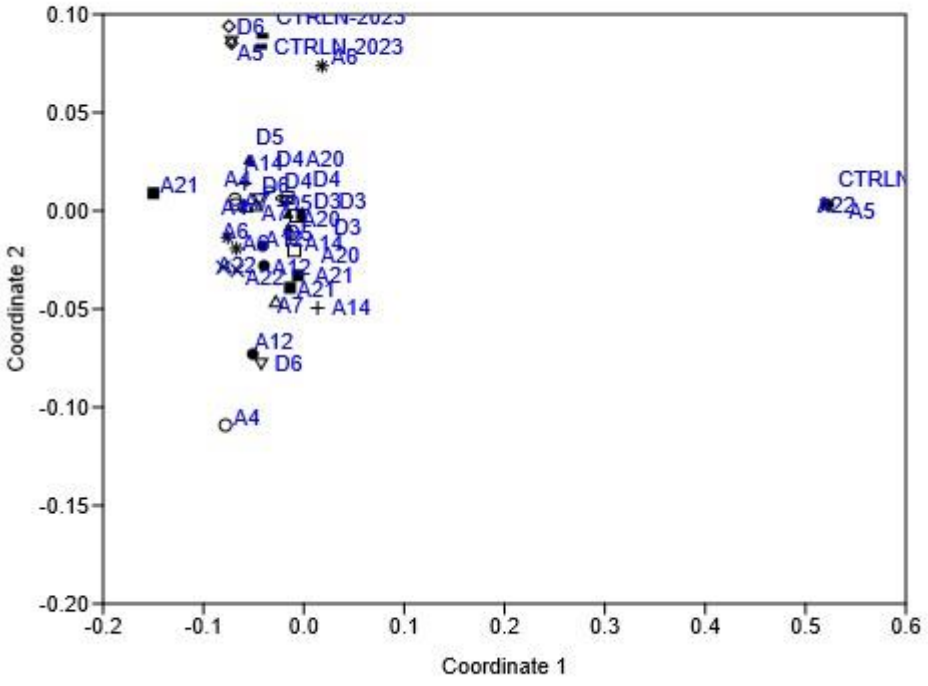


Figura 22 MDS macrofauna

L’analisi PERMANOVA ha indicato il fattore “stazione” come significativo ($p < 0.001$). Nel pair-wise test non sono state riscontrante differenze significative tra le stazioni; tuttavia, spesso si riscontrano valori di p-value prossimi alla significatività ($p=0.09$).

Ciò è imputabile al basso numero di repliche presenti in ciascuna stazione, che non permette di effettuare un test abbastanza robusto da raggiungere la significatività.

4.2 PLASTICHE

L’abbondanza totale delle plastiche mostra valori inferiori a 100 pezzi al m^2 fatta eccezione per le stazioni A4, A5, A6, CTRLN-2023, DHAB0823 in quest’ultima i valori superano i 750 ± 250 pezzi/m^2 con un peso totale di 32.15 mg, mentre in A4 e A6 mostrano valori di abbondanza di 660 ± 365 pezzi al m^2 e 700 ± 300 pezzi al m^2 e con un peso totale di 72.57 e 230.12 mg rispettivamente (Fig. 23).

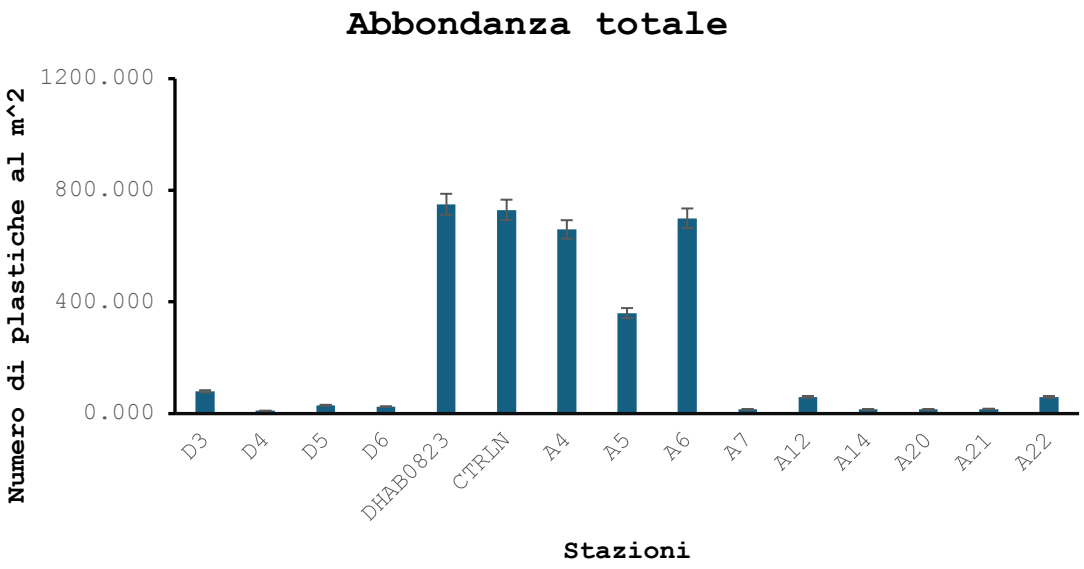


Figura 23 Abbondanza totale plastiche

L'ANOVA ha indicato il fattore "stazione" come significativo ($p < 0.0001$). Mentre il pair-wise test indica come significativamente differenti le stazioni del transetto D rispetto alle stazioni DHAB0823, CTRLN-2023, A4 e A6 ($p < 0.01$), la stazione CTRL-2023 con le stazioni dalla A7 alla A22 ($p < 0.01$) così come la stazione A4 e la A6 con le stazioni dalla A7 alla A22 ($p < 0.05$).

Le plastiche ritrovate (Fig. 24) sono composte principalmente da Titanium ethylexoxide (Fig. 25a, b) nelle stazioni DHAB0823, CTRLN-2023, e tutto il transetto A fatta eccezione per la stazione A14, altro materiale diffuso sono i frammenti di vernice (Fig. 25c) (Fig. 26).

Nelle stazioni del transetto D questo tipo di plastica se presente se ne trova in minori concentrazioni. In questo transetto, la tipologia di plastica mostra una diversità maggiore rispetto alle stazioni nel complesso.

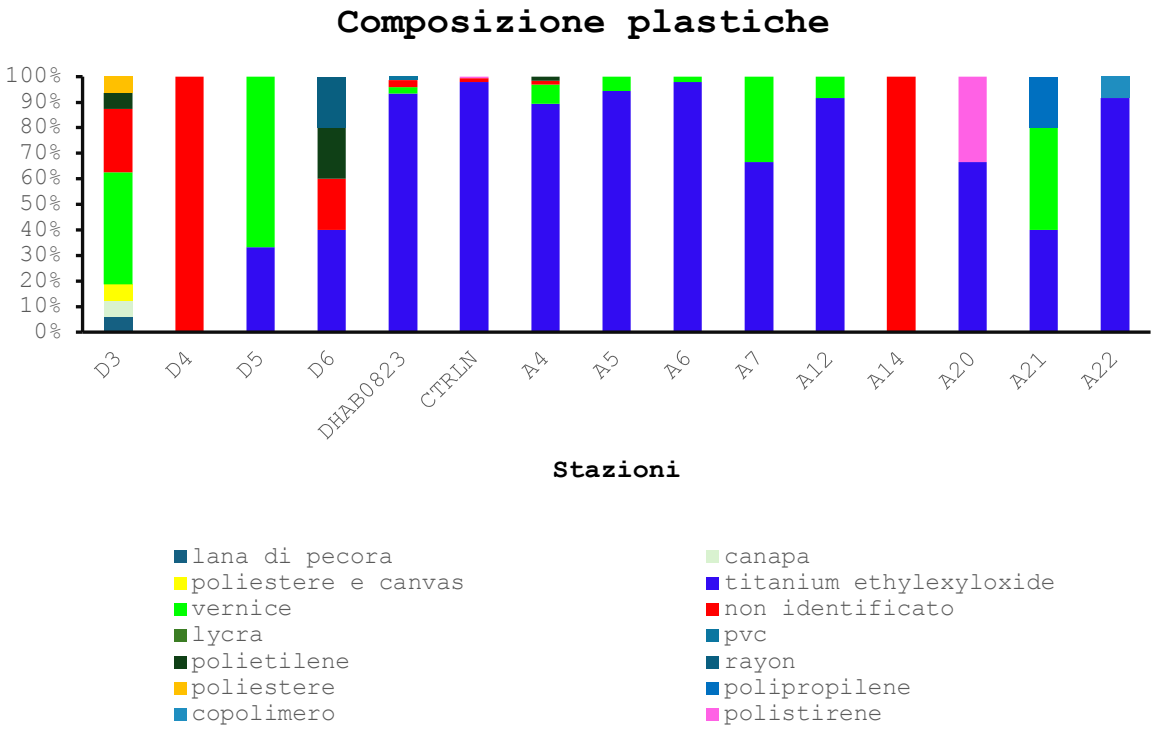


Figura 24 composizione di plastiche e fibre naturali riscontrate nei campioni.

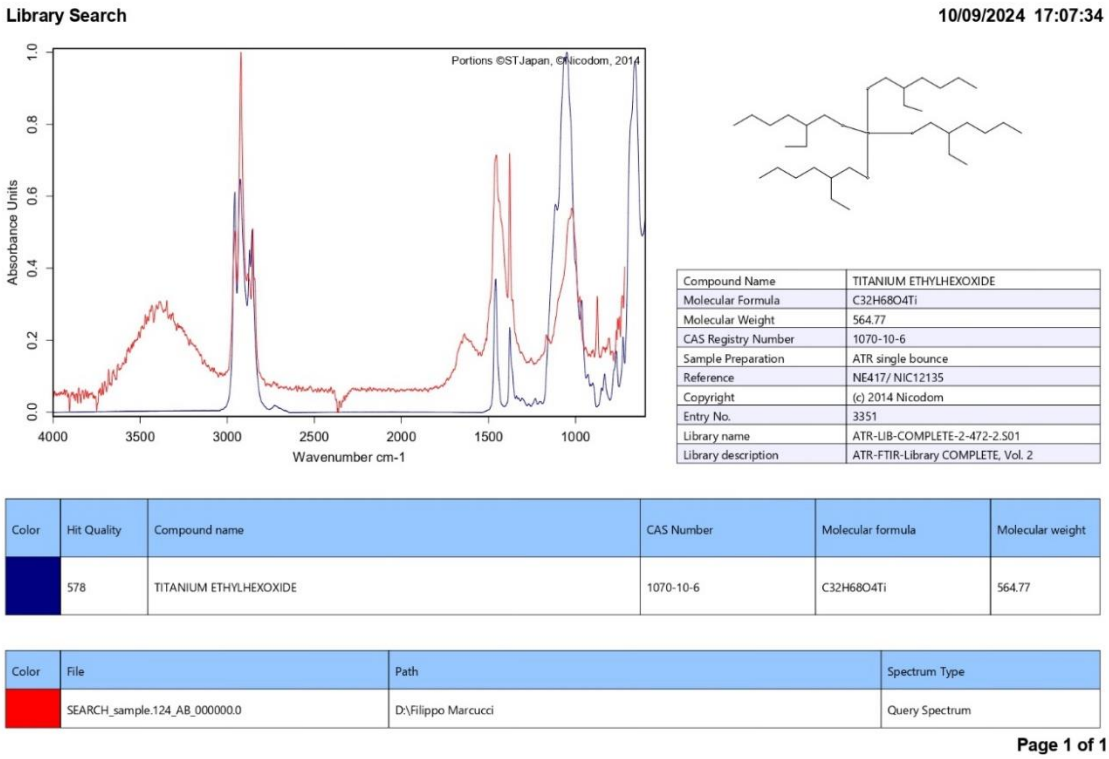


Figura 25a Comparazione spettri IR analizzati. Blu: spettro di riferimento di Titanium exoxide, Rosso: spettro ottenuto da analisi allo FTIR.

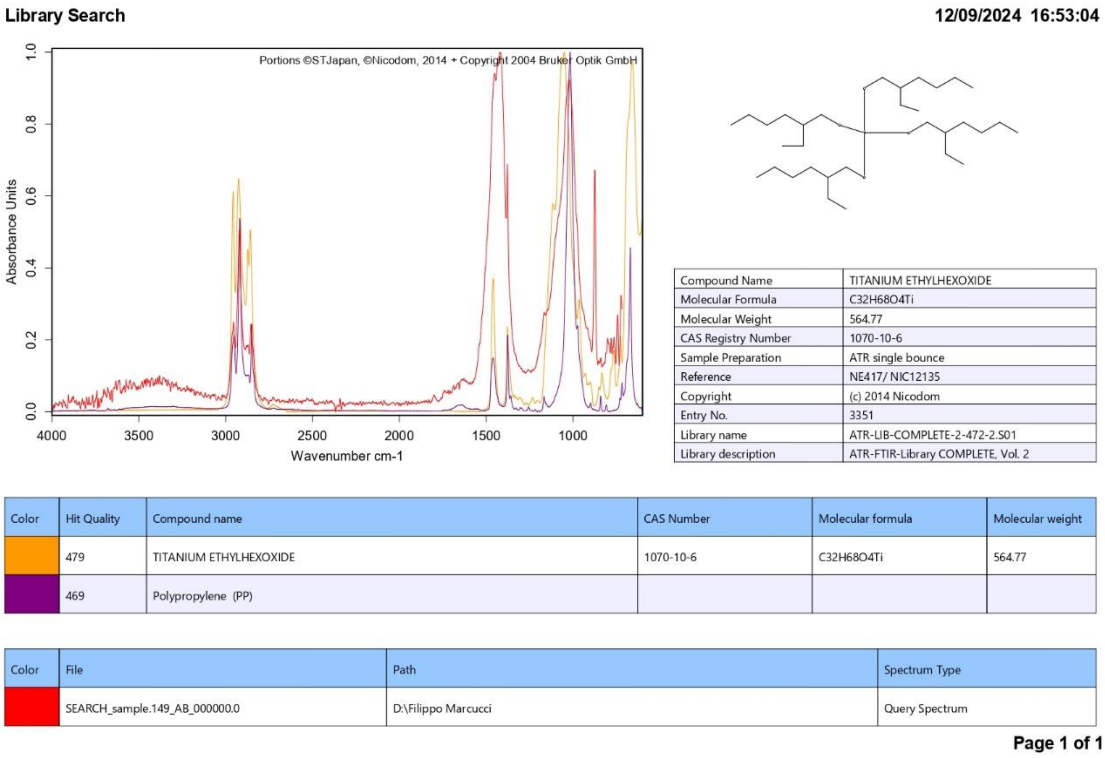


Figure 25b Comparazione spettri IR analizzati. Arancione: spettro di riferimento di titanium exoxide, Viola: spettro di riferimento polipropilene, Rosso: spettro ottenuto d analisi allo FTIR.

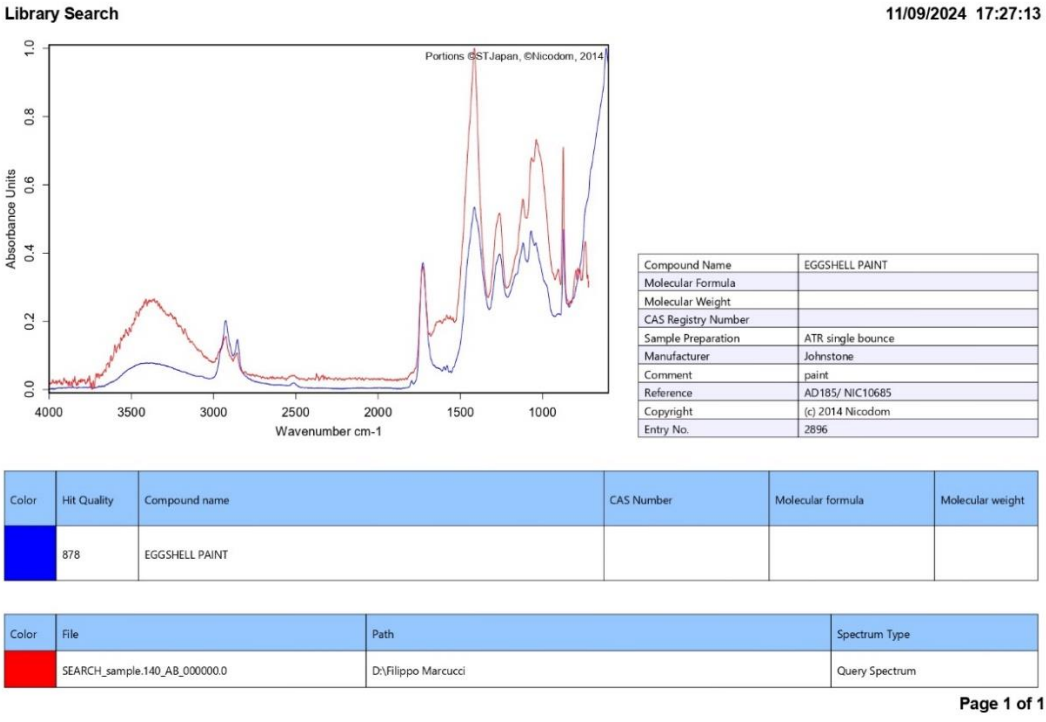


Figura 25c Comparazione spettri IR analizzati. Blu: spettro di riferimento di vernice, Rosso: spettro ottenuto d'analisi allo FTIR.

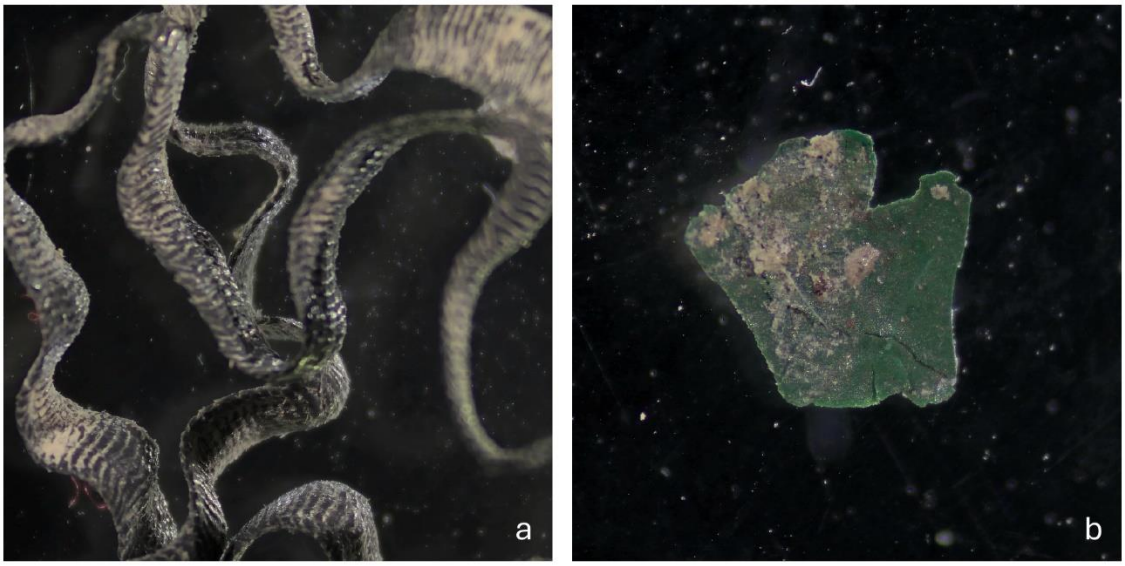


Figure 26 fotografia di pezzi definiti come Titanium ethylexoxide (a) e vernice (b)

Nel MDS le repliche delle varie stazioni appaiono concentrate un vicino all'altra ad eccezione di due repliche della A21 ed una della A20, A22, A14, A7, A5 e D4 che sono posizionate vicine tra di loro (Fig. 27).

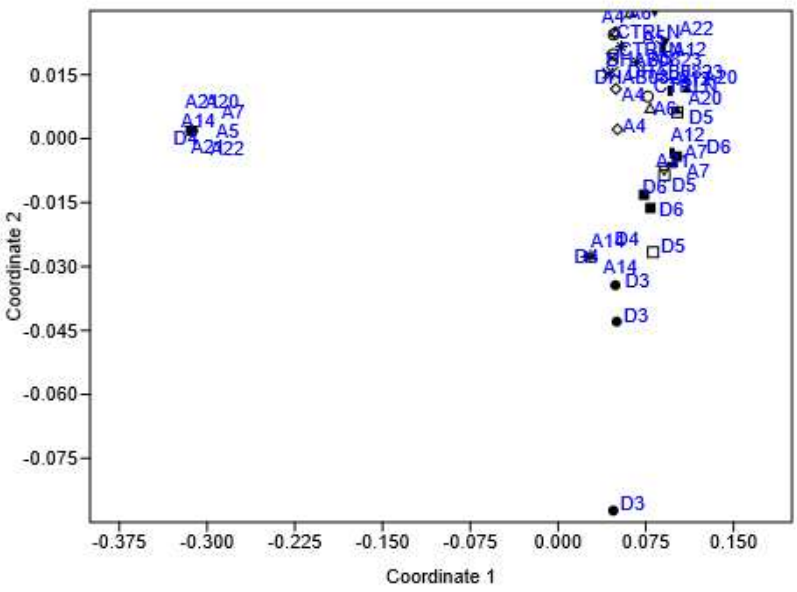


Figura 27 MDS delle plastiche

L'analisi PERMANOVA ha indicato il fattore "stazione" come significativo ($p < 0.001$). Nel pair-wise test non sono state riscontrante differenze significative tra le stazioni; tuttavia, spesso si riscontrano valori di p-value prossimi alla significatività ($p=0.09$).

Ciò è nuovamente imputabile al basso numero di repliche presenti in ciascuna stazione, che non permette di effettuare un test abbastanza robusto da raggiungere la significatività.

5. DISCUSSIONE

5.1 MACROFAUNA

I risultati di questo studio evidenziano come ci sia stato un cambiamento sia nel numero che nella composizione dell'assemblaggio della macrofauna nell'arco di 30 anni.

Un cambiamento notevole si è visto soprattutto lugo la scarpata cretese dove l'abbondanza totale degli organismi misurata da Tselepides (et al., 2000) passa da 654 ind/m^2 (1994) a 960 ind/m^2 (2023) (a 200 m di profondità) (unico caso di aumento), da 431 ind/m^2 (1994) a 140 ind/m^2 (2023) (a 500 m di profondità), da 481 ind/m^2 (1994) a 65 ind7m^2 (2023) (a 1000m di profondità) e da 191 ind/m^2 (1994) a 50 ind/m^2 (2024) (a 1570 m di profondità), comunque rimane costante che ci sia un andamento inversamente proporzionale tra profondità e abbondanza degli organismi, ovvero che all'aumentare della profondità l'abbondanza diminuisce come tipico degli ambienti profondi (Danovaro et al., 2010).

Similmente, anche la composizione dell'assemblaggio della macrofauna passa da una composizione formata principalmente da policheti (44.5-69.3% tra i 40-200 m, 39.7-43.9% tra i 540-940 m e il 53.4% a 1570 m), molluschi (15.2-25.2% con un massimo contributo a 100 m), crostacei (7.1-8% tra i 40-200 m, 5.3-10.6% tra i 540 e 940 m e 5.7% a 1570) e sifunculidi (4.4% a 40 m, 3.4% a 1570 m), a una composizione formata da sifunculidi (42-50% da 200-500 m, 8-23% tra 700-1000 m, e 0% a 1570 m), nematodi (18.75-28.57% tra 200-500m, 40-38.46% tra 700-1000m e 0% a 1570 m), crostacei (3.13-10.71% tra 200-500m, 12-15.38% tra 500-700 m, 100% a 1570 m), policheti (2.08-7.14% tra 200-500

m, 16-15.38 tra 700-100 m e 0% a 1570 m) e molluschi (0.52 % a 200 m e 4 % a 700 m mentre per le restanti profondità 0% (Tselepides et al., 2000).

A conferma di ciò anche gli indici di diversità applicati sui taxa superiori mostrano questo trend, infatti l'indice di dominanza fatta eccezione della stazione A5 dove il valore è uguale a 1 (un solo taxa domina sugli altri), mostra valori che sono inferiori allo 0.5 che ci fa capire che non c'è un taxa che domina sugli altri, ciò viene anche visto dall'indice di Shannon che con i sui valori superiori a1 fatta eccezione della stazione A5 (dove il valore è 0) ci dice che i taxa sono ben distribuiti nella stazione, anche l'indice di Simpson conferma quanto detto con valori bassi sulla stazione A5 dove quindi la probabilità che due individui presi a caso appartengano allo stesso taxon è massima, mentre nelle altre stazioni i valori sono maggiori ciò vuol dire che la probabilità a molto più bassa.

I risultati dell'ANOVA e PERMANOVA confermano una certa eterogeneità tra le stazioni, come indicato dalla significatività del fattore "Stazione".

Questo trend è confermato anche per le altre aree dove si è visto che sia la composizione che l'abbondanza della macrofauna cambia, in quanto il numero di policheti diminuisce e aumenta quello dei sifunculidi che diventano il gruppo dominate mentre il numero di nematodi aumenta leggermente (Kröncke et al., 2003).

In conclusione, nel corso di questi 30 anni c'è stato uno shift nella composizione e abbondanza della macrofauna in tutto il bacino Cretese.

Nell'area del DHAB L'Atalante non sono stati trovati organismi appartenenti alla macrofauna, però nell'area di controllo esterna al bacino a 3400 m di profondità sono stati trovati organismi come sifunculidi, questo risultato conferma ciò che è stato osservato già nella letteratura (Danovaro et al., 2010; Fisher et al., 2021).

Questo cambiamento potrebbe essere dovuto dai cambiamenti climatici in quanto gli animali che vivono negli ambienti profondi sono adattati a vivere in condizioni stabili e anche piccoli cambi delle condizioni ambientali possono modificare le strutture di comunità (Danovaro et al., 2004).

La mancanza di dati intermedi non permette di determinare se i cambiamenti riscontrati siano frutto di variazioni interannuali, o se si tratti piuttosto di un trend generale dovuto a fattori quali ad esempio i cambiamenti climatici.

Un trend di cambiamento è stato osservato anche nella meiofauna dove un aumento dei nematodi è accompagnato da una diminuzione dei policheti. Rispetto ai dati di confronto del 1994 è stato registrato un cambio della composizione della materia organica con un aumento dei lipidi e delle proteine normalmente associato al cambiamento climatico. I quali sono difficilmente utilizzabili dagli organismi come fonte di cibo (Danovaro et al., 2001), questo potrebbe aver contribuito alla riduzione e al cambiamento dell'assemblaggio della macrofauna suggerendo un possibile ruolo dei cambiamenti climatici.

5.2 PLASTICA

Uno studio condotto da Woodall (et al., 2014) sugli ambienti profondi come area di accumulo di rifiuti mostra come già nel 2014 l'area del Mar Egeo (3500 m di profondità) presentava un numero di plastiche pari a 15 pezzi per 50 ml di sedimento, con una composizione fatta da vernice e poliestere. In accordo con Woodal (et al., 2004), i nostri risultati mostrano come le vernici siano ancora presenti. In aggiunta sono stati trovati altri pezzi di diverso tipo.

Le analisi dei frammenti di plastica mostrano come il titanium ethylexoxide sia il materiale più abbondante fatta eccezione per le prime stazioni del transetto D (D3, D4, D5). Questo materiale, però, non è un materiale plastico ma è un additivo che viene utilizzato (sotto anche il nome di "TYZOR" o 2-Titanium (VI) ethylexyloxide) come catalizzatore o promotore di adesione per reazioni di esterificazione trans esterificazione e reazione di Ziegler-Natta, per molteplici usi industriali.

Proprio la reazione di Ziegler-Natta è una reazione che è stata utilizzata per la formazione del polipropilene isotattico che da quando fu scoperto nel 1950, inizio ad essere utilizzato per numerosi scopi fino ai giorni nostri, per la produzione di comuni oggetti per la casa e anche per componenti secondarie di tubature di scarico. Il polipropilene attraverso questa reazione diventa più resistente a trazione, pressione, sfregamento, calore e agenti chimici,

permettendo a questo materiale di acquisire un incredibile versatilità e resistenza.

Attraverso l'analisi allo stereo microscopio (ingrandimento totale 15x) sono stati selezionati molti pezzi di plastica simili appartenenti a diverse stazioni. Ad un'analisi allo FTIR si è visto che questi erano per la gran parte classificati come titanium exoxide. Ma in alcuni casi essi venivano classificati come polipropilene o materiale da riempimento ed isolamento questo dovuto alla similarità dei due spettri che differiscono solo per la posizione dei picchi (Fig. 25b). Questo conferma che il materiale più abbondante possa essere in realtà polipropilene trattato con additivi quali TYZOR, espandendo ancora di più i molteplici usi di questo materiale tra il quale forse anche l'uso come isolante per i cavi di telecomunicazioni sottomarini.

Per quanto concerne l'abbondanza, le area che mostrano il maggior numero di plastiche sono quella del DHAB e l'area al disopra del bacino (stazioni CTRLN, A4, A5, A6), l'intera area quindi potrebbe essere un'area di accumulo dovuto anche alla direzione della corrente principale che spinge le masse d'acqua in direzione del bacino (Pedrotti et al., 2022). Ulteriori studi potrebbero confermare questo tipo di ipotesi.

Anche lungo le coste Cretesi sono state ritrovate delle plastiche di diverse composizioni rispetto all'area del bacino infatti troviamo: polietilene, poliestere e canapa, ma in quantità molto inferiore.

A conferma di ciò, la PERMANOVA evidenzia l'eterogeneità spaziale attraverso la significatività del fattore "Stazione".

6. CONCLUSIONE

In conclusione, possiamo dire che, nel corso di 30 anni è avvenuto uno shift nell'abbondanza e composizione della macrofauna con un cambio dei taxa superiori dominanti. Inoltre, l'area del bacino potrebbe essere un'area di accumulo per le plastiche, ulteriori studi potrebbero quindi permettere di poter avere una visione migliore sulla quantità e la tipologia delle plastiche ritrovate.

Questo studio evidenzia come a discapito di come si è pensato per molto tempo, l'ambiente marino profondo non è un ambiente stabile come si pensava, ma al contrario è facile riscontrare delle variazioni, anche se è spesso difficile individuare una causa univoca di queste variazioni (Glover et al., 2010).

I cambiamenti riscontrati, ci permettono inoltre di confermare come l'assemblaggio della macrofauna sia fra i descrittori più adatti nel monitoraggio dell'ambiente marino di profondità (Danovaro et al., 2020).

7. BIBLIOGRAFIA

- Afghan, A.; Cerrano, C.; Luzi, G.; Calcinai, B.; Puce, S.; Pulido Mantas, T.; Roveta, C.; Di Camillo, C.G. Main Anthropogenic Impacts on Benthic Macrofauna of Sandy Beaches: A Review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, *8*, 405. https://doi.org/10.3390/jmse8060405.

- Allen SE, Durrieu de Madron X (2009) A review of the role of submarine canyons in deep-ocean exchange with the shelf. Ocean Sci 5:607–620. https ://doi.org/10.5194/os-5-607-2009.
- Ana Paula García-Nieto, Ilse R. Geijzendorffer, Francesc Baró, Philip K. Roche, Alberte Bondeau, Wolfgang Cramer, Impacts of urbanization around Mediterranean cities: Changes in ecosystem service supply, Ecological Indicators, Volume 91, 2018, Pages 589-606, ISSN 1470-160X, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.082.
- Anastasios Tselepides, Konstantia-N Papadopoulou, Dimitris Podaras, Wanda Plaiti, Drosos Koutsoubas, Macrobenthic community structure over the continental margin of Crete (South Aegean Sea, NE Mediterranean), Progress in Oceanography, Volume 46, Issues 2–4, 2000, Pages 401-428, ISSN 0079-6611, https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00027-6.
- AUTHOR=García-Gómez José Carlos , Garrigós Marta , Garrigós Javier TITLE=Plastic as a Vector of Dispersion for Marine Species With Invasive Potential. A Review JOURNAL=Frontiers in Ecology and Evolution VOLUME=9 YEAR=2021 URL=https://www.frontiersin.org/journals/ecology-and-evolution/articles/10.3389/fevo.2021.629756 DOI=10.3389/fevo.2021.629756.
- Azov, Eastern Mediterranean—a marine desert?, Marine Pollution Bulletin,Volume 23,1991,Pages 225-232

- Baker BJ, Appler KE, Gong X. New microbial biodiversity in marine sediments. Ann Rev Mar Sci. 2020;13:161–75.
- BEŞIKTEPE, Şükrü T. "Physical oceanography of the Aegean Sea: A review." The Aegean Sea (2015): 27.
- Boero F, Féral JP, Azzurro E, Cardin V, Riedel B, Despalatovi M, Munda I, Moschella P, Zaouali J, Fonda Umani S, Theocharis A, Wiltshire K, Briand F (2008) Climate warming and related changes in Mediterranean marine biota. In: Briand F (ed) Climate Warming and Related Changes in Mediterranean Marine Biota: CIESM Workshop Monographs No. 35. Monaco, pp 5–21
- Connelly DP, Copley JT, Murton BJ, Stansfield K, Tyler PA, et al. 2012. Hydrothermal vent fields and chemosynthetic biota on the world's deepest seafloor spreading centre. Nat. Commun. 3:620
- Costello MJ, Cheung A, De Hauwere N. 2010. Surface area and the seabed area, volume, depth, slope, and topographic variation for the world's seas, oceans, and countries. Environ. Sci. Technol. 44:8821–28
- Danovaro R, Snelgrove PVR, Tyler PA. 2014. Challenging the paradigms of deep-sea ecology. Trends Ecol. Evol. 29:465–75
- Danovaro Roberto, Joan Batista Company, Cinzia Corinaldesi, Gianfranco D'Onghia, Bella Galil, Cristina Gambi, Andrew J. Gooday et al. "Deep-sea biodiversity in the Mediterranean Sea: the known, the unknown, and the unknowable." *PloS one* 5, no. 8 (2010): e11832.

- Danovaro, R. Climate change impacts on the biota and on vulnerable habitats of the deep Mediterranean Sea. *Rend. Fis. Acc. Lincei* **29**, 525–541 (2018). https://doi.org/10.1007/s12210-018-0725-4.
- Danovaro, R., Bianchelli, S., Brambilla, P., Brussa, G., Corinaldesi, C., Del Borghi, A., ... & Boero, F. (2024). Making eco-sustainable floating offshore wind farms: Siting, mitigations, and compensations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *197*, 114386.
- Danovaro, R., Dell'Anno, A. and Pusceddu, A. (2004), Biodiversity response to climate change in a warm deep sea. Ecology Letters, 7: 821-828. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00634.x.
- Danovaro, R., Dell'Anno, A., Fabiano, M., Pusceddu, A., & Tselepides, A. (2001). Deep-sea ecosystem response to climate changes: the eastern Mediterranean case study. *Trends in Ecology & Evolution*, *16*(9), 505-510.
- Danovaro, R., Fanelli, E., Aguzzi, J. *et al.* Ecological variables for developing a global deep-ocean monitoring and conservation strategy. *Nat Ecol Evol* **4**, 181–192 (2020). https://doi.org/10.1038/s41559-019-1091-z.
- E. Rignot et al., Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979 to 2017. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116**, 1095–1103 (2019). https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116.
- Elmqvist, T., Redman, C.L., Barthel, S., Costanza, R., 2013. History of Urbanization and the Missing Ecology. In: Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S.,

Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., Wilkinson, C. (Eds.), Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. Springer, Netherlands, pp. 13–30.

- Eriksen, M., et al., 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. PLoS One 9, e111913. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913.
- Fisher LA, Pontefract A, M Som S, Carr CE, Klempay B, E Schmidt B, S Bowman J, Bartlett DH. Current state of athalassohaline deep-sea hypersaline anoxic basin research-recommendations for future work and relevance to astrobiology. Environ Microbiol. 2021 Jul;23(7):3360-3369. doi: 10.1111/1462-2920.15414. Epub 2021 Feb 15. PMID: 33538392.
- García-Gómez, J. C., Garrigós, M., & Garrigós, J. (2021). Plastic as a vector of dispersion for marine species with invasive potential. A review. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *9*, 629756.
- Gaston, K.J. (2000). Global patterns in biodiversity. Nature, 405, 220–227.
- Georgopoulos, D., Theocharis, A and Zodiatis, G. (1989) Intermediate water formation in the Cretan Sea (South Aegean Sea), Oceanoi. Acta 12(4),353-359.
- Gertmann, I. F., Ovchinnikov, I. M., & Popv, Y. I. (1994). Deep convection in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Oceanology*, *34*(1), 19-25.
- GESAMP, 2016. "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment". (IMO/FAO/UNESCOIOC/ UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the

Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). GESAMP Reports & Studies No.93, eds Kershaw P.J. and Rochman C.M.

- Glover, A. G., Gooday, A. J., Bailey, D. M., Billett, D. S. M., Chevaldonné, P., Colaco, A., ... & Vanreusel, A. (2010). Temporal change in deep-sea benthic ecosystems: a review of the evidence from recent time-series studies. *Advances in marine biology*, *58*, 1-95.
- Hancock, A. M., King, C. K., Stark, J. S., McMinn, A., & Davidson, A. T. (2020). Effects of ocean acidification on Antarctic marine organisms: A meta-analysis. *Ecology and Evolution*, *10*(10), 4495-4514.
- Heinrichs, M.E.; Tebbe, D.A.; Wemheuer, B.; Niggemann, J.; Engelen, B. Impact of Viral Lysis on the Composition of Bacterial Communities and Dissolved Organic Matter in Deep-Sea Sediments. *Viruses* **2020**, *12*, 922. https://doi.org/10.3390/v12090922.
- Hsu¨ KJ, Montadert L, Bernoulli D, Cita MB, Erickson A, et al. (1977) History of the Mediterranean salinity crisis. Nature 267: 399–403.
- I. E. Napper, R. C. Thompson, Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. *Global Challenges* 2020, 4, 1900081. https://doi.org/10.1002/gch2.201900081.
- Jeong Won Kim, Hyeong-Gi Kim, Hyein Kim, Stephen John Hawkins, In-Soo Seo, Chul-Woong Oh, Spatial distribution of meiofaunal and macrofaunal assemblages in the tidal flats of the southern Korean coast in relation to natural and anthropogenic impacts, Marine Pollution Bulletin, Volume 194, Part A,

2023, 115377, ISSN 0025-326X, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115377.

- Jing-Chun Feng, Jianzhen Liang, Yanpeng Cai, Si Zhang, Jingchuan Xue, Zhifeng Yang, Deep-sea organisms research oriented by deep-sea technologies development, Science Bulletin, Volume 67, Issue 17, 2022, Pages 1802-1816, ISSN 2095-9273, https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.07.016.
- Kröncke, I., Türkay, M., & Fiege, D. (2003). Macrofauna communities in the Eastern Mediterranean deep sea. *Marine Ecology*, *24*(3), 193-216.
- Manimpire, Elysee & Menna, Milena. (2023). 3D Reconstruction of the Geostrophic Currents Field in the Mediterranean Sea Using Argo Float and Satellite Altimetric Data. International Centre for Theoretical Physics (ICTP). 10.13140/RG.2.2.26489.68968.
- Margalef, R. (1958). Information theory in ecology. *General Systematics*, *3*, 36–71
- Maria Luiza Pedrotti, Fabien Lombard, Alberto Baudena, François Galgani, Amanda Elineau, Stephanie Petit, Maryvonne Henry, Romain Troublé, Gilles Reverdin, Enrico Ser-Giacomi, Mikaël Kedzierski, Emmanuel Boss, Gabriel Gorsky, An integrative assessment of the plastic debris load in the Mediterranean Sea, Science of The Total Environment, Volume 838, Part 1, 2022, 155958, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155958.

- Martina Pierdomenico, Daniele Casalbore, Francesco Latino Chiocci, The key role of canyons in funnelling litter to the deep sea: A study of the Gioia Canyon (Southern Tyrrhenian Sea), Anthropocene, Volume 30, 2020, 100237, ISSN 2213-3054, https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100237.
- Martinez-Garcia, E., Carlsson, M.S., Sanchez-Jerez, P. *et al.* Effect of sediment grain size and bioturbation on decomposition of organic matter from aquaculture. *Biogeochemistry* **125**, 133–148 (2015). https://doi.org/10.1007/s10533-015-0119-y.
- Merlino G, Barozzi A, Michoud G, Ngugi DK, Daffonchio D. Microbial ecology of deep-sea hypersaline anoxic basins. FEMS Microbiol Ecol. 2018 Jul 1;94(7). doi: 10.1093/femsec/fiy085. PMID: 29905791.
- Moslem Sharifinia, Zahra Afshari Bahmanbeigloo, Mehrzad Keshavarzifard, Mohammad Hossein Khanjani, Brett P. Lyons, Microplastic pollution as a grand challenge in marine research: A closer look at their adverse impacts on the immune and reproductive systems, Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 204, 2020, 111109, ISSN 0147-6513, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111109.
- Munari, C., Scoponi, M., Mistri, M., 2017. Plastic debris in the Mediterranean sea: types, occurrence and distribution along adriatic shorelines. Waste Manag. 67, 385–391. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.020.

- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, Gustavo, A. B., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403, 853–858. doi: 10.1038/35002501.
- Neves, R. C., Gambi, C., Danovaro, R., & Kristensen, R. M. (2014). *Spinoloricus cinziae* (Phylum Loricifera), a new species from a hypersaline anoxic deep basin in the Mediterranean Sea. *Systematics and Biodiversity*, *12*(4), 489–502. https://doi.org/10.1080/14772000.2014.943820.
- Onur, Gönülal., Cem, Dalyan. (2017). Deep-Sea Biodiversity in the Aegean Sea. doi: 10.5772/INTECHOPEN.70492.
- Parras-Berrocal, I. M., Vazquez, R., Cabos, W., Sein, D., Mañanes, R., Perez-Sanz, J., & Izquierdo, A. (2020). The climate change signal in the Mediterranean Sea in a regionally coupled atmosphere–ocean model. Ocean Science, 16(3), 743-765.
- Patti, T.B., et al., 2020. Spatial distribution of microplastics around an inhabited coral island in the Maldives. Indian Ocean. Sci. Tot Environ. 141263. https://doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2020.141263.
- Paul W. J. J. van der Wielen et al., The Enigma of Prokaryotic Life in Deep Hypersaline Anoxic Basins.Science307,121-123(2005). DOI:10.1126/science.1103569
- Pisano A, Marullo S, Artale V, Falcini F, Yang C, Leonelli FE, Santoleri R, Buongiorno Nardelli B. New Evidence of Mediterranean Climate Change and

Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing*. 2020; 12(1):132. https://doi.org/10.3390/rs12010132.

- Polinov, S. (2023). Increased Anthropogenic Activity in the Mediterranean Since the Opening of the Suez Canal. In: Lutmar, C., Rubinovitz, Z. (eds) The Suez Canal: Past Lessons and Future Challenges. Palgrave Studies in Maritime Politics and Security. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15670-0_11.
- Polinov, S., Bookman, R.. and Levin, N. (2022). 'A Global Assessment of Night Lights as an Indicator for Shipping Activity in Anchorage Areas', Remote Sensing, 14(5), p. 1079. https://doi.org/10.3390/rs14051079.
- Pryor, S. C., P. Crippa and R. C. Sullivan (2015). Atmospheric Chemistry. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.
- R Danovaro, A Dinet, G Duineveld, A Tselepides, Benthic response to particulate fluxes in different trophic environments: a comparison between the Gulf of Lions–Catalan Sea (western-Mediterranean) and the Cretan Sea (eastern-Mediterranean), Progress in Oceanography, Volume 44, Issues 1–3, 1999, Pages 287-312, ISSN 0079-6611, https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00030-0.
- Ramirez-Llodra, E., Brandt, A., Danovaro, R., De Mol, B., Escobar, E., German, C. R., ... & Vecchione, M. (2010). Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. *Biogeosciences*, *7*(9), 2851-2899.

- Ramirez-Llodra, Eva. "Deep-sea ecosystems: biodiversity and anthropogenic impacts." The law of the seabed. Brill Nijhoff, 2020. 36-60.
- Roberto Danovaro, Cinzia Corinaldesi, Antonio Dell'Anno, Paul V.R. Snelgrove, The deep-sea under global change, Current Biology, Volume 27, Issue 11, 2017, Pages R461-R465, ISSN 0960-9822. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.046.
- Rogers, A. D. (2015). Environmental change in the deep ocean. Annu. Rev. Environ. Resour. 40, 1–38
- Rogers, Alex & Ramirez-Llodra, Eva. (2024). Deep-sea exploration of marine ecosystems – Knowledge and solutions for marine biodiversity. The International Hydrographic Review. 30. 10-37. 10.58440/ihr-30-1-a09.
- Schratzberger, M., Ingels, J., 2018. Meiofauna matters: the roles of meiofauna in benthic ecosystems. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 502, 12–25. https://doi.org/10.1016/j. jembe.2017.01.007.
- Sfriso, A.A., et al., 2020. Microplastic accumulation in benthic invertebrates in Terra Nova Bay (Ross sea, Antarctica). Environ. Int. 137, 105587. https://doi.org/ 10.1016/j.envint.2020.105587.
- Shannon, C. E., & Weaver, N. (1963). *The mathematical theory of communication.* Urbana, University of Illinois Press, 117 pp.
- Solé Figueras, L., Zandt, E. I., Buschbaum, C., & Meunier, C. L. (2024). How are the impacts of multiple anthropogenic drivers considered in marine

ecosystem service research? A systematic literature review. *Journal of Applied Ecology*.

- Stanley Chukwuemeka Ihenetu, Gang Li, Yuanyuan Mo, Kubwimana Jean Jacques, Impacts of microplastics and urbanization on soil health: An urgent concern for sustainable development, Green Analytical Chemistry, Volume 8, 2024, 100095, ISSN 2772-5774, https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100095.
- Taylor, M., Gwinnett, C., Robinson, L. et al. Plastic microfibre ingestion by deep-sea organisms. Sci Rep 6, 33997 (2016). https://doi.org/10.1038/srep33997
- Tselepides, A., Eleftheriou, A. (1992). South Aegean (Eastern Mediterranean) Continental Slope Benthos: Macroinfaunal — Environmental Relationships. In: Rowe, G.T., Pariente, V. (eds) Deep-Sea Food Chains and the Global Carbon Cycle. NATO ASI Series, vol 360. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2452-2_9.
- Tsiamis, Konstantinos. "Biological Invasions in the Aegean Sea: Temporal Trends, Pathways, and Impacts Stelios Katsanevakis, Argyro Zenetos, Maria Corsini-Foka, and." *The Aegean Sea Environment: The Biodiversity of the Natural System* 129 (2024): 367.
- Tsirintanis, K.; Sini, M.; Ragkousis, M.; Zenetos, A.; Katsanevakis, S. Cumulative Negative Impacts of Invasive Alien Species on Marine Ecosystems of the Aegean Sea. *Biology* **2023**, *12*, 933. https://doi.org/10.3390/biology12070933.ù

- UNEP/MAP, 2012. State of the Mediterranean Marine and Coastal Environment.
- Van Dover C. 2000. The Ecology of Hydrothermal Vents. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press
- Wang, B., Hua, L., Mei, H. et al. Impact of Climate Change on the Dynamic Processes of Marine Environment and Feedback Mechanisms: An Overview. Arch Computat Methods Eng (2024). https://doi.org/10.1007/s11831-024-10072-z
- Woodall LC, Sanchez-Vidal A, Canals M, Paterson GL, Coppock R, Sleight V, Calafat A, Rogers AD, Narayanaswamy BE, Thompson RC. The deep sea is a major sink for microplastic debris. R Soc Open Sci. 2014 Dec 17;1(4):140317. doi: 10.1098/rsos.140317. PMID: 26064573; PMCID: PMC4448771.
- Yang Cheng, Lei Jin, Haiyan Fu, Yurui Fan, Ruolin Bai, Yi Wei, Investigating the impact of climate change and policy orientation on energy–carbon–water nexus under multi-criteria analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 189, Part B, 2024, 114032, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114032.
- Zodiatis G (1993). Circulation of the cretan sea-water masses (eastern mediterranean-sea). *Oceanologica Acta*, 16(2), 107-114. Open Access version: https://archimer.ifremer.fr/doc/00099/21039/.