



GREENPEACE

CONVENZIONE OPERATIVA NELL'AMBITO DEL PROGETTO "MARE CALDO" IN COLLABORAZIONE TRA DISTAV, GREENPEACE, ELBATECH, AREA MARINA PROTETTA DI PORTOFINO E AREA MARINA PROTETTA DEL PLEMMIRIO

RELAZIONE DEL PRIMO ANNO DI PROGETTO (2019-2020)

MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUGLI ECOSISTEMI MARINI BENTONICI DI SCOGLIERA

a cura di

Monica Montefalcone e Annalisa Azzola

Responsabile scientifico: Dr. Monica Montefalcone

DiSTAV, Università degli Studi di Genova, Corso Europa 26, 16132 Genova

Genova, novembre 2020

INDICE

PREMESSE	Pag. 3
Cambiamenti climatici e temperatura degli oceani	Pag. 3
Aumento delle temperature nel Mar Mediterraneo	Pag. 4
Effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi marini	Pag. 7
Comunità di scogliera	Pag. 12
Progetto Mare Caldo	Pag. 13
MATERIALI E METODI	Pag. 16
AREE DI STUDIO	Pag. 16
Area Marina Protetta di Portofino	Pag. 16
Isola d'Elba e Isola di Pianosa	Pag. 18
Area Marina Protetta del Plemmirio	Pag. 19
ATTIVITÀ DI CAMPO	Pag. 20
Monitoraggio della temperatura nella colonna d'acqua	Pag. 20
Monitoraggio sugli ecosistemi di scogliera	Pag. 25
ANALISI DEI DATI	Pag. 34

Dati di temperatura	Pag. 34
Struttura e stato ecologico della comunità	Pag. 35
Cambiamento nel tempo	Pag. 35
Mortalità	Pag. 37
Specie termofile	Pag. 38
RISULTATI E DISCUSSIONI	Pag. 39
Temperature	Pag. 39
Struttura e stato ecologico delle comunità	Pag. 49
Cambiamento nel tempo	Pag. 59
Monitoraggio morie di massa	Pag. 64
Monitoraggio specie termofile	Pag. 73
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	Pag. 86
BIBLIOGRAFIA	Pag. 91

PREMESSE

Cambiamenti climatici e temperatura degli oceani

I mari e gli oceani svolgono un ruolo centrale nella regolazione del clima terrestre attraverso la capacità di assorbire e trasportare grandi quantità di calore, agendo da tamponi energetici. L'aumento della temperatura atmosferica si riflette, quindi, in un aumento della temperatura delle masse d'acqua, con conseguenti cambiamenti nei parametri chimo-fisici che hanno un forte impatto sugli ecosistemi marini (e.g., innalzamento del livello del mare, aumento delle temperature in superficie e in profondità, scioglimento e restringimento dei ghiacci marini) (von Schuckmann et al. 2019). Il ruolo fondamentale dell'oceano per la vita e il benessere della terra è sempre più riconosciuto anche a livello politico; la Comunità Europea, nell'ambito del programma d'azione internazionale Agenda 2030, pone infatti tra gli i principali obiettivi la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico. Le prime prove del riscaldamento globale, legato all'impatto antropico, risalgono agli anni '70. Oggi l'aumento della temperatura terrestre è ampiamente documentato e i conseguenti cambiamenti nelle proprietà delle acque oceaniche procedono a velocità considerevoli (von Schuckmann et al. 2019).

La temperatura della superficie del mare (*Sea Surface Temperature*, SST) è stata definita dal *Global Climate Observing System* (GCOS) una delle variabili climatiche essenziali, poiché svolge un ruolo chiave nella regolazione del clima modulando lo scambio di calore tra l'oceano e l'atmosfera. La SST, a sua volta, risponde sia alla variabilità naturale del clima sia al cambiamento climatico indotto dall'uomo. La sua oscillazione annuale è prevalentemente controllata dalla radiazione solare e da altri fattori ambientali esterni, quali ad esempio l'intensità del vento, la nuvolosità e tutte le interazioni oceano-atmosfera. Tuttavia, dall'inizio degli anni '70 è evidente una tendenza al riscaldamento globale della SST media annua oltre i limiti di variabilità naturale. L'aumento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera ha, infatti, alterato il bilancio energetico della Terra con conseguente accumulo di energia termica di cui, più del 90% negli ultimi cinquant'anni, è stata accumulata negli oceani (Pisano et al. 2020).

La SST è quindi un parametro chiave per analizzare l'evoluzione del riscaldamento globale e per la definizione dello stato attuale degli oceani a scala globale e regionale (Pisano et al. 2020). Tuttavia, anche la temperatura degli strati più profondi e la posizione del termoclino sono influenzati dal cambiamento climatico e i dati di SST non possono essere utilizzati per valutazioni a maggiori profondità. Le misurazioni di temperatura *in situ* sono quindi necessarie per raccogliere dati sulle variazioni di temperatura al di sotto dei primi metri d'acqua, e forniscono informazioni più affidabili e accurate sulle condizioni locali (von Schuckmann et al. 2019). Per tale motivo, gli esperti che studiano l'impatto del cambiamento climatico sugli habitat marini bentonici hanno iniziato, negli ultimi anni, a utilizzare *temperature data logger* con l'intento di monitorare e analizzare la temperatura sull'intera colonna d'acqua. Lo studio sulla climatologia e sulle anomalie termiche che caratterizzano le acque profonde necessita, tuttavia, di ulteriori rilevamenti in campo. La recente

promozione di progetti di ricerca e programmi di monitoraggio sulle temperature della colonna d'acqua attraverso l'utilizzo di *data logger* (e.g., rete mediterranea T-MedNET) rappresenta quindi un valido strumento per definire l'impatto del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini (Ceccherelli et al. 2020).

La tendenza all'aumento della temperatura degli oceani appare ormai irreversibile almeno per i prossimi decenni, anche se le emissioni globali di anidride carbonica e di altri gas serra dovessero diminuire. La distribuzione spaziale del riscaldamento delle acque non è, tuttavia, omogenea: alcuni bacini si stanno riscaldando gradualmente, altri si trovano ad affrontare repentini ed esponenziali aumenti della temperatura. La comprensione dei meccanismi di questi fenomeni a scala regionale è quindi cruciale per lo studio degli impatti sugli ecosistemi marini a livello globale (Alawad et al. 2020).

Aumento delle temperature nel Mar Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo, a causa della sua natura di bacino semi-chiuso e del relativamente breve tempo di residenza delle sue masse d'acqua all'interno del bacino stesso, è particolarmente soggetto al fenomeno del riscaldamento delle acque, tanto da collocarsi tra le regioni del mondo dove i tassi di riscaldamento sono più elevati (von Schuckmann et al. 2019). La temperatura superficiale dell'acqua (SST) in quest'area è in continuo e forte aumento dalla metà degli anni '80 e questa tendenza al riscaldamento è probabilmente destinata ad aumentare per tutto il XXI secolo. Il Mar Mediterraneo svolge quindi un ruolo di sentinella (*hotspot*) del cambiamento climatico e, in effetti, è stato uno dei primi mari dove il trend in aumento delle temperature delle acque profonde sia stato attribuito al riscaldamento globale (Pisano et al. 2020).

Il programma di monitoraggio coordinato e diretto dalla Commissione Europea (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, CMEMS), basandosi su un'ampia gamma di dati satellitari della NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e di rilevamenti *in situ*, ha stimato un innalzamento medio annuo della temperatura dell'acqua di $\sim 0,04^{\circ}\text{C}$ dal 1993 al 2017 (von Schuckmann et al. 2019). I mari Italiani hanno registrato il medesimo trend d'innalzamento medio annuo delle temperature del mare dal 1965 al 2015 (Fig. 1) (Morri et al. 2017), causando un aumento di $\sim 2^{\circ}\text{C}$. In particolare, Skliris et al. (2012) hanno stimato un aumento della SST media annua di $\sim 0,037^{\circ}\text{C}$ per l'intero Mar Mediterraneo, di $\sim 0,026^{\circ}\text{C}$ per il bacino occidentale e di $\sim 0,042^{\circ}\text{C}$ per il bacino orientale. Tra il 1985 e il 2008, gli autori hanno anche evidenziato una marcata variabilità stagionale nel trend della SST, stimando un tasso di riscaldamento più alto in primavera ($\sim 0,054^{\circ}\text{C}$) e in estate ($\sim 0,044^{\circ}\text{C}$) rispetto all'autunno ($\sim 0,027^{\circ}\text{C}$) e all'inverno ($\sim 0,023^{\circ}\text{C}$).

L'aumento del tasso di evaporazione, la riduzione delle precipitazioni e il ridotto apporto dei fiumi osservati in Mar Mediterraneo negli ultimi decenni, ne hanno modificato fortemente l'idrografia; ciononostante, dal 1993 al 2017, si è registrato un innalzamento medio annuo del livello del mare di 2,4 mm a causa del riscaldamento globale (von Schuckmann et al. 2019).

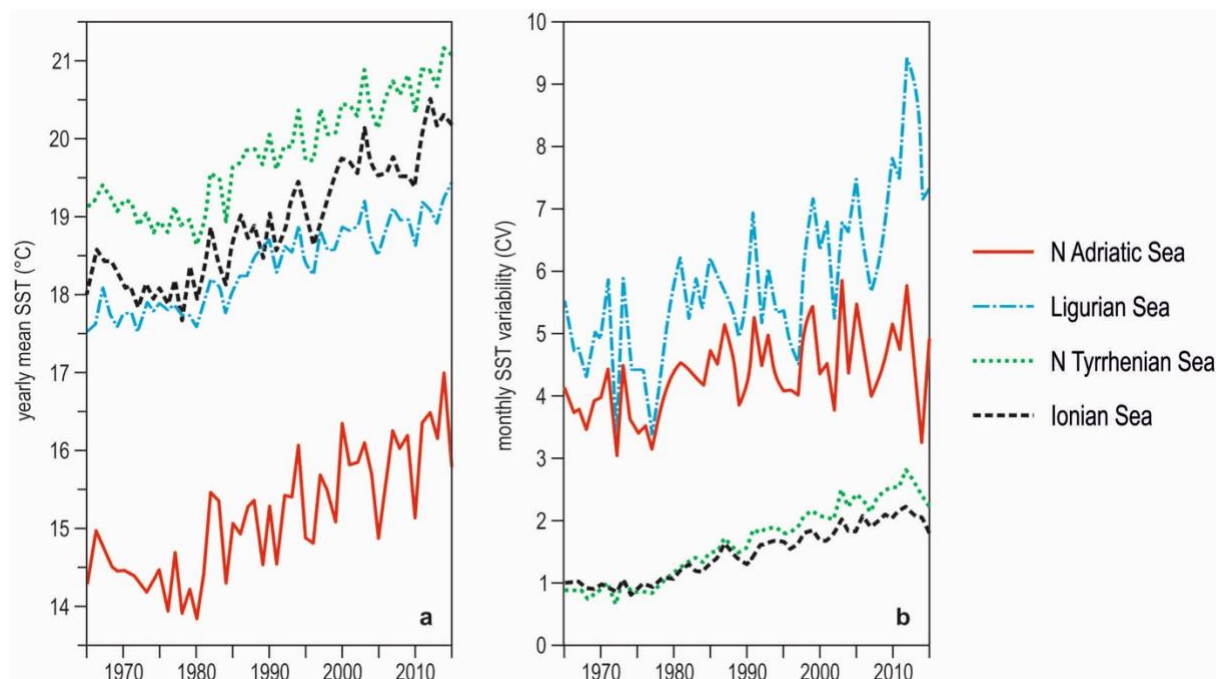


Figura 1. Trend dei valori medi annui (a) della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) e variabilità mensile (b) nei mari italiani (1965-2015) (da Morri et al. 2017).

Il Mar Ligure, che è la regione più a nord e quindi più fredda del Mar Mediterraneo, ha registrato un aumento delle temperature dell'aria e della superficie del mare di circa 1°C rispetto agli anni '70 (Fig. 2). In particolare, tra gennaio 1958 e dicembre 2010, sono stati raccolti dati di temperatura al largo di Villefranche-sur-Mer ogni due settimane a diverse profondità: 0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, e 75 m. L'analisi dei dati ha mostrato un aumento della temperatura dell'acqua a tutte le profondità; a 75 m l'aumento è apparso continuo e graduale, mentre alle minori profondità le variazioni hanno mostrato tre fasi principali: i) una fase relativamente fredda dalla fine degli anni '60 ai primi anni '80; ii) una fase di rapido riscaldamento nella seconda metà degli anni '80; iii) una fase calda e stabile dagli anni '90 (Fig. 2) (Bianchi et al. 2019a). Dati più recenti di temperatura, sia dell'aria (ottenuti dall'Osservatorio Meteorologico di Genova) sia della superficie del mare (ottenuti da dati satellitari della NOAA), evidenziano un aumento di mezzo grado soltanto nell'ultimo decennio: dal 2014 al 2018 sono stati rilevati i più alti valori di temperature mai registrati che identificano una nuova fase di rapido riscaldamento a partire dal 2010 (Bianchi et al. 2019a).

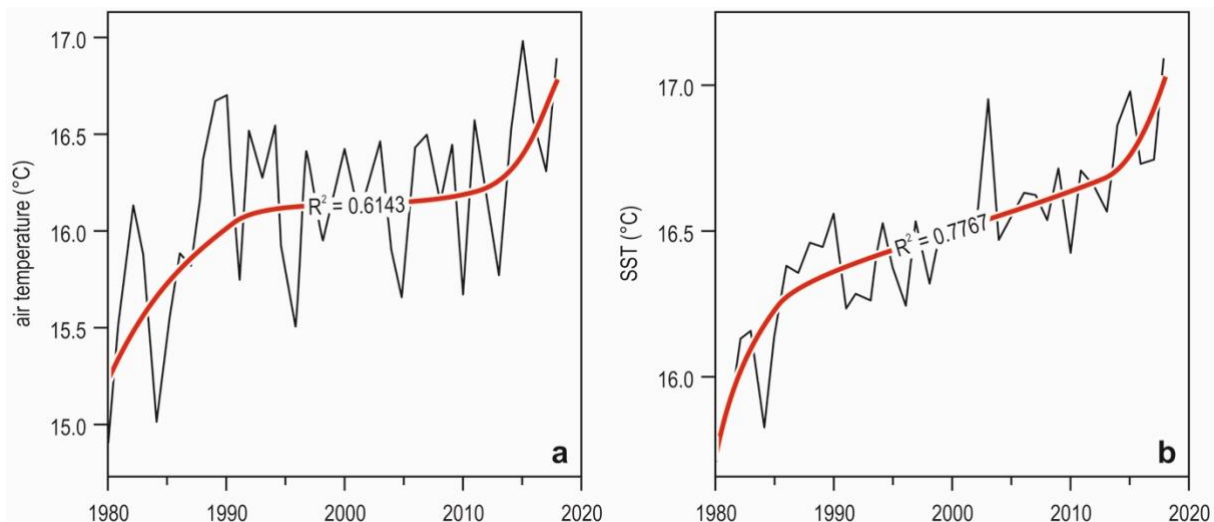


Figura 2. Trend dei valori medi annui di temperatura dell'aria (a) (misurati presso l'osservatorio universitario di Genova) e (b) della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2018 in Mar Ligure (da Bianchi et al. 2019a).

Nel Mar Tirreno sono state eseguite analisi della temperatura dell'acqua fino a 50 m di profondità integrando i profili di temperatura contenuti nel database MEDAR/MEDATLAS con i dati della *World Ocean Database 2013* (WOD13) e della *Mediterranean Forecasting System-Voluntary Observing Ship Program* (MFS-VOS). Confrontando le temperature medie annue dal 1945 al 1982 con quelle dal 1983 al 2011 si è osservato un aumento significativo delle temperature nei mesi di luglio, agosto, settembre, ottobre e novembre, in particolare dai 30 m fino alla superficie (Rivetti et al. 2014).

Negli ultimi decenni, infine, la comunità oceanografica internazionale ha prestato sempre maggiore attenzione al Mar Mediterraneo orientale, perché in questa regione le variazioni dei fenomeni climatici avvengono su scale spaziali e temporali relativamente brevi. Nel Mar Ionio, in particolare, a metà degli anni '90 si è verificato un evento climatico, definito *Eastern Mediterranean Transient* (EMT), che ha causato una completa inversione della circolazione dello strato superiore ionico da anticiclonico a ciclonico. Nei primi anni '90, infatti, la sorgente di acqua profonda che guidava la cella termoalina del Mediterraneo orientale era situata nel Mare Adriatico; con l'avvento dell'EMT si è spostata nel Mar Egeo. Questo ha caratterizzato un aumento significativo di salinità e temperatura nelle acque intermedie e profonde del Mediterraneo orientale, con un conseguente cambiamento drammatico nei modelli di circolazione e un aumento della temperatura dell'acqua (Bianchi et al. 2019; Borzelli et al. 2009). Gli effetti di questo fenomeno si sono estesi a tutti i bacini adiacenti fino a raggiungere il Mediterraneo occidentale (MerMex Group, 2011).

In tutto il Mar Mediterraneo, quindi, a seguito del generale trend in aumento della temperatura, le isoterme superficiali di febbraio (il mese più freddo dell'anno) si sono spostate verso nord, causando inverni più caldi (Fig. 3) (Bianchi et al. 2012, 2019a).

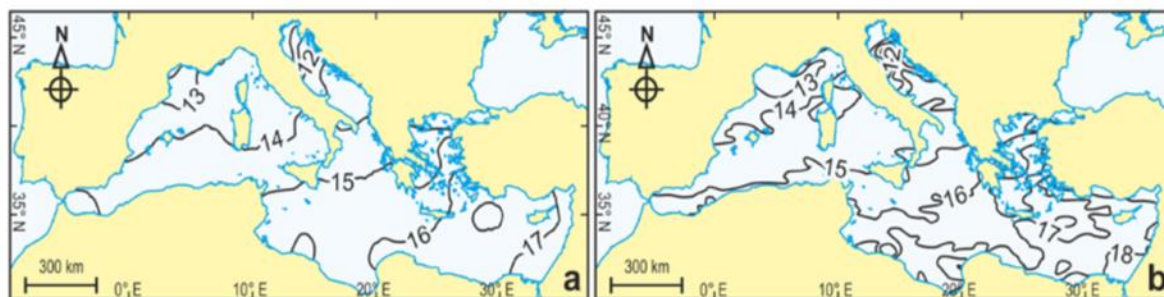


Figura 3. Isotherme del mese di febbraio in Mar Mediterraneo: (a) media dei dati climatologici dal 1906 al 1985; (b) media per il periodo dal 1985 al 2006 (da Bianchi et al. 2012).

Infine, conseguenza diretta dei cambiamenti climatici è l'aumentata frequenza di periodi prolungati d'innalzamento delle temperature, definiti "ondate di calore" (*heat waves*). Nel 2017 il 99,6% della superficie del Mar Mediterraneo è stata colpita da questo fenomeno. L'analisi delle temperature della superficie del mare condotta durante il programma CMEMS in Mediterraneo ha rivelato, in tutte le regioni esaminate, una tendenza all'aumento della durata annuale delle ondate di calore in mare a partire dal 1982, correlate al riscaldamento globale (von Schuckmann et al. 2019).

Effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi marini

La pressione esercitata dal riscaldamento globale sta avendo un impatto drammatico sugli ecosistemi marini a livello mondiale. La velocità con la quale questo fenomeno si sta verificando è diventata il più importante fattore di cambiamento per la biodiversità, portando a un'accelerazione del tasso di perdita delle specie. A causa dello stress termico cui sono sottoposte, le comunità marine potrebbero non essere in grado di adattarsi al rapido cambiamento in atto (Ceccherelli et al. 2020).

Il cambiamento climatico, con il conseguente e repentino aumento della temperatura dell'acqua, sta influenzando gli ecosistemi marini attraverso una combinazione di effetti diretti sugli organismi (e.g., riproduzione, tassi di crescita, sopravvivenza) e di effetti indiretti, mediati da interazioni tra le specie (e.g., predazione, parassitismo, malattie) o dall'alterazione dei flussi di correnti tra bacini adiacenti (Bianchi et al. 2019a). I cambiamenti dei fattori ambientali che avvengono su larga scala o perdurano nel tempo, fenomeno noto come "cambiamento di regime" (*regime shift*), possono provocare drastici cambiamenti nella struttura e nella composizione delle comunità, fenomeno conosciuto come "cambiamento di fase" (*phase shift*) (Montefalcone et al. 2011).

In anni recenti si sta assistendo a cambiamenti di fase nella maggior parte degli ecosistemi marini causati, soprattutto in Mediterraneo, da tre processi principali: i) mortalità di massa; ii) aumento dell'incidenza di epidemie; e iii) spostamento verso nord di specie termofile ad affinità sub-tropicale e arrivo e insediamento di specie ad affinità tropicale, queste ultime definite specie non indigene (alloctone) o specie aliene (Bianchi et al. 2019a).

I. Mortalità di massa

Conseguenze delle anomalie termiche, verificatesi con frequenza sempre maggiore dagli anni '90 in Mar Mediterraneo, sono i vari episodi di mortalità di massa osservati tra gli invertebrati sessili bentonici. In funzione delle caratteristiche biologiche delle specie bentoniche (e.g., longevità, dimensioni, tassi riproduttivi), queste possono mostrare diversi livelli di sensibilità agli stress e ai disturbi ambientali che, se perdurano nel tempo, possono provocare la morte di intere popolazioni (Montefalcone et al. 2017).

In Mar Ligure, il primo evento di mortalità di massa documentato risale agli anni '80. Le specie più colpite sono state il corallo rosso *Corallium rubrum*, le gorgonie delle specie *Eunicella cavolini* e *Paramuricea clavata* e diverse spugne, tra le quali la specie protetta *Spongia officinalis* (Bianchi et al. 2019a).

Nell'area che si estende dall'arcipelago toscano fino alle coste marsigliesi, a fine estate del 1999, sono stati registrati valori di temperatura dell'acqua fino a 2-5°C superiori alla media stagionale. A seguito di questo evento è stata osservata una grave e diffusa mortalità di massa di 27 specie di invertebrati sessili, tra cui spugne, gorgonie, coralli, briozoi e ascidie. Rilevamenti svolti nell'Area Marina Protetta di Portofino (Genova) hanno mostrato una mortalità del 40-60% delle colonie di gorgonie delle specie *Paramuricea clavata*, *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis* (Cerrano et al. 2000).

Un altro caso di mortalità di massa documentato nel Mar Tirreno e nel Mar Ligure si è verificato nell'estate del 2003, con un impatto su circa 25 specie di invertebrati sessili bentonici (principalmente spugne e gorgonie). L'ondata di calore registrata da giugno a settembre ha causato un innalzamento della temperatura dell'acqua di 1-3°C, con un conseguente sviluppo di mucillagine che, depositandosi sopra gli organismi e soffocandoli, ha provocato la morte di circa l'80% delle colonie di gorgonie. Gli effetti di questo evento sono rimasti evidenti per molti anni a seguire; il ricupero delle popolazioni è stato lento e, per la maggior parte delle specie, è stato solo parziale (Schiaparelli et al. 2003; Giuliani et al. 2005; Bianchi et al. 2019a).

Per il Mar Ionio, gli eventi di mortalità di massa presenti in letteratura sono poco rappresentati. Non è tuttavia possibile affermare se questo dipenda dalla carenza di studi o dalla minore frequenza con cui questi fenomeni si verificano in quest'area.

Recenti osservazioni mostrano comunque come negli ultimi anni, in seguito alle ondate di calore estive, siano sempre più frequenti eventi di morie e mortalità di massa: gorgonie con evidenti segni di necrosi, esemplari di *Cladocora caespitosa* (madrepore del Mediterraneo) sbiancati, alghe corallinacee morte sono solo alcuni esempi. Durante l'estate del 2017, presso l'Isola di Montecristo, sono state colpite intere colonie di gorgonie (Turicchia et al. 2018). Nell'estate del 2018 è stata osservata una moria di *Parazoanthus axinellae* (conosciuta con il nome comune di margherita di mare) presso l'Area Marina Protetta di

Bergeggi (Savona), e una moria di *Paramuricea clavata* a Portofino, ripetutasi anche nell'estate del 2019, soprattutto a causa degli eventi mucillaginosi.

Questi eventi, ancora una volta, dimostrano come l'innalzamento della temperatura dell'acqua possa avere gravi conseguenze per le comunità e gli ecosistemi marini e richieda quindi urgentemente l'attenzione di scienziati e ambientalisti (Fig. 4).

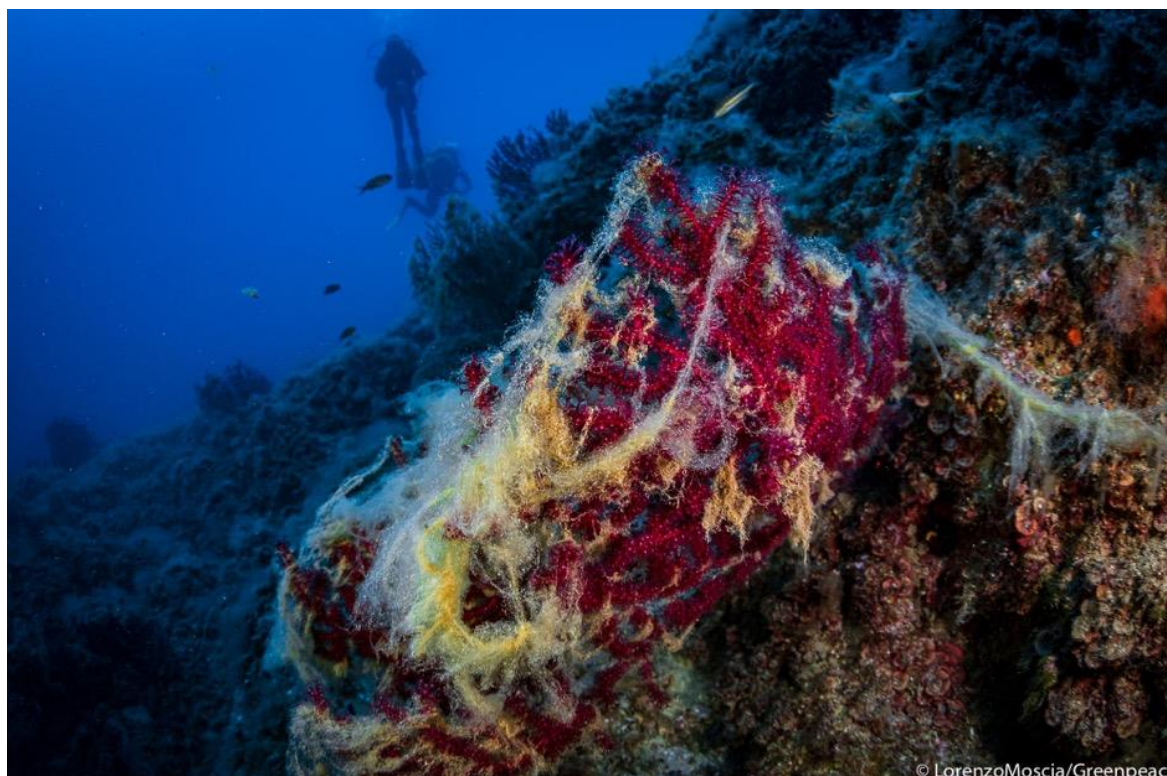


Figura 4. Mucillagine che copre una colonia di *Paramuricea clavata* all'Isola d'Elba. La foto (© Lorenzo Moscia/Greenpeace) è stata scattata durante i monitoraggi biologici condotti nell'ambito del primo anno del progetto Mare Caldo.

II. Epidemie

Le epidemie causate da agenti patogeni stanno aumentando in frequenza e gravità in tutti i mari del mondo, e vi è un crescente numero di prove che indicano legami con il cambiamento climatico. Lo stress termico può ridurre la resistenza delle specie ai microrganismi (virus, batteri, protozoi, funghi) che, in condizioni normali, sarebbero in grado di resistere meglio all'azione patogena (Bianchi et al. 2019a).

Nell'estate del 2018, ad esempio, a causa dell'effetto combinato dell'innalzamento della temperatura dell'acqua e dell'azione di un batterio (*Haplosporidium* sp.), le popolazioni del bivalve *Pinna nobilis* (conosciuto con il nome comune di nacchera) hanno subito fenomeni di mortalità di massa in diverse aree del Mediterraneo, riducendosi del 30-100% a seconda della zona geografica (Fig. 5) (Bianchi et al. 2019a).



Figura 5. Esemplare di *Pinna nobilis* morta all'Isola d'Elba, probabilmente in seguito all'epidemia del 2018-2019. La foto (© Lorenzo Moscia/Greenpeace) è stata scattata durante i monitoraggi biologici condotti nell'ambito del primo anno del progetto Mare Caldo.

III. Tropicalizzazione

Il cambiamento climatico sta avendo importanti effetti, oltre che sulla biodiversità, anche sull'assetto biogeografico del Mediterraneo. Dalla fine degli anni '80, l'aumento della temperatura media annua e la riduzione della variabilità annuale conseguente la mitigazione delle temperature invernali, ha profondamente inciso sulla distribuzione e la dispersione di diverse specie. Attraverso il fenomeno definito 'tropicalizzazione', nelle zone settentrionali più fredde del Mediterraneo sono ora divenute stabili specie termofile ad affinità subtropicale, che popolano il sud di questo bacino, mentre specie aliene ad affinità tropicale sono migrate dal Mar Rosso tramite il Canale di Suez e stanno espandendosi in tutto il Mediterraneo (Bianchi et al. 2019a). Queste specie sono tendenzialmente più adattabili alle diverse condizioni ambientali e più forti nella competizione con le specie autoctone, che sono state spesso sostituite.

Per questi motivi l'invasione da parte di specie aliene è riconosciuta come una delle principali minacce ambientali per la conservazione della biodiversità marina in tutto il mondo. In particolare, queste specie rappresentano un problema per gli ecosistemi costieri poichè la loro presenza può alterare le relazioni ecologiche tra le specie native influenzando la funzionalità dell'intero ecosistema. L'impatto delle specie aliene può avere gravi effetti

anche sulla salute umana o dar luogo a problemi socio-economici finora poco studiati (Félix-Hackradt et al. 2015).

Diversi studi confermano il continuo aumento del fenomeno della tropicalizzazione ed è sempre maggiore il numero di segnalazioni di nuove specie termofile. Ad esempio, la donzella pavonina (*Thalassoma pavo*), specie termofila originaria del sud del Mediterraneo, è ormai divenuta stabile nella parte nord-occidentale di questo bacino, e il pesce pappagallo (*Sparisoma cretense*) è ormai considerato stanziale all'isola del Giglio (Guidetti et al. 2002; Bianchi et al. 2019a; Ventura et al. 2019). Un esempio di specie aliena lessepsiana (ovvero entrata da Suez) è il pesce *Siganus luridus*, noto anche come pesce coniglio, tipico del Mar Rosso e dell'Oceano Indiano. La sua invasione ha avuto finora un grande successo, presumibilmente per la mancanza di competitori. Il pesce coniglio è divenuto comune in tutto il bacino orientale, lungo le coste Greche e Tunisine, ed è stato segnalato più volte in Sicilia e anche più a nord in Costa Azzurra e in Croazia.

Anche in Mar Ionio, in Mar Tirreno e in Mar Ligure si sono stabilite diverse specie aliene; l'ingresso e il successo della loro colonizzazione è stato, direttamente o indirettamente, favorito anche dalle attività antropiche e dal conseguente degrado ambientale (Bianchi et al. 2019a). Fonte di preoccupazione, in particolare, da diversi anni è l'espansione dell'alga verde tropicale *Caulerpa cylindracea*, la cui veloce espansione è stata associata alla riduzione della biodiversità e all'omogeneizzazione degli ecosistemi marini costieri, come osservato ad esempio nelle Aree Marine Protette di Portofino (Genova) e delle Cinque Terre (La Spezia) (Fig. 6) (Morri et al. 2019).

Seebens et al. (2020), attraverso l'utilizzo di un modello matematico, hanno simulato il numero di specie aliene che potrebbero colonizzare i diversi continenti nel 2050 sulla base delle tendenze storiche osservate a lungo termine. I risultati suggeriscono che le tendenze osservate in passato continueranno ad accelerare per molti gruppi tassonomici. Gli aumenti maggiori sono previsti per l'Europa, il continente con il più alto numero di segnalazioni di specie aliene (Seebens et al. 2020). In una recente valutazione di Essl et al. (2020), il cambiamento climatico, il commercio e i trasporti rivestono un ruolo dominante nel determinare l'espansione di specie aliene. Questi si suppone saranno in continuo aumento, rappresentando quindi, anche nel futuro, i fattori trainanti del cambiamento della biodiversità a livello globale (Essl et al. 2020). Secondo Seebens et al. (2020) una significativa diminuzione del numero di specie aliene su larga scala potrebbe essere ottenuta solo attraverso misure coordinate a livello globale.



Figura 6. *Caulerpa cylindracea* a Portofino (Genova). Sono evidenti gli stoloni che colonizzano il substrato entrando in competizione con gli organismi autoctoni. Foto di Annalisa Azzola.

Comunità di scogliera

In diverse aree del Mediterraneo, i fenomeni di mortalità di massa e l'insediamento di specie termofile e di specie non indigene hanno profondamente cambiato la composizione degli ecosistemi marini. Per le scogliere rocciose, in particolare, sono stati osservati importanti cambiamenti nella struttura delle comunità bentoniche (Bianchi et al. 2019a, b).

I fondi rocciosi, comunemente riferiti con il termine di fondi duri, rappresentano ambienti di importante valore scientifico ed economico. Le comunità che li caratterizzano consentono lo studio di numerosi processi ecologici, quali ad esempio la competizione, le cascate trofiche e la strutturazione degli habitat. Le scogliere rocciose rappresentano, infatti, una grande riserva di biodiversità, grazie alla loro eterogeneità spaziale dovuta anche agli organismi sessili a struttura modulare (e.g., alghe, poriferi, cnidari, briozoi, tunicati) tipici di questi ambienti. Il notevole valore economico dei fondi duri, invece, è dovuto alla pesca e alla loro attrazione nei confronti del turismo, in particolare di quello nautico e subacqueo. Le Aree Marine Protette sono, pertanto, spesso istituite e delimitate in corrispondenza di coste rocciose (Bianchi et al. 2004).

In quest'ottica, e considerata anche la vulnerabilità degli ecosistemi marini costieri, risulta di fondamentale importanza la valutazione dello stato ecologico e lo studio del cambiamento nel tempo delle comunità di scogliera (Montefalcone et al. 2017).

Negli ultimi anni, inoltre, stiamo assistendo a una nuova fase d'innalzamento della temperatura del mare e ci sono diversi indizi che sembrano indicare l'inizio di un'ulteriore serie di cambiamenti negli ecosistemi marini. Gli effetti più comunemente osservati, ad esempio nelle comunità di scogliera del Mar Ligure, includono: (i) la ricerca di rifugi in profondità da parte di alcune specie, per evitare le ondate di calore; e (ii) l'omogeneizzazione degli habitat, con una riduzione di biodiversità e/o tridimensionalità degli ecosistemi (Bianchi et al. 2019a).

Progetto Mare Caldo

Sono ancora pochi gli studi sull'effetto dei cambiamenti climatici che considerano grandi scale spaziali e serie temporali di dati a lungo termine. Diventa quindi fondamentale la raccolta di dati rappresentativi delle variabili ambientali, per migliorare la nostra capacità di valutare l'impatto dei cambiamenti climatici e prevedere i futuri effetti che questi avranno sugli ecosistemi marini (Bianchi et al. 2019b). Comprendere come l'innalzamento della temperatura dell'acqua influisca sulla struttura e sul funzionamento degli ecosistemi marini è anche fondamentale per sostenere politiche e strategie di gestione e conservazione.

Il progetto Mare Caldo, in collaborazione tra DiSTAV e Greenpeace, si propone quindi di sviluppare una rete costiera di stazioni di monitoraggio degli impatti dei cambiamenti climatici nei mari italiani (Fig. 7). La rete, nata con l'installazione di una prima stazione pilota presso la costa nord-occidentale dell'Isola d'Elba e sviluppatasi poi grazie all'adesione al progetto da parte dell'Area Marina Protetta di Portofino e dell'Area Marina Protetta del Plemmirio, prevede lo sviluppo di stazioni fisse per la registrazione delle temperature in mare a diverse profondità, secondo il protocollo definito dal progetto sulla base di quello utilizzato dal network T-MEDNet (<http://www.t-mednet.org>), piattaforma mediterranea già esistente e costituita di diverse stazioni per la misurazione delle temperature nel Mediterraneo, ma ad oggi poco sviluppata in Italia (i.e. solo 3 stazioni). Il progetto Mare Caldo prevede la registrazione delle stazioni dei diversi Soggetti Aderenti sulla piattaforma T-MEDNet e la condivisione periodica dei dati registrati con la suddetta piattaforma, in modo da contribuire a una più ampia rete mediterranea per consentire, grazie allo scambio d'informazioni e conoscenze, la messa in atto di meccanismi regionali di tutela.

Nell'ambito del progetto Mare Caldo i dati raccolti nelle diverse stazioni dei mari italiani sono analizzati per evidenziare eventuali differenze geografiche e latitudinali negli andamenti stagionali delle temperature nella colonna d'acqua e per rilevare la presenza di eventuali anomalie termiche (e.g., ondate di calore, alterazioni del termocline), per sviluppare quindi uno studio comparativo tra le diverse aree in modo da aumentare le conoscenze relative ai mari che circondano la nostra penisola. Il progetto, inoltre, prevede nelle aree di studio lo sviluppo di campagne di monitoraggio sulle biocenosi marine di scogliera per correlare gli andamenti delle temperature rilevate a specifici cambiamenti nella struttura e nella composizione delle comunità bentoniche.

Gli obiettivi prioritari del progetto Mare Caldo sono:

- 1) monitorare, attraverso l'adozione di un protocollo standardizzato di raccolta dati, i cambiamenti della temperatura lungo la colonna d'acqua per periodi continui per valutare gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini costieri, in modo da raccogliere dati utili per sviluppare adeguate misure di gestione e tutela;
- 2) sensibilizzare l'opinione pubblica e aumentare la consapevolezza sui cambiamenti in atto, con il fine ultimo di stimolare i dovuti interventi per fronteggiarli;
- 3) porre le basi per lo sviluppo di una rete nazionale di monitoraggio degli impatti dei cambiamenti climatici sulle comunità di scogliera nei mari italiani.

In particolare, il partner scientifico rappresentato dal DiSTAV (Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita) dell'Università degli Studi di Genova è responsabile di:

- 1) analizzare con cadenza periodica i dati di temperatura registrati dalle diverse stazioni di misurazione;
- 2) elaborare e mettere a confronto i dati registrati dalle diverse stazioni aderenti al progetto;
- 3) caricare i dati delle stazioni del progetto Mare Caldo sulla piattaforma T-MedNET;
- 4) programmare e condurre campagne di monitoraggio in immersione subacquea delle biocenosi marine bentoniche nelle aree di studio, per correlare lo stato degli ecosistemi con le variazioni delle temperature in mare.



Figura 7. Foto di Lorenzo Moscia scattata durante i monitoraggi biologici condotti all'Isola d'Elba nell'ambito del primo anno di progetto Mare Caldo.

MATERIALI E METODI

AREE DI STUDIO

Nel corso del primo anno del progetto Mare Caldo (2019-2020) sono state prese in esame tre aree situate a diverse latitudini, con diverso livello di protezione e con diverse caratteristiche ambientali: l'Area Marina Protetta di Portofino a nord, l'area dell'Isola d'Elba e dell'isola di Pianosa al centro, e l'Area Marina Protetta del Plemmirio a sud.

Area Marina Protetta di Portofino

L'Area Marina Protetta di Portofino, gestita dal Consorzio di Gestione dell'Area Marina Protetta del Promontorio di Portofino, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 26 aprile 1999 e comprende i Comuni di Camogli, Portofino e Santa Margherita Ligure. L'area marina, affacciata sul Mar Ligure e situata 30 km a est dalla città di Genova, si sviluppa per circa 13 km costieri lungo tutto il promontorio di Portofino (Fig. 8a) per un totale di 372 ettari di mare che dividono il Golfo del Tigullio (a est) dal Golfo Paradiso (a ovest). L'area marina è suddivisa in tre zone a tutela decrescente (Fig. 8b):

I) zona A di riserva integrale: identificata col tratto di mare interno all'insenatura denominata Cala dell'Oro, che si apre sul fronte meridionale del Promontorio di Portofino. In essa sono consentite solo attività di soccorso e ricerca scientifica autorizzate dal Soggetto Gestore;

II) zona B di riserva generale: comprende il fronte meridionale del Promontorio e va da Punta del Faro di Portofino a Punta Chiappa, escluso il corridoio d'accesso alla Baia di San Fruttuoso. Al suo interno sono consentite: le attività di balneazione e apnea, la navigazione a remi o a vela, la navigazione a motore dei natanti con velocità non superiore a 5 nodi, la navigazione a motore delle imbarcazioni, sempre al di sotto dei 5 nodi, esclusivamente allo scopo di raggiungere con rotta perpendicolare alla costa i punti di ormeggio, consentito solo nei siti predisposti. È inoltre consentita la pesca professionale a pescatori o cooperative locali e la pesca dilettantistica ai residenti nei comuni di Camogli, Santa Margherita Ligure e Portofino, subordinata al rilascio di autorizzazione da parte del Soggetto Gestore. L'attività subacquea diurna è consentita in 20 siti e può essere effettuata tramite centri subacquei autorizzati oppure in modo autonomo richiedendo un'autorizzazione giornaliera al Soggetto Gestore. L'attività subacquea notturna è consentita solo se effettuata tramite centri subacquei autorizzati e solo in particolari siti;

III) zona C di riserva parziale: comprende i tratti di mare, lungo i lati orientali e occidentali del Promontorio, tra Punta Chiappa e Punta Cannette da un lato e tra Punta del Faro di Portofino e Punta Pedale dall'altro, esclusi i corridoi di accesso a Portofino e Porto Pidocchio. Al suo interno sono consentite tutte le attività sopracitate. Inoltre, è consentito l'ancoraggio ai natanti e alle imbarcazioni nei siti individuati dal soggetto gestore, è consentita la pesca dilettantistica che è regolamentata e subordinata al rilascio di

autorizzazione da parte del Soggetto Gestore, è consentita l'attività subacquea diurna con boa di segnalazione o con unità navale di appoggio, utilizzando i siti di ormeggio predisposti dal Soggetto Gestore. Infine, la fascia di transito esterna all'Area Marina Protetta è costituita da una fascia di mare larga 500 m, prospiciente l'Area Marina Protetta (si estende dal limite esterno del perimetro) all'interno della quale la navigazione è consentita a una velocità massima di 10 nodi (<http://www.portofinoamp.it>).

Da un punto di vista geomorfologico le rocce di cui sono costituite le coste del Promontorio di Portofino sono di origine sedimentaria. La parte più a sud del Promontorio di Portofino, che interessa l'area marina tra Punta del Faro di Portofino e Punta Chiappa, è costituita da conglomerato risalente al periodo dell'oligocene (ca. 30 milioni di anni fa). Questa particolare roccia è costituita da ciottoli di varia grandezza e varia origine (i.e., calcari marnosi e arenacei, calcareniti, diaspri, rocce ofiolitiche, scisti cristallini), cementati da una matrice calcareo arenacea o marnosa. Le coperture quaternarie, risalenti agli ultimi due milioni di anni, si sono originate dalla deposizione di materiale da parte dei corsi d'acqua, da depositi alluvionali e da coltri di detriti e frane. Oggi la morfologia della costa dell'Area Marina Protetta appare molto diversificata, caratterizzata da tratti di costa uniforme ma anche zone dove sono preponderanti scogli o grossi massi parzialmente emersi. I fondali, prevalentemente rocciosi, ospitano diversi ambienti tra i quali, ad esempio, i fondali ad alghe fotofile, le praterie di fanerogame marine e l'habitat coralligeno (<http://www.portofinoamp.it>).

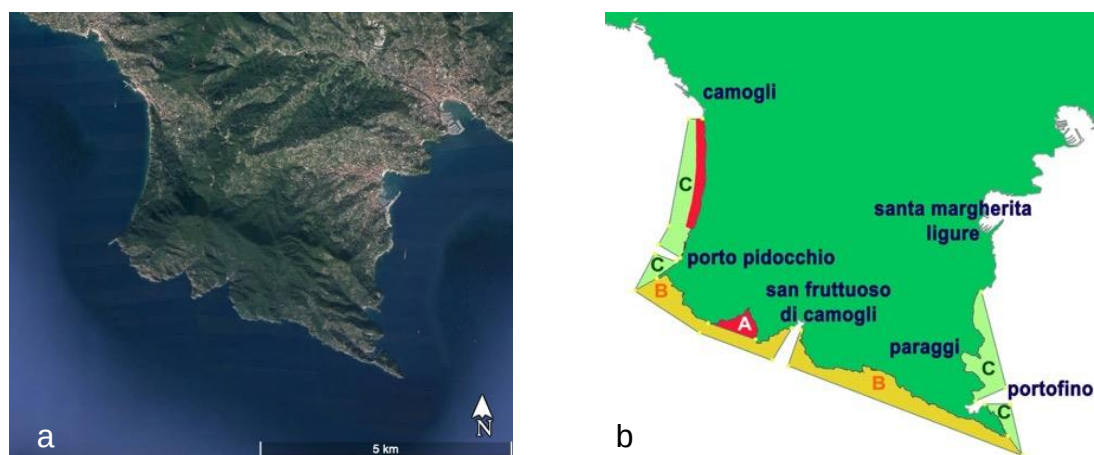


Figura 8. Veduta dall'alto del Promontorio di Portofino: (a) immagine satellitare da Google Earth; (b) carta dell'Area Marina Protetta dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di tutela (<http://www.portofinoamp.it>).

Isola d'Elba e Isola di Pianosa

L'isola d'Elba e l'Isola di Pianosa (Fig. 9a) fanno parte del Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano, istituito con il decreto del Presidente della Repubblica il 22 luglio 1996 (Fig. 9b). Questo rappresenta il più grande parco marino d'Europa comprendendo tutte le sette isole principali dell'Arcipelago Toscano (Elba, Capraia, Gorgona, Pianosa, Montecristo, Giglio e Giannutri) e alcune isole minori e scogli, per un totale di 56.766 ettari di mare e 17.887 ettari di terra. L'Isola d'Elba, tuttavia, è sottoposta a regime di tutela solo per una parte del suo territorio terrestre, mentre le acque costiere non rientrano nel perimetro del Parco Nazionale e non fanno parte di nessuna area marina protetta. L'Isola di Pianosa, invece, grazie alla sua storia politica, può essere vista come un'area remota e pristina, virtualmente priva degli effetti delle pressioni antropiche locali, e può quindi essere considerata un riferimento di quelle che potessero essere le condizioni originarie degli ambienti marino costieri prima dello sviluppo antropico costiero. L'isola di Pianosa è stata, infatti, completamente chiusa al turismo fino al 1999. Le immersioni, in particolare, sono state permesse solo dal 2013 e sono tutt'oggi regolamentate da norme volte a tutelare gli ecosistemi marini.

Da un punto di vista geomorfologico l'Isola d'Elba è l'affioramento più occidentale della catena nord-appenninica ed è nota per i suoi giacimenti minerari a ferro. La sua struttura è in realtà estremamente complessa: a ovest è costituita da plutone granodioritico, mentre a est è costituita da una sequenza di unità tettoniche con successioni sedimentarie di tipo Ligure e Toscano, oltre che da monzoniti. Pianosa, invece, è completamente piatta ed è costituita quasi totalmente da una biocalcarenite pliocenica discordante su marne e argille di età miocenica (Bortolotti et al. 2011).

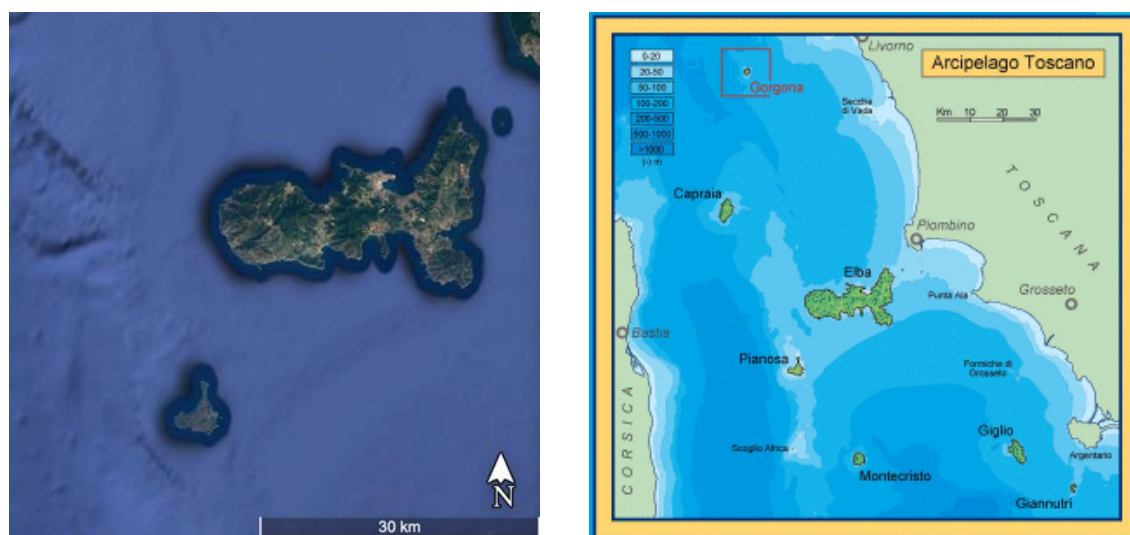


Figura 9. Veduta dall'alto dell'Isola d'Elba e dell'Isola di Pianosa: (a) immagine satellitare da Google Earth; (b) carta del Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano con le sette isole principali (www.parks.it).

Area Marina Protetta del Plemmirio

L'Area Marina Protetta del Plemmirio, gestita dal Consorzio Plemmirio, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 15 settembre 2004. L'area marina, situata 12 km a sud dalla città di Siracusa, si sviluppa per circa 14 km lungo tutto il tratto di costa della Penisola della Maddalena (Fig. 10a), per un totale di 2429 ettari di mare.

L'Area Marina Protetta del Plemmirio è suddivisa in tre zone sottoposte a diverso regime di tutela ambientale, tenuto conto delle caratteristiche ambientali e della situazione socio-economica ivi presenti (Fig. 10b). Di seguito sono riportate, per ogni zona, le attività consentite:

I) zona A di riserva integrale (80 ha): comprende il tratto di mare prospiciente la costa di Capo Murro di Porco. In essa sono consentite solo attività di soccorso e sorveglianza, nonché attività di servizio svolte da e per conto l'ente gestore. Sono inoltre consentite le attività di ricerca, previa autorizzazione dell'ente gestore, e sono consentite le visite guidate subacquee solo ai centri d'immersione autorizzati dall'ente gestore nel periodo dal 1 maggio al 31 ottobre;

II) zona B di riserva generale (1470 ha): comprende il tratto di mare prospiciente la costa compresa tra Cala di Massolivieri e Punta di Milocca. In essa sono consentite: la balneazione, la libera navigazione a vela, remi, pedali e la navigazione a motore a natanti e imbarcazioni ad una velocità non superiore a 5 nodi. L'ormeggio è consentito nei siti individuati e attrezzati previa autorizzazione dell'ente gestore. È inoltre consentita la piccola pesca artigianale previa autorizzazione dell'ente gestore e a esclusione di alcune specie elencate nel regolamento. L'attività subacquea diurna è consentita in 4 siti presso i gavitelli appositamente predisposti e previa autorizzazione dell'ente gestore. Sono infine consentite le attività di ricerca previa autorizzazione dell'ente gestore;

III) zona C di riserva parziale (950 ha): comprende il residuo tratto di mare all'interno del perimetro dell'Area Marina Protetta. In essa sono consentite tutte le attività sopraelencate e inoltre: la navigazione a 10 nodi oltre la distanza di 300 m dalla costa, le gare di pesca sportiva previa autorizzazione dell'ente gestore dal 1 giugno al 31 agosto con un massimo di 2 canne o lenze da terra e, infine, è consentito l'ancoraggio in zone appositamente individuate dall'ente gestore (<https://plemmirio.eu>).

Dal punto di vista geomorfologico la Penisola della Maddalena rientra nel margine orientale dell'altopiano Ibleo ed è costituita da una piattaforma prevalentemente calcarenitica. Quest'area, scolpita nei secoli dall'erosione marina, presenta una morfologia piuttosto varia. I motivi di tale eterogeneità vengono attribuiti, oltre che alle diverse forme di erosione, anche alla presenza dell'*horst* della penisola della Maddalena. Un *horst* non è altro che una porzione di crosta terrestre relativamente rialzata a causa di un sistema di fratture determinate da movimenti sismici. L'*horst* del "Plemmirio" è quindi caratterizzato da alte falesie, linee di spiaggia, spianate d'abrasione, grotte, insenature frastagliate, archi sottomarini, crepe e anfratti che contribuiscono a rendere i paesaggi aerei e subacquei ricchi e diversificati, offrendo così una notevole varietà di habitat per gli organismi. I fondali

dell'area sono costituiti prevalentemente da fondi duri rocciosi. Tale substrato è delineato da una serie di terrazzi alternati da insenature sub-pianeggianti. A questo si aggiunge la presenza di zone sabbiose caratterizzate dalla presenza di praterie di *Posidonia oceanica* (Pasolli 2011, <https://plemmirio.eu>).



Figura 10. Veduta dall'alto della Penisola della Maddalena: (a) immagine satellitare da Google Earth; (b) carta dell'Area Marina Protetta dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di tutela (<https://plemmirio.eu>).

ATTIVITÀ DI CAMPO

Monitoraggio della temperatura nella colonna d'acqua

Nell'ambito del progetto Mare Caldo le temperature della colonna d'acqua sono state registrate *in situ* da stazioni composte di sensori (*temperature data logger*) installati a diverse profondità e settati per registrare le temperature a intervalli di tempo regolari.

Il protocollo per il monitoraggio della temperatura è stato sviluppato sul modello di quello utilizzato dalla rete T-MEDNet in modo da poter inserire i dati delle stazioni in un più ampio network di monitoraggio mediterraneo e favorire la comparazione dell'evoluzione delle temperature nelle diverse aree del bacino.

Temperature data logger

I *temperature data logger* utilizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo sono gli HOB0 MX TidbiT 400 (Fig. 11), in grado di registrare in continuo a intervalli di un'ora e archiviare i dati con una capacità di memoria tale per cui possano essere scaricati ogni sei mesi. Il modello è stato inoltre scelto perché dotato di tecnologia Bluetooth, che facilita il *download* immediato dei dati, attraverso l'uso di dispositivi mobili con apposita applicazione, non appena i sensori vengono recuperati in mare.

Per ogni area di studio dove è stato necessario acquistare i *temperature data logger* (i.e., Isola d'Elba e AMP Plemmirio) si è scelto di acquistarne 12: 8 previsti per la stazione di monitoraggio, 2 di *backup* in acqua e 2 di *backup* in caso di perdita e/o malfunzionamento dei sensori in acqua.

Per tutti i *temperature data logger* acquistati nell'ambito del progetto Mare Caldo, il settaggio è stato curato dal partner tecnico ElbaTech srl che ha effettuato per ognuno il test iniziale di funzionamento e quello di accuratezza (al fine di calcolarne l'offset).

Sviluppo delle stazioni per la registrazione delle temperature in mare

Al fine di monitorare le variazioni stagionali delle temperature e i fenomeni di stratificazione dell'acqua, ogni stazione del progetto Mare Caldo si compone di 8 *temperature data logger* posizionati su pareti rocciose ogni 5 m di profondità dai 40 m fino alla superficie (i.e., 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 m).

Oltre ai *temperature data logger* previsti per la stazione di monitoraggio a 5 e a 10 m, sono stati posti anche 2 sensori di *backup* alle medesime profondità, al fine di garantire comunque la raccolta dei dati anche in caso di perdita del sensore, essendo queste due profondità quelle più esposte al moto ondoso.

Area Marina Protetta di Portofino

L'Area Marina Protetta di Portofino, facendo già parte della rete mediterranea T-MEDNet dal 2015 ed essendo partner dell'Interreg MPA-ADAPT, disponeva già di *temperature data logger* posizionati nel sito di Cala dell'Oro (44°19'01.56" N, 9°09'51.94" E), zona di riserva integrale dell'Area Marina Protetta.

Il modello da loro utilizzato è HOB0 Water Temp Pro v2, leggermente differente rispetto a quello scelto per le altre aree di studio del progetto Mare Caldo. Tuttavia, dal confronto dei rispettivi *data sheets* effettuato dal partner tecnico ElbaTech srl è emerso che i dati raccolti dalle due tipologie di sensori sono del tutto comparabili poiché differiscono per caratteristiche ininfluenti alla misurazione della temperatura (Tab. 1).

Tabella 1. In tabella sono riassunte le caratteristiche rilevanti per la messa a confronto dei due modelli di *temperature data logger*.

Area	AMP Portofino	Isola d'Elba, AMP Plemmirio
Modello	HOBO Water Temp Pro v2	HOBO TidBit 400
Accuratezza	+/-0.21°C da 0° a 50°C	+/-0.2°C da 0° a 70°C
Risoluzione	0.02°C a 25°C	0.01°C
Memoria	42000 measurements	96000 measurements
Interfaccia	USB	Bluetooth



Figura 11. I due modelli di *temperature data logger* utilizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo. A sinistra il modello HOBO Water Temp Pro v2, adottato dall'Area Marina Protetta di Portofino; a destra il modello HOBO MX Tidbit 400 acquistato per l'area dell'Isola d'Elba e per l'Area Marina Protetta del Plemmirio.

Isola d'Elba

L'installazione dei *temperature data logger* per l'area dell'Isola d'Elba è stata diretta e curata da Andrea Romoli, proprietario del *diving center* Il Careno. Le operazioni si sono svolte in 5 giornate lavorative tra il 16 e il 27 novembre 2019, in base alle condizioni meteo-marine. Il sito scelto per il posizionamento dei *temperature data logger* si trova a nord-ovest dell'Isola d'Elba ed è conosciuto come Le Formiche della Zanca (42°48'23.51" N, 10°07'34.74" E). L'area è caratterizzata da piccoli scogli affioranti a 300 m dalla costa, con una batimetria che si sviluppa da 0 a 55 m di profondità e una forte esposizione alle correnti marine (Fig. 12).

Dopo una prima immersione subacquea di sopralluogo per la scelta dei punti dove fissare i *temperature data logger*, sono state eseguite 7 immersioni subacquee per l'installazione di 10 sensori, 8 sulla parete rocciosa e 2 sulla catena del sistema di ormeggio fornita per i *diving* dal Comune di Marciana. Una prima operazione ha previsto l'installazione di chiodi da roccia *narrow angle*, fissati con ancorante chimico bicomponente della Wurth mediante pistola per silicone, sui quali sono stati installati i supporti per le sonde (Fig. 13a). Una volta

verificata la solidità dei chiodi e dei supporti sono stati fissati, tramite fascette di plastica (che rendono semplice la periodica rimozione dei sensori), i sensori alle maggiori profondità (i.e., 25, 30, 35, 40 m) e, al fine di verificare la corretta capacità di acquisizione dei dati da parte dei sensori, è stato fissato il sensore dei 10 m in catena. Quest'ultimo è stato successivamente recuperato per scaricare i dati e verificare il funzionamento dei sensori. Infine, sono stati posizionati tutti gli altri sensori, sia sulla parete rocciosa sia in catena a 5 m di profondità. A tutti i *temperature data logger* è stato fissato, tramite sagola, un galleggiante per essere facilmente individuabili anche in presenza di abbondante mucillagine. Inoltre, è stata riportata un'etichetta con la dicitura in italiano e in inglese: "Esperimento scientifico per cortesia non toccare" (Fig. 13b).



Figura 12. Sito Formiche della Zanca (42°48'23.51" N, 10°07'34.74" E) selezionato per la stazione di monitoraggio delle temperature per l'area dell'Isola d'Elba. Immagine da Google Earth.



Figura 13. Nella foto a sinistra si osserva il chiodo da roccia del tipo *narrow angle* e il supporto con le fascette sul quale sono installati i sensori. Nella foto di destra si osserva un sensore installato sul supporto e segnalato dall'etichetta e dal galleggiante fissato con la cima.

Area Marina Protetta del Plemmirio

Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio l'installazione dei *temperature data logger* è stata diretta e curata dal responsabile tecnico-scientifico dell'Area Marina Protetta Gianfranco Mazza, coadiuvato dalla biologa Linda Pasolli. L'operazione ha richiesto 3 giornate di lavoro dal 9 all'11 settembre, per un totale di 3 immersioni subacquee. Il sito scelto, sulla base delle caratteristiche morfologiche del fondale, per l'installazione della stazione di monitoraggio è denominato Le Tre Ancore (37° 0'4.97" N, 15°20'1.70" E) e si trova nella zona A dell'Area Marina Protetta (Fig. 14). L'area, esposta a intense correnti marine, è caratterizzata da una parete rocciosa che scende fino a circa 48 m di profondità interrotta da terrazzamenti a circa 12 m e 33 m di profondità.

In quest'area di studio le scogliere rocciose sono costituite da calcarenite, molto friabile, per cui a seguito della prima immersione subacquea si è realizzato che non fosse possibile installare i chiodi da roccia tramite la penetrazione meccanica. Nella seconda immersione, quindi, sono stati individuati piccoli anfratti lungo la parete rocciosa che sono stati riempiti da ancorante chimico bicomponente della Wurth mediante pistola per silicone. Nell'ancorante sono stati fissati i chiodi sui quali gli operatori hanno installato il supporto per i *temperature data logger*. Una volta verificata la stabilità del supporto, nel corso della terza immersione, sono stati fissati i sensori, tramite fascetta di plastica, a tutte le profondità (i.e., 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) (Fig.15). Anche in quest'area di studio sono stati installati due sensori di backup alle profondità di 5 e 10 m. Per questi, il sito è stato scelto sul versante opposto (i.e. versante nord) rispetto alla stazione di monitoraggio in modo tale che siano esposti a diverse condizioni meteo-marine.

I sensori, infine, sono stati marcati con etichette riportanti la scritta "Progetto Mare Caldo" e i loghi dei partner del progetto.

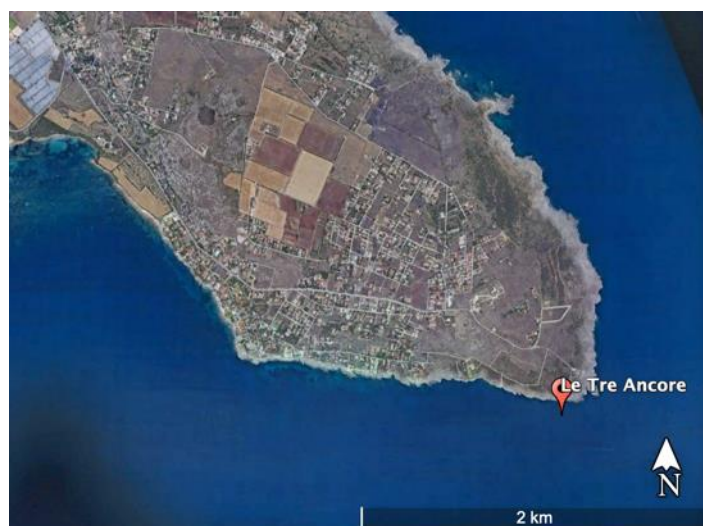


Figura 14. Sito Le Tre Ancore (42°48'23.51" N, 10°07'34.74" E) selezionato per la stazione di monitoraggio delle temperature nell'Area Marina Protetta del Plemmirio. Immagine da Google Earth.

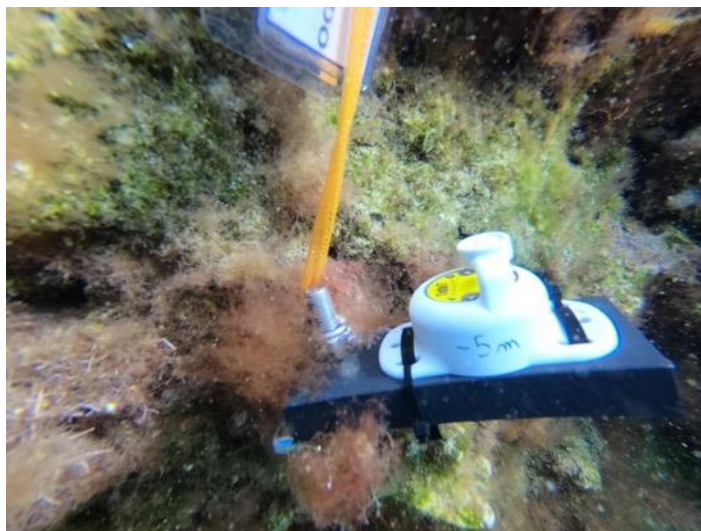


Figura 15. Sensore installato sul supporto e segnalato dall'etichetta e dal galleggiante fissato alla cima.

Monitoraggio sugli ecosistemi di scogliera

Oltre alle analisi sull'andamento delle temperature, nell'ambito del primo anno del progetto Mare Caldo, sono stati condotti i monitoraggi biologici per la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi di scogliera in ogni area di studio.

Tempistiche

I monitoraggi sono stati condotti durante la stagione estiva, tra giugno e ottobre 2020. In particolare, per l'Area Marina Protetta di Portofino i monitoraggi sono stati condotti nelle giornate dal 24 al 26 luglio, per l'area dell'Isola d'Elba e dell'Isola di Pianosa nelle giornate dal 22 al 24 giugno, mentre per l'Area Marina Protetta del Plemmirio nelle giornate dal 21 al 23 settembre.

Selezione delle stazioni per ogni area di studio

Per ogni area di studio sono state individuate tre/quattro stazioni di monitoraggio biologico in corrispondenza di scogliere rocciose dove, indipendentemente dalla morfologia del fondale, fosse raggiunta una profondità di circa 40 m. Una prima stazione è stata fissata in corrispondenza del sito dove sono stati installati i sensori di rilevamento della temperatura. Per le restanti stazioni, nelle aree dove fossero disponibili dati storici in letteratura (i.e., Area Marina Protetta di Portofino e Isola d'Elba), si è scelto di ripercorrere le stazioni già studiate in passato. Nell'area di studio dove non vi fosse disponibilità d'informazione storica (i.e., Area Marina Protetta del Plemmirio), le stazioni sono state scelte sulla base delle indicazioni fornite dal responsabile tecnico-scientifico dell'area marina Gianfranco Mazza, in relazione alla valenza ecologica dei siti.

In particolare:

1. Nell'Area Marina Protetta di Portofino i monitoraggio sono stati condotti in tre stazioni: I) Cala dell'Oro ($44^{\circ}19'01.56''$ N, $9^{\circ}09'51.94''$ E), zona A dell'Area Marina Protetta dove sono stati installati i sensori; II) Grotta dei Gamberi ($44^{\circ}19'18.22''$ N, $9^{\circ}08'44.73''$ E), zona B del versante ovest dell'AMP d; e III) Torretta ($44^{\circ}18'45.10''$ N, $9^{\circ}10'03.40''$ E), zona B del versante est dell'AMP. In tutte e tre le stazioni si ha disponibilità di dati storici in letteratura (Fig. 16).

2. All'Isola d'Elba i monitoraggi sono stati condotti in quattro stazioni: I) Le Formiche della Zanca ($42^{\circ}48'23.51''$ N, $10^{\circ}07'34.74''$ E), dove sono stati installati i sensori; II) Le Cannelle ($42^{\circ}46'28.98''$ N, $10^{\circ}25'60.00''$ E); III) Lo Scoglietto ($42^{\circ}49'42.84''$ N, $10^{\circ}19'55.38''$ E); IV) Picchi di Pablo (denominato anche Altare, $42^{\circ}43'44.58''$ N, $10^{\circ}25'58.38''$ E). Nelle stazioni II, III, e IV si ha disponibilità di dati storici in letteratura. Nell'ambito dei monitoraggi condotti all'Isola d'Elba sono stati inoltre effettuati rilevamenti subacquei speditivi nei siti di immersione SP3 ($42^{\circ}37'03''$ N, $10^{\circ}05'22.47''$ E) e SP5 ($43^{\circ}34'31.45''$ N, $10^{\circ}06'20.36''$ E) dell'Isola di Pianosa (Fig. 17).

3. Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio i monitoraggi sono stati condotti nella zona A dell'AMP in quattro stazioni: I) Le Tre Ancore ($37^{\circ} 0'4.97''$ N, $15^{\circ}20'1.70''$ E), dove sono stati installati i sensori; II) Le Grotte del Capo ($37^{\circ} 0'8.02''$ N, $15^{\circ}20'11.97''$ E); III) La Lingua del Gigante ($37^{\circ} 0'5.25''$ N, $15^{\circ}19'55.80''$ E); e IV) La Secca del Capo ($37^{\circ} 0'5.67''$ N, $15^{\circ}20'12.39''$ E). Quest'ultima stazione, a causa della sua posizione, è esposta a correnti e fattori ambientali differenti rispetto agli altri tre siti (Fig. 18).



Figura 16. Posizione geografica delle tre stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'Area Marina Protetta di Portofino.



Figura 17. Posizione geografica delle sei stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'area dell'Isola d'Elba e dell'Isola di Pianosa.



Figura 18. Posizione geografica delle quattro stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'Area Marina Protetta del Plemmirio.

Metodi di rilevamento

In ogni stazione di monitoraggio, i dati sono stati raccolti tramite rilevamenti visivi in immersione subacquea (Fig. 19 e Fig. 20) con autorespiratore ad aria (ARA) da parte di operatori scientifici subacquei qualificati del DiSTAV (Università di Genova), utilizzando come normativa di riferimento per l'immersione scientifica il codice di pratica dell'Unesco (*Scientific Diving: a general code of practice*, edizione del 1996 e aggiornamenti successivi) e adottando gli standard previsti dalla Comunità Europea (ESD, *European Scientific Diver*, e AESD, *Advanced European Scientific Diver*, MAST CT 96-6351, Maggio 1997) (<http://www.aioss.info/>).

Gli operatori scientifici subacquei partecipanti alle attività di campo sono stati:

Dr. Monica Montefalcone

Brevetto SDI-TDI Instructor e Advanced European Scientific Diver

Ricercatrice DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Dott.ssa Annalisa Azzola

Brevetto FIPSAS Instructor e European Scientific Diver

Dottoranda DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Gli operatori scientifici subacquei del DiSTAV sono sempre stati accompagnati in immersione dal personale dell'Area Marina Protetta o del diving center, assieme al personale di Greenpeace. Il personale presente sulla barca d'appoggio ha anche curato gli aspetti legati alla sicurezza in mare. La profondità è stata misurata con un computer da immersione, la cui precisione è di circa 30 cm. Di seguito sono riportate le tre attività condotte in immersione.

1. Transetti bionomici verticali

Nell'ambito dei monitoraggi sono stati realizzati transetti bionomici al fine di caratterizzare le comunità bentoniche e di valutarne lo stato ecologico. Per ogni stazione è stato quindi percorso un tragitto definito lungo il gradiente di profondità (i.e., a partire da 40 m circa fino alla superficie), mantenendo una fascia di osservazione d'ampiezza fissa (Gatti et al., 2017). Lungo ogni transetto sono state annotate le specie cospicue presenti identificate mediante criterio fisionomico, che presentassero dimensioni tali da permetterne il riconoscimento e l'identificazione sott'acqua. Per tutte le specie rilevate è stata inoltre stimata l'abbondanza tramite stime semi-quantitative basate su 3 classi: 1 = poco abbondante; 2 = mediamente abbondante; 3 = molto abbondante.

2. Monitoraggio delle specie termofile

Lungo i transetti sono stati inoltre registrati i dati di presenza e abbondanza (tramite stime semi-quantitative basate sempre sulle tre classi di abbondanza 1, 2, 3) di alcune specie indicatrici del cambiamento climatico (i.e., specie termofile), facendo riferimento agli esempi elencati in Tabella 2. Le specie termofile sono distinte in specie aliene, specie criptogeniche (quelle specie per le quali non è possibile definirne con certezza l'origine aliena o nativa, a causa di scarse conoscenze tassonomiche), e specie native. La lista delle specie termofile è stata aggiornata e adattata in funzione delle diverse realtà locali e non è esaustiva di tutte le specie termofile segnalate in Mediterraneo, ma rappresenta un elenco delle specie termofile bentoniche più frequentemente osservate in corrispondenza della fascia infralitorale e circalitorale delle scogliere rocciose nei mari italiani.

3. Monitoraggio degli eventi di mortalità di massa

Seguendo il protocollo utilizzato dalla rete di monitoraggio T-MEDNet, sono stati raccolti dati sugli eventi di moria di alcune specie target (e.g., *Cladocora caespitosa*, *Eunicella cavolini*, *Eunicella singularis*, *Paramuricea clavata*, *Pinna nobilis*, spugne massive e incrostanti, briozoi massivi, alghe corallinacee) che sono state individuate di volta in volta in relazione alle diverse aree di studio. In particolare, è stato registrato il numero di individui (o colonie) presenti di ciascuna specie target ad una data profondità, o la percentuale di ricoprimento del fondo da parte delle alghe corallinacee. È stato poi registrato il numero di individui (o colonie, o % di ricoprimento per le alghe) che mostrassero segni di impatto e necrosi (e.g., segni di sbiancamento per gli organismi calcarei, parziale o totale mortalità della colonia, presenza di epibiosi). Secondo il protocollo T-MEDNet gli organismi sono da considerarsi impattati quando presentano segni di necrosi (o sbiancamento) per oltre il 10% della superficie dell'individuo o della colonia (Fig. 21).



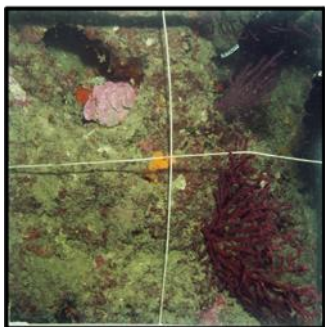
Figura 19 e Figura 20. Rilevamenti visivi in immersione subacquea nell'ambito dei monitoraggi biologici svolti all'Isola d'Elba per il progetto Mare Caldo. Foto di Lorenzo Moscia.

Tabella 2. Lista delle principali specie termofile indicatrici del cambiamento climatico che possono essere osservate e facilmente identificate tramite il rilevamento visivo subacqueo sulle scogliere rocciose della fascia infralitorale e circalitorale dei mari italiani. Le specie sono distinte in aliene (A), criptogeniche (C), e native (N).

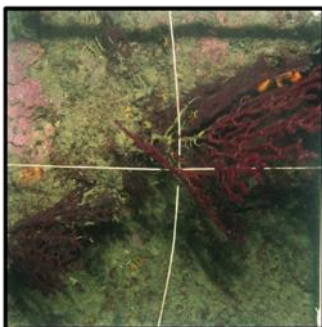
Phylum	Classe	Specie	Status
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Anadyomene stellata</i> (Wulfen) C. Agardh, 1823	N
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Caulerpa cylindracea</i> Sonder, 1845	A
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Caulerpa prolifera</i> (Forsskål) J.V. Lamouroux, 1809	N
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Caulerpa taxifolia</i> (M.Vahl) C. Agardh, 1817	A
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Caulerpa dystichophylla</i> (Sonder) Verlaque, Huisman & Procaccini, 2014	A
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Codium fragile</i> (Suringar) Hariot, 1889	A
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Dasycladus vermicularis</i> (Scopoli) Krasser, 1898	N
Chlorophyta	Ulvophyceae	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i> (Zanardini) Børgesen, 1925	N
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Acrosymphyton purpuriferum</i> (J. Agardh) Sjöstedt, 1926	N
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Acrothamnion preissii</i> (Sonder) E.M. Wollaston, 1968	A
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Asparagopsis armata</i> Harvey, 1855	A
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Botryocladia madagascariensis</i> G. Feldmann, 1945	A
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Liagora viscida</i> (Forsskål) C. Agardh, 1822	N
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Lophocladia lallemandii</i> (Montagne) F. Schmitz, 1893	A
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Tricleocarpa fragilis</i> (Linnaeus) Huisman & R.A. Townsend, 1993	N
Rhodophyta	Florideophyceae	<i>Womersleyella setacea</i> (Hollenberg) R.E. Norris, 1992	A
Ochrophyta	Phaeophyceae	<i>Padina boergesenii</i> Allender & Kraft, 1983	A
Ochrophyta	Phaeophyceae	<i>Sargassum muticum</i> (Yendo) Fensholt, 1955	A
Tracheophyta	Magnoliopsida	<i>Halophila stipulacea</i> (Forsskål) Ascherson, 1867	A
Porifera	Calcarea	<i>Paraleucilla magna</i> Klautau, Monteiro & Borojevic, 2004	A
Porifera	Demospongiae	<i>Axinella cannabina</i> (Esper, 1794)	N
Cnidaria	Hydrozoa	<i>Pennaria disticha</i> Goldfuss, 1820	C
Cnidaria	Schizophzoa	<i>Cassiopea andromeda</i> (Forsskål, 1775)	A
Cnidaria	Scyphozoa	<i>Phyllorhizapunctata</i> von Lendenfeld, 1884	A
Cnidaria	Anthozoa	<i>Astroides calycularis</i> (Pallas, 1766)	N
Cnidaria	Anthozoa	<i>Balanophyllia</i> (<i>Balanophyllia</i>) <i>regia</i> Gosse, 1853	N
Cnidaria	Anthozoa	<i>Madracis pharensis</i> (Heller, 1868)	N
Cnidaria	Anthozoa	<i>Oculina patagonica</i> de Angelis, 1908	C
Cnidaria	Anthozoa	<i>Phyllangia americana mouchezii</i> (Lacaze-Duthiers, 1897)	N
Ctenophora	Tentaculata	<i>Mnemiopsis leidyi</i> A. Agassiz, 1865	A
Annelida	Polychaeta	<i>Branchiommma luctuosum</i> (Grube, 1870)	A
Annelida	Polychaeta	<i>Branchiommma boholense</i> (Grube, 1878)	A
Annelida	Polychaeta	<i>Branchiommma bairdi</i> (McIntosh, 1885)	A
Annelida	Polychaeta	<i>Hermodice carunculata</i> (Pallas, 1766)	N
Mollusca	Gastropoda	<i>Aplysia dactylomela</i> Rang, 1828	C
Mollusca	Gastropoda	<i>Charonia lampas</i> (Linnaeus, 1758)	N
Mollusca	Gastropoda	<i>Polycera hedgpethi</i> Er. Marcus, 1964	A
Mollusca	Gastropoda	<i>Rapana venosa</i> (Valenciennes, 1846)	A
Arthropoda	Malacostraca	<i>Calcinus tubularis</i> (Linnaeus, 1767)	N
Arthropoda	Malacostraca	<i>Callinectes sapidus</i> Rathbun, 1896	A
Arthropoda	Malacostraca	<i>Percnon gibbesi</i> (H. Milne Edwards, 1853)	A

Echinodermata	Asterozoa	<i>Chaetaster longipes</i> (Bruzellius, 1805)	N
Echinodermata	Asterozoa	<i>Hacelia attenuata</i> Gray, 1840	N
Echinodermata	Asterozoa	<i>Ophidiaster ophidianus</i> (Lamarck, 1816)	N
Echinodermata	Asterozoa	<i>Peltaster placenta</i> (Müller & Troschel, 1842)	N
Echinodermata	Echinozoa	<i>Arbaciella elegans</i> Mortensen, 1910	N
Echinodermata	Echinozoa	<i>Centrostephanus longispinus</i> (Philippi, 1845)	N
Bryozoa	Gymnolaemata	<i>Amathia verticillata</i> (delle Chiaje, 1822)	A
Chordata	Ascidacea	<i>Polysyncraton lacazei</i> (Giard, 1872)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Abudefduf vaigiensis</i> (Quoy & Gaimard, 1825)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Acanthurus chirurgus</i> (Bloch, 1787)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Balistes caprisca</i> Gmelin, 1789	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Cephalopholis taeniops</i> (Valenciennes, 1828)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Chaetodon auriga</i> Forsskal, 1775	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Diplodus cervinus</i> (Lowe, 1838)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Fistularia commersonii</i> Rüppell, 1838	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Lutjanus sebae</i> (Cuvier, 1816)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Mycteroperca rubra</i> (Bloch, 1793)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Ostracion cubicus</i> Linnaeus, 1758	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Parablennius pilicornis</i> (Cuvier, 1829)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Pterois miles</i> (Bennett, 1828)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Siganus luridus</i> (Rüppell, 1829)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Sparisoma cretense</i> (Linnaeus, 1758)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Sphoeroides pachygaster</i> (Müller & Troschel, 1848)	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Sphyraena viridensis</i> Cuvier, 1829	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Stephanolepis diaspros</i> Fraser-Brunner, 1940	A
Chordata	Actinopterygii	<i>Synodus saurus</i> (Linnaeus, 1758)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Thalassoma pavo</i> (Linnaeus, 1758)	N
Chordata	Actinopterygii	<i>Zebrasoma xanthurum</i> (Blyth, 1852)	A

Paramuricea clavata



COLONIE SANE

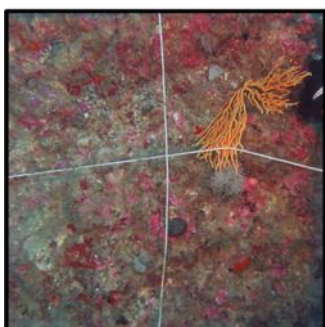


COLONIE PARZIALMENTE MORTE -SBIANCATE



COLONIE TOTALMENTE MORTE-SBIANCATE

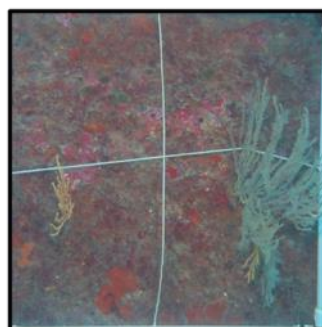
Eunicella cavolini



COLONIE SANE

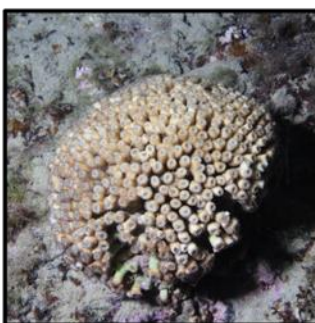


COLONIE PARZIALMENTE MORTE -SBIANCATE



COLONIE TOTALMENTE MORTE-SBIANCATE

Cladocora caespitosa



COLONIE SANE

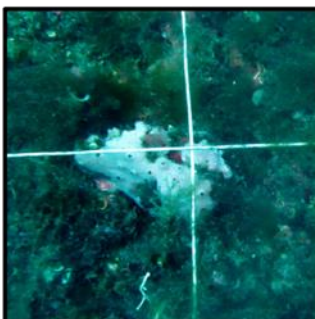


COLONIE PARZIALMENTE MORTE -SBIANCATE

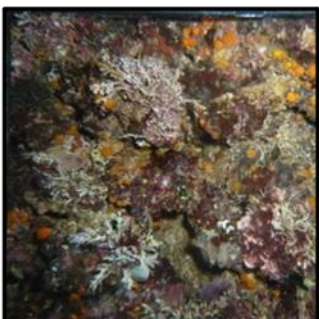


COLONIE TOTALMENTE MORTE-SBIANCATE

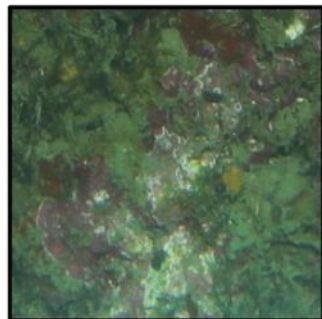
ALTRI ESEMPI DI SBIANCAMENTO



Spugne



Alghe erette articolate



Alghe incrostanti corallinacee

Figura 21. Esempi di specie target utilizzate nell'ambito dei monitoraggi sulle morie di massa. Nelle immagini si osservano diversi gradi di impatto sulle colonie/individui.

ANALISI DEI DATI

Dati di temperatura

Sea Surface Temperature (SST)

In mancanza di una serie storica di dati sulla temperatura della colonna d'acqua e al fine di valutare l'andamento nel tempo della temperatura del mare nelle tre aree di studio, sono stati utilizzati i dati di temperatura superficiale dell'acqua (*Sea Surface Temperature*, SST) disponibili sul sito della NOAA (<https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>).

Di seguito sono riportate le coordinate dei punti di rilevamento per le tre aree di studio che sono stati fissati lontano da costa per evitare di rilevare dati di temperatura terrestre:

- Area Marina Protetta di Portofino: 42,9° N, 7,5° E
- Isola d'Elba: 42,9° N, 9,4° E
- Area Marina Protetta del Plemmirio: 37,1° N, 16,9° E

Attraverso l'utilizzo del programma Microsoft Excel sono state calcolate le temperature medie annue a partire dal 1948, primo anno nel quale si ha disponibilità dei dati, fino al 2020, primo anno del progetto Mare Caldo.

L'andamento della SST nel tempo è stato quindi rappresentato tramite un grafico a linee sul quale è stata anche riportata la curva di tendenza più significativa (da una tendenza lineare fino a una funzione polinomiale di 4° grado) e il suo relativo valore di R^2 al fine di misurare la significatività della tendenza osservata. L'andamento è stato in questo modo analizzato sia per tutto il periodo preso in esame (i.e., 1948-2020) sia dagli anni '80 poiché è proprio in questi anni che in letteratura è stato segnalato il primo repentino aumento di temperatura.

Al fine di valutare la variabilità della temperatura nel tempo è stato calcolato il Coefficiente di Variazione ($CV = \sqrt{\sigma/m}$, dove σ = varianza e m = valore medio) per ogni anno e, anche in questo caso, i dati sono stati rappresentati tramite grafico a linee sul quale è stata riportata la linea di tendenza e il valore di R^2 al fine di valutare la significatività della tendenza lineare.

Colonna d'acqua

Per l'Area Marina Protetta di Portofino i dati sulla colonna d'acqua sono stati scaricati dai *temperature data loggers* una prima volta il 27 luglio 2020 e una seconda volta il 9 ottobre 2020, a coprire il periodo di tempo dal 17 settembre 2019 al 9 ottobre 2020. Per l'area dell'Isola d'Elba i dati sono stati scaricati una prima volta l'1 luglio 2020 e una seconda volta il 13 ottobre 2020, a coprire il periodo di tempo dal 26 novembre 2019 al 13 ottobre 2020. Per l'Area Marina Protetta del Plemmirio, invece, i dati sono stati scaricati a distanza di soli 11 giorni dall'installazione dei *temperature data logger* (i.e., il 22 settembre 2020) per testarne il corretto funzionamento e sono stati riposizionati nuovamente in acqua il 24

settembre 2020. Per tale motivo le analisi dei dati di temperatura sulla colonna d'acqua per quest'ultima area di studio saranno effettuate nel corso del secondo anno di progetto.

Per l'Area Marina Protetta di Portofino e per l'area dell'Isola d'Elba i dati di temperatura sono stati riportati in un foglio di calcolo Excel organizzati in una matrice profondità × tempo. Per le due aree sono stati calcolati i valori medi di temperatura, i valori massimi e i valori minimi annuali, stagionali e mensili. Da questi calcoli sono stati esclusi i mesi per i quali non si avesse disponibilità di dati dal primo all'ultimo giorno del mese (i.e., il primo e l'ultimo mese di rilevamento). Inoltre, sono state calcolate le medie mensili alle 8 diverse profondità che sono state rappresentate tramite grafico a linee per l'analisi dell'andamento nel tempo delle temperature lungo la colonna d'acqua.

I dati scaricati dai *temperature data loggers* sono stati inoltre rappresentati graficamente tramite il software Ocean Data View (ODV), che consente l'analisi e la visualizzazione di dati oceanografici tramite una scala graduata di colore per mezzo della quale viene evidenziato l'andamento delle temperature nel tempo, in relazione alle diverse profondità.

Struttura e stato ecologico della comunità

Al fine di caratterizzare la composizione e la struttura delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio previste dal progetto Mare Caldo, le specie e le relative abbondanze rilevate tramite i transetti bionomici sono state organizzate in matrici (sito × profondità) × specie su fogli di calcolo Excel. Sul numero totale di specie rilevate è stata calcolata la percentuale delle specie per ogni taxon.

Le matrici di dati sono state inoltre importate nel software *open-source* PaSt (Hammer e Harper 2001) per le analisi sulla struttura delle comunità. In particolare si è scelto di utilizzare due indici di diversità: i) l'indice di Shannon, per misurare la diversità delle specie nella comunità e il suo stato ecologico; e ii) l'indice di Simpson, per misurare la dominanza tra le specie.

Cambiamento nel tempo

Per l'analisi del cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio sono stati utilizzati metodi differenti in base alla disponibilità di dati storici in letteratura e di dati storici non ancora pubblicati.

Area Marina Protetta di Portofino

Il cambiamento nel tempo delle comunità bentoniche di scogliera dell'Area Marina Protetta di Portofino è stato recentemente valutato da Gatti et al. (2017). Nell'ambito di questo studio sono state prese in considerazione diverse fonti tra le quali: i) pubblicazioni scientifiche; ii) letteratura grigia; iii) dati di campo raccolti dagli autori; iv) dati recenti raccolti durante le rivisitazioni *ad hoc* dei siti storicamente descritti. Poiché l'esatta localizzazione dei siti d'indagine storica non poteva essere considerata affidabile per un confronto a livello di sito nel tempo, l'area di studio è stata suddivisa in quattro zone, che corrispondono all'attuale zonazione dell'AMP di Portofino: zona A, zona B lato est (BE) e zona B lato ovest (BW), e zona C. Per avere un numero comparabile di transetti bionomici nel tempo, sono stati identificati tre periodi: il periodo 1, dalla fine degli anni '50 agli anni '70; il periodo 2, che comprende gli anni '80 e '90; e il periodo 3, dal 2000 al 2013. Le profondità sono state raggruppate in quattro fasce come inizialmente fatto da Tortonese (1958): a (0-10 m); b (11-20 m); c (21-30 m); d (31-40 m). Sulla base di questo disegno è stata costruita una matrice di dati (zona × intervallo di profondità × tempo) × specie (Gatti et al. 2017). Grazie ai nuovi dati raccolti nell'ambito del progetto Mare Caldo sono stati quindi aggiunti alla matrice elaborata da Gatti et al. (2017) i dati registrati a luglio 2020 lungo i transetti bionomici nelle zone A, BE e BW.

Al fine di valutare come sia cambiata la comunità bentonica dell'Area Marina Protetta di Portofino, è stata eseguita un'analisi multivariata delle corrispondenze (CA) tramite il software *open-source* PaSt (Hammer e Harper 2001). La significatività degli assi estratti è stata valutata attraverso il test di Lebart. Sono stati quindi calcolati graficamente i centroidi dei quattro periodi temporali analizzati e questo ha permesso di delineare la traiettoria temporale (e quindi il cambiamento nel tempo) per le quattro fasce di profondità.

Sempre al fine di valutare come sia cambiata la struttura delle comunità delle scogliere di Portofino, e in particolare la diversità delle specie, è stato calcolato l'Indice di Shannon tramite il software *open-source* PaSt (Hammer e Harper 2001). I dati sono stati riportati in un foglio di calcolo Excel e rappresentati tramite grafico a linee sul quale è stata riportata anche la linea di tendenza. Per valutare la significatività della tendenza è stato calcolato il valore di R^2 . Infine, sono state analizzate le specie che più hanno inciso sul cambiamento nella composizione della comunità. In particolare, sono stati confrontati i dati semi-quantitativi nei quattro periodi di studio alle diverse profondità, attraverso grafici a linee per evidenziare le differenze di abbondanza delle specie nel tempo.

Isola d'Elba

Per l'area dell'Isola d'Elba, i dati storici sono stati ricavati da rilevamenti subacquei svolti negli anni '90, nel 2000 e nel 2010 da Carlo Nike Bianchi e Carla Morri (DiSTAV, Università di Genova). Per avere un numero comparabile di transetti bionomici nel tempo, anche per quest'area di studio sono stati identificati quattro periodi di tempo: il periodo 1, che

corrisponde agli anni '90; il periodo 2, dall'inizio del 2000 fino al 2008; il periodo 3, che comprende gli anni 2009 e 2010; il periodo 4 che corrisponde ai dati raccolti a giugno del 2020 nell'ambito del progetto Mare Caldo. Anche per le profondità si è scelto di adottare il metodo utilizzato per le analisi dell'area di Portofino, e quindi i dati sono stati divisi in quattro fasce batimetriche: 0-10 m; 10-20 m; 20-30 m; 30-40 m. È stata quindi organizzata una matrice di dati (intervallo di profondità × tempo) × specie.

Alla matrice dati è stata applicata l'analisi multivariata *Multi Dimensional Scaling* (MDS) tramite il software *open-source* PaSt (Hammer e Harper 2001). Anche in questo caso sono stati calcolati graficamente i centroidi dei quattro periodi temporali analizzati e ciò ha permesso di delineare la traiettoria temporale per le quattro fasce di profondità.

Al fine di analizzare com'è cambiata la diversità delle specie nella comunità delle scogliere rocciose dell'Isola d'Elba, anche per quest'area di studio si è scelto di calcolare l'Indice di Shannon tramite il software *open-source* PaSt (Hammer e Harper 2001). I dati sono stati riportati in un foglio di calcolo Excel e rappresentati tramite grafico a linee sul quale è stata anche riportata la linea di tendenza. Per valutare la significatività della tendenza lineare è stato calcolato il valore di R^2 . Infine, sono state analizzate le specie che più hanno inciso sul cambiamento nella composizione della comunità, confrontando le loro abbondanze semi-quantitative, nei quattro periodi di studio alle diverse profondità, attraverso grafici a linee per evidenziare le differenze nel tempo.

Area Marina Protetta del Plemmirio

Per l'Area Marina Protetta del Plemmirio non sono disponibili dati storici. I rilevamenti in quest'area di studio rappresentano quindi il 'punto zero' per futuri studi sul cambiamento della comunità bentonica delle scogliere del Plemmirio. In quest'ottica, anche per quest'area i dati sono stati organizzati in una matrice (sito × intervallo di profondità × tempo) × specie.

Mortalità

Per determinare l'impatto delle anomalie termiche sulle specie target previste dal protocollo della rete mediterranea T-MedNET, il numero di organismi o di colonie (o la percentuale di ricoprimento per le alghe corallinacee) che riportavano segni di necrosi, sbiancamento o sofferenza è stato rapportato al numero totale di individui monitorati. L'impatto è stato valutato 'basso' per una percentuale del 10-30%, 'moderato' per una percentuale del 30-60% e 'severo' nel caso in cui il rapporto tra individui impattati e totali fosse maggiore del 60%.

Specie termofile

Per ogni area di studio è stato calcolato il numero di specie termofile presenti e su questo numero è stata calcolata la percentuale delle specie aliene, criptogeniche e native. Inoltre, il numero di specie termofile bentoniche è stato rapportato al numero totale delle specie rilevate in ciascuna area di studio, al fine di valutare il loro contributo nella comunità di scogliera.

Nelle aree per le quali si avesse disponibilità di dati storici (i.e., AMP Portofino e Isola d'Elba) i dati semi-quantitativi raccolti nell'ambito dei monitoraggi del progetto Mare Caldo sono stati confrontati con i dati storici per valutare l'eventuale aumento o diminuzione delle specie termofile nel tempo in relazione al gradiente batimetrico (i.e., a 10, 20, 30 e 40 m di profondità). I valori nei quattro periodi analizzati sono stati rappresentati con grafici a linee tramite foglio di calcolo Excel.

RISULTATI E DISCUSSIONI

TEMPERATURE

L'analisi dei dati di *Sea Surface Temperature* (SST) e di temperatura della colonna d'acqua mostrano un atteso gradiente latitudinale Nord-Sud con le più basse temperature registrate nell'Area Marina Protetta di Portofino (42° lat. N), seguite dalle temperature registrate all'Isola d'Elba (43° lat. N) e dalle più alte temperature registrate nell'Area Marina Protetta del Plemmirio (37° lat. N).

I dati storici resi disponibili dalla NOAA sulla temperatura superficiale dell'acqua hanno permesso di evidenziare un generale trend di aumento nel tempo in tutte le aree di studio, mentre i dati registrati dai *temperature data logger* sulla colonna d'acqua hanno permesso di ottenere un'analisi preliminare sull'andamento delle temperature alle diverse profondità nel corso del primo anno di progetto Mare Caldo.

SEA SURFACE TEMPERATURE (SST)

Per tutte le aree di studio l'analisi dei dati di *Sea Surface Temperature* (SST) mostra un generale trend in aumento dal 1948 al 2020, sia per i valori di temperatura media annua sia per i valori di variabilità annuale.

I valori medi annui risultano differenti tra le diverse aree di studio su base latitudinale: nell'Area Marina Protetta di Portofino la temperatura media negli ultimi 70 anni risulta essere di ~16-16,5°C, all'Isola d'Elba di ~16,5-17°C e nell'Area Marina Protetta del Plemmirio di ~19-20°C. Tuttavia, le linee di tendenza delle tre regressioni lineari mostrano lo stesso coefficiente angolare ($m = 0,01$) evidenziando come l'aumento di temperatura sia analogo per tutte le tre aree di studio. In particolare, la variazione media annua per l'Area Marina Protetta di Portofino è risultata di 0,043°C con un aumento totale dal 1980 di 1,7°C. Per l'area dell'Isola d'Elba la variazione media annua è risultata di 0,045°C con un aumento totale dal 1980 di 1,8°C. Infine, per l'Area Marina Protetta del Plemmirio la variazione media annua è risultata di 0,027°C con un aumento totale dal 1980 di 1,1°C.

Per l'area di Portofino il 2020 è stato tra gli anni più caldi degli ultimi 40 anni con una media annuale di 17°C, temperatura registrata anche in precedenza nel 2014 e 2019, e superata solo negli anni 2003 e 2014 (i.e., 17,2°C) e 2018 (i.e., 17,4°C).

Per l'area dell'Isola d'Elba invece gli anni più caldi a partire dal 1980 sono stati: il 2018 con 18,2°C, il 2015 con 18°C, il 2003 con 17,9°C e il 2014 e 2019 con 17,8°C.

Infine per l'area del Plemmirio le temperature medie annuali più alte dal 1980 ad oggi sono state registrate nel 2012 con 20,9°C, seguito dal 2003 e 2015 con 20,8°C e dal 2018 con 20,6°C.

Area Marina Protetta di Portofino

Per l'Area Marina Protetta di Portofino l'analisi dei dati di *Sea Surface Temperature* (SST) mostra un generale trend in aumento (Fig. 22), nonostante la diminuzione della temperatura media verificatasi dalla metà degli anni '70 fino alla metà degli anni '80 aumenti la variabilità e riduca, quindi, la significatività relativa alla linea di tendenza ($r = 0,4$). Considerando però l'andamento della temperatura media annua dagli anni '80, il trend mostra un aumento significativo ($r = 0,8$) e si osserva una duplice fase di riscaldamento: un primo aumento repentino intorno agli anni '80-'90, seguito da una fase di stabilità dagli anni '90 fino ai primi anni del 2000, e un secondo aumento repentino dal 2010 ad oggi (Fig. 23). I valori del coefficiente di variazione mostrano invece un aumento significativo ($r = 0,6$), negli ultimi 70 anni evidenziando un aumento della variabilità della temperatura media annua (Fig. 24).

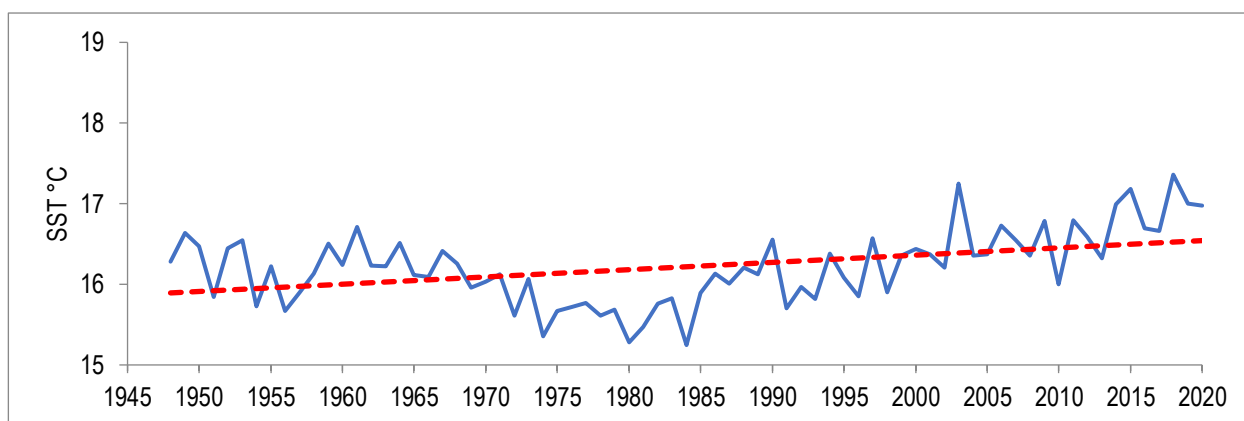


Figura 22. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1948 al 2020 nell'area di Portofino. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y=0,009x-1,6634$; $R^2 = 0,1744$).

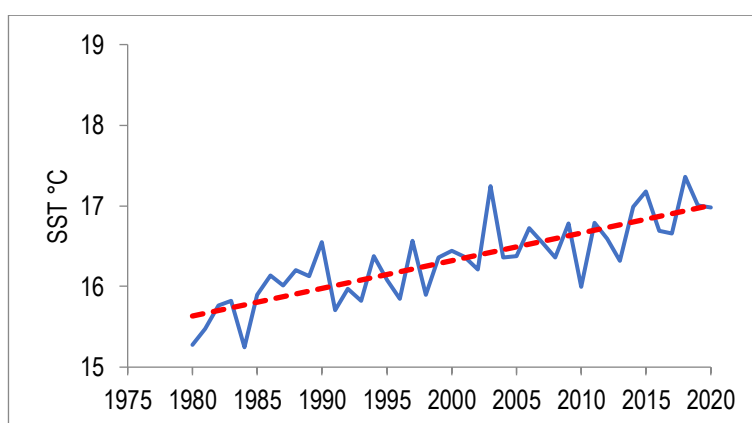


Figura 23. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area di Portofino. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la curva che descrive la tendenza dei dati ($y = 0,0343x-52,282$; $R^2 = 0,653$).

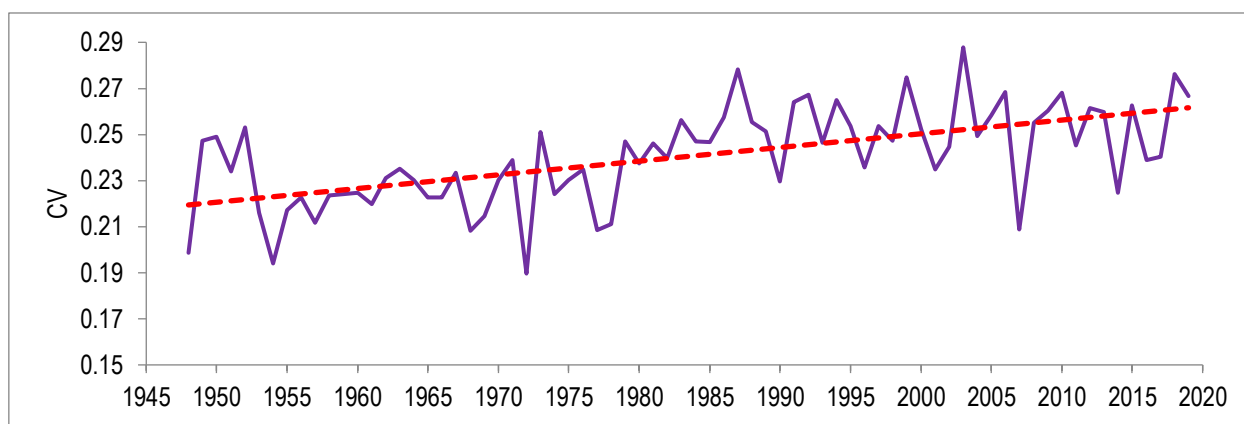


Figura 24. Trend della variabilità media annua (CV = coefficiente di variazione) della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area di Portofino. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y=0,0006x-0,9382$; $R^2 = 0,3536$).

Isola d'Elba

Per l'area dell'Isola d'Elba l'analisi dei dati di *Sea Surface Temperature* (SST) mostra un andamento simile a quella dell'Area Marina Protetta di Portofino. Anche in quest'area si osserva, infatti, un generale trend in aumento (Fig. 25) nonostante la diminuzione della temperatura media verificatasi dalla metà degli anni '70 fino alla metà degli anni '80 riduca la significatività relativa alla linea di tendenza ($r = 0,5$). Anche per quest'area si osserva una duplice fase di riscaldamento caratterizzata da due fasi di aumento repentino della temperatura, negli anni '80-'90 e poi dal 2010 ad oggi, intervallate da una fase di stabilità (Fig. 26). Tuttavia, considerando l'andamento della temperatura media annua dagli anni '80, il trend è significativo ($r = 0,8$) (Fig.26). Infine, i valori del coefficiente di variazione della temperatura media mostrano un trend di aumento significativo ($r = 0,6$) (Fig. 27).

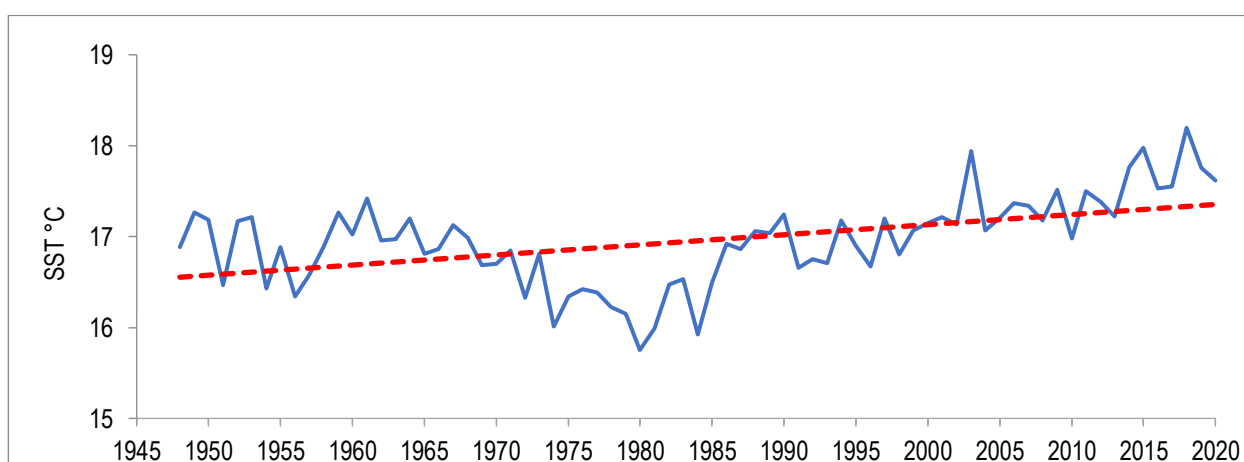


Figura 25. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1948 al 2020 nell'area dell'Isola d'Elba. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y=0,0111x-501011$; $R^2 = 0,2301$).

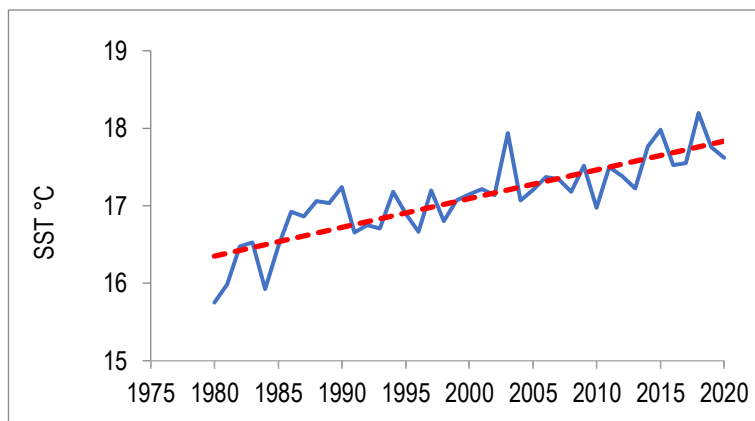


Figura 26. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area dell'Isola d'Elba. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la curva polinomiale che descrive la tendenza dei dati ($y = 0,0371x - 57,104$; $R^2 = 0,7019$).

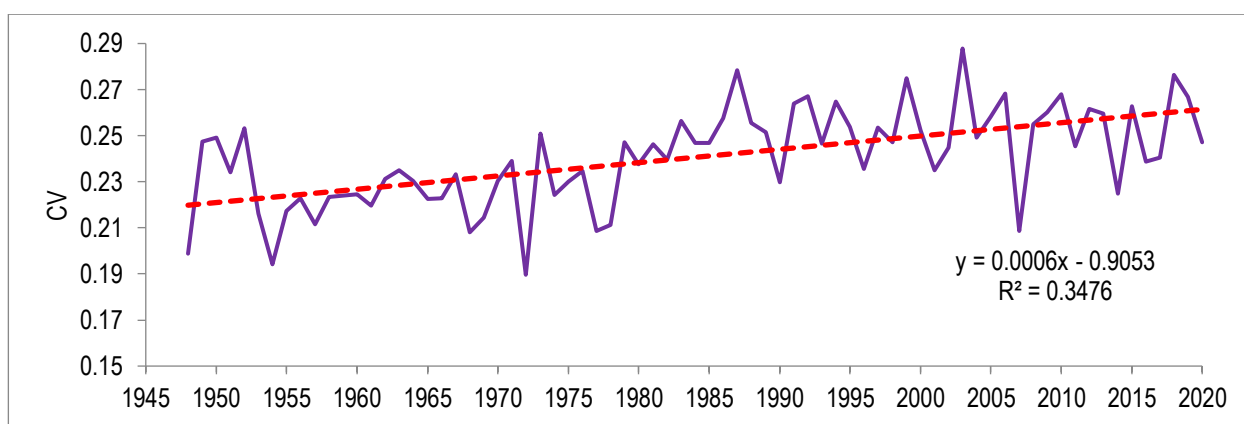


Figura 27. Trend della variabilità media annua (CV = coefficiente di variazione) della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area dell'Isola d'Elba. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y = 0,0006x - 0,9053$; $R^2 = 0,3476$).

Area Marina Protetta del Plemmirio

Anche per l'Area Marina Protetta del Plemmirio l'analisi dei dati di *Sea Surface Temperature* (SST) mostra un generale trend in aumento (Fig. 28). La diminuzione della temperatura media nell'intervallo temporale preso in esame si è qui verificata all'inizio degli anni '70 fino all'inizio degli anni '80, con cinque anni in anticipo rispetto alle altre due aree di studio. Tuttavia, per l'area del Plemmirio il trend di aumento delle temperature nel tempo è significativo sia considerando tutto l'arco di tempo preso in esame ($r = 0,6$), sia considerando l'andamento della temperatura media annua dagli anni '80 ($r = 0,7$) (Fig. 29).

Nell'area del Plemmirio, a differenza delle altre aree di studio, il coefficiente di variazione non mostra un aumento significativo ($r = 0,3$) e la variazione di temperatura da un anno all'altro appare elevata per tutto il periodo preso in esame (Fig. 30).

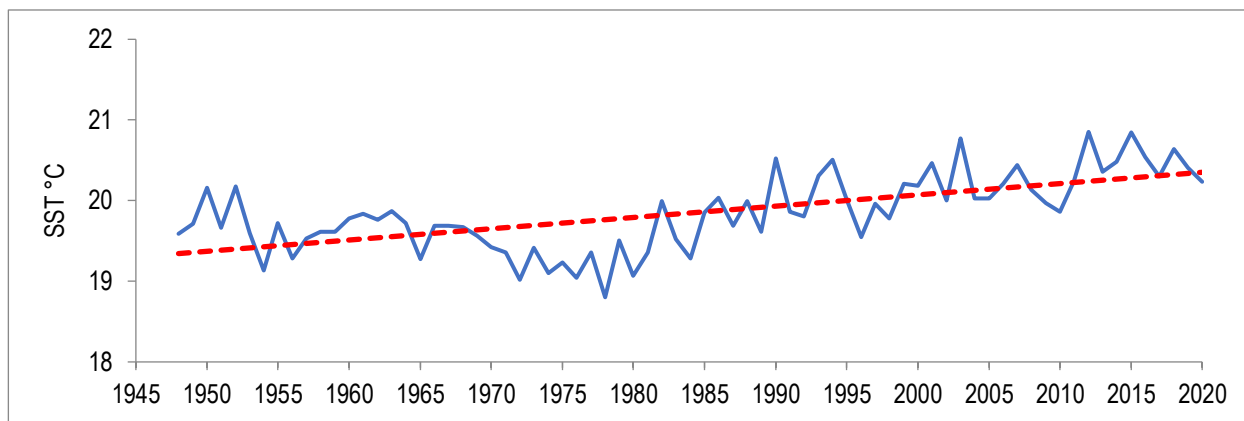


Figura 28. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1948 al 2020 nell'area del Plemmirio. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y=0,0141x-7,9199$; $R^2 = 0,4045$).

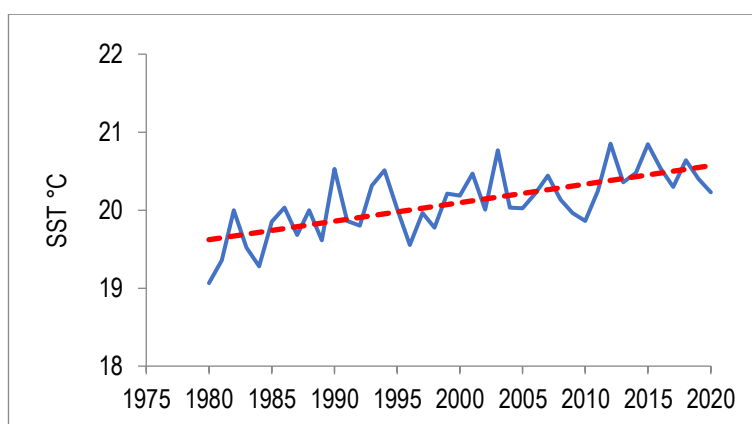


Figura 29. Trend dei valori medi annui della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area del Plemmirio. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la curva polinomiale che descrive la tendenza dei dati ($y=0,0237x-27,397$; $R^2 = 0,4045$).

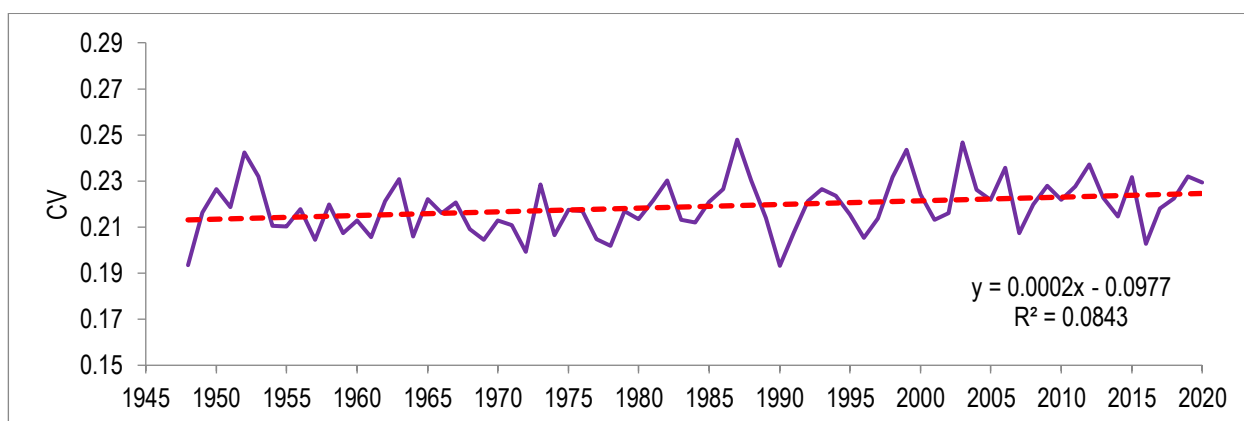


Figura 30. Trend della variabilità media annua (CV = coefficiente di variazione) della temperatura della superficie del mare (SST, *Sea Surface Temperature*, da dati satellitari della NOAA) dal 1980 al 2020 nell'area del Plemmirio. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y=0,0002x-0,0977$; $R^2 = 0,0843$).

COLONNA D'ACQUA

Nel corso del primo anno del progetto Mare Caldo sono stati raccolti un totale di 74.122 dati di temperatura sulla colonna d'acqua per l'Area Marina Protetta di Portofino e 57.514 dati di temperatura per l'area dell'Isola d'Elba. Nella prima area di studio, in particolare, sono stati raccolti 9.316 dati a ogni profondità indagata, eccetto a 35 m dove sono stati raccolti 8.912 dati. A questa profondità il sensore si è infatti staccato dal supporto, è stato recuperato il 24 luglio 2020 e riposizionato l'8 agosto 2020. Nell'area dell'Isola d'Elba, invece, sono stati raccolti 7.730 dati alle profondità di 5 e 10 m, 7.922 dati alle profondità di 15, 20, 25, 30 m e 7.898 dati alla profondità di 35 m. Alla profondità di 40 m, sono stati raccolti solo 2.468 dati a causa dell'allagamento del sensore, per cui mancano i dati dal 26 novembre 2019 al 1 luglio 2020.

L'analisi dei dati ha permesso di monitorare l'andamento della temperatura nel corso del primo anno di progetto, durante il quale, in entrambe le aree di studio, sono state registrate due ondate di calore: una più intensa a giugno e una più moderata ad agosto. A Portofino si è verificato un riscaldamento della colonna d'acqua meno profondo, in linea con la situazione termica del Mar Ligure, mentre all'Elba, che si trova a una maggiore latitudine, il riscaldamento ha interessato la colonna d'acqua fino alle maggiori profondità e si è mantenuto più costante nel tempo.

Area Marina Protetta di Portofino

Nell'Area Marina Protetta di Portofino la temperatura media per la stagione autunnale è stata di 20°C con massime di 24°C e minime di 15°C. Per la stagione invernale la temperatura media è risultata di 15°C con massime di 17°C e minime di 13°C. In primavera la temperatura media registrata è di 17°C con massime di 22°C e minime di 14°C. Infine, nella stagione estiva sono state registrate temperature medie di 20°C con massime che hanno raggiunto i 28°C a 5 m e i 21°C a 40 m e minime di 15°C (Tab. 3).

I dati forniti dai *temperature data logger* hanno permesso di monitorare l'andamento della temperatura da ottobre 2019 a settembre 2020. Le temperature medie a ottobre sono di ~21°C su tutta la colonna d'acqua. Da novembre le temperature sono diminuite a tutte le profondità fino a raggiungere i 14°C a marzo. Nel corso di questo periodo le acque più superficiali (i.e., 5, 10, 20 m) sono risultate più fredde di quelle profonde (i.e., 25, 30, 35, 40 m). Da marzo si è verificata un'inversione di tendenza con acque superficiali più calde e acque profonde più fredde. A giugno è stata registrata la prima ondata di calore: a tutte le profondità, la temperatura è aumentata di ~1°C, con picchi che raggiungono i 20-21°C fino a 20 m di profondità. A luglio le acque dai 20 m di profondità verso il fondo si sono poi raffreddate, a 15 m il valore di temperatura è rimasto stabile, mentre le acque più superficiali hanno continuato a scaldarsi con l'inizio della stagione estiva. Ad agosto è stata registrata una seconda, più moderata, ondata di calore che ha interessato nuovamente la colonna

d'acqua a tutte le profondità indagate, con un nuovo picco di 20°C a 20 m di profondità. Infine, a settembre le temperature delle masse d'acqua più superficiali (i.e., 5, 10 m) hanno iniziato a decrescere mentre quelle più profonde (i.e., 20, 25, 30, 35, 40 m) a crescere (Fig. 31, 32).

Tabella 3. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) nell'Area Marina Protetta di Portofino per il periodo di studio da ottobre 2019 a settembre 2020. In tabella sono inoltre riportati i valori di errore standard (err.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE ANNUALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
5	19,14	0,05	27,70	12,97
10	18,78	0,04	27,33	13,04
15	18,39	0,04	26,62	13,21
20	17,93	0,03	26,40	13,47
25	17,44	0,03	26,18	13,52
30	16,92	0,02	26,18	13,62
35	16,63	0,02	26,30	13,64
40	16,25	0,02	25,43	13,76
TEMPERATURE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
Autunno (22 sett - 20 dic)	19,57	0,02	24,17	15,37
Inverno (21 dic - 19 mar)	14,67	0,01	16,58	12,97
Primavera (20 mar - 19 giu)	16,52	0,02	22,23	13,88
Estate (20 giu - 21 sett)	19,80	0,03	27,70	14,70
TEMPERATURE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
ott-19	21,40	0,01	23,50	16,80
nov-19	18,82	0,01	20,72	16,51
dic-19	16,57	0,01	18,06	13,28
gen-20	15,11	0,01	16,13	13,55
feb-20	14,29	0,00	14,84	13,28
mar-20	13,96	0,00	14,96	12,97
apr-20	14,80	0,01	16,58	13,93
mag-20	17,32	0,02	21,84	14,48
giu-20	19,45	0,03	27,33	14,70
lug-20	19,58	0,04	26,99	15,10
ago-20	20,26	0,05	27,70	14,79
set-20	20,83	0,05	25,89	15,01

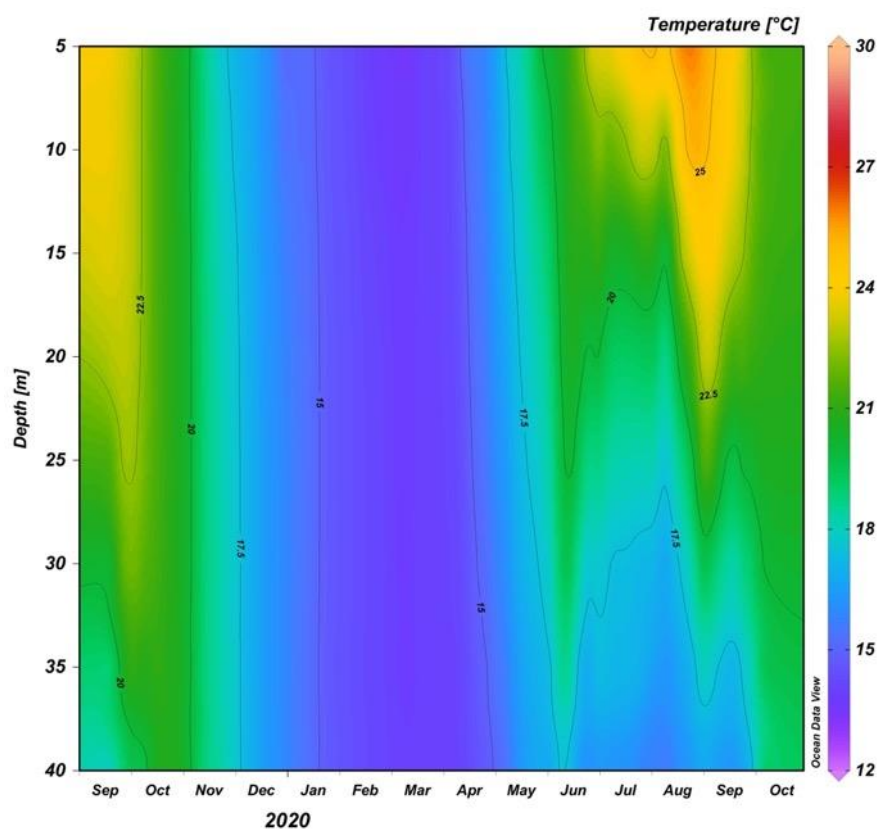


Figura 31. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo da ottobre 2019 a settembre 2020 nell'Area Marina Protetta di Portofino. Il particolare andamento che si osserva a luglio 2020 a 35 m dipende dalla mancanza di 17 giorni di dati.

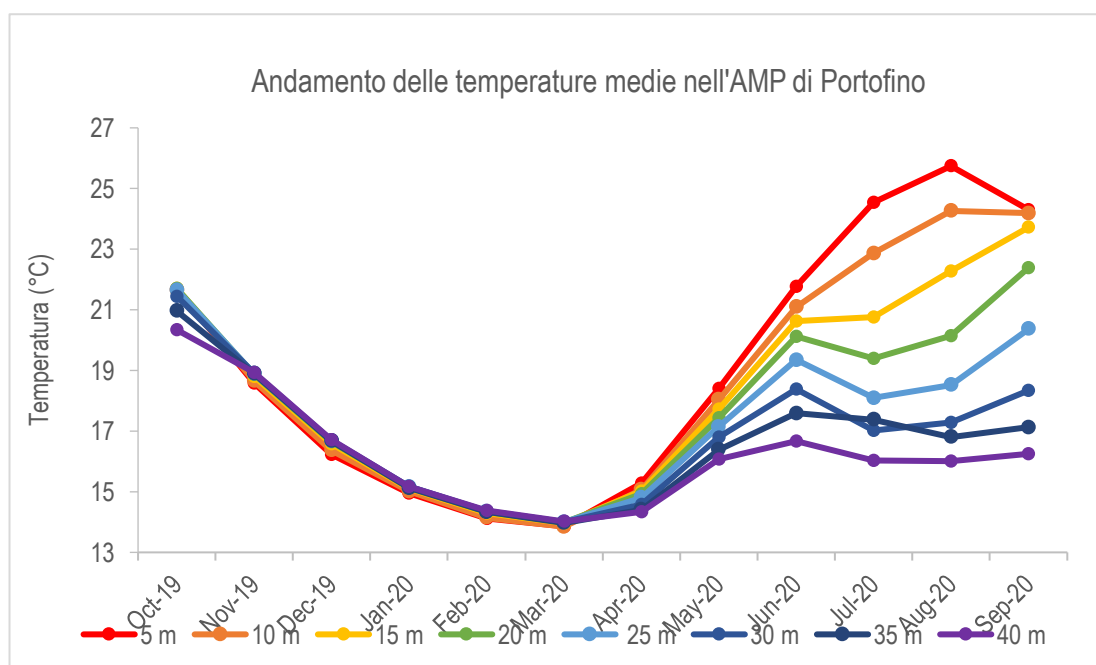


Figura 32. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'Area Marina Protetta di Portofino per il periodo di tempo dal 17 settembre 2019 al 9 ottobre 2020.

Isola d'Elba

Dall'analisi dei dati di temperatura sulla colonna d'acqua nell'area dell'Isola d'Elba è emerso come la temperatura media registrata per la stagione invernale sia stata di 15°C con temperature massime di 17°C e minime di 14°C. Per la stagione primaverile la temperatura media è di 17°C, con temperature massime di 22°C e minime di 14°C. Per l'estate la temperatura media registrata è di 22°C con temperature massime di 28°C a 5 m e di 22°C a 40 m e minime di 15°C. Per la stagione autunnale non sono disponibili dati completi (Tab. 4).

Per l'area dell'Isola d'Elba l'analisi dei dati forniti dai *temperature data logger* ha permesso di monitorare l'andamento della temperatura sulla colonna d'acqua da dicembre 2019 a settembre 2020. Le temperature medie a dicembre sono di 17°C su tutta la colonna d'acqua. A gennaio le temperature hanno iniziato a diminuire, fino ad arrivare a 14°C a marzo. Da questo mese hanno iniziato a scaldarsi prima le acque superficiali e poi quelle profonde. A giugno si osserva la prima più intensa ondata di calore che ha registrato picchi di 20-21°C fino a 25 m di profondità. A luglio alle maggiori profondità (i.e., 25, 30, 35 m) la temperatura è diminuita, mentre alla profondità di 20 m fino alla superficie sono state registrate temperature maggiori rispetto al mese di giugno. Ad agosto è stata registrata la seconda ondata di calore, più intensa rispetto all'area di Portofino, con un picco di temperatura che a 25 m ha raggiunto i 21°C. A settembre, infine, le acque più superficiali (i.e. 5, 10, 15, 20 m) hanno iniziato a raffreddarsi prima delle acque profonde che sono invece rimaste stabili (Fig. 33, 34).

Tabella 4. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'area dell'Isola d'Elba per il periodo di studio da dicembre 2019 a settembre 2020. In tabella sono inoltre riportati i valori di errore standard (err.st) riferiti ai valori medi. * = i valori a 40 m si riferiscono esclusivamente al periodo compreso tra il 2 luglio 2020 e il 13 ottobre 2020.

TEMPERATURE ANNUALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
5	19,19	0,05	27,28	13,79
10	18,96	0,05	27,25	13,72
15	18,70	0,04	27,21	13,77
20	18,25	0,04	27,29	13,76
25	17,61	0,03	26,30	13,82
30	16,98	0,03	25,00	13,72
35	16,47	0,02	23,82	13,80
40	*16,93	0,03	*21,74	*15,03

TEMPERATURE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
inverno (21 dic - 19 mar)	14,96	0,01	16,81	13,91
primavera (20 mar - 19 giu)	16,69	0,02	22,09	13,73
estate (20 giu - 21 sett)	21,72	0,03	28,28	15,30

TEMPERATURE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	err.st	Max (°C)	Min (°C)
dic-19	16,95	0,01	18,23	15,85
gen-20	15,39	0,00	16,09	14,76
feb-20	14,54	0,00	15,16	14,12
mar-20	14,20	0,00	14,87	13,72
apr-20	14,80	0,01	17,05	13,75
mag-20	17,43	0,02	21,17	14,66
giu-20	20,09	0,02	25,11	15,24
lug-20	20,86	0,02	28,28	15,30
ago-20	22,49	0,03	27,28	15,70
set-20	22,07	0,03	25,83	14,99

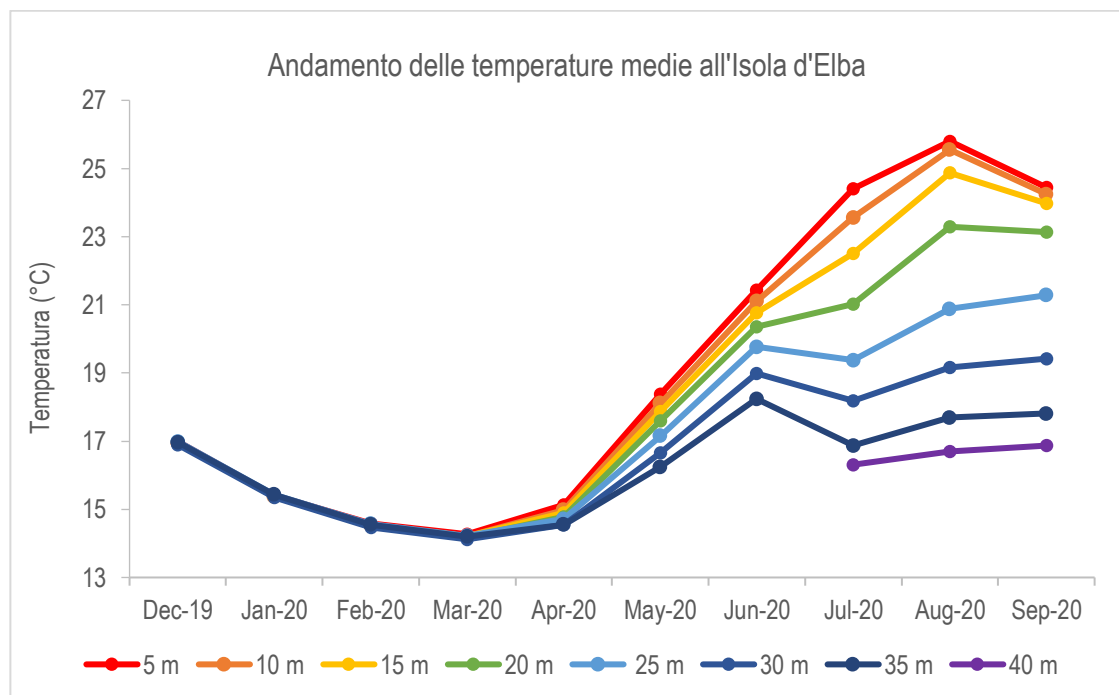


Figura 33. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo da dicembre 2019 a settembre 2020 nell'area dell'Isola d'Elba. A 40 m i dati sono disponibili a partire da luglio 2020.

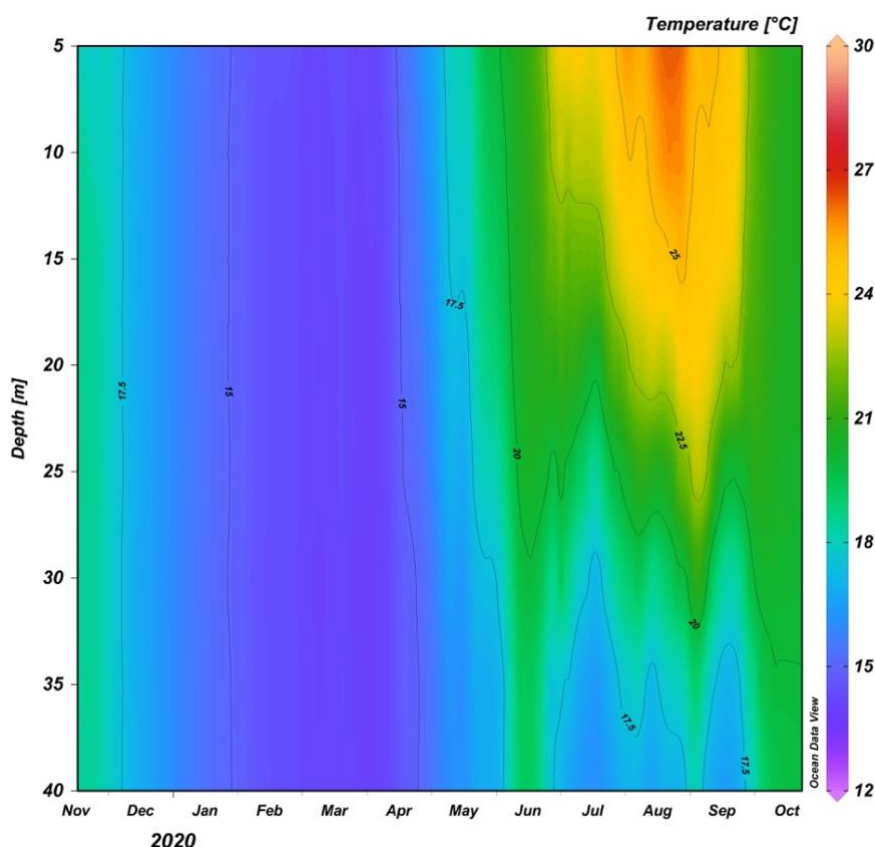


Figura 34. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'area dell'Isola d'Elba per il periodo dal 26 novembre 2019 al 13 ottobre 2020.

STUTTURA E SATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ

L'analisi della struttura e della composizione delle comunità bentoniche dell'Area Marina Protetta di Portofino, dell'area dell'Isola d'Elba e dell'Isola di Pianosa, e dell'Area Marina Protetta del Plemmirio ha permesso una prima caratterizzazione degli ecosistemi di scogliera nelle aree di studio previste dal progetto Mare Caldo. Attraverso l'applicazione dei due indici di diversità, l'Indice di Shannon e l'Indice di Simpson, è stato inoltre possibile valutare lo stato ecologico degli habitat di scogliera, che è risultato in generale tra moderato e buono in tutte le aree di studio.

Area Marina Protetta di Portofino

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a luglio 2020, per l'Area Marina Protetta di Portofino sono state rilevate un totale di 38 specie bentoniche sessili tra le quali 18 specie vegetali e 20 specie animali. Di queste ultime il 40% (N=8) è rappresentato da cnidari, il 35% (N=7) da poriferi, il 20% (N=4) da briozoi e il 5% (N=1) da cordati (Fig. 35).

I valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H'), risultano compresi tra 2 e 3 a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=2,59$; 20 m: $H'=2,17$; 30 m: $H'=2,21$; 40 m: $H'=2,55$), evidenziando uno stato ecologico moderato delle comunità di scogliera dell'Area Marina Protetta di Portofino (Fig. 36).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano alti a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $D'=0,91$; 20 m: $D'=0,88$; 30 m: $D'=0,88$; 40 m: $D'=0,9184$) a indicare quindi una comunità molto dominata da poche specie e, di conseguenza, un basso livello di equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'Area Marina Protetta di Portofino (Fig. 37).

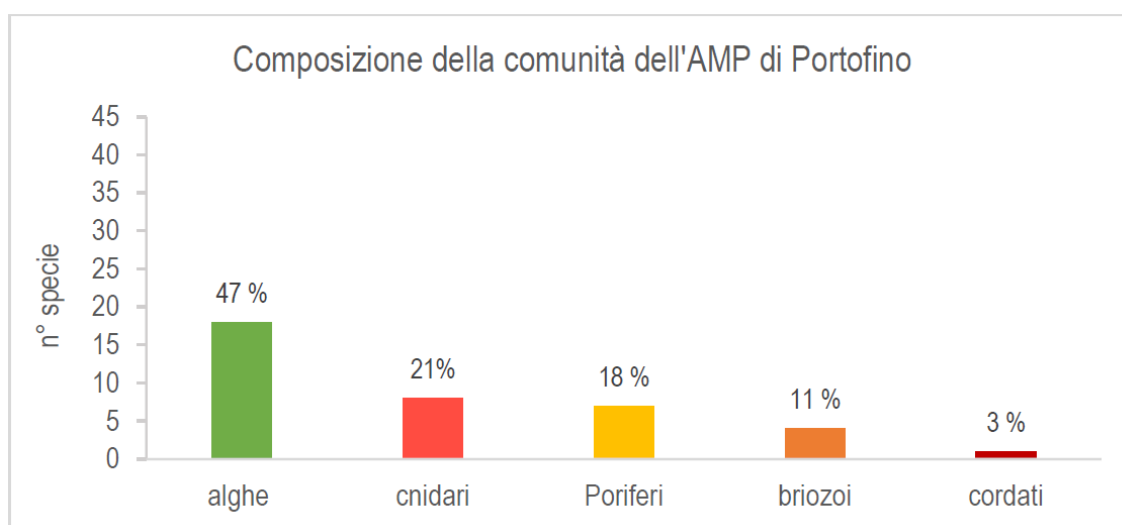


Figura 35. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP di Portofino. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

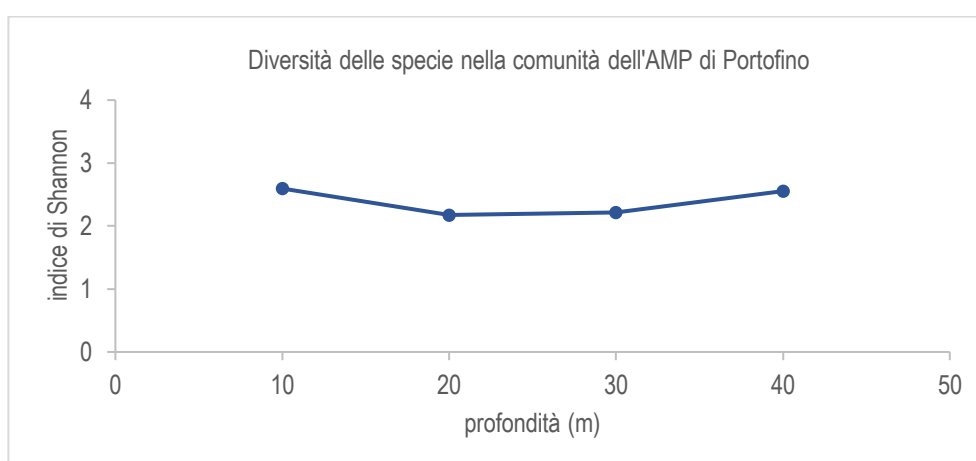


Figura 36. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'AMP di Portofino.

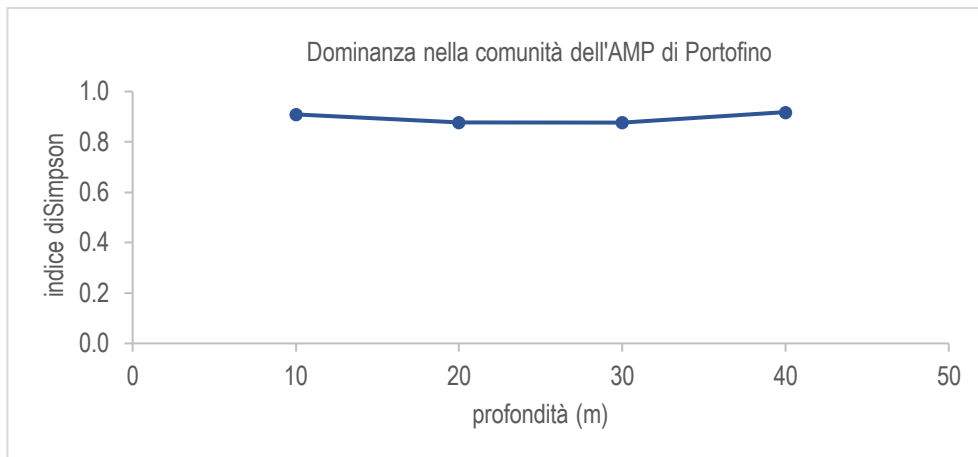


Figura 37. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'AMP di Portofino.

Isola d'Elba e Isola di Pianosa

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a giugno 2020, per l'area dell'Isola d'Elba sono state rilevate un totale di 70 specie bentoniche sessili tra le quali 28 specie vegetali e 42 specie animali. Di queste ultime il 38% (N=16) è rappresentato da poriferi, il 29% (N=12) da cnidari, il 19% (N=8) da briozoi, il 7% (N=3) da anellidi, il 5% (N=2) da artropodi e il 2% (N=1) da cordati (Fig. 38).

I valori della diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di diversità di Shannon (H'), risultano compresi tra 3 e 4 a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=3,32$; 20 m: $H'=3,03$; 30 m: $H'=3,64$; 40 m: $H'=3,69$), e evidenziano un buono stato ecologico delle comunità di scogliera dell'area dell'Isola d'Elba (Fig. 39).

Anche per quest'area, i valori della dominanza, calcolati attraverso l'indice di Simpson (D'), sono alti a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $D'=0,96$; 20 m: $D'=0,95$; 30 m: $D'=0,97$; 40 m: $D'=0,97$) a indicare quindi una comunità molto dominata da poche specie e, di conseguenza, con un basso livello di equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'Isola d'Elba (Fig. 40).

Per quanto riguarda l'Isola di Pianosa, invece, nell'ambito dei rilevamenti speditivi effettuati sono state rilevate un totale di 39 specie bentoniche sessili tra le quali 23 specie vegetali e 16 specie animali. Di queste ultime il 56% (N=9) è rappresentato da poriferi, il 31% (N=5) da cnidari e il 13% (N=2) da anellidi (Fig. 41).

Per quest'area, i valori di diversità delle specie, calcolati attraverso l'indice di diversità di Shannon (H'), sono bassi a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=0,86$; 20 m: $H'=1,63$; 30 m: $H'=1,93$; 40 m: $H'=1,41$). Ciò indicherebbe una bassa qualità ecologica delle comunità di scogliera dell'Isola di Pianosa (Fig. 42); tuttavia va tenuto conto che per quest'area di studio non sono stati effettuati transetti bionomici bensì rilevamenti speditivi per il rilevamento delle sole specie cospicue caratterizzanti l'habitat di scogliera.

I valori ottenuti dall'applicazione dell'indice di Simpson (i.e., 10 m: $D'=0,47$; 20 m: $D'=0,75$; 30 m: $D'=0,80$; 40 m: $D'=0,74$) indicano una minore dominanza da parte di poche specie e, di conseguenza, una maggiore equitabilità tra le specie della comunità rispetto a tutte le altre aree di studio (Fig. 43).

L'analisi multivariata (nMDS) sui dati semi-quantitativi di abbondanza delle specie sessili bentoniche delle due comunità mostra che i dati sono ordinati lungo due gradienti: uno batimetrico lungo il primo asse (orizzontale) e uno spaziale lungo il secondo asse (verticale). Il confronto dei valori del secondo asse dell'Isola d'Elba e dei valori del secondo asse dell'isola di Pianosa mostrano differenze significative (Fig. 44) evidenziando una differente struttura della comunità tra le due aree prese in esame. Il coefficiente di variazione dell'Isola d'Elba ($CV = -65,33$), calcolato sui valori del secondo asse del nMDS, risulta significativamente minore ($p = 0,007$) rispetto al valore del coefficiente di variazione dell'Isola di Pianosa ($CV = 41,98$), indicando una minore eterogeneità, e quindi biodiversità, dell'habitat.

Questa differenza è prevalentemente riconducibile al piano infralitorale dove i fondali dell'Isola di Pianosa sono caratterizzati da ricchi popolamenti algali, dominati dalle alghe strutturanti del genere *Sargassum* e *Cystoseira*, capaci di creare vere e proprie foreste che strutturano l'ambiente rendendolo eterogeneo, ricco in biodiversità e tridimensionalità. Questi popolamenti sono invece totalmente assenti (a eccezione di qualche specie del genere *Cystoseira* sulla frangia, con coperture del fondo sempre molto modeste) nel piano infralitorale di tutti le stazioni all'Isola d'Elba, dove l'ambiente appare più omogeneo, povero in specie e dominato da poche specie non strutturanti che non conferiscono quindi tridimensionalità e eterogeneità all'ecosistema. Non va però trascurato il fatto che le differenze significative osservate tra la comunità di scogliera dell'Isola d'Elba e quelle dell'Isola di Pianosa potrebbero tuttavia dipendere anche dagli aspetti mineralogici e geomorfologici differenti tra le due aree.

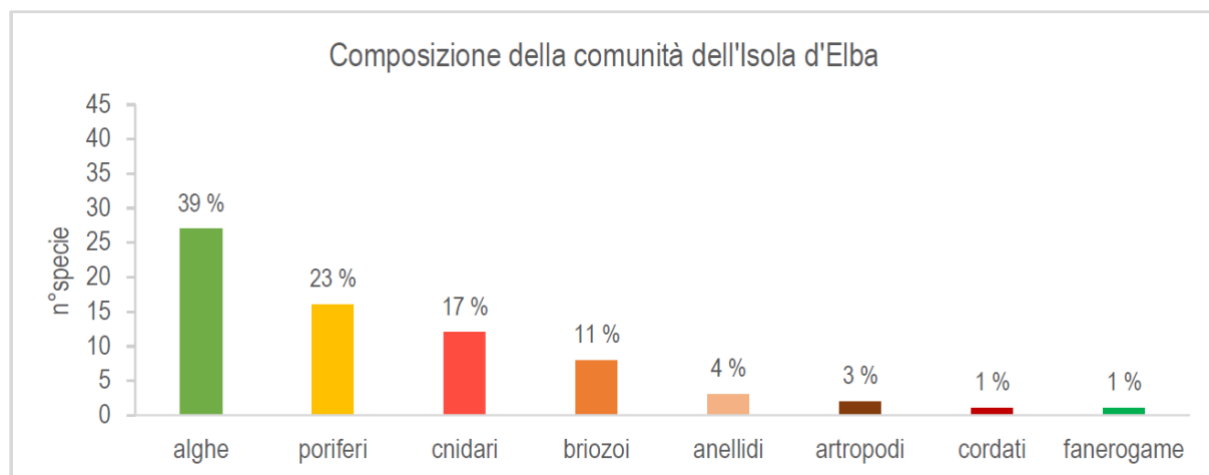


Figura 38. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'Isola d'Elba. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

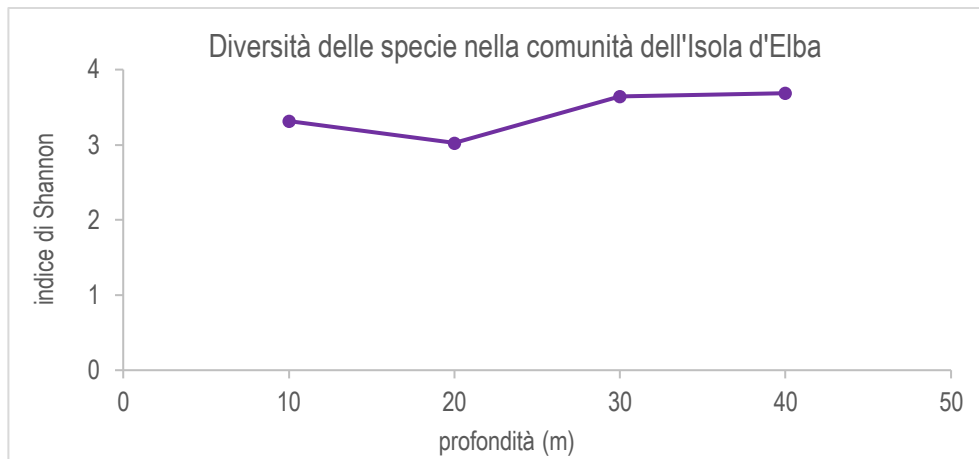


Figura 39. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'area dell'Isola d'Elba.

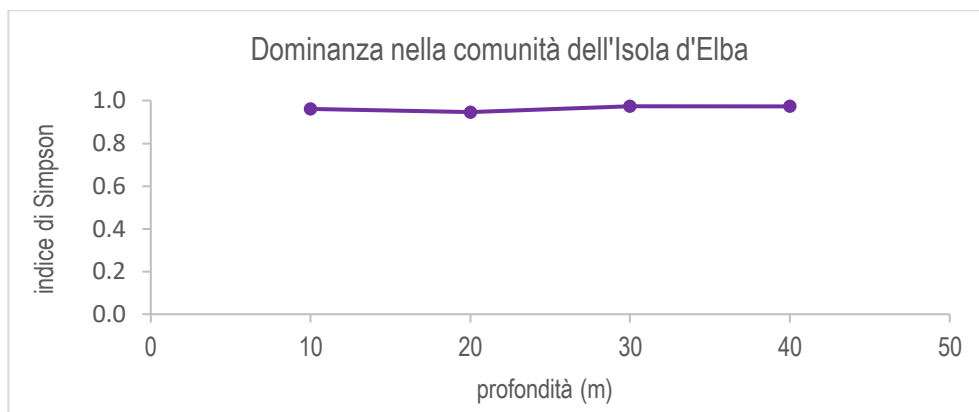


Figura 40. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'area dell'Isola d'Elba.

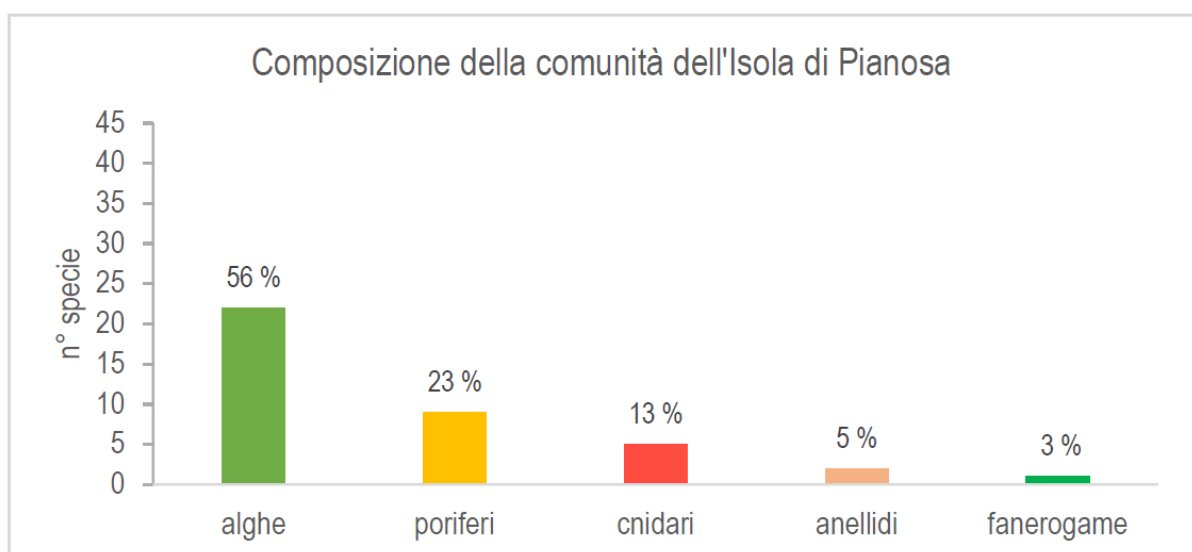


Figura 41. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'Isola di Pianosa. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

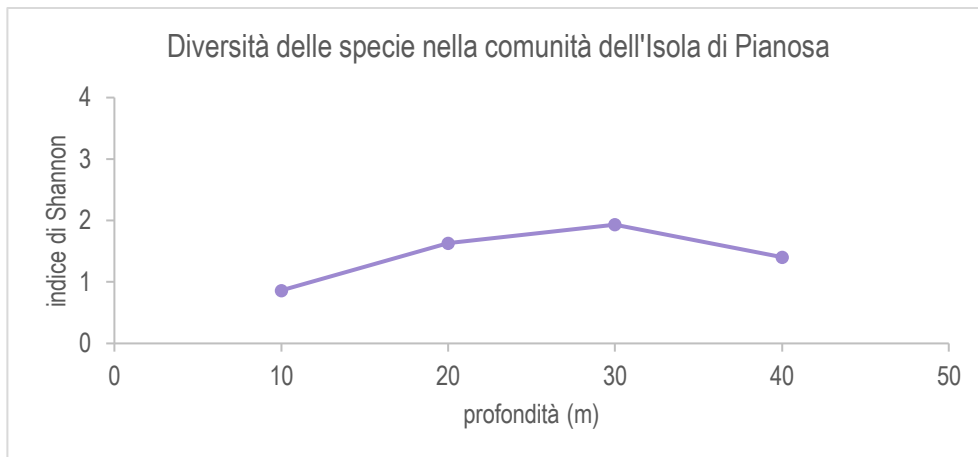


Figura 42. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'area dell'Isola di Pianosa.

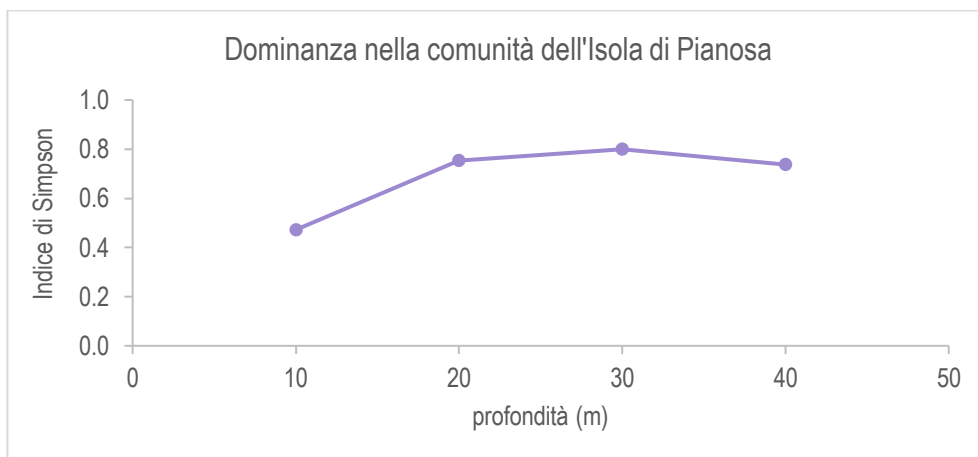


Figura 43. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'area dell'Isola di Pianosa.

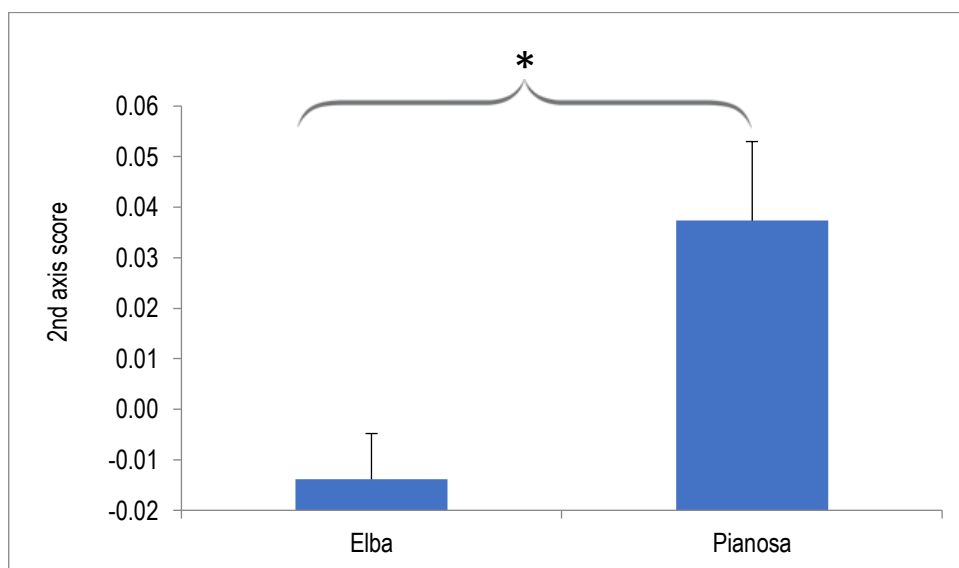


Figura 44. Media (+ es) dei valori del secondo asse del nMDS per l'Isola d'Elba e l'Isola di Pianosa.

Area Marina Protetta del Plemmirio

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a settembre 2020, per l'Area Marina Protetta del Plemmirio è stato rilevato un totale di 71 specie bentoniche sessili tra le quali 40 specie vegetali e 31 specie animali. Di queste ultime il 52% (N=16) è rappresentato da poriferi, il 19% (N=6) da cnidari, il 16% (N=5) da briozoi, il 6% (N=2) da anellidi, il 3% (N=1) da artropodi e il 3% (N=1) da cordati (Fig.45).

I valori di diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di diversità di Shannon (H'), risultano prossimi al 3 a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=2,97$; 20 m: $H'=3,02$; 30 m: $H'=2,81$; 40 m: $H'=2,89$) evidenziando un buono stato ecologico della comunità di scogliera dell'Area Marina del Plemmirio (Fig. 46).

Anche per quest'area, i valori della dominanza calcolati attraverso l'indice di Simpson (D'), sono alti a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $D'=0,95$; 20 m: $D'=0,95$; 30 m: $D'=0,93$; 40 m: $D'=0,94$) evidenziando un'alta dominanza sulla comunità da parte di poche specie e quindi un basso livello di equitabilità (Fig. 47).

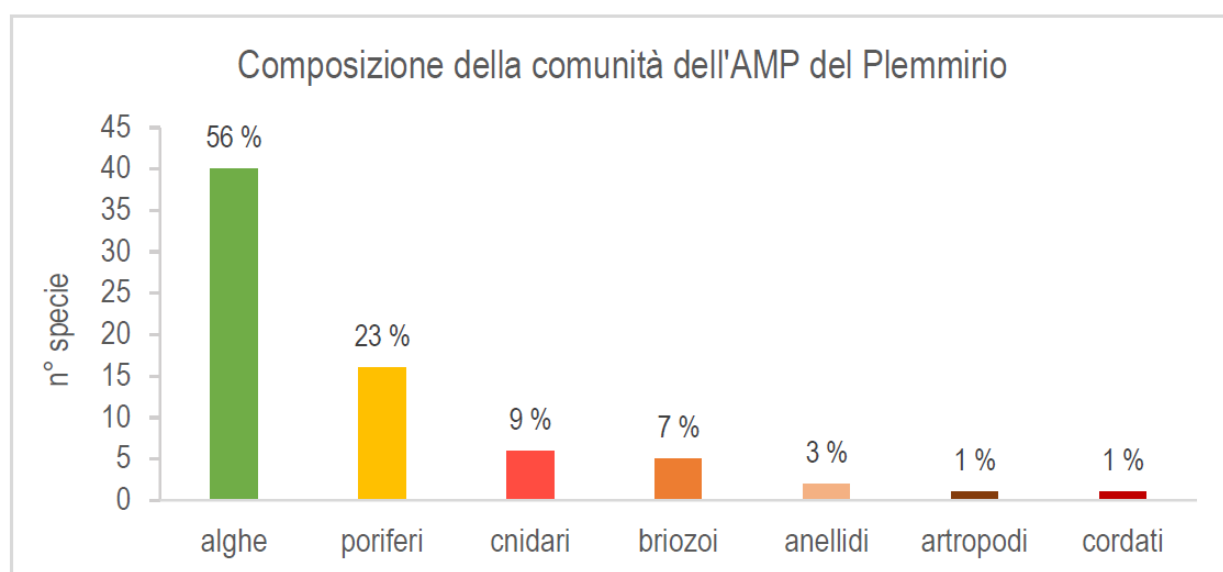


Figura 45. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP del Plemmirio. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

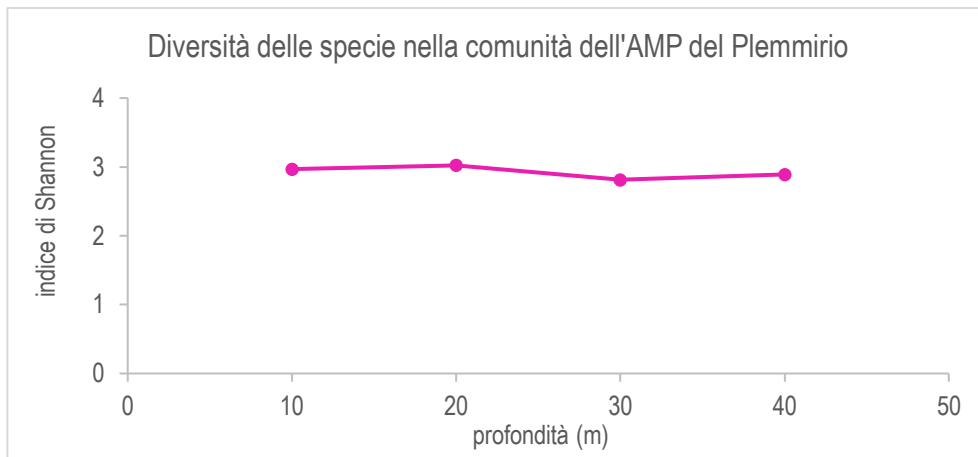


Figura 46. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'AMP del Plemmirio.

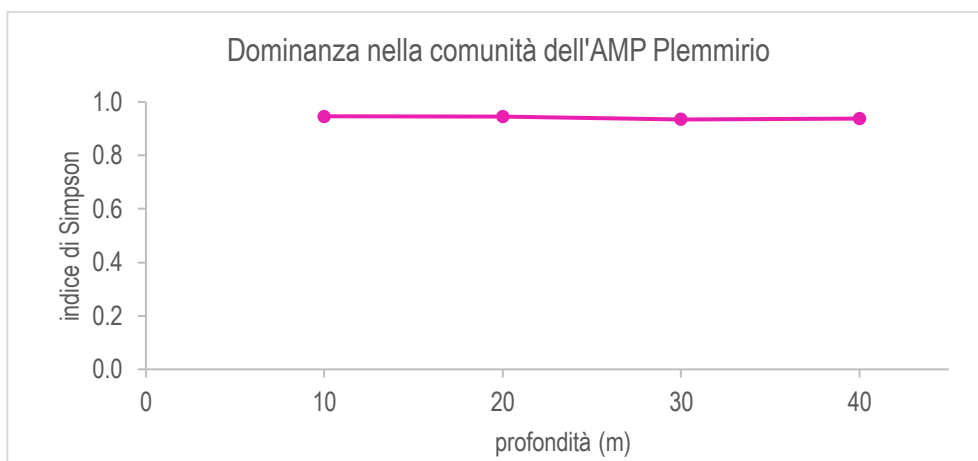


Figura 47. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'AMP del Plemmirio.

Confronto della struttura e dello stato ecologico delle comunità bentoniche nelle quattro aree indagate

Il confronto della composizione e della struttura delle comunità bentoniche nelle quattro aree di studio ha permesso di evidenziare che i maggiori valori di biodiversità, in termini di numero di specie, sono stati rilevati nell'Area Marina Protetta del Plemmirio ($N = 71$) e all'Isola d'Elba ($N = 70$), seguiti poi dall'Area Marina Protetta di Portofino ($N = 38$). I gruppi più rappresentati in termini di numero di specie sono quelli delle alghe, dei poriferi e infine degli cnidari. Questi taxa rappresentano l'86% delle specie nell'Area Marina Protetta di Portofino, il 79% delle specie nell'area dell'Isola d'Elba, il 92% delle specie nell'Isola di Pianosa e l'88% nell'Area Marina Protetta del Plemmirio (Fig. 48).

I valori dell'indice di diversità di Shannon indicano un buono stato ecologico per l'Isola d'Elba e l'Area Marina Protetta del Plemmirio. Una moderata qualità ecologica è stata invece

rilevata nell'Area Marina Protetta di Portofino, evidenziando come le misure adottate su scala locale possano non essere sufficienti e siano invece necessari interventi sinergici a livello nazionale e globale (Fig. 49). Come precedentemente descritto, i bassi valori dell'indice all'Isola di Pianosa sono dovuti al diverso tipo di rilevamento svolto in quest'area e, pertanto, questi non sono confrontabili con le altre aree.

Gli alti valori di dominanza rilevati a Portofino, all'Isola d'Elba e al Plemmirio indicano che le comunità, per quanto ricche, siano anche fortemente dominate da alcune specie e, di conseguenza, possano essere meno resilienti (Fig. 50). A fronte di un impatto, infatti, le comunità con bassi valori di equitabilità sono maggiormente esposte al rischio di perdita di biodiversità (nel caso di scomparsa delle specie meno abbondanti) e di perdita di funzioni ecosistemiche (nel caso di scomparsa delle specie cospicue). Il più basso valore di dominanza rilevato all'Isola di Pianosa è un'indicazione del migliore stato ecologico della comunità di scogliera di quest'area.

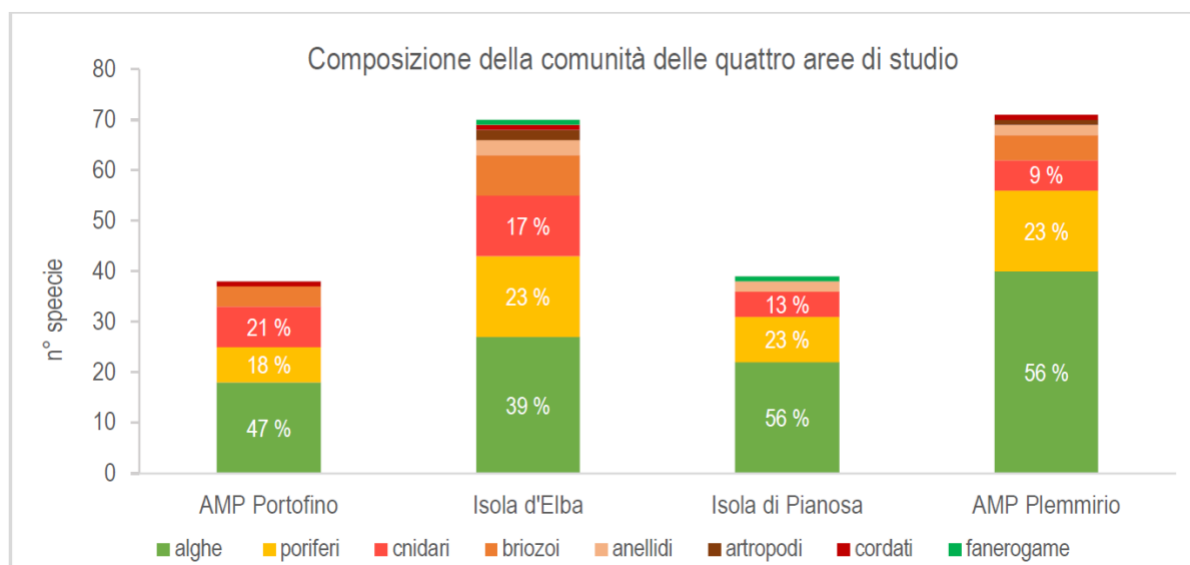


Figura 48. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone le comunità nelle quattro aree di studio. Sono inoltre riportati i valori percentuali dei tre gruppi (i.e., alghe, poriferi, cnidari) più rappresentativi.

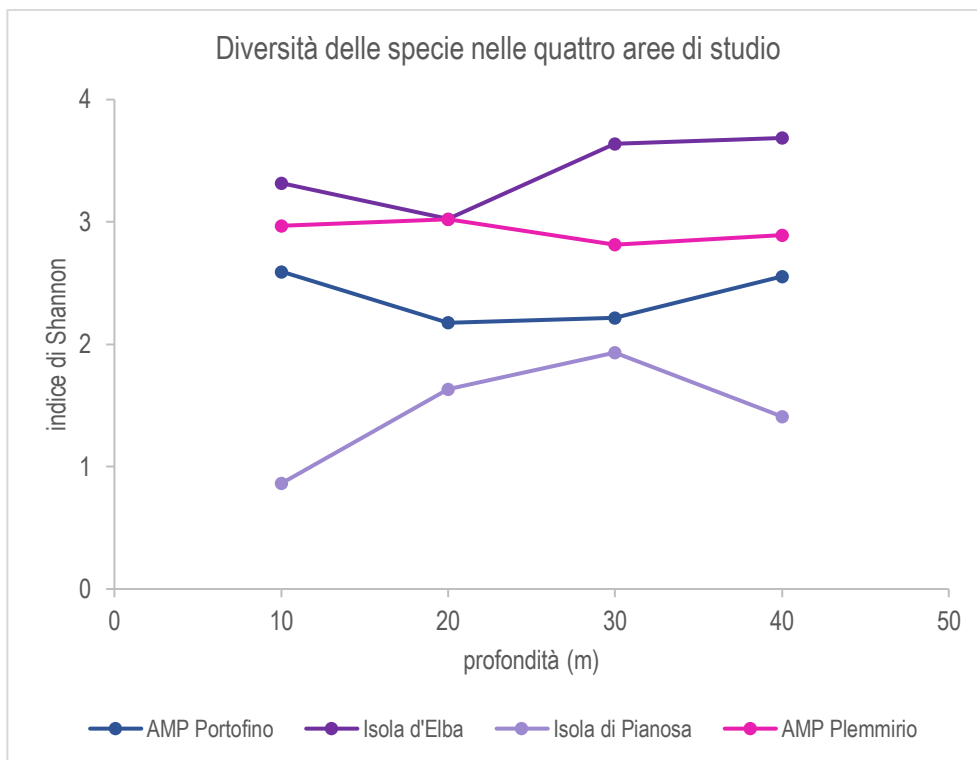


Figura 49. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nelle quattro aree indagate.

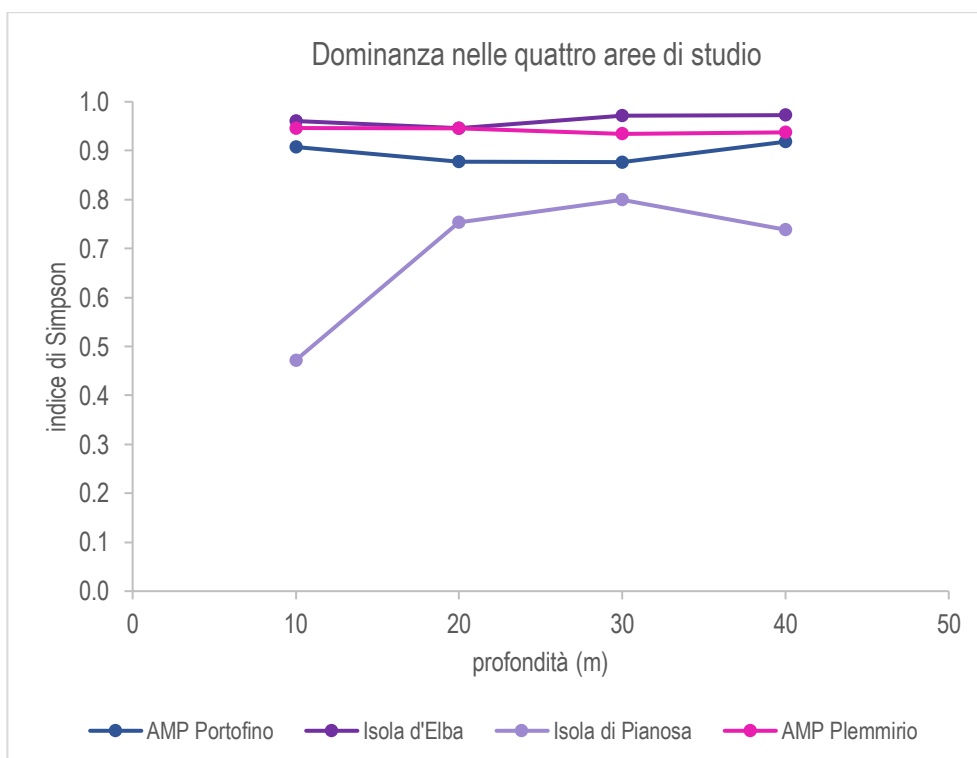


Figura 50. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nelle quattro aree indagate.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

La disponibilità di dati storici a partire dagli anni '50 nell'Area Marina Protetta di Portofino e a partire dagli anni '90 nell'area dell'Isola d'Elba ha permesso di valutare come le comunità bentoniche delle scogliere rocciose di queste due aree siano cambiate nel tempo.

Area Marina Protetta di Portofino

L'analisi delle corrispondenze (CA) applicata alla matrice dei dati di comunità di Portofino ha fornito due assi significativi (test Lebart, $p < 0,05$), che spiegano rispettivamente il 14,51% e l'11,32% della variazione totale (Fig. 51). Il primo asse, in particolare, rappresenta il gradiente di profondità, mentre il secondo asse rappresenta il gradiente temporale (Fig. 51).

Come già evidenziato da Gatti et al. (2017) dagli anni '50 la struttura e la composizione della comunità di Portofino è significativamente cambiata nel tempo a tutte le profondità (Fig. 51). In particolare, la distanza tra i punti nel piano della CA, che indicano le singole repliche negli anni, mostra un forte cambiamento tra gli anni '50 e gli anni '90, un ulteriore netto cambio di direzione tra gli anni '90 e il 2010 e un terzo forte cambiamento nella composizione e nella struttura della comunità di Portofino tra il 2010 e il 2020 a tutte le profondità (Fig. 51). Tuttavia, per l'ultimo tempo di campionamento (i.e., 2020) i dati si riferiscono ai soli monitoraggi condotti nell'ambito del progetto Mare Caldo e sono quindi di numero inferiore rispetto ai campionamenti degli anni precedenti, rendendo quindi necessari futuri monitoraggi. Ciononostante, sembrerebbe che il cambiamento stia continuando verso una nuova direzione ed è pertanto da considerarsi irreversibile: osservando la traiettoria temporale, infatti, la direzione è opposta rispetto alla posizione della comunità iniziale degli anni '50.

Il cambiamento nella comunità bentonica delle scogliere di Portofino è stato osservato anche tramite l'applicazione dell'Indice di Shannon. La diversità delle specie in quest'area di studio mostra, infatti, una riduzione significativa nel tempo ($r = 0,7$) (Fig. 52).

Nell'ambito dello studio condotto da Gatti et al. (2017) era già stato evidenziato un profondo cambiamento nelle prime fasce batimetriche dove le alghe strutturanti, in particolare, erano scomparse. I dati del 2020 confermano una perdita definitiva di alcune di queste specie algali (i.e., *Sargassum* sp., *Cystoseira* spp.) e un'ulteriore diminuzione di altre specie algali quali ad esempio *Flabellia petiolata*, diminuita a tutte le profondità, e *Dyctyopteris polypodioides*, scomparsa a tutte le profondità a eccezione della fascia dei 10-20 m dove la sua abbondanza è aumentata rispetto al 2010 (Fig. 53). Come possibili fattori trainanti del cambiamento, oltre all'innalzamento della temperatura, vi è l'aumento delle specie termofile, quali ad esempio *Caulerpa cylindracea* e *Pseudochlorodesmis furcellata*, tutt'oggi molto abbondanti (si veda il capitolo relativo alle specie termofile).

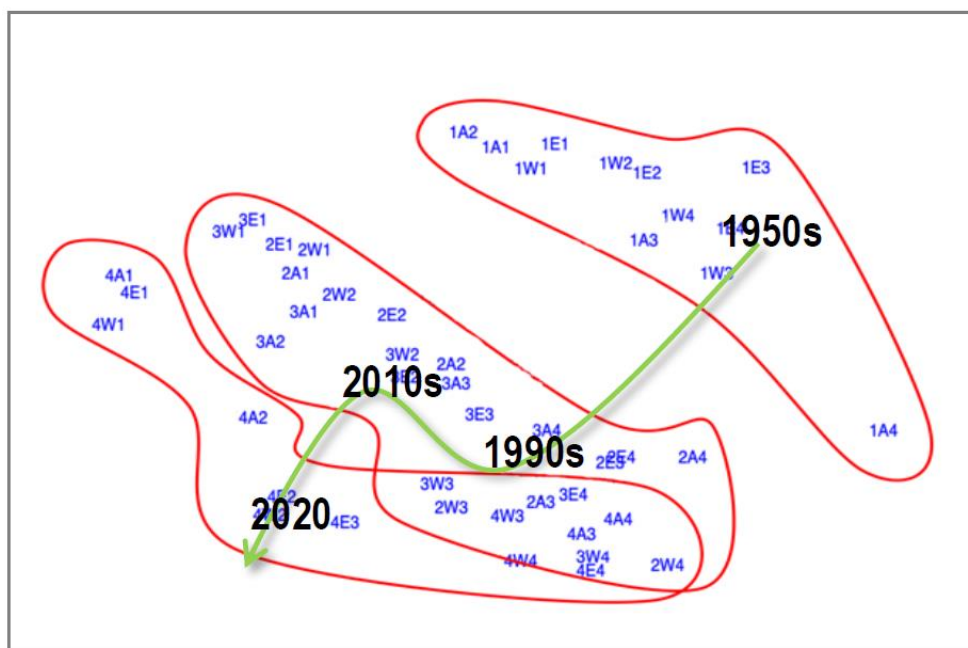


Figura 51. Grafico dell'analisi delle corrispondenze (CA). Il primo asse (orizzontale) spiega il 14,51% della varianza totale mentre il secondo asse (verticale) l'11,32%. Il codice dei punti, rappresentanti ogni singola replica, è composto da: i) un numero che indica il periodo di raccolta dati (1=1950; 2=1990; 3=2010; 4=2020); ii) una lettera che indica il sito (A=zona A, W=zona B a ovest; E= zona B a est); iii) un numero che indica la profondità (1=10 m; 2=20 m; 3=30 m; 4=40 m). Gli anni riportati in nero rappresentano i centroidi per ogni periodo di studio, mentre in verde è evidenziata la traiettoria di cambiamento temporale.

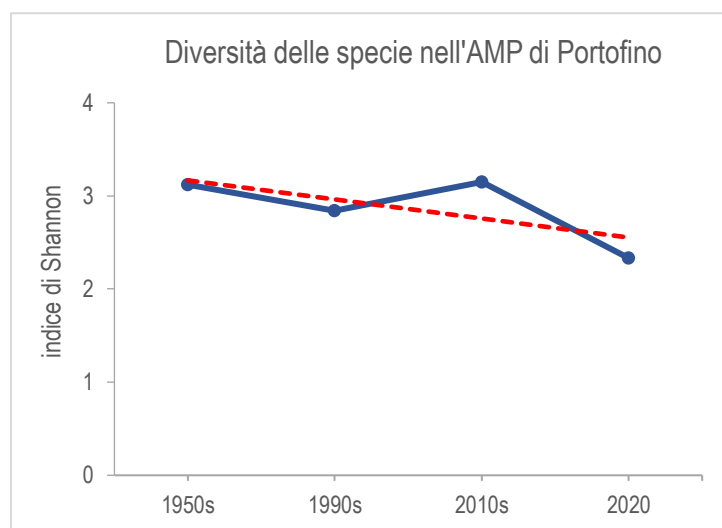
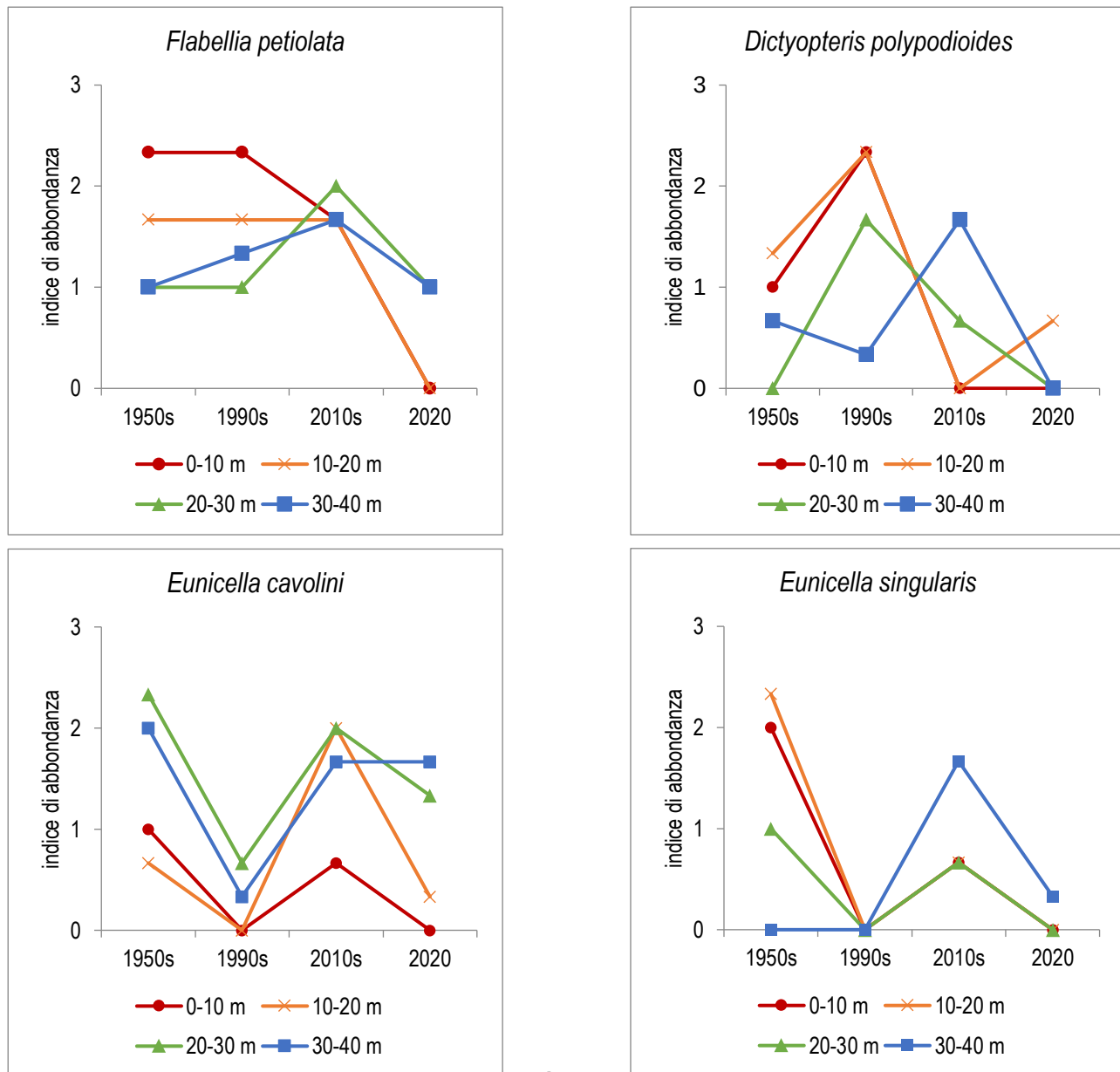


Figura 52. Grafico dell'andamento nel tempo dell'indice di Shannon nella comunità bentonica di scogliera dell'Area Marina Protetta di Portofino. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y = -0,204x + 3,371$; $R^2 = 0,487$).

Il confronto nel tempo delle abbondanze di alcune specie rilevate nel 2020 ha mostrato, inoltre, una perdita di alcune specie chiave dell'ecosistema, quali ad esempio *Eunicella*

cavolini ed *Eunicella singularis*. Queste specie erano già diminuite negli anni '90 a tutte le profondità, probabilmente a seguito dell'innalzamento della temperatura, ma negli anni 2010 avevano mostrato segni di ricuperato. Probabilmente a causa dell'ulteriore innalzamento di temperatura verificatosi dal 2010 ad oggi, queste specie sono andate incontro a un'altra importante diminuzione, specialmente tra i 10 e i 20 m di profondità (Fig. 53).



Figura

53. Andamento nel tempo, in termini di abbondanza media (indici semi-quantitativi 1, 2, 3), di alcune delle specie che sono diminuite nella comunità bentonica dell'Area Marina Protetta di Portofino dagli anni '50 al 2020 lungo un gradiente batimetrico.

Isola d'Elba

L'analisi multivariata (nMDS) applicata alla matrice dei dati della comunità bentonica dell'Isola d'Elba ha ordinato i punti lungo due gradienti perpendicolari: uno batimetrico lungo il 1° asse (orizzontale) e uno temporale lungo il 2° asse (verticale) (Fig. 54). Il gradiente batimetrico è espresso dalla profondità crescente da sinistra (10 m) a destra (40 m): lungo l'asse orizzontale è quindi possibile osservare come la principale forzante nella distinzione delle comunità sia la batimetria. Il gradiente temporale è invece espresso dal secondo asse, lungo il quale si osservano le traiettorie temporali che mostrano un cambiamento irreversibile per le stazioni a 10 m e 20 m e un chiaro segnale di ritorno alla condizione iniziale per la stazione a 40 m. A 30 m, invece, la comunità sembrava stesse tornando alla condizione iniziale nel 2010, ma i dati del 2020 mostrano un nuovo cambio di direzione mostrando nuovamente un cambiamento probabilmente irreversibile, nella comunità bentonica.

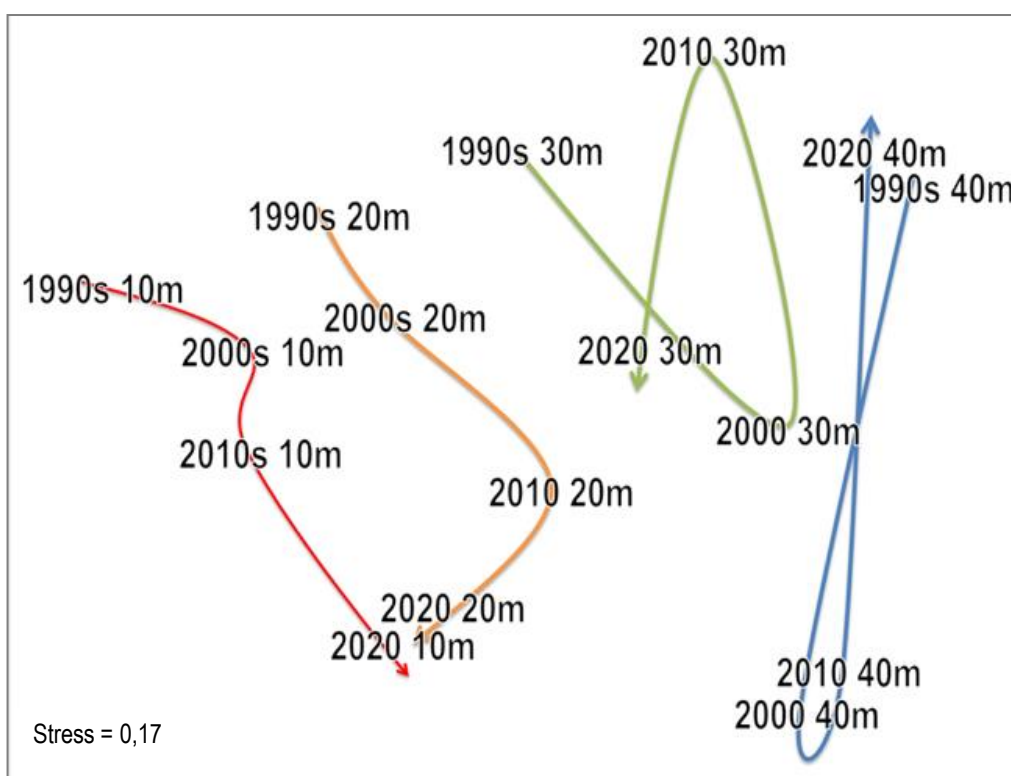


Figura 54. Grafico dell'analisi nMDS. Il primo asse (orizzontale) rappresenta il gradiente batimetrico mentre il secondo asse (verticale) rappresenta il gradiente temporale. Gli anni e le profondità riportati in nero rappresentano i centroidi per ogni periodo di studio a ogni differente fascia batimetrica, mentre le frecce rappresentano le traiettorie temporali per ogni fascia di profondità.

A differenza dell'area di Portofino, la comunità dell'Isola d'Elba non è variata nel tempo in termini di diversità in specie; l'Indice di Shannon, infatti, non mostra cambiamenti significativi ($r = 0,1$) da un periodo di studio all'altro, a indicare che nel tempo si è mantenuto un buono

stato ecologico in quest'area (Fig. 55). Tuttavia, anche in quest'area di studio si osserva un'importante diminuzione delle specie algali autoctone, quali ad esempio *Flabellia petiolata*, che è rimasta abbondante alle maggiori profondità ma risulta scomparsa nelle fasce batimetriche più superficiali, e *Halimeda tuna*, scomparsa a tutte le profondità e rilevata solo a 40 m (Fig. 56). Nonostante non siano disponibili dati antecedenti il 1990 in quest'area di studio, le osservazioni fatte all'Isola di Pianosa e l'andamento osservato nell'Area Marina Protetta di Portofino, potrebbe fare ipotizzare che un tempo anche all'Isola d'Elba le prime fasce batimetriche fossero dominate da folti popolamenti algali strutturanti. Oltre al riscaldamento delle acque, fattore di cambiamento importante, potrebbe avere influito anche in quest'area l'arrivo delle specie termofile, quali ad esempio *Caulerpa cylindracea*, che è molto abbondante a tutte le profondità seppur si sia ridotta dal 2010 al 2020 (si veda il capitolo sulle specie termofile). Un'altra importante causa di riduzione delle specie algali potrebbe essere l'aumento nei livelli d'inquinamento lungo la fascia costiera, che ha provocato una conseguente riduzione della qualità dell'acqua e la scomparsa delle specie più sensibili. Anche all'Isola d'Elba, infine, dall'analisi dei dati di abbondanza delle specie strutturanti, è emersa una diminuzione delle gorgonie *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis*, praticamente scomparse entro i 20 m di profondità e significativamente ridotte tra i 20 e i 40 m di profondità (Fig. 56).

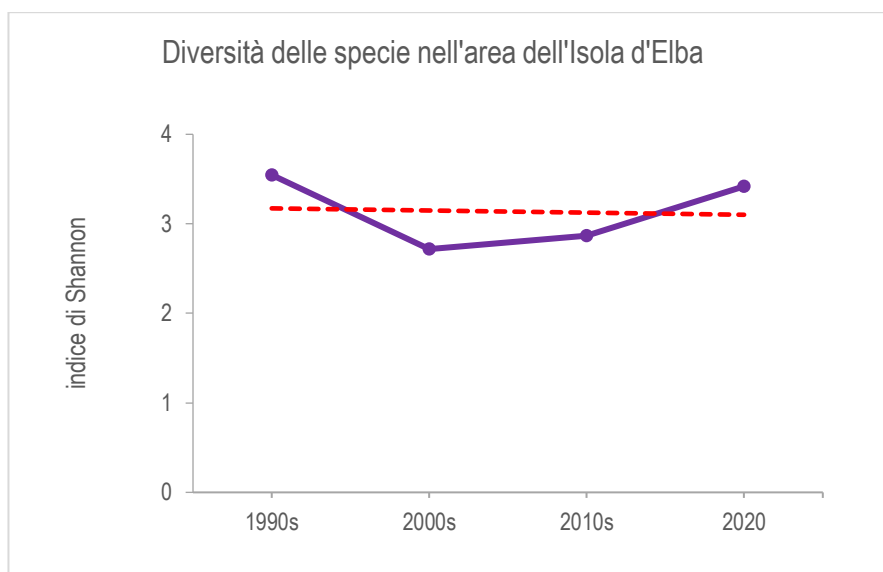
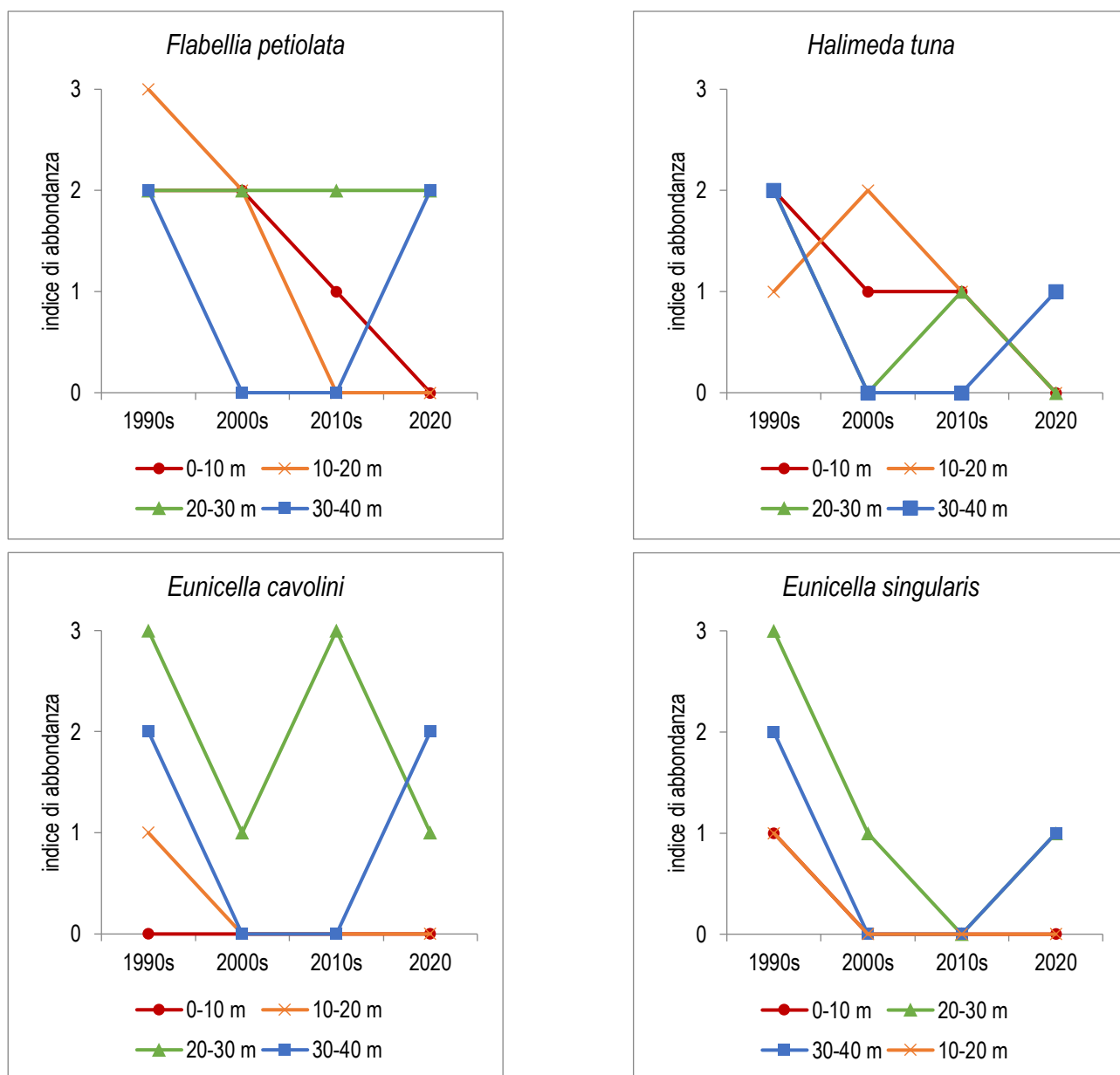


Figura 55. Grafico dell'andamento nel tempo dell'indice di Shannon per la comunità bentonica di scogliera dell'area dell'Isola d'Elba. Nel grafico è inoltre riportata in rosso la linea di tendenza ($y = -0,023x + 3,196$; $R^2 = 0,005$).



Figura

56. Andamento nel tempo, in termini di abbondanza media (indici semi-quantitativi 1, 2, 3), di alcune delle specie che sono diminuite nella comunità bentonica dell'area dell'Isola d'Elba dagli anni '90 al 2020 lungo un gradiente batimetrico.

MONITORAGGIO MORIE DI MASSA

Nel corso dei monitoraggi condotti nel primo anno del progetto Mare Caldo in nessuna delle tre aree di studio sono stati rilevati eventi eccezionali di morie di massa paragonabili a quelli osservati negli anni '90. Tuttavia, per ogni area di studio, l'analisi dei dati sulle colonie (o individui) che mostravano segni di necrosi ha permesso di stabilire quali fossero le specie maggiormente colpite e il relativo grado di impatto (i.e., basso, moderato, severo).

Area Marina Protetta di Portofino

Nonostante nell'Area Marina Protetta di Portofino a partire dagli anni '90 siano stati registrati diversi eventi di mortalità di massa conseguenti l'innalzamento delle temperature e i sempre più severi eventi mucilluginosi, nell'ambito dei monitoraggi del 2020 non sono stati osservati in quest'area evidenti segni di mortalità sulle gorgonie, specie che più di altre subiscono l'effetto di questi fenomeni. Solo nel sito della Torretta, tra i 15 e i 20 m, sono stati rilevati segni di necrosi nel 20% (N=20) delle colonie della specie *Eunicella cavolini* (Tab. 5). Tuttavia, nel sito della Torretta in particolare, è stato registrato un alto valore di ricoprimento del fondo (70%) da parte della mucillagine e il conseguente impatto sulle gorgonie sarà rilevabile solo nei prossimi mesi.

Un grado d'impatto severo (> 60%) è stato invece registrato per le colonie della madrepora *Cladocora caespitosa* poiché, in due dei tre siti monitorati (i.e., Cala dell'Oro e Grotta dei Gamberi), mostravano segnali di sbiancamento imputabile alle alte temperature. Va tuttavia evidenziato come il numero di colonie rilevate sia esiguo (N=4) (Tab. 5). Segnali di sbiancamento sono stati inoltre registrati per le alghe corallinacee incrostanti (*Lithophyllum incrustans*, *Lithophyllum* sp.), ma il grado d'impatto è comunque risultato basso (10-30%) in tutte le stazioni monitorate (Tab. 5).

Tabella 5. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'Area Marina Protetta di Portofino. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = > 60%.

CALA DELL'ORO							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	5-10	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Cladocora caespitosa</i>	10-15	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Eunicella cavolini</i>	25-35		0	0	30	30	
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Lithophyllum incrustans</i>	5-15	B	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
<i>Lithophyllum incrustans</i>	20-30	B	10	0,2	1,8	2	Sbiancamento
<i>Lithophyllum incrustans</i>	30-40		0	0	2	2	
<i>Peyssonnelia squamaria</i>	5-15		0	0	1	1	
<i>Peyssonnelia squamaria</i>	20-30		0	0	1	1	
<i>Peyssonnelia</i> sp.	30-40		0	0	2	2	

GROTTA DEI GAMBERI

Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	5-10	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Leptogorgia sarmentosa</i>	45		0	0	2	2	
<i>Paramuricea clavata</i>	30		0	0	100	100	
<i>Paramuricea clavata</i>	40		10	10	90	100	Necrosi
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Lithophyllum incrustans</i>	5-10		0	0	1	1	
<i>Lithophyllum</i> sp.	30-40	B	5	0,1	1,9	2	Sbiancamento
<i>Parazoanthus axinellae</i>	30-40		0	0	1	1	
<i>Peyssonnelia squamaria</i>	3-5		0	0	1	1	
<i>Peyssonnelia squamaria</i>	10-15		0	0	1	1	
TORRETTA							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	30		0	0	1	1	
<i>Eunicella cavolini</i>	15-20	B	20	20	80	100	Necrosi / Mucillagine
<i>Paramuricea clavata</i>	30-40		0	0	100	100	Mucillagine
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Lithophyllum</i> sp.	30-40		0	0,0	2	2	
<i>Peyssonnelia</i> sp.	20-30		0	0	1	1	

Isola d'Elba e Isola di Pianosa

I monitoraggi sulle morie di massa condotti all'Isola d'Elba e all'Isola di Pianosa hanno permesso il confronto tra due aree a diversa pressione antropica mostrando importanti differenze. La prima differenza riguarda la presenza e la quantità di mucillagine osservata sul fondo e su molti degli organismi bentonici eretti (e.g., gorgonie). All'Isola d'Elba, in tutte le stazioni monitorate tra i 10 m e i 30 m circa di profondità, è stata rilevata una copertura quasi totale del fondale (70%) con aggregati di mucillagine; a Pianosa, al contrario, la mucillagine è risultata rara ed è stata osservata solo nel sito SP3 su un numero molto esiguo di gorgonie (20%) che sono apparse solo parzialmente coperte. Oltre che per l'aumento della temperatura, la presenza di mucillagine è in buona parte legata a una ridotta qualità dell'acqua e dell'ambiente in generale.

La seconda importante differenza tra l'Isola d'Elba e l'Isola di Pianosa riguarda le colonie con segni di necrosi il cui numero rispecchia il diverso grado d'impatto della mucillagine nelle due aree di studio. Mentre a Pianosa la percentuale di colonie impattate è molto bassa

(2,4%), all'Isola d'Elba un maggior numero di gorgonie (13%) riporta segni di necrosi imputabili, principalmente, agli effetti della mucillagine. In particolare, *Eunicella singularis* è apparsa la specie più sensibile: nei siti Cannelle e Picchi di Pablo (Isola d'Elba) la percentuale delle colonie che mostrano segni di necrosi raggiunge il 40-50% (Tab. 4). Quasi un terzo (24%) delle colonie osservate di *Eunicella cavolini* all'Isola d'Elba riporta aree necrotizzate (Tab. 6), mentre solo il 6% circa delle colonie di *Paramuricea clavata* è risultata impattata (Tab. 6).

Altri effetti diretti di anomalie termiche pregresse, avvenute durante le estati del 2018 e del 2019, sono stati ugualmente osservati all'Isola d'Elba e all'Isola di Pianosa. Il madreporaro mediterraneo *Cladocora caespitosa* e le alghe corallinacee mostrano segni di mortalità o sbiancamento delle colonie in entrambe le aree (Tab. 6). Inoltre, sono stati registrati numerosi individui morti del grosso bivalve *Pinna nobilis* in entrambe le aree (Tab. 6), colpiti nel 2018 e nel 2019 da una moria di massa dovuta a un consorzio di patogeni la cui diffusione è favorita dall'aumento di temperatura dell'acqua.

Tabella 6. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'area dell'Isola d'Elba e dell'Isola di Pianosa. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = > 60%.

LE CANNELLE							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	9-12	S	71	5	2	7	Sbiancamento
<i>Cladocora caespitosa</i>	20		0	0	1	1	
<i>Eunicella cavolini</i>	30-40	B	2	2	8	10	Mucillagine
<i>Eunicella singularis</i>	30-40	M	38	3	5	8	Mucillagine
<i>Paramuricea clavata</i>	30-40	B	10	10	90	100	Mucillagine
PICCHI DI PABLO							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	9	M	40	2	3	5	
<i>Eunicella cavolini</i>	20	B	18	2	9	11	
<i>Eunicella cavolini</i>	30-37	B	13	4	26	30	
<i>Eunicella singularis</i>	30-37	M	57	4	3	7	
<i>Paramuricea clavata</i>	30-37	B	5	5	95	100	

Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
--------	----------	------------------	------------------------	--	--	---------------------------------------	------

Corallinacee	30-37	B	10%	0,1	0,9	1	
<i>Lithophyllum</i> sp.	13	B	10%	0,1	0,9	1	
<i>Parazoanthus axinellae</i>	10	B	5%	0,05	0,95	1	
LO SCOGLIETTO							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	26	B	33	1	2	3	
<i>Eunicella cavolini</i>	27-33	M	50	25	25	50	Mucillagine
<i>Eunicella cavolini</i>	35-40		0	0	30	30	Mucillagine
<i>Pinna nobilis</i>	27	S	100	8	0	8	Patogeni
LE FORMICHE DELLA ZANCA							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	15	S	100	2	0	2	
<i>Eunicella cavolini</i>	25-30	B	24	9	29	38	Mucillagine
<i>Eunicella singularis</i>	25-30	B	13	1	7	8	Mucillagine
<i>Eunicella singularis</i>	45-50		0	0	1	1	
<i>Leptogorgia sarmentosa</i>	25-30		0	0	1	1	
<i>Paramuricea clavata</i>	30-40	B	4	4	96	100	Mucillagine
<i>Paramuricea clavata</i>	45-55	B	6	6	94	100	
PIANOSA SP5							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Eunicella cavolini</i>	20-30	B	5	5	95	100	10% coperte da mucillagine
<i>Eunicella cavolini</i>	30-40		0	0	100	100	10% coperte da mucillagine
<i>Paramuricea clavata</i>	30-40	B	5	5	95	100	
<i>Pinna nobilis</i>	22-32	S	100	2	0	2	Patogeni
PIANOSA SP3							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	18	S	100	1	0	1	
<i>Eunicella cavolini</i>	20-30	B	2	2	98	100	
<i>Eunicella cavolini</i>	30-40		0	0	100	100	
<i>Pinna nobilis</i>	20		0	0	1	1	Patogeni
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m²)	superficie non impattata (m²)	superficie rilevata (m²)	Note
<i>Lithophyllum</i> sp.	30-37	B	30%	0,3	0,7	1	

Area Marina Protetta del Plemmirio

Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio la prima evidente differenza rispetto a quanto osservato nelle due aree dell'Isola d'Elba e a Portofino è rappresentata dalla totale mancanza di mucillagine in tutte le stazioni monitorate, confermata anche dagli operatori dell'AMP per tutto il periodo intercorso da maggio 2020 fino a ottobre 2020.

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target mostrano segnali di sofferenza su un numero esiguo di specie rispetto a quanto osservato nelle altre aree di studio. Bisogna tuttavia evidenziare come le comunità bentoniche di quest'area siano caratterizzate, principalmente, da popolamenti algali a tutte le profondità indagate. Le alghe, tipicamente, non mostrano segni di sbiancamento o necrosi dovuti alle alte temperature, fatta eccezione per le alghe caratterizzate da uno scheletro carbonatico (e.g., alghe corallinacee o appartenenti alla famiglia delle Peyssonneliaceae). In tutti i siti monitorati è stato, infatti, osservato, a partire dai 30 m di profondità, lo sbiancamento di diverse alghe calcaree incrostanti (i.e., *Mesophyllum expansum*, *Mesophyllum lichenoides*) e l'alga incrostante *Peyssonnelia* sp. è risultata la specie per la quale sono stati osservati i maggiori segni di sbiancamento (Tab. 7).

Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio, inoltre, mancano i popolamenti a gorgonie tipici del coralligeno, che sono utilizzate come specie target per la valutazione degli effetti dell'innalzamento della temperatura, proprio grazie agli evidenti segni di necrosi che mostrano in stato di sofferenza. Gli unici organismi animali per i quali sono stati osservati segni di necrosi sono i grandi briozoi coloniali *Salmacina dysteri*, di cui è stata trovata una colonia morta alla Secca del Capo (Tab. 7), e *Myriapora truncata* per la quale sono state osservate alcune colonie che riportavano segni di necrosi (Tab. 7). La carenza di dati, tuttavia, non permette di valutare se questi segnali possano essere attribuiti a un aumento di temperatura e solo attraverso i monitoraggi futuri sarà possibile stabilire una reale relazione.

Tabella 7. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'Area Marina Protetta del Plemmirio. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = >60%.

GROTTE DEL CAPO							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Myriapora truncata</i>	12-16	B	20	1	4	5	Morta/epibiontata
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Peyssonnelia</i> sp.	6-8	M	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	12-14	M	5	0,05	0,95	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	17	M	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
LINGUA DEL GIGANTE							

Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Myriapora truncata</i>	20	B	20	1	4	5	Morta/epibiontata
SECCA DEL CAPO							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Myriapora truncata</i>	15		0	0	2	2	Morta/epibiontata
<i>Salmacina dysteri</i>	30	S	100	1	0	1	Morta
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Mesophyllum expansum</i>	31	M	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	14	B	20	0,2	0,8	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	31	B	5	0,05	0,95	1	Sbiancamento
<i>Mesophyllum lichenoides</i>	12	M	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
TRE ANCORE							
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Myriapora truncata</i>	17-20	B	22	2	7	9	Morta/epibiontata
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	superficie impattata (m ²)	superficie non impattata (m ²)	superficie rilevata (m ²)	Note
<i>Peyssonnelia</i> sp.	6	B	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	10	M	10	0,1	0,9	1	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	22	B	5	0,05	0,95	1	Sbiancamento

Confronto delle quattro aree di studio

Indipendentemente dal diverso livello di protezione e dalla diversa latitudine, per tutte le aree di studio sono stati osservati fenomeni di morie su colonie animali e organismi vegetali.

L'Isola d'Elba è l'area dove sono stati rilevati i maggiori segnali di sofferenza sulle colonie di gorgonie (*Eunicella cavolini*, *Eunicella singularis*, *Paramuricea clavata*) (Fig. 57). Per il madreporario *Cladocora caespitosa* la percentuale d'impatto maggiore (100%) è stata rilevata all'Isola di Pianosa, ma questo risultato deriva dall'unica colonia osservata che è anche apparsa sbiancata. Al contrario, all'Isola d'Elba, seppur la percentuale d'impatto risulti minore, sono state osservate ben 10 colonie di *Cladocora caespitosa* sbiancate (Fig. 57). Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio sulle specie cospicue di cnidari bentonici presenti (e.g., *Astroides calycularis*, *Leptopsammia pruvoti*) non sono stati osservati segni di

sofferenza. Tuttavia, in quest'area è stato rilevato un grado d'impatto del 22% sulle colonie di briozoi, non osservato nelle altre aree di studio.

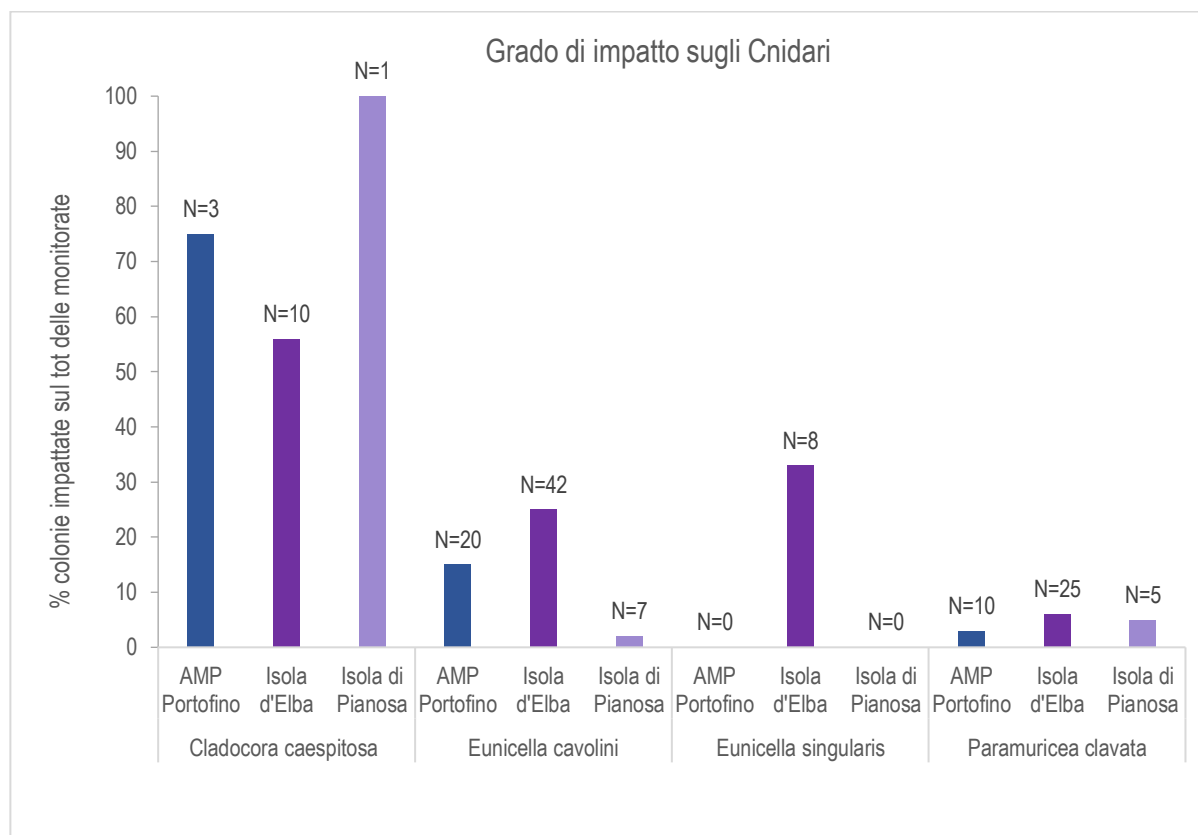


Figura 57. Percentuale (%) di colonie di Cnidari riportanti segni di necrosi o sbiancamento nelle tre aree di studio: AMP Portofino, Isola d'Elba e Isola di Pianosa. Nell'AMP del Plemmirio non sono stati osservati segni di sofferenza sulle specie di cnidari presenti.

Per quanto riguarda le alghe calcaree incrostanti i maggiori impatti sono stati osservati all'Isola di Pianosa (30% delle alghe Corallinacee monitorate) e nell'Area Marina Protetta del Plemmirio (11% delle alghe Corallinacee e 9% di *Peyssonnelia* sp. monitorate) (Fig. 58).

Anche i dati sulle morie evidenziano, ancora una volta, come le misure di protezione adottate a scala locale, volte a mitigare le pressioni antropiche, non siano sufficienti a contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici che agiscono a scala globale (Fig. 59 e Fig. 60).

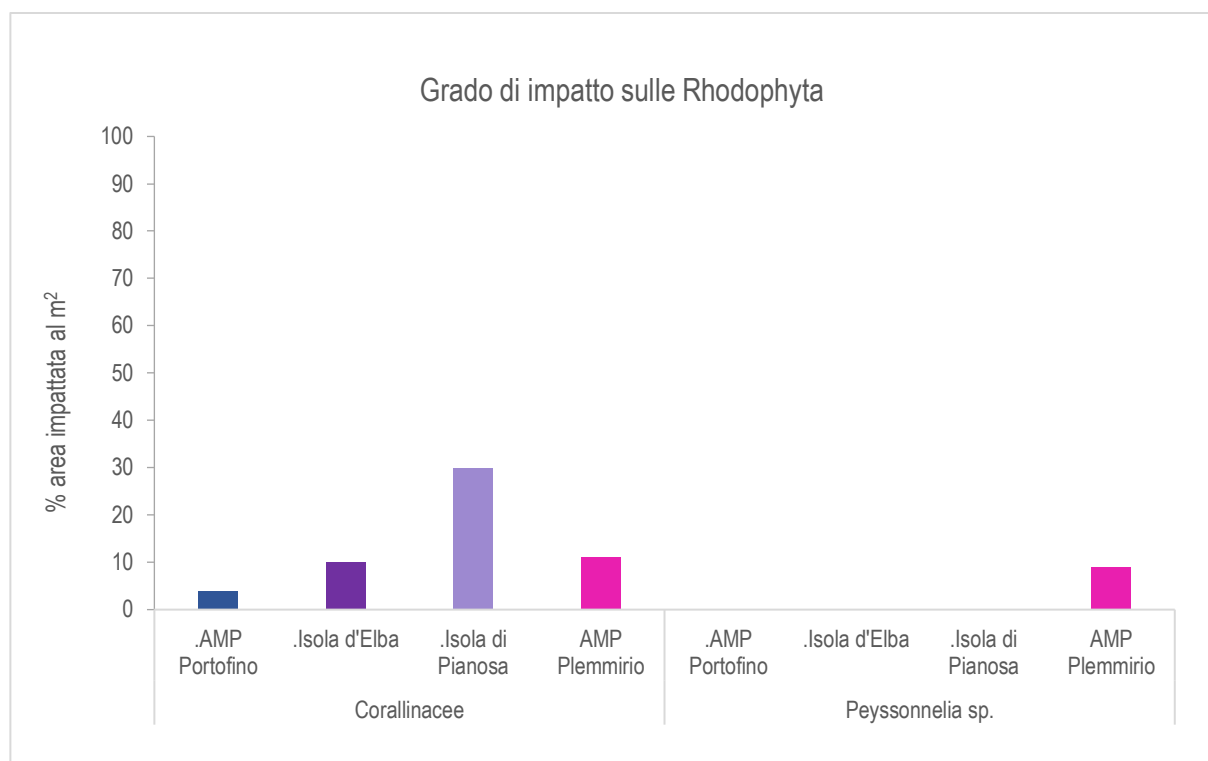


Figura 58. Percentuale (%) di alghe calcaree sbiancate nelle quattro aree di studio: AMP Portofino, Isola d'Elba, Isola di Pianosa e AMP Plemmirio.



Figura 59. Colonia di *Paramuricea clavata*, nell'Area Marina Protetta di Portofino, che mostra segni di necrosi come conseguenza della presenza di mucillagine. Foto di Annalisa Azzola.



Figura 60. Colonia di *Cladocora caespitosa*, parzialmente sbiancata e circondata da mucillagine. Foto di Monica Montefalcone scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti all'Isola d'Elba.

MONITORAGGIO SPECIE TERMOFILE

Coerentemente con i dati di temperatura, anche i dati sulle specie termofile mostrano un gradiente latitudinale. Una maggiore presenza e abbondanza di specie termofile si osserva infatti nell'Area Marina Protetta del Plemmirio, dove naturalmente abbondano le specie native termofile ma sono anche diverse le specie aliene provenienti dal canale di Suez. Si osserva invece una minore presenza di specie termofile nell'Area Marina Protetta di Portofino, nella cui comunità sono tuttavia dominanti le specie termofile native mediterranee a causa del recente riscaldamento del Mar Ligure (Fig. 61).

Nelle aree per le quali erano disponibili dati storici è stato possibile evidenziare i cambiamenti nel tempo in termini di abbondanza delle specie termofile.

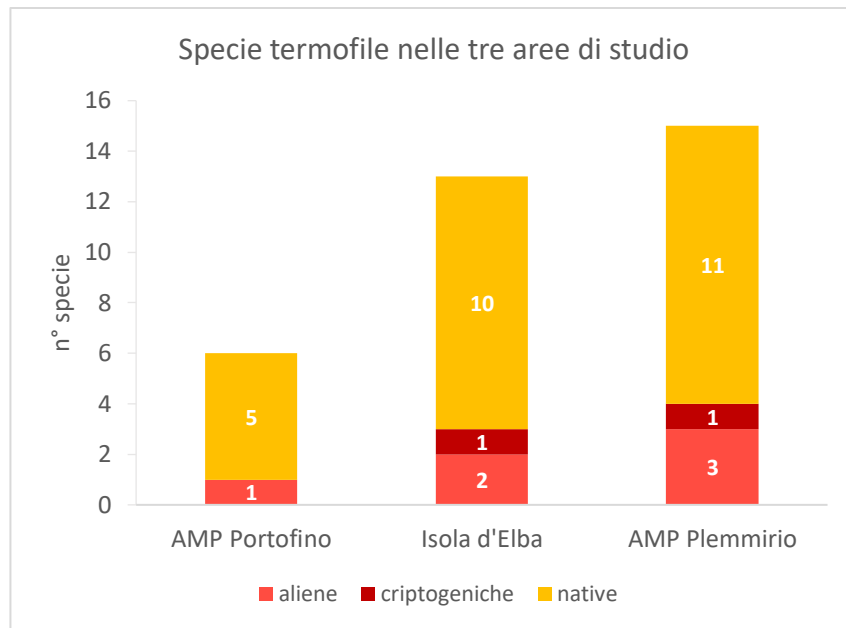


Figura 61. Numero di specie termofile aliene, criptogeniche e native in ogni area di studio. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni categoria sul totale delle specie termofile.

Area Marina Protetta di Portofino

Per l'Area Marina Protetta di Portofino nell'ambito dei monitoraggi sono state rilevate un totale di 6 specie termofile di cui una aliena (17%) e cinque native (83%) (Tab. 8).

Delle sei specie rilevate, tre sono specie ittiche (i.e. *Mycteroperca rubra*, *Sphyrna viridensis*, *Thalassoma pavo*) e tre sono specie bentoniche sessili (i.e. *Caulerpa cylindracea*, *Pseudochlorodesmis furcellata*, *Tricleocarpa fragilis*). Queste ultime rappresentano l'8% delle specie della comunità bentonica di scogliera di Portofino (N=38) (Fig. 62).

Tra le specie bentoniche osservate di particolare rilevanza è l'alga aliena *Caulerpa cylindracea* che risulta una delle componenti più abbondanti della comunità bentonica di Portofino intorno ai 20 m di profondità.

La disponibilità di dati quantitativi storici sulle comunità bentoniche di Portofino ha inoltre permesso di valutare come le specie termofile siano cambiate nel tempo lungo un gradiente batimetrico. Su un totale di 77 specie presenti nella serie storica di dati quantitativi sono state rilevate cinque specie termofile, di cui una non rilevata nei monitoraggi del 2020 (*Dasycladus vermicularis*). Delle quattro restanti specie termofile, due sono apparse in aumento: *Caulerpa cylindracea* da 0 a 20 m e *Pseudochlorodesmis furcellata* dai 20 ai 40 m. Le restanti due specie sono invece apparse in diminuzione: *Dasycladus vermicularis* a 30-40 m e *Tricleocarpa fragilis* da 0 a 30 m (Fig. 63). Tuttavia lo sforzo di campionamento nel 2020 rispetto agli anni passati è minore e questo potrebbe avere influenzato i risultati.

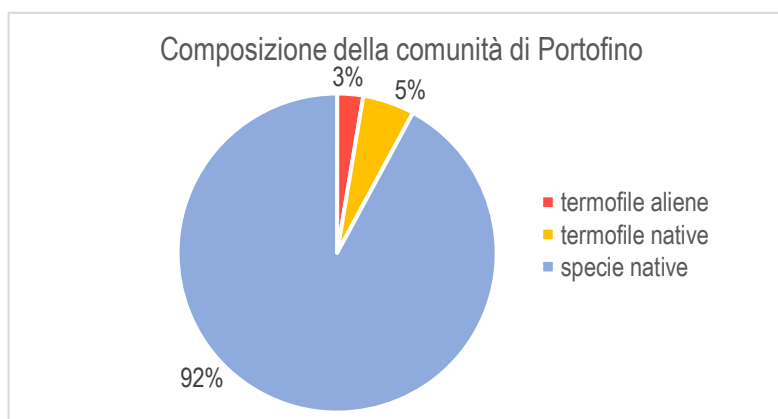
Ulteriori monitoraggi saranno quindi necessari per confermare l'andamento nel tempo delle specie termofile in quest'area.

Negli ultimi anni, infatti, sono state osservate diverse altre specie termofile nell'Area Marina Protetta di Portofino, tra le quali: *Pennaria disticha*, sulle boe a circa 5 m di profondità (osservazioni di Carlo Nike Bianchi), *Percnon gibbesi* (osservazioni di Carlo Nike Bianchi), *Chaetaster longipes* (Bianchi e Morri, 1994), *Hacelia attenuata* (Bianchi e Morri 1994), *Ophidiaster ophidianus* (Bianchi e Morri 1994).

Tabella 8. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'area di Portofino. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

CALA DELL'ORO			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	5	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10-15	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	2	A
<i>Pseudochlorodesmisfurcellata</i>	20-40	3	N
<i>Sphyrenaviridensis</i>	10	2	N
GROTTA DEI GAMBERI			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	5-10	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	15-30	1	A
TORRETTA			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	5-10	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20-30	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	40	1	A
<i>Mycteroperca rubra</i>	10	1	N
<i>Sphyrenaviridensis</i>	10	2	N
<i>Thalassomapavo</i>	10	1	N
<i>Tricleocarpafragilis</i>	30	1	N

Figura 62. Composizione della comunità nell'Area Marina Protetta di Portofino.



Composizione bentonica Protetta di

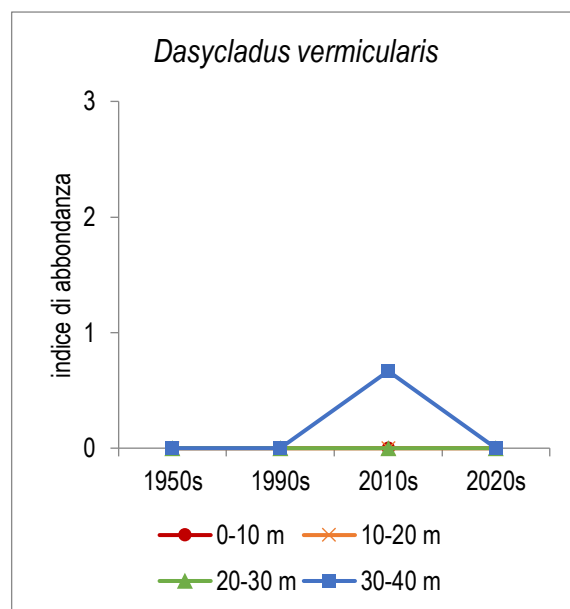
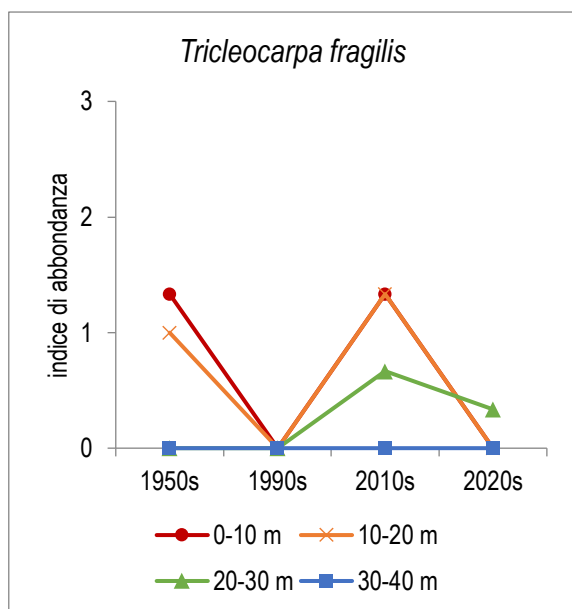
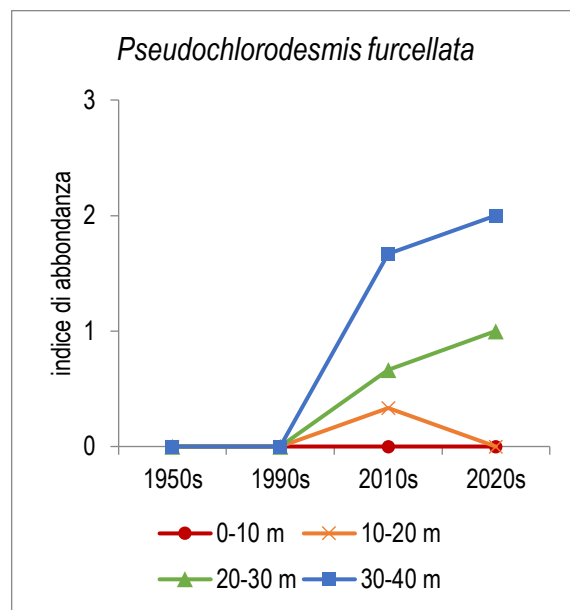
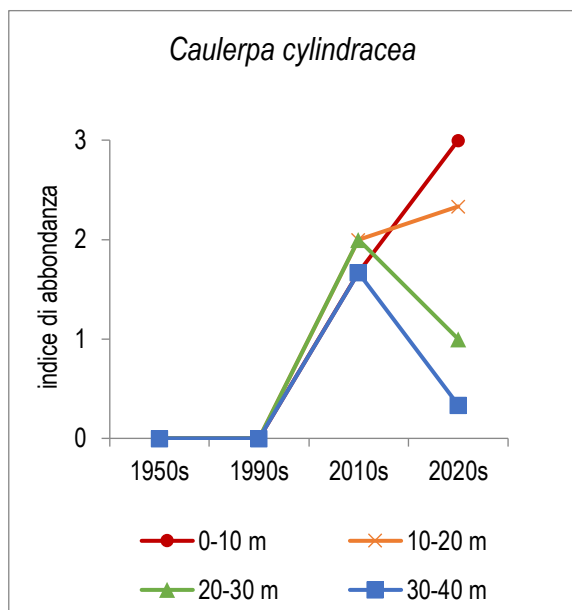


Figura 63. Andamento nel tempo, in termini di abbondanza media (indici semi-quantitativi 1, 2, 3), di alcune delle specie termofile presenti nella comunità bentonica dell'area di Portofino lungo un gradiente batimetrico.

Isola d'Elba

Per l'area dell'Isola d'Elba nell'ambito dei monitoraggi sono state rilevate un totale di 13 specie termofile di cui una criptogenica (8%), due aliene (15%) e dieci native (77%) (Tab. 9).

Delle 13 specie rilevate 2 sono specie ittiche (*Sphyraena viridensis*, *Thalassoma pavo*) e 11 sono specie bentoniche sessili (*Acrosymphyton purpuriferum*, *Calcinus tubularis*, *Caulerpa cylindracea*, *Caulerpa prolifera*, *Centrostephanus longispinus*, *Hacelia attenuata*,

Lophocladia lallemandii, *Ophidiaster ophidianus*, *Pennaria disticha*, *Pseudochlorodesmis furcellata*, *Tricleocarpa fragilis*). Queste ultime rappresentano il 13% della comunità bentonica di scogliera di Portofino (N=86) (Fig. 64).

La disponibilità di dati quantitativi storici sulle comunità bentoniche dell'Isola d'Elba ha permesso, anche per quest'area di studio, di valutare come le specie termofile siano cambiate nel tempo lungo un gradiente batimetrico. Su un totale di 111 specie presenti nella serie storica di dati sono state rilevate 12 specie termofile di cui 4 non rilevate nei monitoraggi del 2020 (i.e. *Asparagopsis armata*, *Balanophyllia regia*, *Dasycladus vermicularis*, *Penicillus capitatus*). Tra le specie in aumento sono rilevanti le alghe *Acrosymphyton purpuriferum* a 30-40 m e *Pseudochlorodesmis furcellata* a 10-20 m e a 30-40 m. Tra le specie in diminuzione sono invece rilevanti l'alga nativa *Caulerpa prolifera* tra gli 0 e i 20 m e l'alga aliena *Caulerpa cylindracea* a tutte le profondità indagate (Fig. 65).

Tabella 9. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'area dell'Isola d'Elba. Lo 'status' indica l'origine della specie che è distinta in aliena (A), criptogenica (C), e native (N).

LE CANNELLE			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	25-30	3	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	17-25	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	25-35	3	A
<i>Centrostephanus longispinus</i>	40	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	13	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	35-40	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	4	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	15	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	30-35	3	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	16	1	N
LE FORMICHE DELLA ZANCA			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	40-50	3	N
<i>Calcinus tubularis</i>	4-8	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20-30	2	A
<i>Centrostephanus longispinus</i>	46	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	23-30	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	40-50	3	N
<i>Thalassomapavo</i>	4	2	N

LO SCOGLIETTO			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	30-40	3	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10-20	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20-30	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	30-40	1	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	10-20	3	N
<i>Caulerpa prolifera</i>	20-30	2	N
<i>Caulerpa prolifera</i>	30-40	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	20	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	9-18	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	18-23	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	23-40	3	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	8	1	N
PICCHI DI PABLO			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	35-40	3	N
<i>Calcinus tubularis</i>	2	1	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	1	A
<i>Hacelia attenuata</i>	33-37	1	N
<i>Ophidiastero phidianus</i>	34	1	N
<i>Pennaria disticha</i>	3	1	C
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	10-15	3	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	20	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	33	3	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	11	1	N
SP3 - PIANOSA			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	30-40	3	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	3	A
<i>Hacelia attenuata</i>	15-40	3	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	5-15	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	15-40	2	N
<i>Sphyræna viridensis</i>	15	1	N
<i>Thalassoma pavo</i>	9-13	2	N

SP5 - PIANOSA			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	20-30	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	7-25	2	A
<i>Hacelia attenuata</i>	7-30	3	N
<i>Pseudoclorodesmis furcellata</i>	24	1	N
<i>Sphyraena viridensis</i>	12	2	N
<i>Thalassoma pavo</i>	3-7	1	N

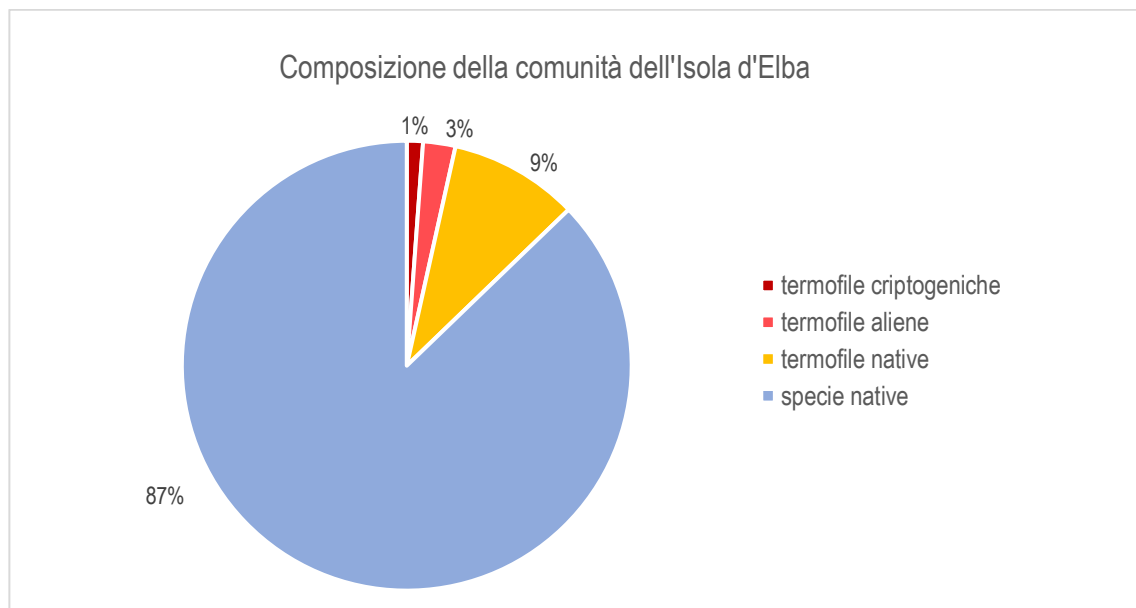


Figura 64. Composizione della comunità bentonica nell'area dell'Isola d'Elba.

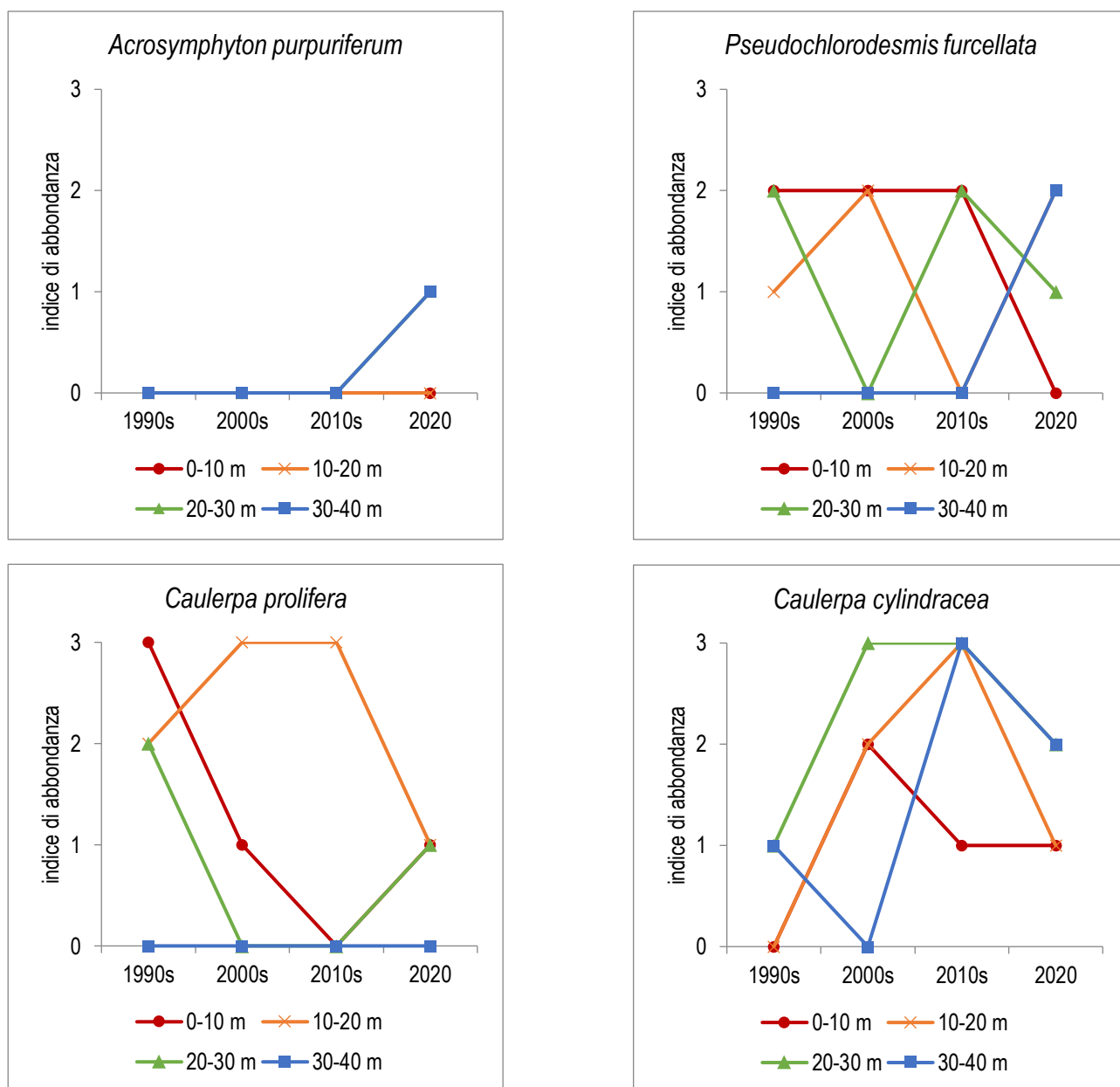


Figura 65. Andamento nel tempo, in termini di abbondanza media (indici semi-quantitativi 1, 2, 3), di alcune delle specie termofile presenti nella comunità bentonica dell'area dell'Isola d'Elba lungo un gradiente batimetrico.

Area Marina Protetta del Plemmirio

Per l'AMP del Plemmirio nell'ambito dei monitoraggi sono state rilevate un totale di 17 specie termofile di cui una criptogenica (6%), tre aliene (18%) e 13 native (76%) (Tab. 10).

Delle 17 specie rilevate, tre sono specie ittiche (*Mycteroperca rubra*, *Sparisoma cretense*, *Thalassoma pavo*) e 14 sono specie bentoniche sessili (*Acrosymphyton purpuriferum*; *Astroides calycularis*; *Calcinus tubularis*; *Caulerpa cylindracea*; *Caulerpa prolifera*; *Caulerpa taxifolia*; *Centrostephanus longispinus*; *Hacelia attenuata*; *Hermodice carunculata*;

Lophocladia lallemandii; *Ophidiaster ophidianus*; *Peltaster placenta*; *Pennaria disticha*; *Pseudochlorodesmis furcellata*). Queste ultime rappresentano il 19% della comunità bentonica di scogliera dell'Area Marina Protetta del Plemmirio (N=71) (Fig. 66).

Nell'AMP del Plemmirio sono stati osservati evidenti segnali degli effetti del cambiamento climatico dovuti alla presenza di specie aliene termofile, quali ad esempio l'alga rossa *Lophocladia lallemandii*, di origine tropicale, e l'alga verde *Caulerpa cylindracea*, di origine australiana. Questa seconda specie, in particolare, copre la quasi totalità dei fondali dai 20 m ai 40 m di profondità. Negli stessi habitat, inoltre, seppure con minore abbondanza, è stata rilevata la specie congenita *Caulerpa taxifolia*, anch'essa aliena e introdotta in Mediterraneo per cause antropiche. A queste due specie, in altre aree del Mediterraneo, è stata attribuita la scomparsa della specie nativa *Caulerpa prolifera*, che al Plemmirio è ancora presente seppur in minor quantità rispetto alle due specie aliene.

Nell'ambito dei monitoraggi sono state rilevate diverse altre specie termofile, sia native sia aliene (Fig. 67). Le specie native termofile sono, ovviamente, tipiche dell'Area Marina Protetta del Plemmirio, ma stanno diventando la componente dominante della comunità con il rischio di alterarne gli equilibri e creare effetti negativi sulla biodiversità di quest'area. Non essendo disponibili dati storici in letteratura che permettano il confronto nel tempo non è stato possibile definire la velocità della diffusione e l'entità dell'espansione di areale delle specie termofile. A questo proposito sono risultate preziose le osservazioni condivise dai biologi marini dell'AMP del Plemmirio. In particolare, per la specie *Hermodice carunculata* è stata rilevata negli ultimi anni una crescita esponenziale della popolazione, divenuta particolarmente abbondante negli strati più superficiali ma presente fino ai 40 m di profondità (Fig. 69). Per la specie *Sparisoma cretense* è stato rilevato un aumento del numero e della taglia degli individui (Fig. 70). Infine, nell'ambito delle attività di documentazione condotte da Giorgia Monti e Lorenzo Moscia (rispettivamente responsabile mare e video-operatore di Greenpeace) è stata per la prima volta avvistata, nell'Area Marina Protetta del Plemmirio, la specie aliena *Fistularia commersonii*, originaria del Mar Rosso che da qualche anno risulta presente nei mari siciliani.

Tabella 10. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'area dell'Area Marina Protetta del Plemmirio. Lo 'status' indica l'origine della specie che è distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

GROTTE DEL CAPO			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	15-20	3	N
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	30	2	N
<i>Astroides calycularis</i>	3-6	3	N
<i>Astroides calycularis</i>	10-13	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	15 - 30	3	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	15 - 30	1	N
<i>Caulerpa taxifolia</i>	30	1	A
<i>Hermodice carunculata</i>	12-29	3	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	30	1	A
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	12-24	2	N
<i>Pennaria disticha</i>	3	1	C
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	10-15	2	N
<i>Sparisoma cretense</i>	4-28	3	N
<i>Thalassoma pavo</i>	5-23	3	N
LINGUA DEL GIGANTE			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	25-34	2	N
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	38	1	N
<i>Astroides calycularis</i>	0-5	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10-12	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	20-25	3	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	25-38	2	N
<i>Caulerpa taxifolia</i>	30-38	2	A
<i>Hacelia attenuata</i>	15-20	1	N
<i>Hermodice carunculata</i>	30	1	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	15	3	N
<i>Mycteroperca rubra</i>	15-30	2	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	5-26	2	N
<i>Pennaria disticha</i>	2-8	2	C
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	2-15	3	N
<i>Sparisoma cretense</i>	3-34	3	N
<i>Thalassoma pavo</i>	9-30	3	N

SECCA DEL CAPO			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	16-29	3	N
<i>Astroides calycularis</i>	28	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	15-32	3	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	29	1	N
<i>Hermodice carunculata</i>	14-31	3	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	29	2	N
<i>Mycteroperca rubra</i>	15-20	2	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	14-32	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	14	1	N
<i>Sparisoma cretense</i>	14-25	2	N
<i>Thalassoma pavo</i>	14-31	3	N
TRE ANCORE			
specie	prof (m)	abbondanza	status
<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	18-32	2	N
<i>Astroides calycularis</i>	4	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	8-43	3	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	25-32	2	N
<i>Caulerpa taxifolia</i>	29	2	N
<i>Calcinus tubularis</i>	8	1	N
<i>Centrostephanus longispinus</i>	43	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	8-11	1	N
<i>Hermodice carunculata</i>	3-25	3	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	25-32	2	N
<i>Mycteroperca rubra</i>	15-20	2	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	3-43	3	N
<i>Peltaster placenta</i>	43	1	N
<i>Pennaria disticha</i>	1-4	2	C
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	1-11	2	N
<i>Sparisoma cretense</i>	5-30	3	N
<i>Thalassoma pavo</i>	4-29	3	N

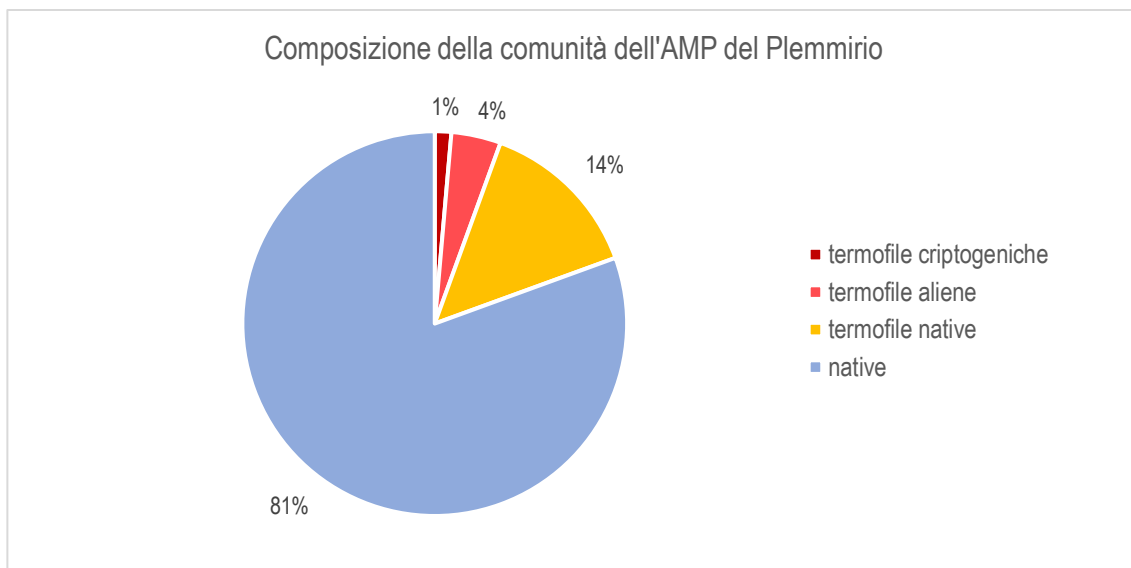


Figura 66. Composizione della comunità bentonica nell'Area Marina Protetta del Plemmirio.

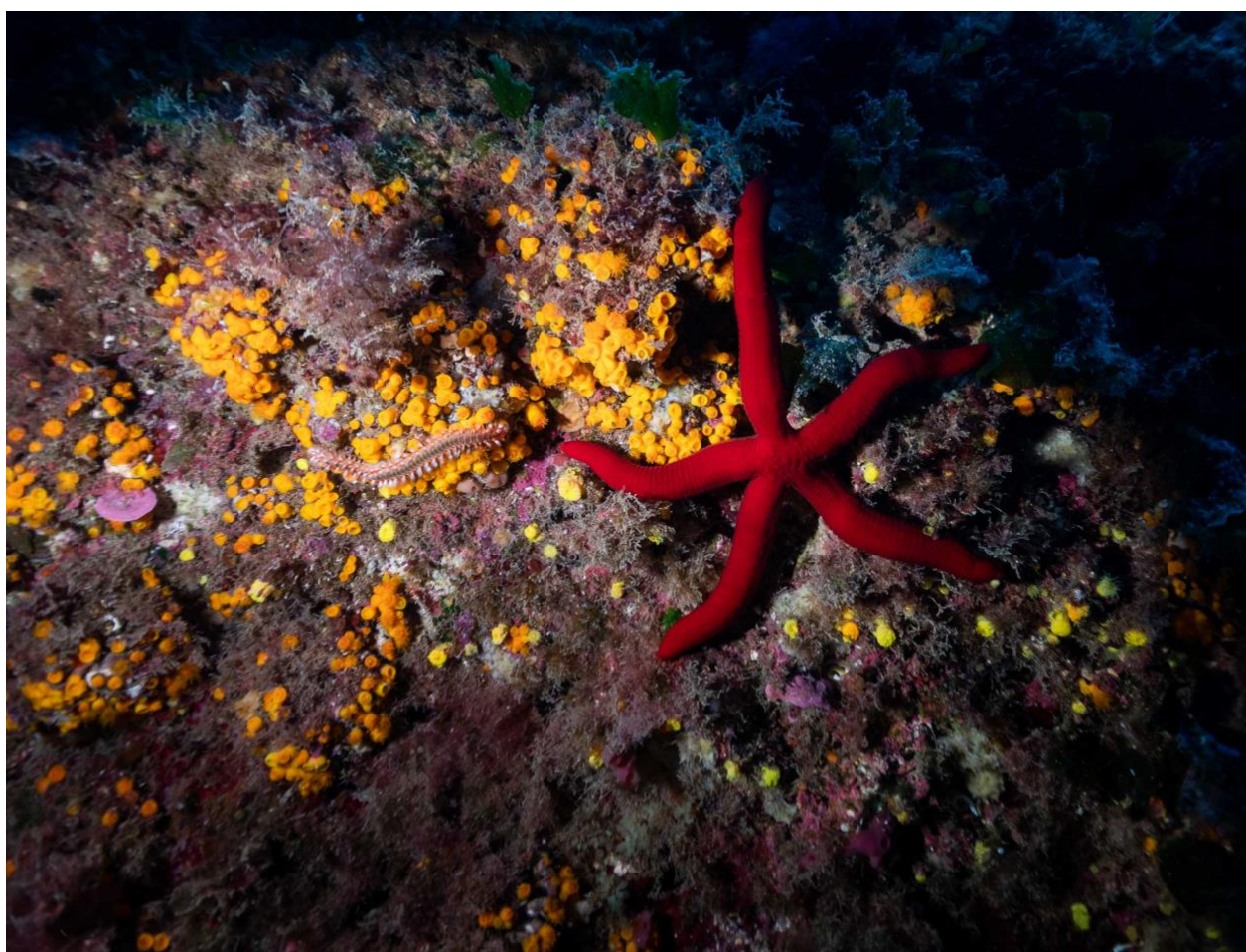


Figura 67. Tre specie termofile osservate nell'Area Marina Protetta del Plemmirio: *Astroides calycularis*, *Hermodice carunculata*, *Ophidiaster ophidianus*. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti per il progetto Mare Caldo.



Figura 68. Esemplari della specie termofila *Hermodice carunculata*, diventata particolarmente abbondante nell'Area Marina Protetta del Plemmirio. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti per il progetto Mare Caldo.

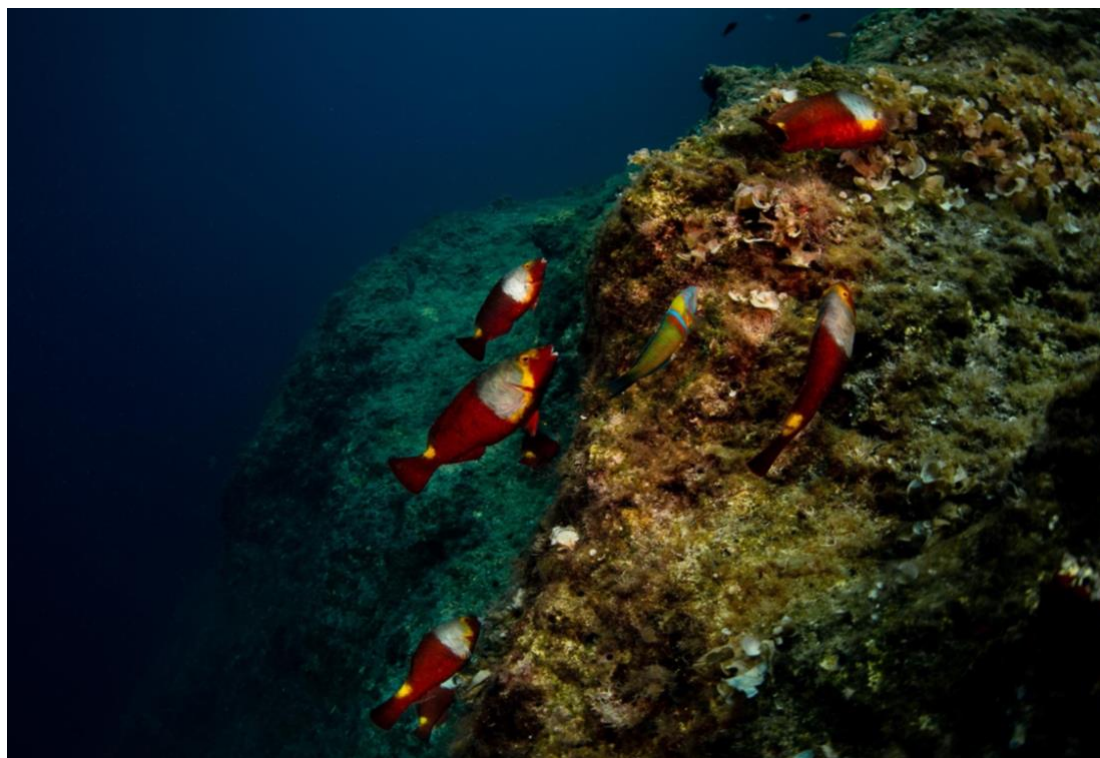


Figura 69. Esemplari della specie termofila *Sparisoma cretense*, diventata particolarmente abbondante nell'Area Marina Protetta del Plemmirio, tra i quali si osserva anche un esemplare della specie *Thalassoma pavo*. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti per il progetto Mare Caldo.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Coerentemente con gli studi che evidenziano un innalzamento della temperatura superficiale dell'acqua (SST) negli ultimi decenni in Mar Mediterraneo (von Schuckmann et al. 2019), le analisi condotte sui dati della NOAA hanno mostrato un significativo aumento delle temperature superficiali in tutte le aree di studio dagli anni '80 a oggi. I valori medi annui di SST variano coerentemente al gradiente latitudinale, con le temperature più basse registrate nell'Area Marina Protetta di Portofino (~16-16,5°C) e nell'Isola d'Elba (~16,5-17°C) e le temperature più alte registrate nell'Area Marina Protetta del Plemmirio (~19-20°C). Tuttavia, nelle tre aree di studio è stato osservato un analogo aumento di temperatura dal 1948 al 2020, evidenziando quindi un generale trend di aumento a scala nazionale.

Nonostante la SST rappresenti un parametro chiave nello studio del riscaldamento globale, non risulta tuttavia sufficiente per comprendere gli andamenti delle temperature che caratterizzano la colonna d'acqua (Ceccherelli et al. 2020). Tramite l'installazione dei *temperature data logger* nell'Area Marina Protetta di Portofino e nell'area dell'Isola d'Elba è stato possibile monitorare l'andamento della temperatura fino a 40 m di profondità. Nel corso dell'estate del 2020 entrambe le aree di studio sono state interessate da due ondate di calore: una più intensa a giugno e una più moderata ad agosto. In linea con le caratteristiche termiche del Mar Ligure, nell'Area Marina Protetta di Portofino si è verificato un riscaldamento della colonna d'acqua meno importante rispetto all'Isola d'Elba, dove invece il riscaldamento ha interessato le maggiori profondità e si è mantenuto più costante nel tempo. Nel corso delle due anomalie termiche i picchi di calore hanno coinvolto tutta la colonna d'acqua in entrambe le aree, evidenziando come il riscaldamento globale interessi non soltanto la temperatura superficiale dell'acqua ma anche quella a maggiori profondità.

Al fine di valutare quali siano gli effetti dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi di scogliera, nell'ambito del primo anno del progetto Mare Caldo sono state condotte attività di monitoraggio biologico in tutte le aree di studio. Le attività di rilevamento subacqueo tramite transetti bionomici, in particolare, hanno permesso di caratterizzare la struttura e la composizione delle comunità bentoniche di scogliera nelle tre aree di studio. Dal confronto tra le aree è emersa una differente composizione delle comunità bentoniche: nell'Area Marina Protetta del Plemmirio le comunità a tutte le profondità sono dominate dai popolamenti algali, mentre nell'Area Marina Protetta di Portofino e dell'area dell'Isola d'Elba le comunità a 30 e 40 m risultano dominate dai popolamenti a gorgonie.

Le aree a maggiore biodiversità sono l'Area Marina Protetta del Plemmirio (71 specie) e l'area dell'Isola d'Elba (70 specie), seguite dall'Area Marina Protetta di Portofino (38 specie). Questi valori si riflettono nei risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice di diversità di Shannon che ha mostrato un buono stato ecologico ($3 < H' < 4$) nell'Area Marina Protetta del Plemmirio e all'isola d'Elba, mentre un basso stato ecologico ($H' \sim 2,5$) nell'Area Marina Protetta di Portofino. L'indice di diversità di Simpson ha mostrato un alto valore di dominanza, e quindi una scarsa equitabilità tra le specie, per tutte le aree di studio. Il basso valore di diversità della comunità di Portofino e gli alti valori di dominanza in tutte le aree di

studio sono un'evidenza del fatto che le misure protezionistiche adottate su scala locale, quali ad esempio l'istituzione di aree marine protette, non siano purtroppo sufficienti al fine di mantenere un buono stato ecologico degli habitat marini, ma sono invece necessari anche piani di gestione a livello globale.

I rilevamenti condotti all'Isola di Pianosa hanno permesso di evidenziare come in quest'area l'eterogeneità, e quindi la biodiversità, degli ecosistemi di scogliera sia significativamente maggiore rispetto alla limitrofa area dell'Isola d'Elba. Questa differenza si osserva prevalentemente nel piano infralitorale dove i fondali dell'Isola di Pianosa sono dominati dalle alghe del genere *Sargassum* e *Cystoseira*. Questi popolamenti algali sono in grado di formare vere e proprie foreste sommerse che sono scomparse in diverse aree del Mediterraneo dove sono state sostituite da turf algale, considerato un indicatore di stato di degrado della comunità di scogliera (Peleg et al. 2020). Queste differenze tra le due aree sono coerenti con i risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice di Simpson che per l'Isola di Pianosa, in particolare a 10 m, ha mostrato, rispetto a tutte le altre aree di studio, i minori valori di dominanza e quindi una migliore equitabilità tra le specie. Il confronto con un'area definita 'pristine' com'è l'Isola di Pianosa, ha quindi permesso di dimostrare come le comunità protette, o comunque soggette a minori pressioni antropiche locali, siano più resilienti alle pressioni a scala globale come il cambiamento climatico.

Per comprendere l'entità dell'impatto del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini, un valido strumento è l'analisi delle serie storiche di dati (Gatti et al. 2015). Il confronto con i dati storici disponibili dagli anni '50 per l'Area Marina Protetta di Portofino e dagli anni '90 per l'area dell'Isola d'Elba ha permesso di valutare il cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera a fronte dell'aumento della temperatura registrato negli ultimi decenni.

Per l'Area Marina Protetta di Portofino, Gatti et al. (2017) avevano già evidenziato un cambiamento irreversibile nella struttura della comunità. In particolare, un primo cambiamento significativo si osservava tra la comunità degli anni '50 e la comunità degli anni '90. Un minore cambiamento era stato invece osservato tra la comunità degli anni '90 e la comunità degli anni 2010. Il confronto con i dati raccolti durante questi monitoraggi nel 2020 ha permesso di evidenziare un ulteriore significativo cambiamento dal 2010 ad oggi in entrambe le aree di studio. La traiettoria di cambiamento della struttura della comunità di Portofino ha un andamento coerente con quello dei valori di temperatura, con cambiamenti significativi nella comunità in corrispondenza dei due aumenti repentini di temperatura verificatisi tra gli anni '80 e '90 e intorno agli anni 2010.

Conseguenza diretta dell'aumento di temperatura è stato l'insediamento di specie termofile native un tempo confinate a maggiori latitudini, quali ad esempio *Pseudochlorodesmis furcellata* e *Tricleocarpa fragilis*. Di particolare rilevanza è risultata la presenza e l'espansione dell'alga aliena *Caulerpa cylindracea*. Questa specie è diventata dominante a Portofino, in particolare intorno ai 20 m di profondità, a fronte della riduzione delle specie native con una conseguente omogeneizzazione dell'ecosistema di scogliera (Morri et al. 2019). L'analisi dei dati di abbondanza degli organismi ha mostrato come in quest'area di

studio siano scomparse nei primi metri d'acqua le alghe strutturanti dei generi *Sargassum* e *Cystoseira*, e quindi tutte le foreste algali. Tra gli organismi strutturanti è stata osservata una significativa diminuzione anche per le specie *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis*, probabilmente a causa dell'innalzamento della temperatura e dei sempre più frequenti fenomeni mucilluginosi (Piazzi et al. 2018), evidenziando come il cambiamento in atto stia mettendo a rischio l'eterogeneità spaziale delle comunità di scogliera rocciosa.

Per l'area dell'Isola d'Elba questo studio rappresenta la prima analisi del cambiamento avvenuto nel tempo nella struttura e nella composizione della comunità bentonica delle scogliere rocciose, reso possibile grazie ai dati storici raccolti da Carlo Nike Bianchi e Carla Morri a partire dagli anni '90. Anche per quest'area sono stati osservati cambiamenti, probabilmente irreversibili, nella comunità bentonica delle fasce batimetriche più superficiali (10 e 20 m), mentre sembra esserci un ritorno verso la comunità iniziale alle maggiori profondità (40 m). A 30 m, invece, la comunità del 2010 appariva simile a quella degli anni '90, ma i dati del 2020 mostrano un nuovo cambiamento nella traiettoria temporale che la fa allontanare dallo stato iniziale. Futuri monitoraggi saranno quindi fondamentali per capire se anche per quest'area di studio il cambiamento in atto sarà da ritenersi irreversibile.

Nonostante non siano disponibili per l'Isola d'Elba dei dati storici risalenti agli anni '50, i rilevamenti condotti alla vicina Isola di Pianosa e l'andamento nel tempo osservato nell'Area Marina Protetta di Portofino fanno ipotizzare che un tempo anche all'Isola d'Elba le fasce batimetriche più superficiali fossero dominate da popolamenti algali strutturanti ormai completamente scomparsi. Come per l'Area Marina Protetta di Portofino, anche per quest'area un fattore di cambiamento importante potrebbe essere attribuito all'invasione dell'alga aliena *Caulerpa cylindracea* (Morri et al. 2019), divenuta abbondante a tutte le profondità, e alla diminuzione delle specie *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis*, praticamente scomparse entro i 20 m e significativamente ridotte tra i 20 e i 40 m di profondità a causa del riscaldamento globale. Un'altra importante causa di riduzione delle specie algali potrebbe essere l'aumento nei livelli d'inquinamento lungo la fascia costiera, che ha provocato una conseguente riduzione della qualità dell'acqua e la scomparsa delle specie più sensibili.

I cambiamenti osservati nell'Area Marina Protetta di Portofino e nell'area dell'Isola d'Elba, a fronte della diminuzione o della scomparsa di specie strutturanti e dell'arrivo e aumento di specie termofile, mostrano come l'aumento della temperatura sia diventato una forzante del cambiamento che incide profondamente sulla struttura delle comunità bentoniche di scogliera. In questo contesto, risulta quindi necessario il continuo monitoraggio delle morie di massa e della presenza delle specie termofile.

Durante le attività di monitoraggio condotte nel primo anno del progetto Mare Caldo, nelle tre aree di studio non sono stati rilevati eventi di morie di massa paragonabili a quelli degli anni '90. Tuttavia, in tutte le aree di studio sono stati osservati, per alcune specie target, fenomeni di sbiancamento o necrosi riconducibili all'effetto dell'aumento delle temperature. L'Area Marina Protetta di Portofino è l'area dove è stato registrato il minore impatto, sia per quanto riguarda le specie di gorgonie sia per le alghe calcaree. L'Isola d'Elba è invece l'area

dove si è osservato il maggiore impatto sulle gorgonie. In particolare, per le specie *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis*, il 20-30% delle colonie osservate mostravano segni di necrosi. Infine, l'Area Marina Protetta del Plemmirio è l'area dove è stato osservato il maggiore impatto sulle alghe calcaree che sono apparse notevolmente sbiancate. In quest'area è stato anche rilevato un forte impatto (22%) sulle colonie di briozoi, mai osservato nelle altre aree di studio.

A partire dagli anni '80-'90, a seguito del primo repentino aumento della temperatura superficiale dell'acqua, sono risultati sempre più frequenti gli eventi di morie di massa (Garrabou et al. 2009) anche a fronte dei fenomeni mucilluginosi (Piazzi et al. 2018). Nell'ambito dei monitoraggi condotti nel 2020, l'Isola d'Elba è l'area dove è stata osservata la maggiore quantità di mucillagine sul fondo e sugli organismi arborescenti. In tutte le stazioni monitorate, infatti, è stata osservata un'elevata percentuale di ricoprimento del fondo con mucillagine tra i 10 m e i 30 m di profondità dove, in alcuni casi, raggiungeva valori dell'80%. Anche nell'Area Marina Protetta di Portofino è stato osservato un valore simile di ricoprimento del fondo con mucillagine (70%), ma in uno solo dei tre siti indagati (i.e., Torretta). Nell'Area Marina del Plemmirio, a differenza delle altre aree di studio, non è mai stata osservata mucillagine sul fondo.

Grazie al confronto tra l'Isola d'Elba e l'Isola di Pianosa è stato possibile correlare la presenza di mucillagine alla moria osservata sulle gorgonie. A Pianosa, infatti, dove la mucillagine è rara o presente solo alle maggiori profondità e su un esiguo numero di colonie di gorgonie, la percentuale di colonie con segni di necrosi è del 2,4%, differentemente da quanto osservato all'Isola d'Elba che, come detto precedentemente, è risultata l'area con il maggiore livello di necrosi osservato. Oltre a essere un effetto diretto dell'innalzamento della temperatura (Danovaro et al. 2009), la presenza di mucillagine è in buona parte legata alla qualità dell'acqua e dell'ambiente in generale. Il confronto dei dati tra l'Isola d'Elba e l'Isola di Pianosa, ancora una volta, mostra quindi come gli habitat marini protetti a livello locale siano in grado di fronteggiare meglio i cambiamenti che avvengono a livello globale. Tuttavia, è anche da considerare che la diversa esposizione alle correnti e la conseguente diversa stratificazione delle masse d'acqua (Misic et al. 2011) potrebbe aver inciso sul diverso grado di ricoprimento e conseguente impatto della mucillagine nelle due aree di studio.

Infine, le attività di monitoraggio condotte sulle specie termofile hanno permesso di evidenziare un gradiente latitudinale coerente con i dati di temperatura. Nell'Area Marina Protetta del Plemmirio, più a sud e più vicina al Canale di Suez, è stato registrato il maggior numero di specie termofile, sia native sia aliene, che rappresentano il 19% delle specie componenti la comunità di scogliera. In quest'area le specie termofile native sono naturalmente presenti in abbondanza, ma l'esponenziale aumento osservato negli ultimi anni di alcune specie termofile, quali ad esempio *Caulerpa cylindracea*, *Caulerpa taxifolia*, *Hermodice carunculata* e *Sparisoma cretense*, rischia di alterare gli equilibri nella struttura della comunità bentonica di scogliera con conseguenti effetti negativi sulla biodiversità.

Un elevato numero di specie termofile è stato, più inaspettatamente, osservato anche all'Isola d'Elba, dove queste specie rappresentano il 13% della comunità bentonica di scogliera, e nell'Area Marina Protetta di Portofino, dove rappresentano l'8% della comunità. In queste due aree di studio la disponibilità di dati storici ha permesso di analizzare come siano cambiate, anche in termini di abbondanza, le specie termofile nel tempo. Queste specie non hanno mostrato un andamento di aumento o diminuzione costante nel tempo ma una generale variabilità temporale. Tuttavia, per l'ultimo periodo di studio (2020) i dati raccolti sono minori rispetto ai dati raccolti nei precedenti periodi, e saranno quindi necessari monitoraggi futuri per valutare l'evoluzione delle specie termofile a Portofino e all'Isola d'Elba.

In conclusione, i risultati del primo anno del progetto Mare Caldo mostrano come gli effetti del cambiamento climatico e delle anomalie termiche siano evidenti in tutte le aree di studio, indipendentemente dalla diversa localizzazione geografica, dalla diversa latitudine e dal diverso livello di conservazione. Rispetto ai valori medi di temperatura lungo la colonna d'acqua, all'intensità delle ondate di calore osservate nel mese di giugno 2020 a Portofino e all'Isola d'Elba, e alla presenza delle specie termofile è possibile osservare un chiaro gradiente latitudinale, ma è tuttavia evidente come questi fenomeni coinvolgano ormai anche le aree più a Nord e più fredde del Mar Mediterraneo. L'aumento costante di temperatura nel tempo sta seguendo un trend analogo in tutte le aree di studio. Il confronto dello stato ecologico delle comunità bentoniche e dei dati sulle morie di massa in aree a differente livello di protezione mostra come la mitigazione e la corretta gestione delle pressioni locali, anche grazie all'istituzione di Aree Marine Protette, rappresentino le migliori strategie per aumentare la resilienza degli ecosistemi marini costieri nei confronti delle pressioni globali. Tuttavia, pur essendo validi strumenti di conservazione, non sono sufficienti a contrastare gli effetti del cambiamento climatico, per i quali sono necessari anche interventi sinergici a livello globale. Grazie ai futuri monitoraggi delle temperature del mare e degli effetti del cambiamento climatico che saranno realizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo sarà possibile aumentare le nostre conoscenze su questo fenomeno globale, e la crescita della rete di aree coinvolte nel progetto Mare Caldo permetterà di valutare in maniera sinottica e comparativa come il Mar Mediterraneo, e le sue biocenosi marine, stiano rispondendo a tale cambiamento.

BIBLIOGRAFIA

- Alawad K.A., Al-Subhi A.M., Alsaafani M.A., Alraddadi T.M. (2020). Decadal variability and recent summer warming amplification of the sea surface temperature in the Red Sea. *PLoS One*, 15 (9): e0237436.
- 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. (2019a). Consequences of the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s on the Ligurian Sea biodiversity (NW Mediterranean). *The European Journal of Zoology*, 86 (1): 458-487.
- Bianchi C.N., Azzola A., Parravicini V., Peirano A., Morri C., Montefalcone M. (2019b). Abrupt change in a subtidal rocky reef community coincided with a rapid acceleration of sea water warming. *Diversity*, 11: 215.
- Bianchi C.N., Morri C., Chiantore M., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A. (2012). Mediterranean Sea biodiversity between the legacy from the past and a future of change. In: Noga Stambler (Ed.), *Life in the Mediterranean Sea: a look at habitat changes*. New York, Nova Science Publishers Inc.: p. 55.
- Bianchi C.N., Pronzato R., Cattaneo-Vietti R., Benedetti Cecchi L., Morri C., Pansini M., Chemello R., Milazzo M., Fraschetti S., Terlizzi A., Peirano A., Salvati E., Benzoni F., Calcinai B., Cerrano C., Bavestrello G. (2004). Hard bottoms. *Biologia Marina Mediterranea*, 11: 185-215
- Bortolotti V., Fazzuoli M., Pandeli E., Principi G., Babbini A., Corti S. (2001). Geology of central and eastern Elba Island, Italy. *Ofioliti*, 26 (2A): 97-150.
- Borzelli G.L.E., Gačić M., Cardin V., Civitarese G. (2009). Eastern Mediterranean Transient and reversal of the Ionian Sea circulation. *Geophysical Research Letters*, 36 (15).
- Ceccherelli G., Pinna F., Pansini A., Piazzzi L., La Manna G. (2020). The constraint of ignoring the subtidal water climatology in evaluating the changes of coralligenous reefs due to heating events. *Scientific Reports*, 10 (1): 1-13.
- Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C.N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C., Morri C., Picco P., Sara G., Schiaparelli S., Siccardi A., Sponga F. (2000). A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North- western Mediterranean), summer 1999. *Ecology Letters*, 3: 284-293.
- Danovaro R., Fonda Umani S., Pusceddu A. (2009). Climate change and the potential spreading of marine mucilage and microbial pathogens in the Mediterranean Sea. *PLoS One*, 4 (9): e7006.
- Essl F., Lenzner B., Bacher S., Bailey S., Capinha C., Daehler C., ..., Jeschke J.M. (2020). Drivers of future alien species impacts: An expert-based assessment. *Global Change Biology*, 26 (9): 4880-4893.
- Félix-Hackradt F.C., Sanchis-Martínez A.M., Hackradt C.W., Treviño-Otón J., García-Charton J.A. (2018). Distribution and ecological relations among the alien crab, *Percnon*

- gibbesi* (H. Milne-Edwards 1853) and autochthonous species, in and out of an SW Mediterranean MPA. *Hydrobiologia*, 806 (1): 187-201.
- Garrabou J., Coma R., Bensoussan N., Bally M., Chevaldonné P., Cigliano M., ..., Ledoux J.B. (2009). Mass mortality in North western Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology*, 15 (5): 1090-1103.
- Gatti G., Bianchi C.N., Montefalcone M., Venturini S., Diviacco G., Morri C. (2017). Observational information on a temperate reef community helps understanding the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s. *Marine Pollution Bulletin*, 114: 528-538.
- Gatti G., Bianchi C.N., Parravicini V., Rovere A., Peirano A., Montefalcone M., Massa F., Morri C. (2015). 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*, 10 (2): e0118581.
- Giuliani S., Virno Lamberti C., Sonni C., Pellegrini D. (2005). Mucilage impact on gorgonians in the Tyrrhenian sea. *Science of the Total Environment*, 353: 340-349.
- Guidetti P., Bianchi C.N., La Mesa G., Modena M., Morri C., Sara G., Vacchi M. (2002). Abundance and size structure of *Thalassoma pavo* (Pisces: Labridae) in the western Mediterranean Sea: variability at different spatial scales. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 82: 495-500.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. (2001). PaSt: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4: 4.
- Misic C., Schiaparelli S., Harriague A.C. (2011). Organic matter re cycling during a mucilage event and its influence on the surrounding environment (Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, 31 (6): 631-643.
- Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N., Bavestrello C., Piazzzi L. (2017). The two facets of species sensitivity: stress and disturbance on coralligenous assemblages in space and time. *Marine Pollution Bulletin*, 117: 229-238.
- Montefalcone M., Parravicini V., Bianchi C.N. (2011). Quantification of coastal ecosystem resilience. In: Wolanski E. and McLusky D.S. (Eds), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Waltham, Academic Press, 10 (3): 49-70.
- Morri C., Bianchi C.N., Di Camillo C.G., Ducarme F., Allison W.R., Bavestrello G., (2017). Global climate change and regional biotic responses: two hydrozoan tales. *Marine Biology Research*, 13 (5): 573-586.
- Morri C., Montefalcone M., Gatti G., Vassallo P., Paoli C., Bianchi C.N. (2019). An alien invader is the cause of homogenization in the recipient ecosystem: a simulation-like approach. *Diversity*, 11: 146.

- Pasolli L. (2011). Effetti della protezione sul popolamento ittico costiero dell'Area Marina Protetta "Plemmirio". Tesi di Laurea Magistrale in Biologia Marina, Facoltà di Scienze MM.FF.NN., Università degli Studi di Padova.
- Peleg O., Guy-Haim T., Yeruham E., Silverman J., Rilov G. (2020). Tropicalization may invert trophic state and carbon budget of shallow temperate rocky reefs. *Journal of Ecology*, 108 (3): 844-854.
- Piazzi L., Atzori F., Cadoni N., Cinti M.F., Frau F., Ceccherelli G. (2018). Benthic mucilage blooms tore apart coralligenous reefs. *Marine Environmental Research*, 140: 145-151.
- Pisano A., Marullo S., Artale V., Falcini F., Yang C., Leonelli F. E., Santolieri R., Buongiorno Nardelli B. (2020). New evidence of Mediterranean climate change and variability from Sea Surface Temperature observations. *Remote Sensing*, 12 (1): 132.
- Rivetti I., Frascchetti S., Lionello P., Zambianchi E., Boero F. (2014). Global warming and mass mortalities of benthic invertebrates in the Mediterranean Sea. *PLoS One*, 9 (12): e115655.
- Schiaparelli S., Castellano M., Povero P., Sartoni G., Cattaneo-Vietti R. (2007). A benthic mucilage event in North-Western Mediterranean Sea and its possible relationships with the summer 2003 European heatwave: short term effects on littoral rocky assemblages. *Marine Ecology*, 28: 341-353.
- Seebens H., Bacher S., Blackburn T. M., Capinha C., Dawson W., Dullinger S., ..., Jeschke J.M. (2020). Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050. *Global Change Biology*, in press.
- Skirris N., Sofianos S., Gkanasos A., Mantziafou A., Vervatis V., Axaopoulos P., Lascaratos A. (2012). Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, 62 (1): 13-30.
- T-MED Net, 2019. <http://www.t-mednet.org> (Accessed 1 November 2019).
- The MerMex Group: Durrieu de Madron X., Guieu C., Sempéré R., Conan P., Cossa D. et al. (2011). Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*, 91: 97-166.
- Tortonese E. (1958). Bionomia marina della regione costiera fra Punta della Chiappa e Portofino (Riviera Ligure di Levante). *Archivio di Oceanografia e Limnologia*, 11: 167-216.
- Turicchia E., Abbiati M., Sweet M., Ponti M. (2018). Mass mortality hits gorgonian forests at Montecristo Island. *Diseases of Aquatic Organisms*, 131: 79-85.
- Ventura D., Colloca F., Ardizzone G. (2019). Settlement evidence of the Mediterranean parrotfish *Sparisoma cretense* (Teleostei: Scaridae) in the Central Tyrrhenian Sea (Giglio Island, Italy). *BioInvasions Records*, 8 (2): 413-418.
- von Schuckmann K., Le Traon P., Smith N., Pascual A., Djavidnia S., et al. (2019). Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 3. *Journal of Operational Oceanography*, 12.

