



CONVENZIONE OPERATIVA NELL'AMBITO DEL PROGETTO "MARE CALDO" IN COLLABORAZIONE TRA DiSTAV, GREENPEACE E ELBATECH

RELAZIONE RELATIVA AL SESTO ANNO DI PROGETTO MARE CALDO (2024-2025)

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

A cura di

Annalisa Azzola, Giulia Cesarato, Monica Montefalcone, Riccardo Martellucci

Monica Montefalcone, Annalisa Azzola e Giulia Cesarato (DiSTAV, Università di Genova), hanno curato l'analisi dei dati relativi alle comunità bentoniche di scogliera rocciosa; Riccardo Martellucci (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS) ha curato l'analisi dei dati di temperatura.

DiSTAV, Dipartimento di Scienze della Terra dell'Ambiente e della Vita, Università degli Studi di Genova, Corso Europa 26, 16132 Genova

Genova, giugno 2026

INDICE	
PROGETTO MARE CALDO	2
PREMESSE: VARIABILITÀ TERMICA DELL'ANNO 2025	3
MATERIALI E METODI	6
AREE DI STUDIO	6
MONITORAGGI E ANALISI DEI DATI	19
Monitoraggio della temperatura nella colonna d'acqua	19
Monitoraggio degli ecosistemi di scogliera	21
Dati di temperatura superficiale dell'acqua (SST)	25
Dati di temperatura lungo la colonna d'acqua	25
Struttura e stato ecologico delle comunità	26
Mortalità	27
Specie termofile	27
Cambiamento nel tempo	27
RISULTATI	29
Temperatura superficiale dell'acqua (SST)	29
Wind-stress e temperatura lungo la colonna d'acqua	42
Struttura e stato ecologico delle comunità bentoniche	70
Monitoraggio delle morie di massa	77
Monitoraggio delle specie termofile	83
Cambiamento nel tempo	87
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	89
ALLEGATO I: il caso studio dell'Isola d'Elba	92
ALLEGATO II: monitoraggi tramite DNA ambientale	97
ALLEGATO III: confronto tra osservazioni in situ e modello numerico	99
BIBLIOGRAFIA	102

PROGETTO MARE CALDO

Il progetto Mare Caldo, in collaborazione tra il DiSTAV dell'Università di Genova e Greenpeace, si propone di sviluppare una rete costiera di stazioni di monitoraggio della temperatura della colonna d'acqua e degli effetti dei cambiamenti climatici nei mari italiani. La rete di quattordici stazioni, nata nel 2019 con l'installazione della prima stazione pilota presso la costa nord-occidentale dell'Isola d'Elba, include tredici Aree Marine Protette (AMP) aderenti al progetto, riportate di seguito in ordine latitudinale nord-sud: AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, AMP Isole Tremiti, AMP Secche di Tor Paterno, AMP Isola dell'Asinara, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara, AMP Isola di Ustica, AMP Capo Milazzo, e AMP Plemmirio.

Il progetto Mare Caldo prevede l'installazione di stazioni fisse per la registrazione in continuo delle temperature in mare a diverse profondità, secondo il protocollo proposto dal network mediterraneo T-MEDNet (<http://www.t-mednet.org>), piattaforma già esistente e costituita da diverse stazioni per la misurazione delle temperature nel Mediterraneo. Il progetto prevede inoltre 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 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 termoclino). Grazie ai dati così raccolti è possibile sviluppare uno studio comparativo tra le diverse aree in modo da aumentare le conoscenze relative ai mari che circondano la nostra penisola. Il progetto, infine, prevede nelle aree di studio la realizzazione di campagne di monitoraggio sulle biocenosi marine di scogliera per correlare gli andamenti delle temperature rilevate a specifici effetti e 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.

Nella presente relazione sono riportati i risultati degli andamenti delle temperature registrati dalle stazioni della rete nel 2024-2025 e i risultati relativi all'analisi delle comunità bentoniche di scogliera rocciosa, monitorate nel sesto anno di progetto Mare Caldo (2025), all'Isola d'Elba, nell'AMP Isola dell'Asinara e nell'AMP Torre Guaceto.

PREMESSE: VARIABILITÀ TERMICA DELL'ANNO 2025

Nel 2025 il sistema climatico globale è rimasto in condizioni eccezionalmente calde, pur senza raggiungere i record assoluti del 2024. Secondo il *Copernicus Climate Change Service* (DOI: doi.org/10.24381/b3nm-p354), il 2025 è stato il terzo anno più caldo mai registrato a scala globale, con una temperatura media di 14,97°C, pari a +0,59°C rispetto al periodo 1991–2020 e a +1,48°C rispetto al livello preindustriale (Fig. 1). Anche l'Europa ha registrato il terzo anno più caldo della serie, con una temperatura media di 10,41°C e un'anomalia di +1,17°C rispetto alla climatologia recente. Le temperature superficiali del mare (*Sea Surface Temperature*, SST) sono rimaste anch'esse molto elevate: la SST media degli oceani extra-polari ha raggiunto 20,73°C, corrispondente al terzo valore più alto mai osservato, confermando la persistenza di un forte segnale di riscaldamento marino anche dopo gli estremi osservati nel biennio precedente.

Nel corso dell'anno sono stati registrati numerosi eventi estremi, il report evidenzia infatti che l'Europa è stata interessata da molteplici ondate di calore marine (*Marine Heat Waves*, MHW) tra aprile e settembre, con effetti particolarmente evidenti anche in Italia.

Nel Mediterraneo, il 2025 si inserisce quindi in una fase ancora fortemente caratterizzata da anomalie termiche diffuse e persistenti. Gli indici annuali di MHW mostrano che gran parte del bacino è stato interessato da un numero elevato di giorni di MHW, con vaste aree del Mediterraneo occidentale e centrale che raggiungono valori molto elevati, in molti casi superiori a circa 100–150 giorni e localmente anche oltre 200 giorni (Fig. 2). Questo indica che le MHW non sono stati fenomeni episodici e isolati, ma una componente estesa della variabilità termica annuale del bacino (Juza, 2026).

Anche l'intensità media delle MHW appare diffusamente elevata su gran parte del Mediterraneo. Le figure mostrano valori generalmente compresi tra circa 1,5 e 2,5°C sopra la climatologia, con aree localmente ancora più intense nel Mediterraneo occidentale, nell'Adriatico settentrionale e in alcuni settori del bacino orientale. Parallelamente, la mappa della durata media evidenzia che molti settori del Mediterraneo centrale e occidentale sono stati interessati da episodi persistenti, spesso della durata di diverse settimane. Nel complesso, emerge quindi un Mediterraneo ampiamente coinvolto da condizioni di stress termico marino, caratterizzate non solo da elevata frequenza, ma anche da una significativa persistenza e da intensità moderate o elevate.

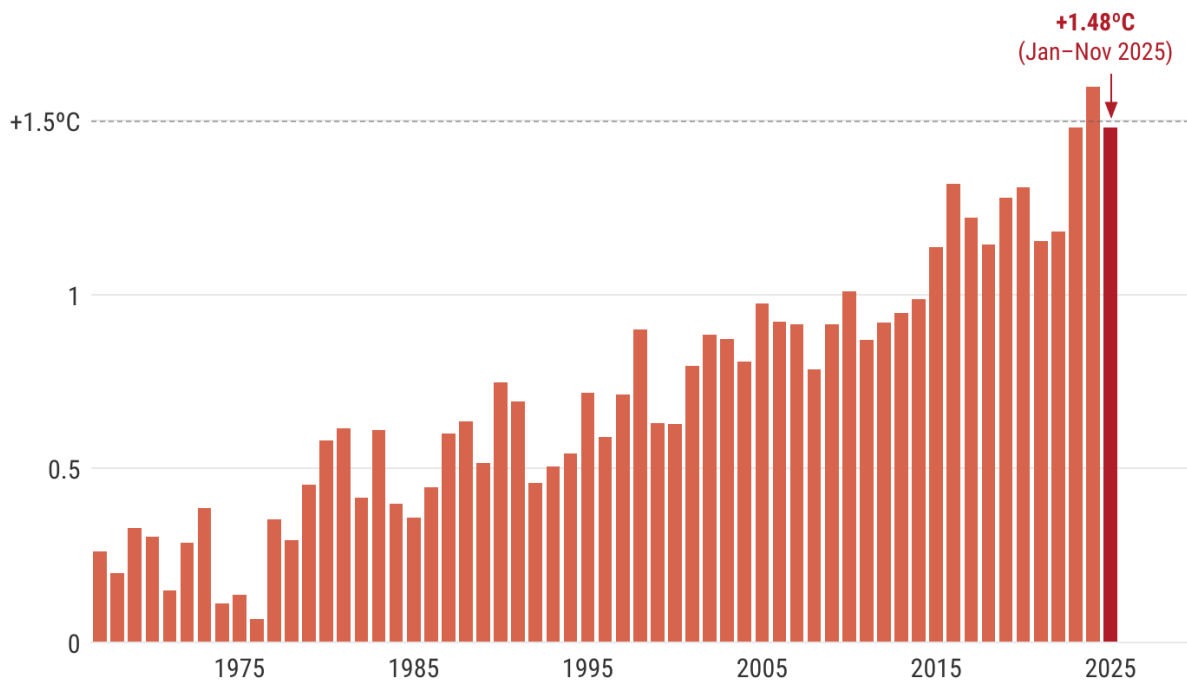
In questo contesto regionale, il quadro osservato nelle AMP italiane nel 2025 risulta pienamente coerente con il segnale Mediterraneo. Le serie analizzate mostrano infatti una diffusa presenza di MHW, spesso già a partire dalla fine dell'inverno o dalla primavera,

con una chiara intensificazione tra giugno e luglio, fase in cui in molte aree si concentrano gli eventi più lunghi e intensi.



2025 currently tied with 2023 for second-warmest year

Annual global surface air temperature increase above the pre-industrial level



Data: ERA5 • Reference period: 1850–1900 • Credit: C3S/ECMWF



PROGRAMME OF
THE EUROPEAN UNION



IMPLEMENTED BY



Figura 1. Aumento della temperatura dell'aria superficiale globale (°C) rispetto alla media del periodo di riferimento preindustriale 1850–1900, basato su diversi dataset globali di temperatura, mostrato come media annuale dal 1967. Crediti: C3S/ECMWF.

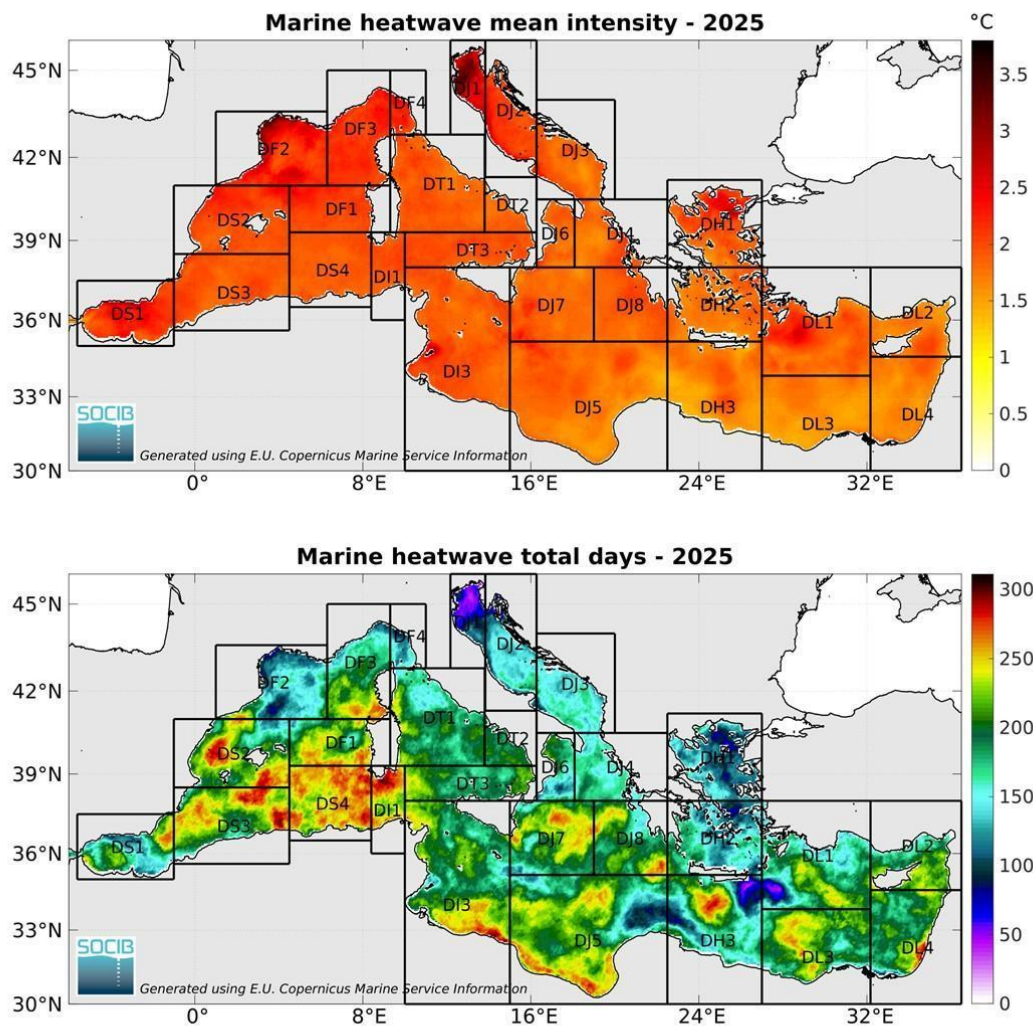


Figura 2. Intensità massima (°C) e durata (giorni) della MHW nel 2025 (Juza, 2026)

MATERIALI E METODI

AREE DI STUDIO

Nel corso del sesto anno del progetto Mare Caldo (2024-2025) sono stati analizzati i dati di temperatura registrati dai *temperature data logger* nelle quattordici aree situate a diverse latitudini (da nord verso sud): AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Isole Tremiti, AMP Secche di Tor Paterno, AMP Isola dell'Asinara, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara, AMP Isola di Ustica, AMP Capo Milazzo, e AMP Plemmirio (Fig. 3).

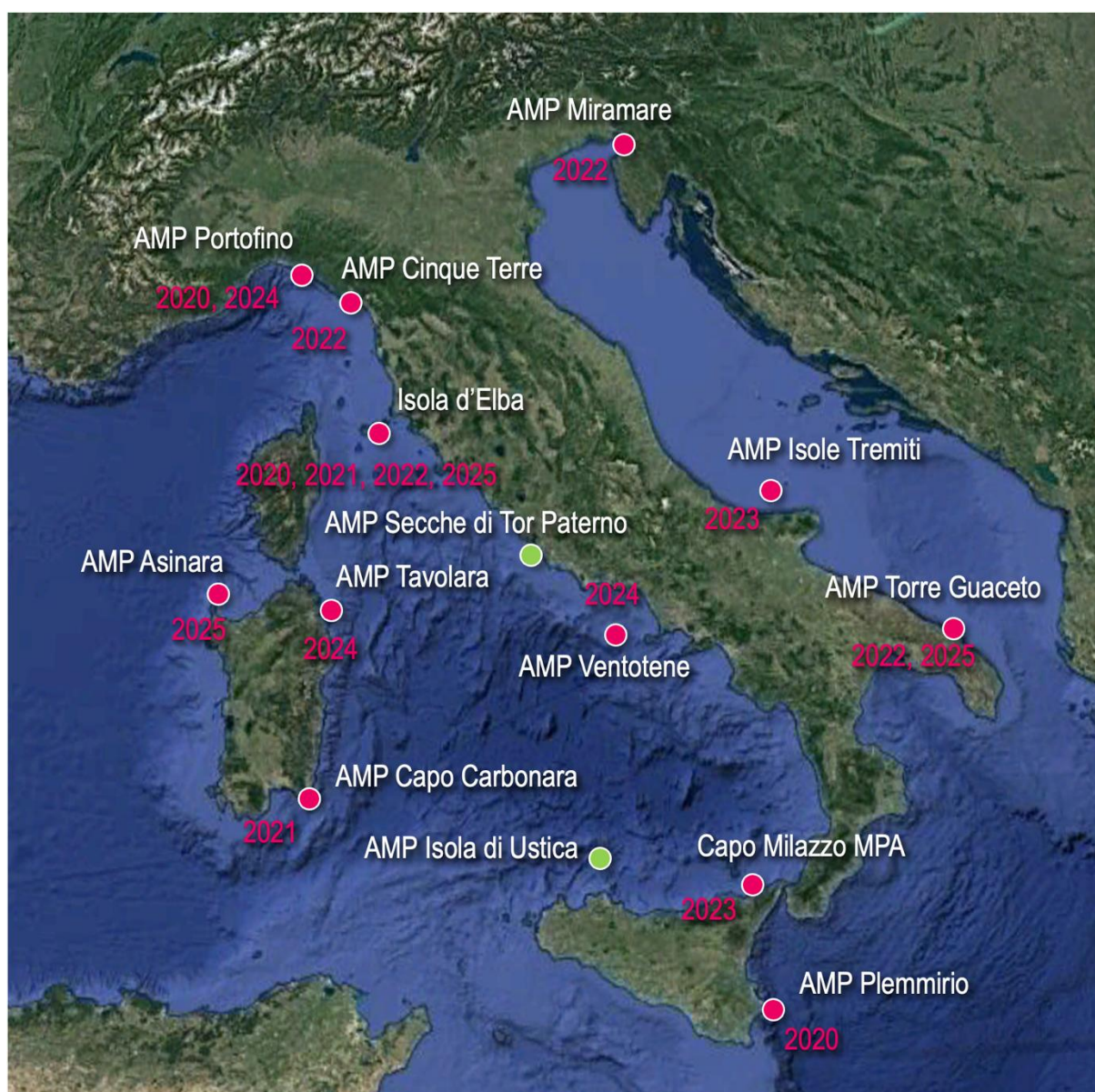


Figura 3. Mappa delle aree di studio comprendenti la stazione pilota dell'Isola d'Elba e le 13 aree marine protette (AMP) aderenti al progetto Mare Caldo. In rosso le stazioni dove, oltre al monitoraggio delle temperature, sono stati condotti monitoraggi biologici nei sei anni di progetto; in verde le aree dove i rilevamenti sulle comunità bentoniche sono ancora da svolgere.

AMP Miramare

L'AMP Miramare (Fig. 4) nasce nel 1973 inizialmente come Parco Marino, in concessione demaniale dalla Capitaneria di Porto di Trieste al WWF Italia, e istituita poi come area marina protetta con il Decreto Interministeriale del 12 novembre 1986. L'AMP ha un'estensione di 30 ettari sottoposti a protezione integrale e 90 ettari di zona cuscinetto, istituita nel 1995 da un'ordinanza della Capitaneria di Porto (www.ampmiramare.it).

Dal punto di vista geomorfologico l'AMP presenta ambienti di marea, ambienti detritici, ambienti di scogliera e fondali sabbiosi e fangosi.



Figura 4. Carta dell'AMP Miramare dove è evidenziata la zona a protezione integrale (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Portofino

L'AMP Portofino (Fig. 5), 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, si sviluppa per circa 13 km costieri lungo tutto il promontorio di Portofino per un totale di 372 ettari di mare che dividono il Golfo del Tigullio dal Golfo Paradiso (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 costa è caratterizzata da falesie che proseguono verticalmente sott'acqua finendo su fondali detritici.

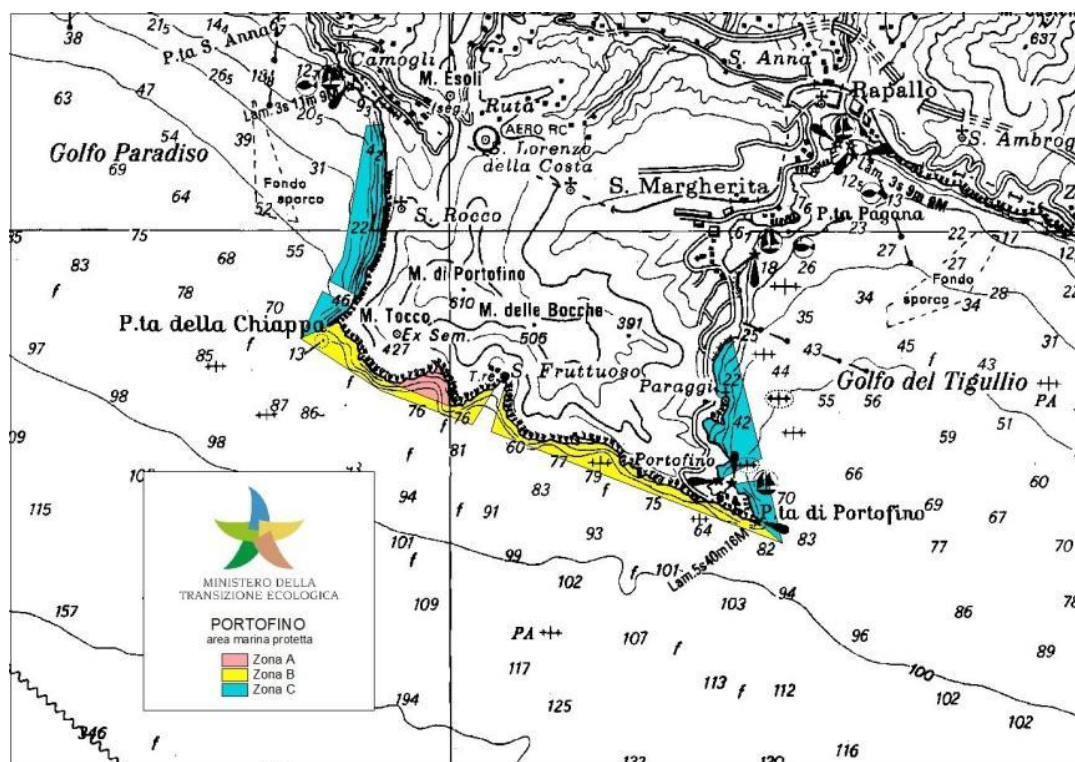


Figura 5. Carta dell'AMP Portofino dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Cinque Terre

L'AMP Cinque Terre (Fig. 6), gestita dall'Ente parco nazionale delle Cinque Terre, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 12 dicembre 1997 in riferimento alle due leggi nazionali: Disposizioni per la difesa del mare (n. 979 del 31 dicembre 1982) e Legge Quadro sulle Aree Protette (n. 394 del 6 dicembre 1991).

L'AMP delle Cinque Terre comprende i Comuni di Riomaggiore, Vernazza, Monterosso e per una piccola porzione Levanto, per un totale di 19 km costieri. L'area ricopre 4591 ha di mare, facenti parte di un unico golfo che si estende da Punta Mesco a est, a Punta Pineda a ovest, poco oltre Capo Montenero (www.parconazionale5terre.it).

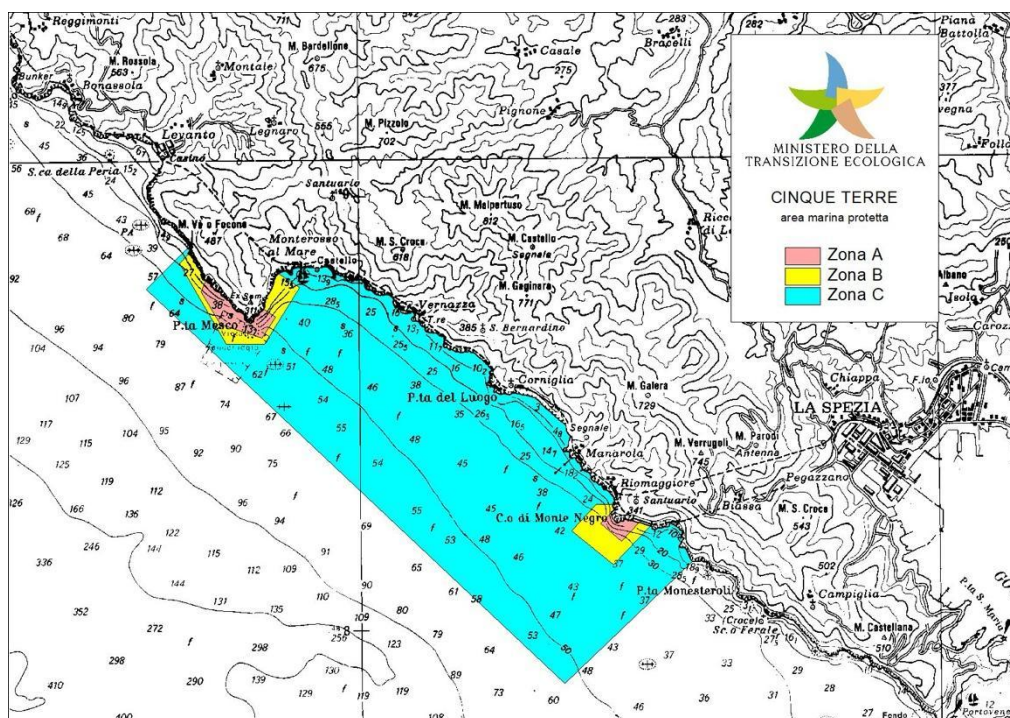


Figura 6. Carta dell'AMP Cinque Terre dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

Isola d'Elba

L'isola d'Elba fa parte del Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano, istituito con il decreto del Presidente della Repubblica il 22 luglio 1996. Il parco comprende tutte le sette isole principali dell'Arcipelago Toscano (Elba, Capraia, Gorgona, Pianosa, Montecristo, Giglio e Giannutri) e alcune isole minori 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 e le acque costiere non rientrano nel perimetro del Parco Nazionale.

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. 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.

AMP Isole Tremiti

L'AMP Isole Tremiti (Fig. 7) è stata istituita nel 1989, con D.I. del 14.07.1989 inizialmente come "Riserva Naturale marina Isole Tremiti". La gestione della Riserva, con l'istituzione del Parco Nazionale del Gargano avvenuta nel 1991, è passata all'Ente Parco Nazionale del Gargano. Con Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica viene istituita la "Commissione di Riserva dell'Area Marina protetta Isole Tremiti". La Commissione ha durata di quattro anni. La Commissione istituita con Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare n. 178 del 11/05/2018 è scaduta nel 2022. Resta in carica il Prof. Angelo Tursi (Rappresentante designato dal Ministro

dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare con Decreto n. 31 del 25/01/2021) con funzioni di Presidente (www.parcogargano.it).

L'AMP Isole Tremiti ha un'estensione di 1466 ha, ed è localizzato a circa 12 miglia a Nord del promontorio del Gargano. L'arcipelago è costituito da tre isole maggiori: S. Domino, S. Nicola e Caprara, da un isolotto posto fra le tre isole denominato il Cretaccio ed infine da un'isola minore, localizzata a distanza di circa 12 miglia in direzione NE dalle prime tre e ad oltre 30 miglia dalla costa garganica, denominata Pianosa (www.parcogargano.it).

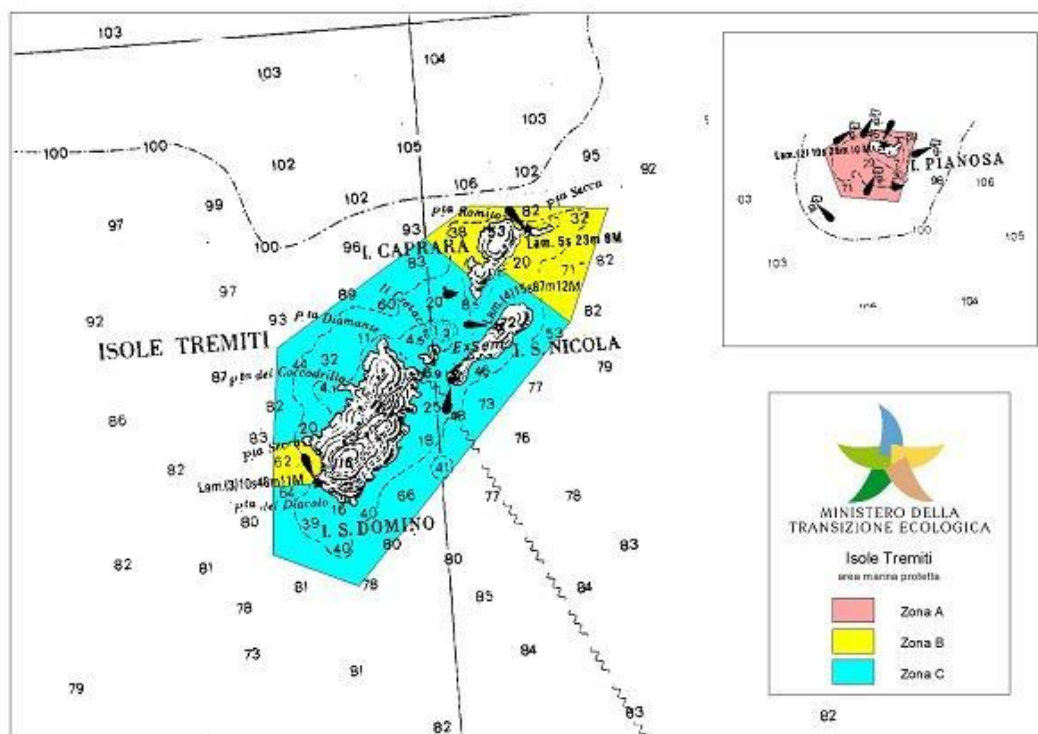


Figura 7. Carta dell'AMP Isole Tremiti dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Secche di Tor Paterno

L'AMP Secche di Tor Paterno (Fig. 8), gestita dall'Ente Regionale RomaNatura, è stata istituita nel dicembre 2000 dal Ministero dell'Ambiente. A livello amministrativo risulta facente parte del comune di Roma e si trova tra le 4 e le 7 miglia nautiche dalle spiagge di Ostia e di Torvaianica.

La misura di protezione include un'unica zona B di 1387 ha e racchiude al suo interno un affioramento di rocce sedimentarie (Pietraforte) che raggiunge i 18 m di profondità, elevandosi da un fondale sabbio-fangoso a 50-60 m di profondità. (www.ampsecchetorpaterno.it).

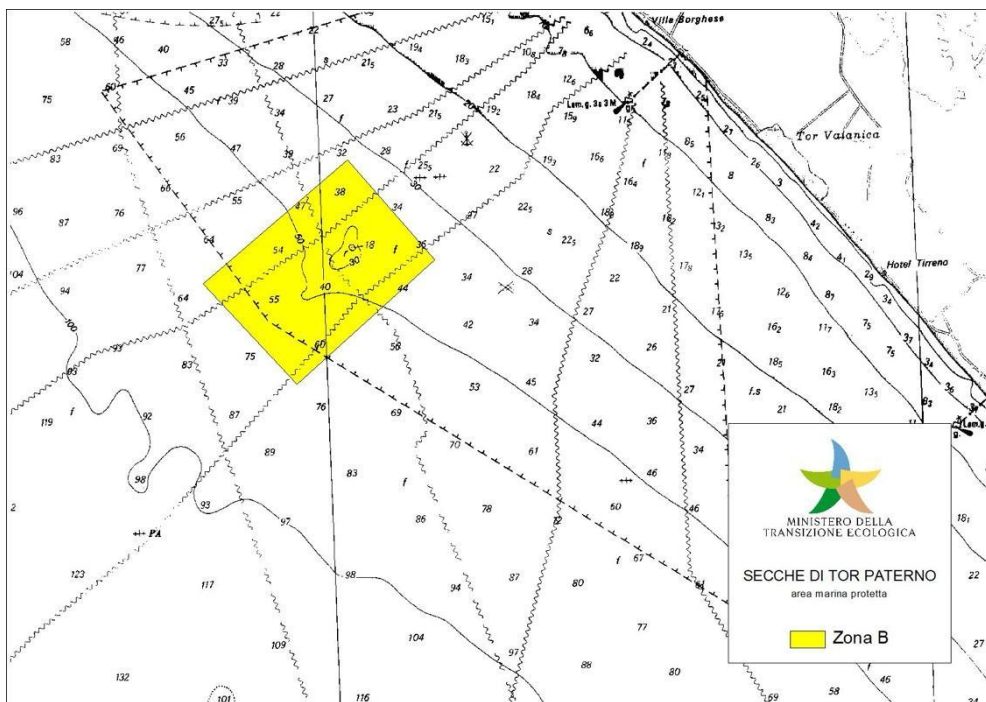


Figura 8. Carta dell'AMP Secche di Tor Paterno con la zona di tutela B in evidenza (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isola dell'Asinara

L'AMP Isola dell'Asinara (Fig. 9) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente con Decreto Ministeriale 13 agosto 2002 (GU n. 298 del 20 dicembre 2002). L'AMP si trova di fronte alla Punta di Capo Falcone, a nord-ovest della Sardegna tra Punta Salippa e Punta Scorno, e ha un'estensione totale di 10.732 ettari che coinvolgono 108 km di costa. L'AMP fa parte del territorio del Comune di Porto Torres ma comprende anche i comuni di Stintino, Sassari e Sorso.

Dal punto di vista geomorfologico, il versante occidentale è caratterizzato da ripidi pendii che continuano nella parte sommersa fino a 50 m. La morfologia del fondo marino è costituita da falesie ricche di anfratti, canali e spaccature. Il versante orientale, invece, è caratterizzato da coste basse. Il fondo qui è costituito prevalentemente da un basamento formato da scisti e attraversati da filoni, vene di quarzo e da substrati incoerenti formati da sabbie grossolane di detrito organogeno, da cui emergono frequentemente grossi affioramenti rocciosi (www.parcoasinara.org).

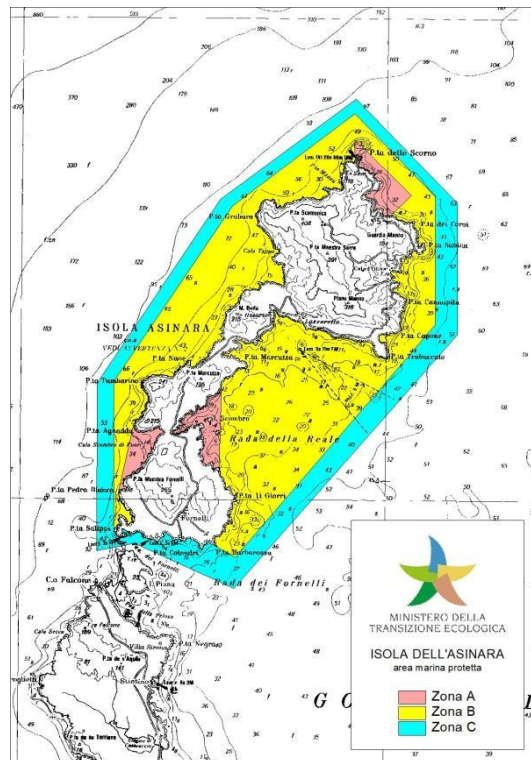


Figura 9. Carta dell'AMP Isola dell'Asinara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

L'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (Fig. 10) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente nel 1997 con Decreto Ministeriale del 12 Dicembre, in seguito modificato con Decreto Ministeriale del 28 Novembre 2001. L'AMP si estende lungo la costa nord-orientale della Sardegna, da Capo Ceraso fino a Cala Finocchio, e comprende le isole di Tavolara, Molara e Molarotto per un'estensione totale di circa 15.000 ettari di mare. La gestione è affidata dal 01.01.2004 ad un Consorzio costituito fra i Comuni di Olbia, Loiri Porto San Paolo e San Teodoro (www.amptavolara.com).

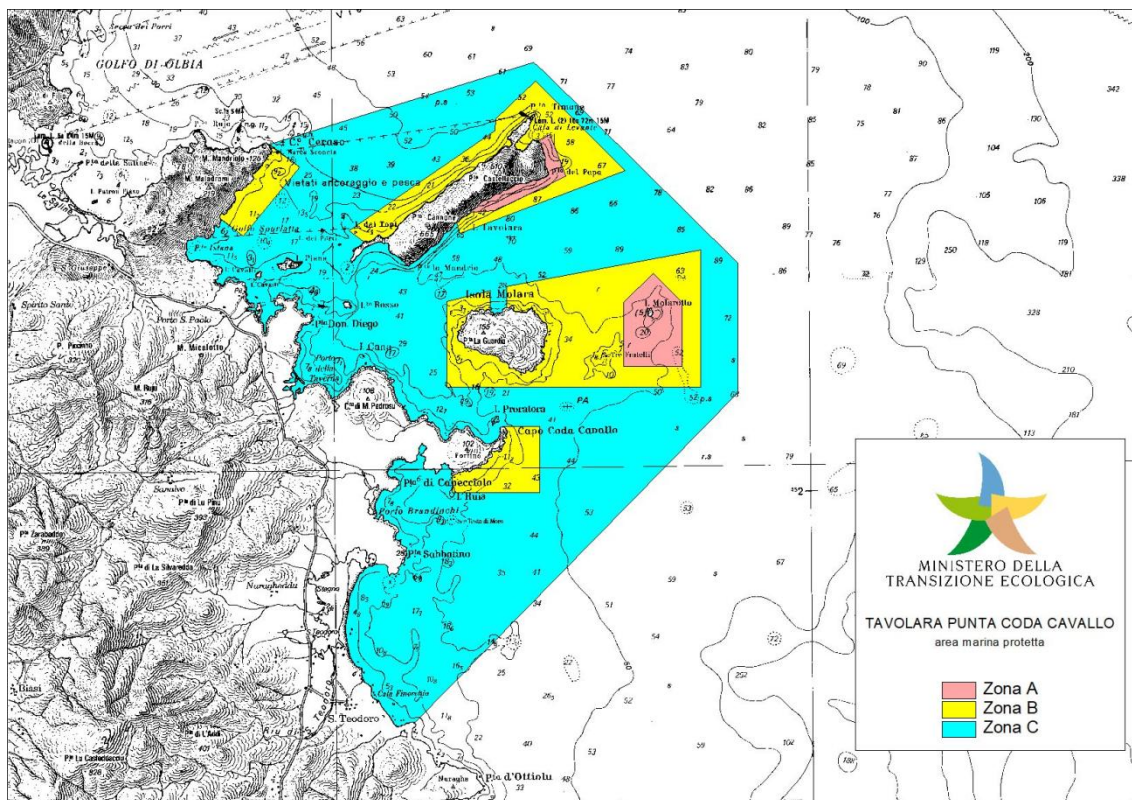


Figura 10. Carta dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

L'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Fig. 11) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente nel 1999 con il Decreto Ministeriale del 12 dicembre 1997 (G.U. n. 190 del 14.08.1999). L'AMP ricade nel territorio della provincia di Latina in Lazio, e comprende le Isole di Ventotene e Santo Stefano per un'estensione totale di 2.799 ettari.

A differenza delle altre isole facenti parte dell'Arcipelago delle Pontine, le isole di Ventotene e Santo Stefano sono geologicamente più recenti e formate da differenti tipi di rocce dovute a un tipo di magmatismo più basico. L'Isola di Ventotene, in particolare, è caratterizzata da falesie verticali, promontori, e lingue di basalto nero originati dall'erosione marina dei depositi vulcanici (www.riservaventotene.it).

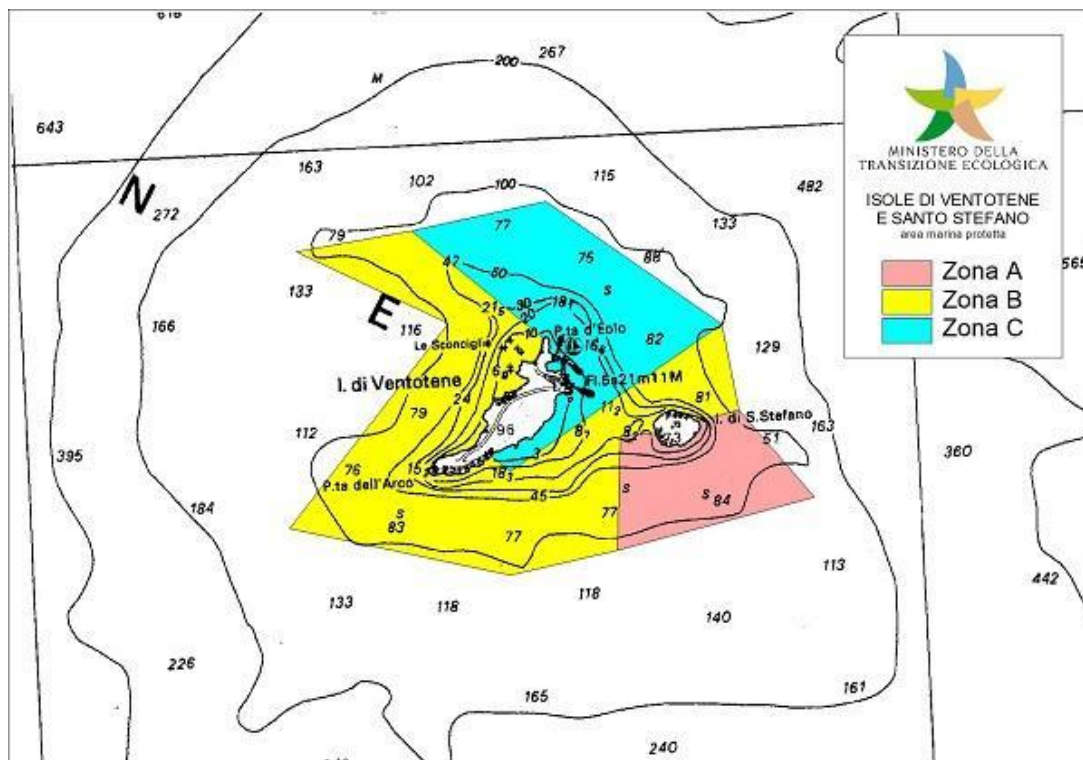


Figura 11. Carta dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Torre Guaceto

L'AMP di Torre Guaceto (Fig. 12) è stata istituita con Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del 04 febbraio 2000 (G.U. n. 124 del 30/05/2000) con l'obiettivo di gestire sia un'area terrestre sia marina. Ad oggi è gestita dal consorzio comprendente i comuni di Brindisi e Carovigno e l'Associazione Italiana per il WWF for Nature Onlus. L'AMP si estende per circa 2.200 ettari fino alla linea batimetrica dei 50 m, interessando un tratto di costa di 8 Km, compreso tra Punta Penna Grossa e gli scogli di Apani (www.riservaditorreguaceto.it).

Dal punto di vista geomorfologico l'area di Torre Guaceto ha formazione calcarea e calcareo dolomitica di età cretacea. A causa dell'alternanza di fondali sabbiosi e rocciosi l'AMP comprende diversi habitat tra i quali l'habitat degli ambienti di marea, delle scogliere marittime, delle spiagge ghiaiose e delle acque stagnanti.

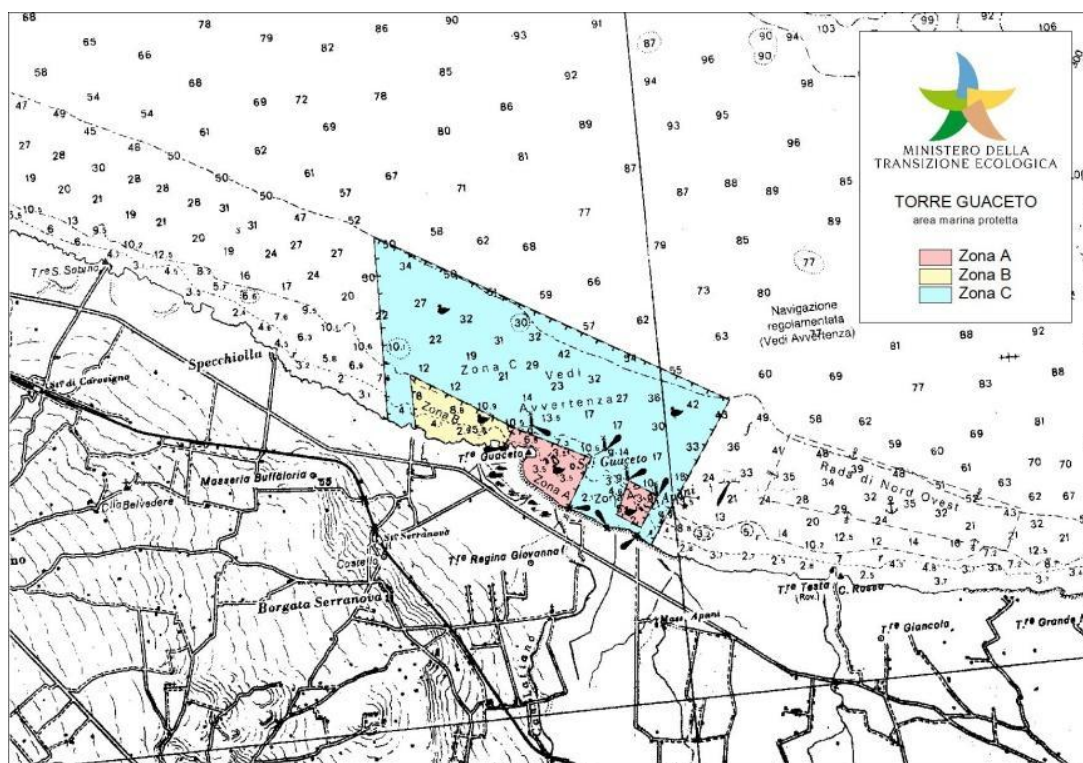


Figura 12. Carta dell'AMP Torre Guaceto dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Capo Carbonara

L'AMP Capo Carbonara (Fig. 13) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente con Decreto Ministeriale del 15 settembre 1998, poi modificato nel 1999 e sostituito integralmente dal Decreto Ministeriale del 7 febbraio 2012 (Gazzetta Ufficiale n. 113 del 16 maggio 2012). L'AMP è situata a sud-est della Sardegna ed è delimitata a ovest da Capo Boi e a est da Punta Porceddus, nella zona di mare antistante l'Isola di Serpentara. L'area ricopre 14.360 ettari, suddivisi in due ampie baie dal promontorio granitico di Capo Carbonara. L'AMP comprende inoltre l'Isola dei Cavoli e l'Isola di Serpentara e ha un'estensione costiera di 42 km, di cui 7 km di costa sabbiosa, 25 km di costa rocciosa 'continentale' e 10 km di costa rocciosa 'insulare' (Isola dei Cavoli, Isola di Serpentara e numerosi scogli minori) (www.ampcapocarbonara.it).

Da un punto di vista geomorfologico la linea di costa è caratterizzata da promontori, costituiti per lo più da graniti e granodioriti. Il paesaggio sommerso dell'Area Marina Protetta Capo Carbonara è caratterizzato da rocce granitiche, che formano pinnacoli e bastioni, e da rocce magmatiche alternate a sistemi sabbiosi.

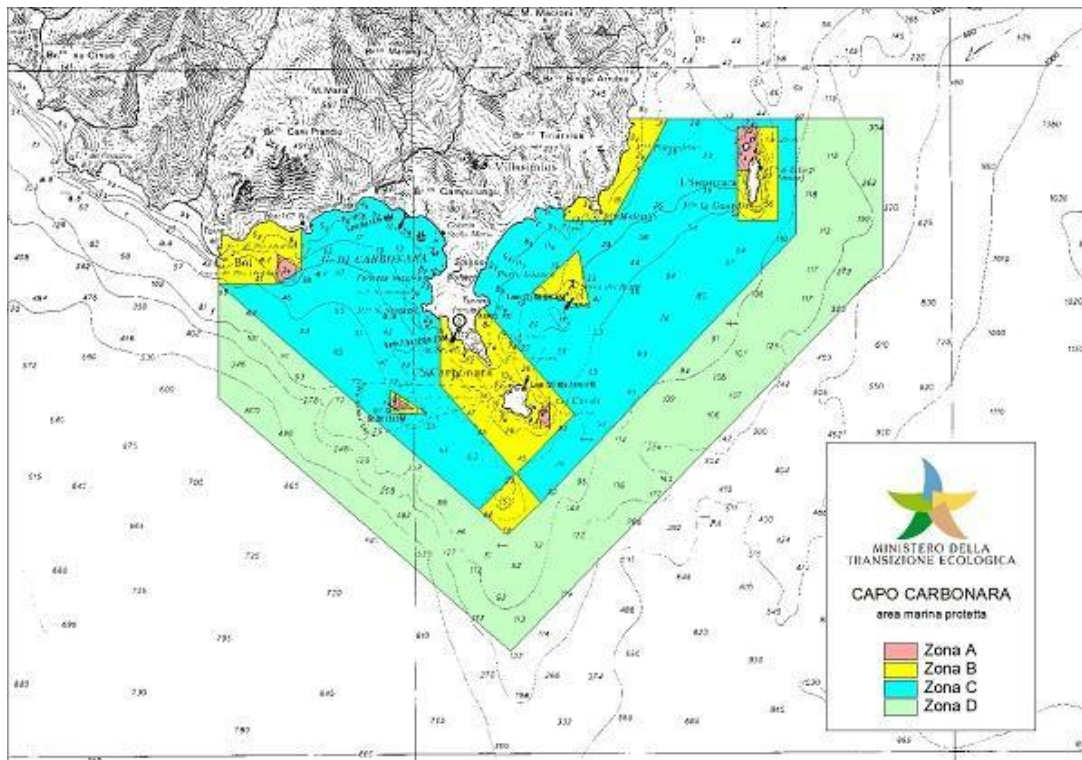


Figura 13. Carta dell'AMP Capo Carbonara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isola di Ustica

L'AMP Isola di Ustica (Fig. 14), gestita dal Comune di Ustica, è stata istituita con Decreto Ministeriale del 12 novembre 1986, ed è la prima area marina protetta istituita in Italia. Il regolamento di organizzazione dell'AMP, tuttora vigente, è stato approvato il 30 agosto 1990. L'AMP circonda i 14,45 km di costa dell'isola e si estende per un totale di 15.951 ha di fondale marino. Le acque dell'AMP sono suddivise in tre zone caratterizzate da differenti livelli di tutela: i) la zona A (riserva integrale) è antistante Cala Sidoti e delimitata da cinque boe gialle; ii) la zona B (riserva generale) comprende il versante nord-occidentale dell'isola e si estende da Punta Cavazzi a Punta Omo Morto; iii) la zona C (riserva parziale) si estende nel versante sud-orientale. I "Fondali di Ustica" sono inoltre riconosciuti [sito di interesse comunitario](#) della [Rete Natura 2000](#) (cod. SIC ITA020046). All'interno dell'AMP vivono e si incontrano numerose specie di interesse ecologico e conservazionistico tra cui *Posidonia oceanica*, cernia bruna, tonni, ricciole, dentici, barracuda, occhiate, nonché polpi e aragoste (<https://www.mite.gov.it>, <http://www.ampustica.it/it/index.asp>).

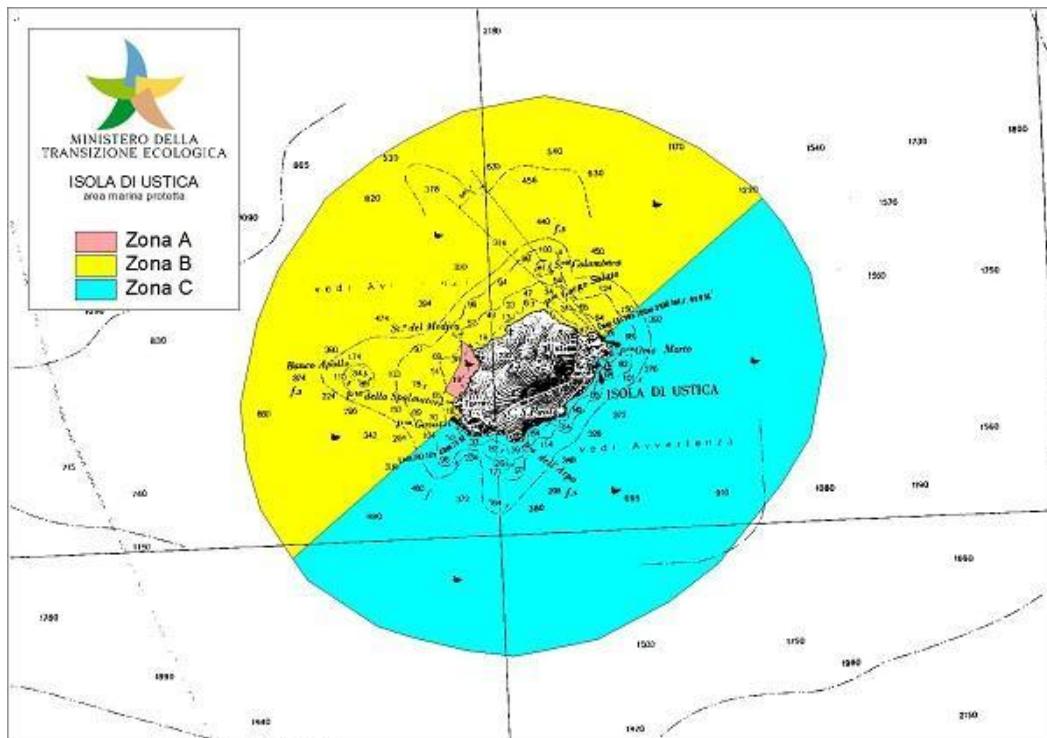


Figura 14. Carta dell'AMP Isola di Ustica dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Capo Milazzo

L'AMP Capo Milazzo (Fig. 15), gestita dal Consorzio di Gestione dell'Area Marina Protetta Capo Milazzo composto dal Comune di Milazzo, dall'Università degli Studi di Messina e dall'Associazione Ambientalista Marevivo onlus, è stata istituita con il Decreto 17 maggio 2018 (GU n.55 del 6 marzo 2019). Ha un'estensione di 755 ettari che interessano 5.670 m di costa.

Da un punto di vista geologico il promontorio dell'AMP Capo Milazzo presenta insenature, cale e grotte che si susseguono tra ricchi giacimenti fossiliferi. I fondali sono caratterizzati dalla presenza di foreste animali formate da gorgonie bianche, gialle e rosse, e dalle praterie di *Posidonia oceanica* (www.ampcapomilazzo.it).

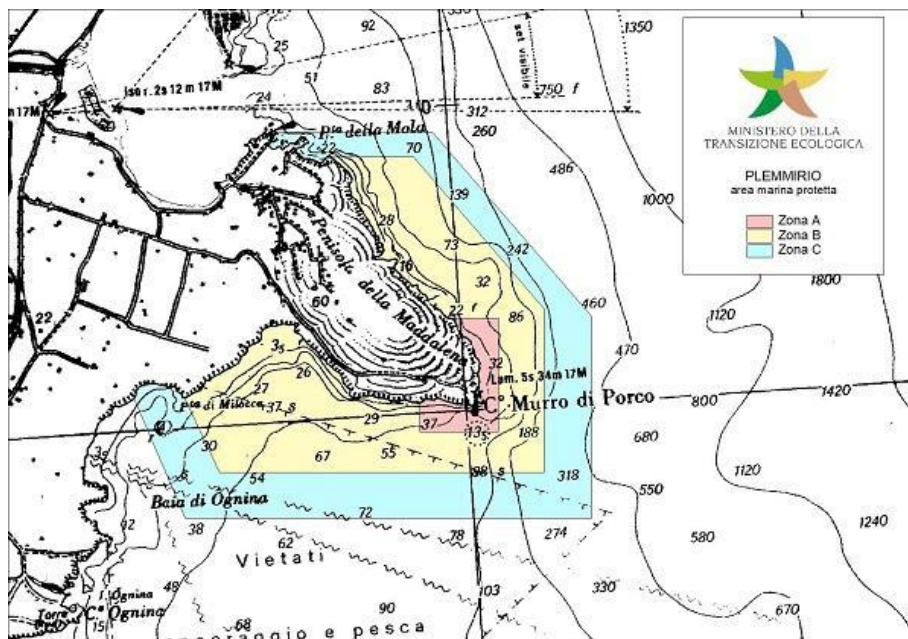


Figura 16. Carta dell'AMP Plemmirio dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

MONITORAGGI E ANALISI DEI DATI

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 in continuo a intervalli di tempo regolari.

Il protocollo per il monitoraggio della temperatura è stato sviluppato sul modello di quello utilizzato dalla rete mediterranea T-MEDNet in modo da poter inserire i dati delle stazioni italiane 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 HOBO MX TidbiT 400 (Fig. 17), 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., tutte le aree a esclusione dell'AMP Miramare e dell'AMP Portofino che ne erano già dotate) si è scelto di acquistarne 12: 8 sensori previsti per la stazione di monitoraggio, 2 sensori 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).

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 m 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.

AMP Miramare e AMP Portofino

L'AMP Portofino, facendo già parte della rete mediterranea T-MEDNet dal 2015 ed essendo partner del progetto Interreg MPA-ADAPT, disponeva già di *temperature data logger* posizionati nel sito di Cala dell'Oro, zona di riserva integrale dell'Area Marina Protetta. Similmente, l'AMP Miramare disponeva già dei sensori posizionati all'interno dell'AMP alle profondità di 1, 10, 11, e 17 m. Il modello utilizzato da entrambe queste AMP è HOBO Water Temp Pro v2, leggermente differente rispetto a quello scelto per le altre aree di studio del progetto Mare Caldo (Fig. 17). 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).



Figura 17. 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'AMP Miramare e dall'AMP Portofino; a destra il modello HOBO MX TidbiT 400 acquistato per l'Isola d'Elba e le altre aree marine protette del progetto.

Tabella 1. Caratteristiche rilevanti per il confronto dei due modelli di *temperature data logger*.

Area	AMP Miramare, AMP Portofino	Progetto Mare Caldo
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

Installazione dei *temperature data logger*

L'installazione dei *temperature data logger* viene svolta dal partner tecnico ElbaTech SRL e/o dagli operatori delle AMP e prevede l'utilizzo di chiodi da roccia *narrow angle*, che sono fissati meccanicamente o con ancorante chimico bicomponente mediante pistola per silicone, sulla base della litologia presente nell'area di interesse. Sui chiodi vengono installati i supporti per le sonde fissate tramite fascette di plastica (che rendono semplice la periodica rimozione dei sensori).

MONITORAGGIO DEGLI ECOSISTEMI DI SCOGLIERA

Oltre alle analisi relative ai dati di temperatura, nell'ambito del sesto anno di progetto Mare Caldo sono stati analizzati i dati riguardanti i monitoraggi biologici per la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi di scogliera all'Isola d'Elba, nell'AMP Isola dell'Asinara, e nell'AMP Torre Guaceto.

Selezione delle stazioni di monitoraggio per ogni area di studio

I dati analizzati si riferiscono a stazioni di monitoraggio biologico identificate in corrispondenza di scogliere rocciose. In particolare:

1. all'isola d'Elba le stazioni sono (Fig. 18): I) Formiche della Zanca (42.806531° N; 10.126317° E); e II) Lo Scoglietto (42.828567° N; 10.332050° E);
2. nell'AMP Isola dell'Asinara le stazioni sono (Fig. 19): I) Pedra Bianca (41.00260° N; 8.20851° E); II) Punta dei Corvi (41.09980° N; 8.34978° E); III) Punta Sabina (41.08679° N; 8.35322° E); IV) Punta Scorno (41.11725° N; 8.32682° E);
3. nell'AMP Torre Guaceto le stazioni sono (Fig. 20): I) Ancora 26 (40.727700° N; 17.809350° E); II) Laguna (40.714817° N; 17.802017° E); III) La parete di Giorgia (40.719750° N; 17.815817° E); III) Panettoni profondi (40.729267° N; 17.817533° E).



Figura 18. Posizione geografica delle due stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera all'Isola d'Elba.



Figura 19. 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 nell'AMP Isola dell'Asinara.



Figura 20. 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'AMP Torre Guaceto.

Metodi di rilevamento

1. Transetti bionomici verticali

I dati analizzati si riferiscono a transetti bionomici realizzati al fine di caratterizzare le comunità bentoniche e per valutarne lo stato ecologico. I dati si riferiscono, per ogni stazione, a un 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) e specificatamente alle specie cospicue presenti. Queste specie sono state identificate mediante criterio fisionomico, qualora le dimensioni fossero tali da permetterne il riconoscimento e l'identificazione. Per tutte queste specie 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

Sono stati inoltre analizzati 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) registrati lungo i transetti. 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 analizzati dati relativi agli eventi di moria e sbiancamento 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 analizzato il numero di individui (o colonie) presenti di ciascuna specie target a una data profondità, o la percentuale di ricoprimento del fondo da parte delle alghe corallinacee. È stato poi analizzato 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.

DATI DI TEMPERATURA SUPERFICIALE DELL'ACQUA (SST)

Le analisi sulle *Marine Heat Waves* (MHW), ossia aumenti estremi della temperatura degli oceani per un periodo di tempo prolungato, sono state effettuate sul dataset di temperatura superficiale del mare ottenuta dal servizio Copernicus Marine Services (ESA *Sea Surface Temperature Climate Change Initiative*). Il prodotto è stato utilizzato per ottenere la climatologia relativa al periodo 1981-2016. I giorni con MHW sono stati individuati sulla base della temperatura superficiale del mare (SST) superiore alla soglia del 90° percentile climatologico per almeno cinque giorni consecutivi. L'intensità degli eventi è stata valutata secondo i criteri proposti da Hobday et al. (2016), calcolando per ciascun episodio l'intensità media e massima in termini di anomalia rispetto alla soglia.

DATI DI TEMPERATURA LUNGO LA COLONNA D'ACQUA

I dati di temperatura registrati dai *temperature data logger* sono stati utilizzati per validare i campi prodotti dal modello numerico fornito da Copernicus Marine Services, in particolare il modello fisico ad alta risoluzione per il Mar Mediterraneo in alcune AMP.

Questo modello è stato scelto in quanto ha mostrato una buona rappresentatività rispetto alle osservazioni costiere disponibili. La procedura seguita è stata la seguente: è stato individuato il punto della griglia del modello più vicino alla stazione di misura, sia in termini di posizione geografica che di profondità. Per garantire la compatibilità temporale, i dati in situ sono stati mediati su base giornaliera, in modo da uniformarli alla risoluzione temporale del modello. Per assicurare l'affidabilità del confronto, i dati in situ ritenuti errati o anomali sono stati esclusi tramite una procedura statistica, che ha tenuto conto della variabilità attesa del segnale termico e dei limiti plausibili di variazione giornaliera della temperatura. Il confronto tra le due serie (ALLEGATO III), effettuato nei periodi in cui erano entrambe disponibili, ha evidenziato un'elevata coerenza sia in termini di valori assoluti sia di andamento temporale, anche alle diverse profondità. Sulla base di questi risultati, i dati del modello numerico sono stati utilizzati per rappresentare in modo coerente l'andamento della temperatura lungo la colonna d'acqua nelle differenti AMP. Per l'AMP Ustica sono stati utilizzati i dati dei *temperature data logger*.

I dati di temperatura lungo la colonna d'acqua sono stati inoltre rappresentati graficamente tramite diagramma di Hovmöller, 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.

Per ogni area di studio sono di seguito riportati i periodi di monitoraggio a partire dalla data di installazione dei *temperature data logger* fino alla data dell'ultimo download dei dati, eseguito dagli operatori delle AMP aderenti al progetto:

- AMP Miramare: 14.01.2021 - 2.7.2025
- AMP Portofino: 17.09.2019 - 06.11.2024

- AMP Cinque Terre: 29.08.2022 - 11.10.2025
- Isola d'Elba: 26.11.2019 - 29.9.2025
- AMP Isole Tremiti: 2.05.2022 - 24.1.2026
- AMP Isola dell'Asinara: 30.06.2021 - 1.7.2025
- AMP Tavolara Punta Coda Cavallo: 21.06.2022 - 2.12.2025
- AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano: 29.04.2021 - 1.11.2025
- AMP Torre Guaceto: 30.03.2021 - 04.11.2022
- AMP Capo Carbonara: 8.09.2020 - 11.12.2025
- AMP Isola di Ustica: 28.5.2025 - 11.12.2025
- AMP Capo Milazzo: 22.07.2023 - 04.11.2024
- AMP Plemmirio: 23.07.2020 - 17.03.2025

STRUTTURA E STATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ

Al fine di caratterizzare la composizione e la struttura delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio previste dal progetto Mare Caldo, i dati relativi alle specie e alle relative abbondanze rilevate tramite i transetti bionomici sono state organizzate in matrici (sito $\times$ profondità) $\times$ 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 & 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. Lo stato ecologico delle comunità di scogliera rocciosa delle aree di studio è stato definito tramite i valori ottenuti dall'applicazione dell'indice di Shannon secondo la classificazione riportata in Tabella 2.

Tabella 2. Classi di stato ecologico associate ai valori dell'indice di Shannon (H') (Zettler et al. 2007).

$H' > 4$	Elevato
$3 < H' \leq 4$	Buono
$2 < H' \leq 3$	Moderato
$1 < H' \leq 2$	Scarso
$H' \leq 1$	Cattivo

Lo stato ecologico delle aree di studio indagate nell'ambito del sesto anno di progetto è stato confrontato con lo stato ecologico delle undici aree di studio indagate nei primi cinque anni di progetto.

MORTALITÀ

Per determinare l'impatto delle anomalie termiche sulle specie target previste dal protocollo della rete mediterranea T-MEDNet, i dati relativi al 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 dato relativo 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%.

La percentuale di mortalità delle diverse specie target rilevata nelle aree di studio indagate nell'ambito del quinto anno di progetto è stata confrontata con la percentuale di mortalità rilevata nelle nove aree di studio indagate nei primi quattro anni di progetto.

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 relativo nelle comunità di scogliera.

Il numero di specie termofile rilevato nelle aree di studio indagate nell'ambito del quinto anno di progetto è stato confrontato con il numero di specie termofile rilevato nelle nove aree di studio indagate nei primi quattro anni di progetto.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

Isola d'Elba

Grazie alla disponibilità di dati relativi a una serie storica di dati raccolti a partire dagli anni '90, per l'area dell'Isola d'Elba è stato possibile valutare il cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera. Per avere un numero comparabile di dati relativi a transetti bionomici nel tempo, per quest'area di studio sono stati identificati quattro periodi di tempo: un primo periodo (codice: 1990s) che corrisponde al decennio 1990-1999; un secondo periodo (2000s) che corrisponde al decennio 2000-2009; un terzo periodo (2010s) che corrisponde al decennio 2010-2019; e un quarto periodo (2020s) che corrisponde ai dati raccolti nell'ambito del progetto Mare Caldo nel 2020, 2021, 2022 e 2025. Anche per le profondità 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 (nMDS) tramite il software open-source PaSt (Hammer & Harper 2001). 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 attribuire una misura del cambiamento delle comunità e permettere un confronto tra le quattro profondità, sono state calcolate le traiettorie temporali tra ognuna delle repliche alle quattro fasce di profondità per ogni periodo temporale (i.e., 1990s vs 2000s, 2000s vs 2010s, 2010s vs 2020s). In particolare, le traiettorie di cambiamento (T) sono state misurate per ogni replica utilizzando i valori degli assi dell'analisi nMSD e tramite l'applicazione del Teorema di Pitagora, come segue:

$$T = \sqrt{(x_{R1_{2000s}} - x_{R1_{1990s}})^2 + (y_{R1_{2000s}} - y_{R1_{1990s}})^2}$$

dove $x_{R1_{2000s}}$ e $x_{R1_{1990s}}$ e $y_{R1_{2000s}} - y_{R1_{1990s}}$ sono rispettivamente i valori dell'asse x e y, ad esempio, della replica a 10 m negli anni 2000s e 1990s. Come sopra citato, la formula è stata applicata ai periodi temporali alle quattro diverse profondità. Le traiettorie medie delle quattro profondità sono state confrontate con un test di Kruskal-Wallis per valutare eventuali differenze significative nei possibili cambiamenti avvenuti alle quattro profondità.

AMP Torre Guaceto

Grazie ai dati relativi ai monitoraggi condotti nel 2021 nell'AMP Torre Guaceto, anche per quest'area di studio è stato possibile valutare eventuali cambiamenti nel tempo nella composizione e struttura della comunità nel periodo 2021-2025. Con questo obiettivo, come per l'Isola d'Elba, è stata eseguita un'analisi nMDS applicata alla matrice dei dati raccolti tramite transetti bionomici. Allo stesso modo, al fine di attribuire una misura del cambiamento delle comunità e permettere un confronto tra le quattro profondità, sono state calcolate le traiettorie temporali tra ognuna delle repliche delle quattro profondità, in questo caso tra due soli anni. Le traiettorie di cambiamento (T) sono state quindi misurate tramite l'applicazione del Teorema di Pitagora, come segue:

$$T = \sqrt{(x_{R1_{2025}} - x_{R1_{2021}})^2 + (y_{R1_{2025}} - y_{R1_{2021}})^2}$$

dove $x_{R1_{2025}}$ e $x_{R1_{2021}}$ e $y_{R1_{2025}} - y_{R1_{2021}}$ sono rispettivamente i valori dell'asse x e y, ad esempio, delle repliche a 10 m nell'anno 2025 e 2021. La formula è stata applicata a tutte le repliche che sono state poi mediate per ogni profondità indagata (10 m, 20 m, 30 m, e 40 m). Le traiettorie medie delle quattro profondità sono state quindi ugualmente confrontate con un test di Kruskal-Wallis per valutare eventuali differenze significative nei possibili cambiamenti avvenuti alle quattro profondità.

RISULTATI

TEMPERATURA SUPERFICIALE DELL'ACQUA (SST)

AMP Miramare

Nel corso del 2025 si sono verificati sei episodi distinti di MHW nell'AMP di Miramare, distribuiti tra gennaio e dicembre e caratterizzati da una maggiore concentrazione degli eventi tra la primavera avanzata e la fine dell'estate (Fig. 21). Il primo episodio si è manifestato tra il 28 gennaio e il 1° febbraio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di circa 0,59 °C e una massima di 1,16 °C. Dopo una lunga pausa, il fenomeno è riapparso in modo più evidente tra il 19 e il 29 aprile, con un evento di 11 giorni che ha mostrato un'intensità media di circa 0,97 °C e una massima di 2,48 °C, rappresentando uno dei primi episodi significativamente intensi dell'anno.

All'inizio dell'estate si osserva un nuovo evento tra il 31 maggio e il 7 giugno, della durata di 8 giorni, con intensità media di circa 0,51 °C e massima di 1,14 °C. Tuttavia, la fase più rilevante dell'intera serie si sviluppa tra il 25 giugno e il 14 luglio, quando si verifica l'episodio più lungo e intenso dell'anno, della durata di 20 giorni, con un'intensità media di circa 1,33 °C e una massima di 2,45 °C. Anche dalla figura questo evento emerge con chiarezza, poiché la SST si mantiene stabilmente al di sopra della soglia del 90° percentile tra la fine di giugno e la prima metà di luglio, evidenziando una fase di anomalia termica persistente e ben strutturata.

Dopo il picco estivo, il fenomeno si ripresenta in autunno con un episodio tra il 20 e il 26 settembre, durato 7 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 1,10 °C e una massima di 1,34 °C. Pur essendo più breve rispetto all'evento di inizio estate, questo episodio mostra comunque un'intensità media elevata, indicando il permanere di condizioni termiche anomale anche nella parte finale della stagione calda. L'ultimo episodio dell'anno si verifica infine tra il 20 e il 25 dicembre, con una durata di 6 giorni, un'intensità media di circa 0,64 °C e una massima di 0,82 °C.

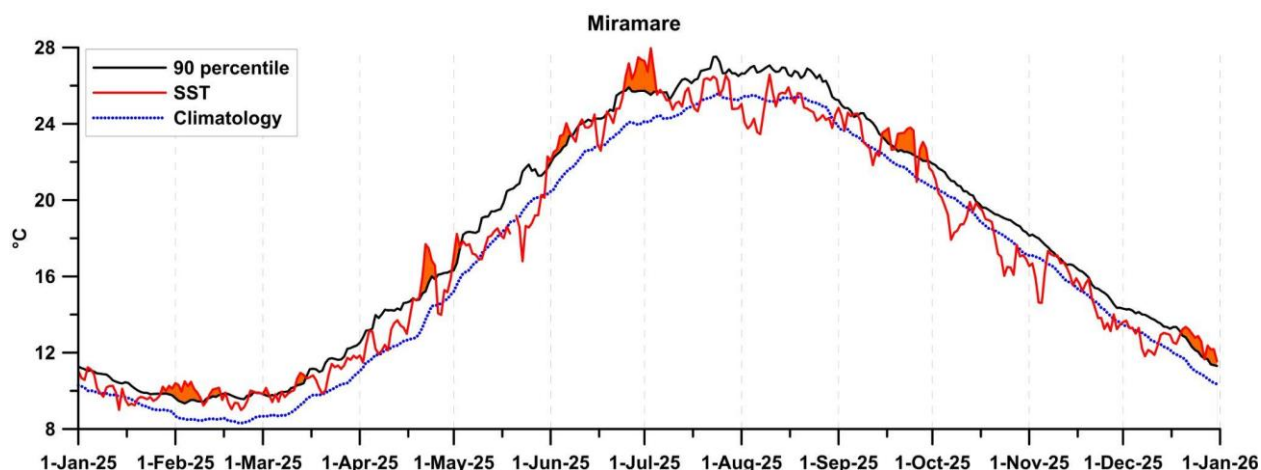


Figura 21. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Portofino

Nel corso del 2025 si sono verificati sette episodi distinti di MHW nell'AMP di Portofino, concentrati tra marzo e agosto e caratterizzati da una progressiva intensificazione dalla tarda primavera all'inizio dell'estate (Fig. 22). I primi due eventi si sono manifestati nel mese di marzo, entrambi della durata di sette giorni: il primo, dal 7 al 13 marzo, è risultato piuttosto debole, con un'intensità media di circa 0,18 °C e una massima di 0,26 °C, mentre il secondo, tra il 25 e il 31 marzo, ha mostrato valori leggermente più elevati, con un'intensità media di circa 0,45 °C e una massima di 0,84 °C.

Con l'inizio della primavera avanzata gli eventi sono divenuti più persistenti e intensi. Tra il 2 e il 13 aprile si è osservato un episodio di 12 giorni, con intensità media di circa 0,64 °C e massima di 1,43 °C. Poco dopo, tra il 22 aprile e il 4 maggio, si è verificato un nuovo evento della durata di 13 giorni che rappresenta uno dei più intensi dell'anno, con un'intensità media di circa 1,35 °C e una massima di 2,56 °C. A questo è seguito un ulteriore episodio più breve, tra il 9 e il 14 maggio, durato 6 giorni, con intensità media di circa 0,34 °C e massima di 0,91 °C.

La fase più rilevante dell'anno si è sviluppata tra il 10 giugno e il 6 luglio, quando si è verificato l'evento più lungo e strutturato dell'intera serie, con una durata di 27 giorni, un'intensità media di circa 1,53 °C e una massima di 2,82 °C. Dopo una fase di relativa attenuazione, il fenomeno si ripresenta infine tra il 10 e il 19 agosto con un ultimo episodio di 10 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 1,09 °C e una massima di 1,91 °C.

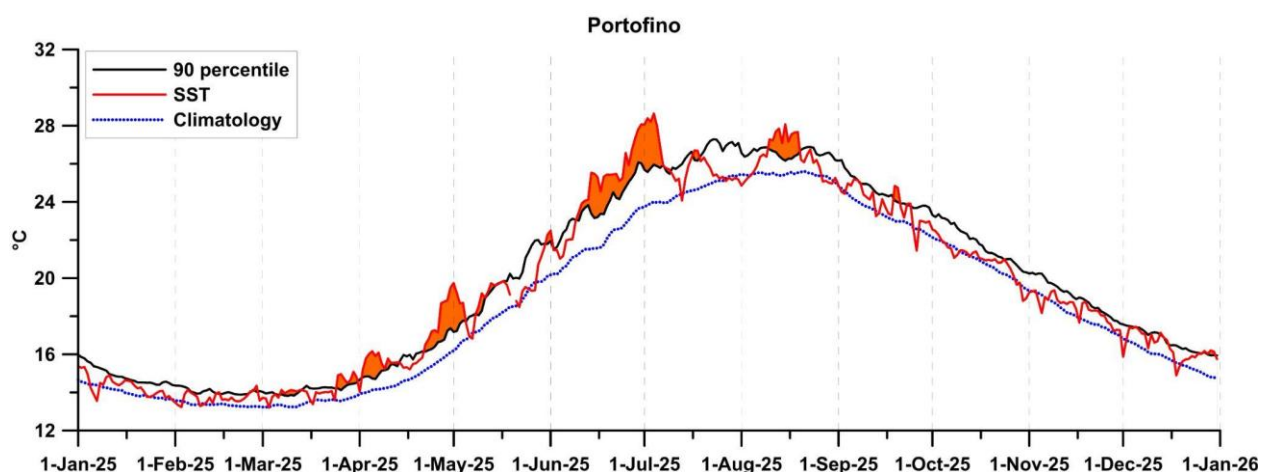


Figura 22. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Cinque Terre

Nel corso del 2025 si sono verificati quattro episodi distinti di MHW nell'AMP delle Cinque Terre, concentrati tra la primavera e l'estate, con una distribuzione temporale più compatta rispetto ad altre AMP e con una chiara intensificazione tra giugno e agosto (Fig. 23). Il primo evento si è manifestato tra il 26 marzo e il 1° aprile, con una durata di 7 giorni,

un'intensità media di circa 0,54 °C e una massima di 1,40 °C. La MHW si è ripresentata tra il 22 e il 29 aprile con un secondo evento, anch'esso della durata di 8 giorni, ma decisamente più intenso rispetto al precedente, con un'intensità media di circa 1,10 °C e una massima di 1,76 °C. Questo episodio evidenzia già un rafforzamento primaverile delle anomalie termiche, ben visibile anche nella figura, dove la SST tende a portarsi con maggiore decisione al di sopra della soglia del 90° percentile.

La MHW più intensa si è osservata tra il 9 e il 30 giugno, questo evento, durato 22 giorni, ha mostrato un'intensità media di circa 1,22 °C e una massima di 2,73 °C, rappresentando il nucleo principale dell'attività di MHW del 2025 alle Cinque Terre. L'ultimo episodio si è verificato tra il 12 e il 18 agosto, con una durata di 7 giorni, un'intensità media di circa 0,71 °C e una massima di 1,16 °C. Si tratta di un evento più breve e meno intenso rispetto a quello di giugno, ma comunque significativo perché conferma il permanere di condizioni termiche anomale anche nel cuore dell'estate.

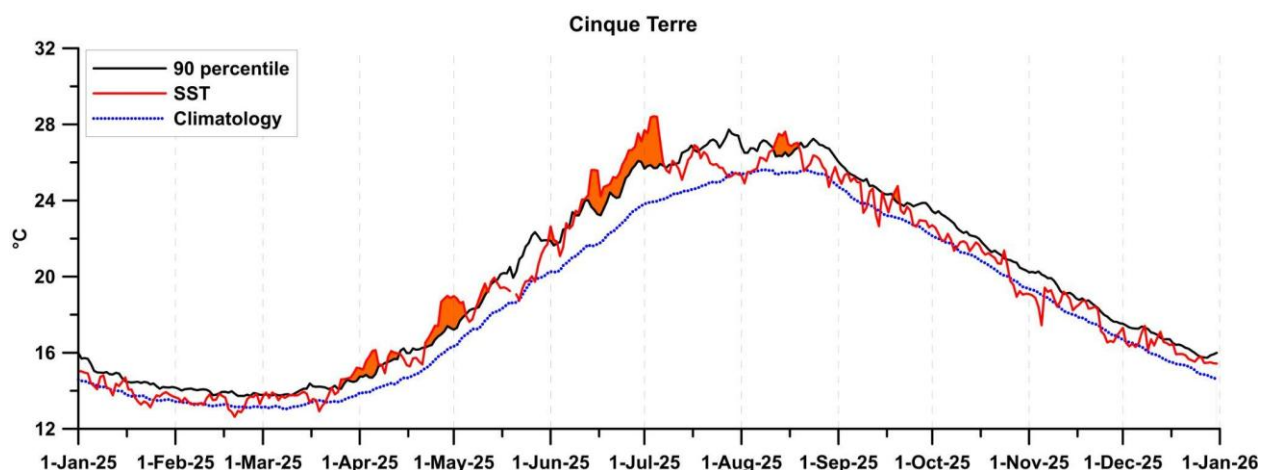


Figura 23. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

Isola d'Elba

Nel corso del 2025 si sono verificati dieci episodi distinti di MHW nell'AMP dell'Isola d'Elba, distribuiti tra gennaio e dicembre e caratterizzati da una progressiva intensificazione dalla fine dell'inverno fino all'inizio dell'estate (Fig. 24). Il primo episodio si è manifestato tra il 31 gennaio e il 4 febbraio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di circa 0,25 °C e una massima di 0,66 °C. A questo ha fatto seguito un secondo evento tra il 19 e il 27 febbraio, durato 9 giorni, con intensità media di circa 0,42 °C e massima di 0,83 °C. Dopo una breve pausa, il fenomeno si è ripresentato tra il 20 e il 26 marzo con un episodio di 7 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 0,45 °C e una massima di 0,80 °C, seguito da un ulteriore evento primaverile tra il 2 e il 12 aprile, della durata di 11 giorni, con intensità media di circa 0,53 °C e massima di 0,79 °C. Nel corso della primavera avanzata si osserva un chiaro rafforzamento del segnale. Tra il 22

aprile e il 1° maggio si è verificato uno degli episodi più intensi della prima parte dell'anno, con una durata di 10 giorni, un'intensità media di circa 1,09 °C e una massima di 2,36 °C. A questo è seguito un evento più breve e debole tra l'8 e il 12 maggio, di 5 giorni, con intensità media di circa 0,31 °C e massima di 0,53 °C.

La parte centrale dell'anno rappresenta il nucleo principale dell'attività di MHW all'Isola d'Elba. Tra il 9 e il 14 giugno si osserva un episodio di 6 giorni, con intensità media di circa 1,16 °C e massima di 2,28 °C, ma soprattutto tra il 19 giugno e il 14 luglio si sviluppa l'evento più rilevante dell'intera serie, con una durata di 26 giorni, un'intensità media di circa 1,72 °C e una massima di 3,57 °C, la più elevata dell'anno. Anche dal grafico questo episodio emerge con estrema evidenza, poiché la SST si mantiene per un periodo prolungato ben al di sopra della soglia climatologica, con il massimo sviluppo tra la fine di giugno e i primi di luglio, quando si osservano le anomalie termiche più intense dell'intera serie.

Dopo la fase culminante estiva il fenomeno si attenua, ma non scompare del tutto. Tra l'11 e il 18 agosto si registra un ulteriore episodio di 8 giorni, con intensità media di circa 0,62 °C e massima di 1,10 °C, mentre l'ultimo evento dell'anno si verifica tra il 23 e il 29 dicembre, con una durata di 7 giorni, intensità media di circa 0,35 °C e massima di 0,57 °C.

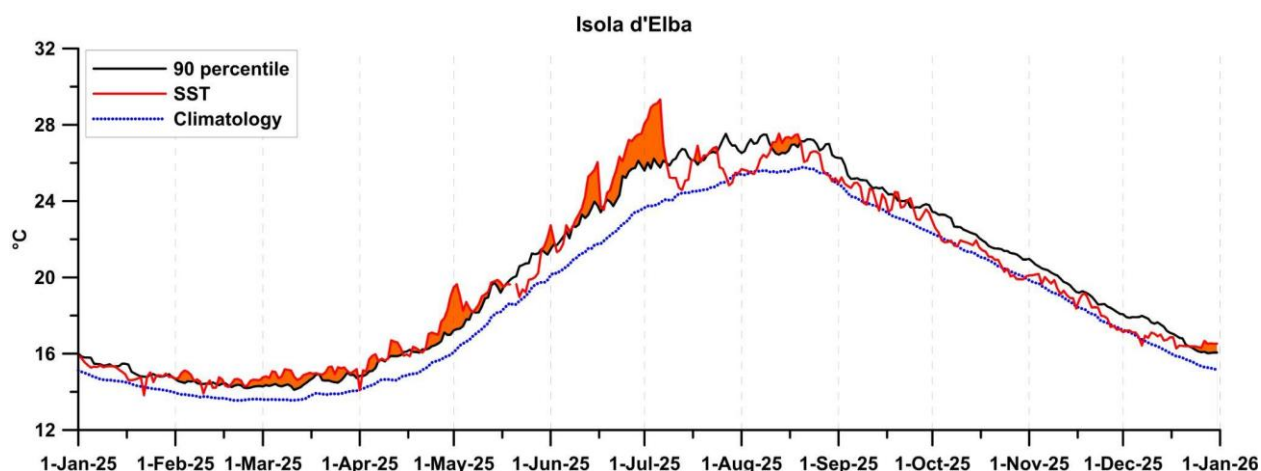


Figura 24. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isole Tremiti

Nel corso del 2025 si sono verificati nove episodi distinti di MHW nell'AMP delle Isole Tremiti, distribuiti tra la fine di febbraio e dicembre e caratterizzati da una marcata concentrazione degli eventi tra la primavera e l'inizio dell'estate (Fig. 25). Il primo episodio si è manifestato tra il 28 febbraio e il 12 marzo, con una durata di 13 giorni, un'intensità media di circa 0,73 °C e una massima di 1,11 °C, configurandosi come il primo evento ben strutturato dell'anno. A questo ha fatto seguito un secondo episodio tra il 14 e il 23 marzo,

durato 10 giorni, ma decisamente più debole, con un'intensità media di circa 0,22 °C e una massima di 0,49 °C. Un terzo evento si è poi verificato tra il 26 e il 31 marzo, della durata di 6 giorni, con intensità media di circa 0,41 °C e massima di 0,75 °C. Con l'avanzare della primavera il fenomeno si è intensificato in modo più evidente. Tra il 21 aprile e il 10 maggio si è osservato un episodio di 20 giorni, con intensità media di circa 1,13 °C e una massima di 1,87 °C, che rappresenta uno dei segnali più rilevanti della prima parte dell'anno. La MHW si ripresenta tra l'11 e il 23 giugno con un episodio di 13 giorni, caratterizzato da intensità media di circa 0,68 °C e massima di 1,02 °C, seguito dall'evento più intenso dell'anno tra il 30 giugno e il 7 luglio, più breve ma nettamente più marcato, con una durata di 8 giorni, un'intensità media di circa 1,25 °C e una massima di 1,85 °C.

Nella parte finale della stagione calda si osservano due episodi ravvicinati tra settembre e inizio ottobre. Il primo si sviluppa tra il 17 e il 21 settembre, con durata minima di 5 giorni, intensità media di circa 0,43 °C e massima di 0,64 °C; il secondo, tra il 23 settembre e il 1° ottobre, dura 9 giorni e risulta più intenso, con valori medi di circa 0,77 °C e un massimo di 1,13 °C. Infine, l'ultimo episodio dell'anno si verifica tra l'11 e il 15 dicembre, con una durata di 5 giorni, un'intensità media molto debole, pari a circa 0,16 °C, e una massima di 0,32 °C.

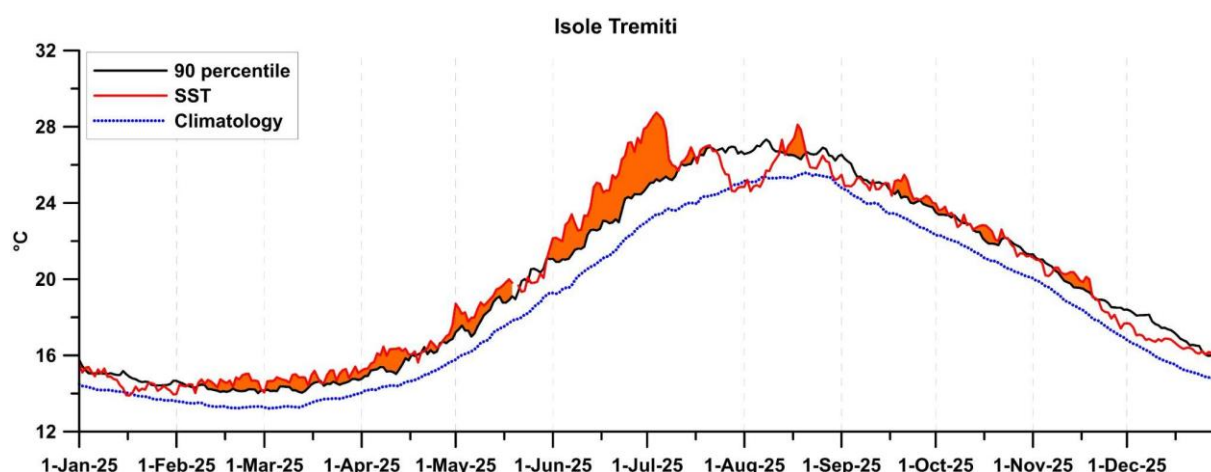


Figura 25. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isola dell'Asinara

Nel corso del 2025 si sono verificati dieci episodi distinti di MHW nell'AMP Isola dell'Asinara, distribuiti tra febbraio e novembre e caratterizzati da una marcata variabilità sia nella durata sia nell'intensità (Fig. 26). I primi eventi si sono concentrati tra la fine dell'inverno e la primavera: un primo episodio si è sviluppato tra l'8 e il 28 febbraio, con una durata di 21 giorni, un'intensità media di circa 0,45 °C e una massima di 0,88 °C, seguito da un secondo evento tra il 2 e il 18 marzo, durato 17 giorni, con intensità media di circa 0,52 °C e massima di 0,84 °C. A questo ha fatto seguito un episodio più lungo, tra il 20 marzo e il 18 aprile, protrattosi per 30 giorni, con intensità media di 0,58 °C e un picco

massimo di 1,31 °C, seguito ancora da un nuovo evento primaverile tra il 27 aprile e il 19 maggio, della durata di 23 giorni, con intensità media di 0,71 °C e massima di 1,49 °C.

La fase più rilevante dell'anno si è osservata tra la fine di maggio e l'inizio di luglio, quando si è verificato l'episodio più intenso e persistente dell'intera serie: dal 31 maggio al 10 luglio si è sviluppata una MHW di 41 giorni, con intensità media pari a circa 2,04 °C e un'intensità massima di 3,50 °C. Dopo una breve pausa, a metà luglio si è verificato un episodio più breve e debole, tra il 12 e il 16 luglio, della durata minima di 5 giorni, con intensità media di 0,38 °C e massima di 0,88 °C. In agosto compare un nuovo evento, tra il 15 e il 20 agosto, di 6 giorni, con intensità media prossima a 1,00 °C e un massimo di 1,72 °C, quindi moderatamente intenso ma di breve durata.

Nella parte finale dell'anno gli eventi tornano a essere meno intensi ma ancora piuttosto frequenti. Tra il 18 settembre e il 6 ottobre si osserva un episodio di 19 giorni con intensità media di 0,43 °C e massima di 1,14 °C, seguito da un ulteriore evento tra il 12 e il 22 ottobre, durato 11 giorni, con intensità media di circa 0,41 °C e massima di 0,83 °C. L'ultimo episodio dell'anno si colloca infine tra l'8 e il 19 novembre, con durata di 12 giorni, intensità media di 0,46 °C e valore massimo di 0,79 °C.

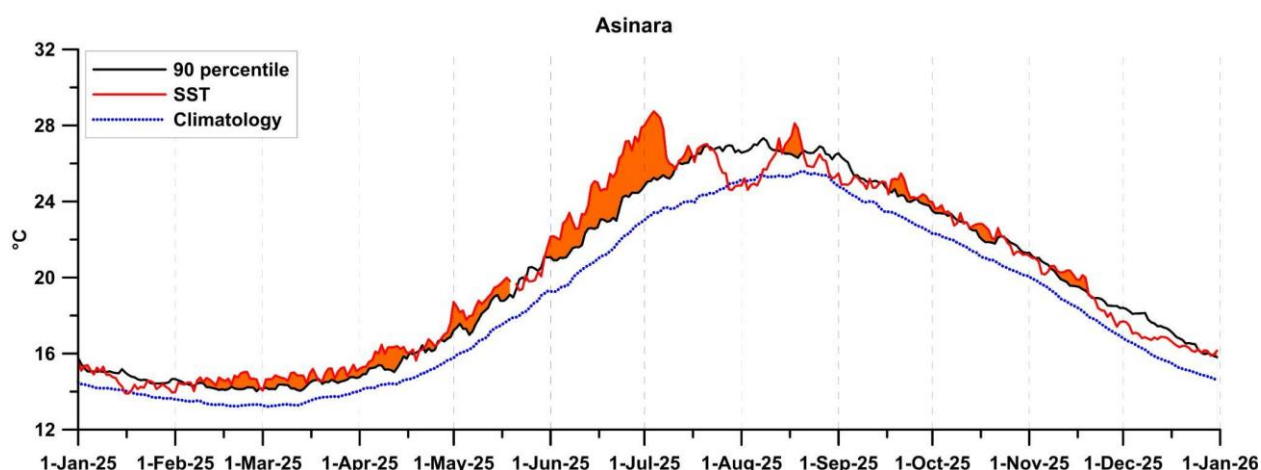


Figura 26. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nel corso del 2025 si sono verificati undici episodi distinti di MHW nell'AMP di Tavolara Punta Coda Cavallo, distribuiti tra gennaio e dicembre e caratterizzati da una progressiva intensificazione dalla fine dell'inverno fino all'inizio dell'estate (Fig. 27). Il primo episodio si è manifestato tra il 7 e l'11 gennaio, con una durata minima di 5 giorni, un'intensità media molto contenuta, pari a circa 0,12 °C, e una massima di 0,21 °C. Dopo una pausa, il fenomeno è ricomparso tra il 12 febbraio e il 5 marzo con un evento di 22 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 0,27 °C e una massima di 0,52 °C, seguito da

un ulteriore episodio tra il 7 e il 18 marzo, durato 12 giorni, con intensità media di circa 0,32 °C e massima di 0,63 °C.

Nel corso della primavera gli eventi diventano più persistenti e marcati. Tra il 29 marzo e il 18 aprile si osserva un episodio di 21 giorni con intensità media di circa 0,53 °C e massima di 1,03 °C, seguito da un evento ancora più lungo tra il 20 aprile e il 19 maggio, protrattosi per 30 giorni, con intensità media di circa 0,81 °C e una massima di 2,32 °C.

La MHW più intensa dell'intero anno avviene tra il 6 giugno e l'11 luglio caratterizzata da una durata di 36 giorni, con un'intensità media di circa 2,08 °C e una massima di 3,46 °C. Questo evento emerge in modo molto evidente, con una persistenza prolungata delle anomalie positive e con il massimo sviluppo tra la seconda metà di giugno e i primi di luglio, quando la differenza tra SST e soglia climatologica raggiunge i valori più elevati dell'anno. Dopo questa fase culminante compare un breve episodio tra il 14 e il 18 luglio, della durata di 5 giorni, con intensità media di circa 0,26 °C e massima di 0,61 °C, che rappresenta una fase residua e molto più debole rispetto al picco precedente.

Nella seconda parte dell'anno si osservano eventi più sporadici e generalmente meno intensi. Tra l'11 e il 19 agosto si registra un episodio di 9 giorni con intensità media di circa 0,53 °C e massima di 0,96 °C, seguito da un evento settembrino tra il 15 e il 25 settembre, della durata di 11 giorni, con intensità media di circa 0,37 °C e massima di 0,86 °C. Dopo una pausa autunnale, il fenomeno riappare tra il 9 e il 21 novembre con un episodio di 13 giorni, caratterizzato da intensità media di circa 0,54 °C e massima di 1,03 °C. L'ultimo evento dell'anno si verifica infine tra il 15 e il 30 dicembre, con una durata di 16 giorni, un'intensità media di circa 0,42 °C e una massima di 0,92 °C.

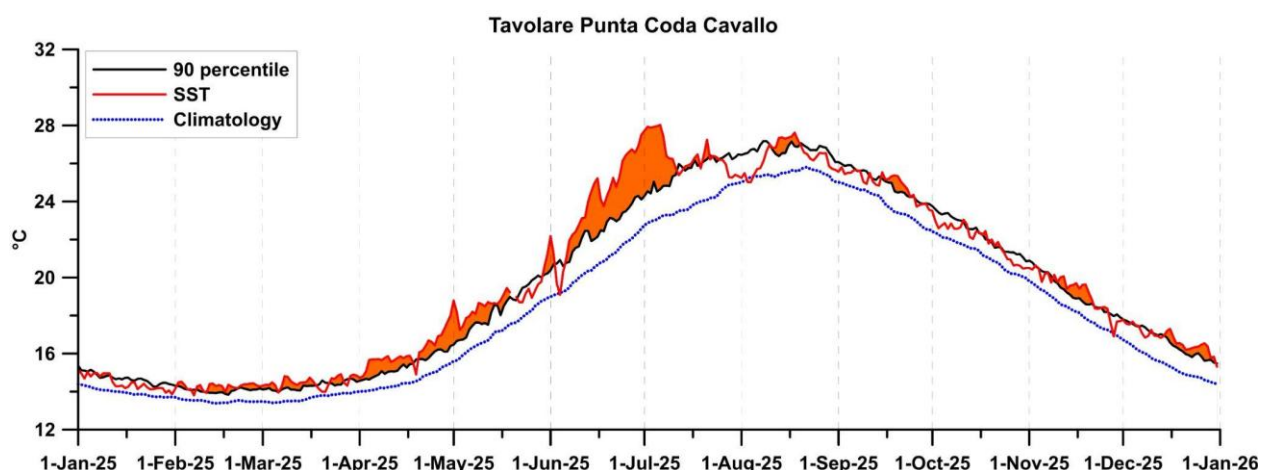


Figura 27. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isola Ventotene e Santo Stefano

Nel corso del 2025 si sono verificati undici episodi distinti di MHW nell'AMP delle Isole di Ventotene e Santo Stefano, distribuiti tra gennaio e dicembre e caratterizzati da una

notevole continuità (Fig. 28). Il primo episodio si è sviluppato tra il 3 e il 9 gennaio, con una durata di 7 giorni, un'intensità media di circa 0,29 °C e una massima di 0,51 °C. A questo ha fatto seguito un secondo evento tra il 28 gennaio e il 10 febbraio, durato 14 giorni, con intensità media di circa 0,33 °C e massima di 0,64 °C, seguito a sua volta da un terzo episodio tra il 13 e il 24 febbraio, della durata di 12 giorni, con intensità media di circa 0,49 °C e massima di 0,75 °C. Il quarto evento, tra il 26 febbraio e il 20 marzo, è risultato il più lungo di questa prima fase, con ben 23 giorni di durata, un'intensità media di circa 0,58 °C e una massima di 0,96 °C.

Dopo una breve attenuazione, il fenomeno si è ripresentato in aprile con un episodio tra il 9 e il 15 aprile, della durata di 7 giorni, con intensità media di circa 0,29 °C e massima di 0,60 °C. Poco dopo, tra il 21 aprile e il 10 maggio, si è verificato un evento più marcato e persistente, durato 20 giorni, con intensità media di circa 0,78 °C e una massima di 1,54 °C, che rappresenta il primo chiaro rafforzamento primaverile del segnale. La fase più rilevante dell'intero anno si colloca tuttavia tra il 2 giugno e il 10 luglio, quando si sviluppa l'episodio più lungo e intenso della serie, con una durata di 39 giorni, un'intensità media di circa 1,16 °C e una massima di 2,45 °C. Dopo questo episodio principale si osserva ancora un breve evento estivo tra il 22 e il 26 luglio, della durata minima di 5 giorni, con intensità media di circa 0,44 °C e massima di 0,69 °C.

Nella parte finale dell'anno il fenomeno si ripresenta in modo più debole ma ancora ben riconoscibile. Tra il 16 e il 30 settembre si registra un episodio di 15 giorni, con intensità media di circa 0,73 °C e massima di 1,15 °C, che costituisce l'ultimo evento significativo della stagione calda. Infine, dicembre mostra due episodi conclusivi: il primo tra il 7 e il 22 dicembre, con una durata di 16 giorni, intensità media di circa 0,16 °C e massima di 0,34 °C, e il secondo tra il 24 e il 31 dicembre, durato 8 giorni, con intensità media di circa 0,32 °C e massima di 0,57 °C.

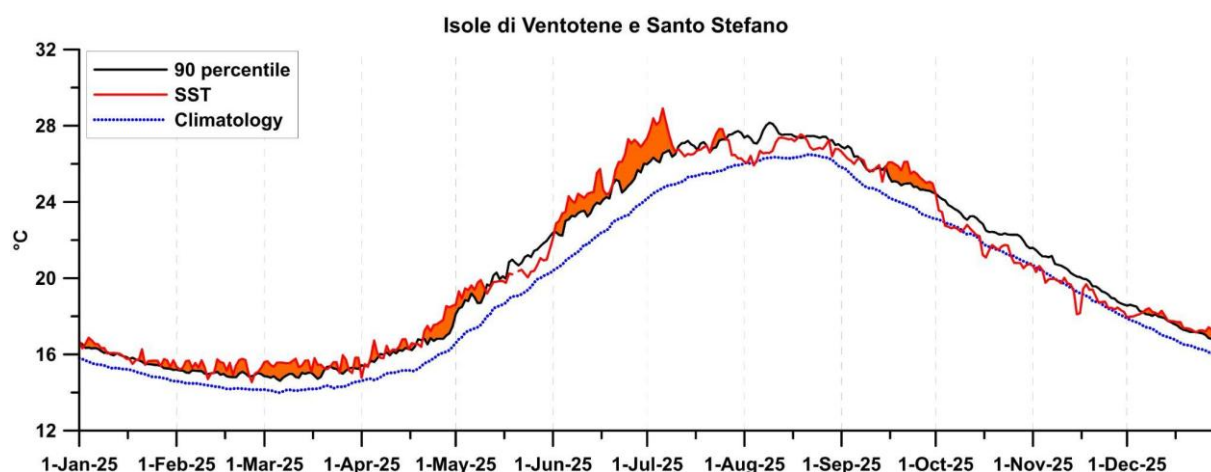


Figura 28. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Torre Guaceto

Nel corso del 2025 si sono verificati sette episodi distinti di MHW nell'AMP di Torre Guaceto, distribuiti tra gennaio e ottobre e caratterizzati da una maggiore concentrazione degli eventi tra la primavera e l'inizio dell'estate (Fig. 29). Il primo episodio si è manifestato tra il 27 gennaio e il 1° febbraio, con una durata di 6 giorni, un'intensità media di circa 0,49 °C e una massima di 0,64 °C. Dopo una pausa di alcune settimane, il fenomeno è riapparso tra il 12 e il 20 marzo con un evento di 9 giorni, più intenso del precedente, con un'intensità media di circa 0,84 °C e una massima di 1,78 °C. A questo ha fatto seguito un ulteriore episodio più breve, tra il 23 e il 27 marzo, della durata minima di 5 giorni, con intensità media di circa 0,37 °C e massima di 0,67 °C.

La primavera avanzata segna una fase di maggiore persistenza del fenomeno. Tra il 20 aprile e il 13 maggio si sviluppa infatti un episodio di 24 giorni, con intensità media di circa 0,98 °C e una massima di 1,90 °C, che rappresenta uno dei segnali più strutturati della prima parte dell'anno. La fase più importante dell'anno si colloca tuttavia tra il 10 giugno e il 9 luglio, quando si osserva la MHW più duratura (30 giorni), un'intensità media di circa 0,97 °C e una massima di 1,64 °C. Dal grafico emerge chiaramente come, tra giugno e l'inizio di luglio, le anomalie positive si mantengano persistenti, accompagnando il rapido riscaldamento stagionale e rappresentando il nucleo principale dell'attività di MHW del 2025 per questa AMP.

Nella parte finale della stagione calda il fenomeno si ripresenta con due episodi ravvicinati ma meno intensi. Il primo si verifica tra il 16 e il 24 settembre, con durata di 9 giorni, intensità media di circa 0,53 °C e massima di 0,73 °C; il secondo segue immediatamente tra il 26 settembre e il 1° ottobre, durando 6 giorni, con intensità media di circa 0,41 °C e massima di 0,62 °C.

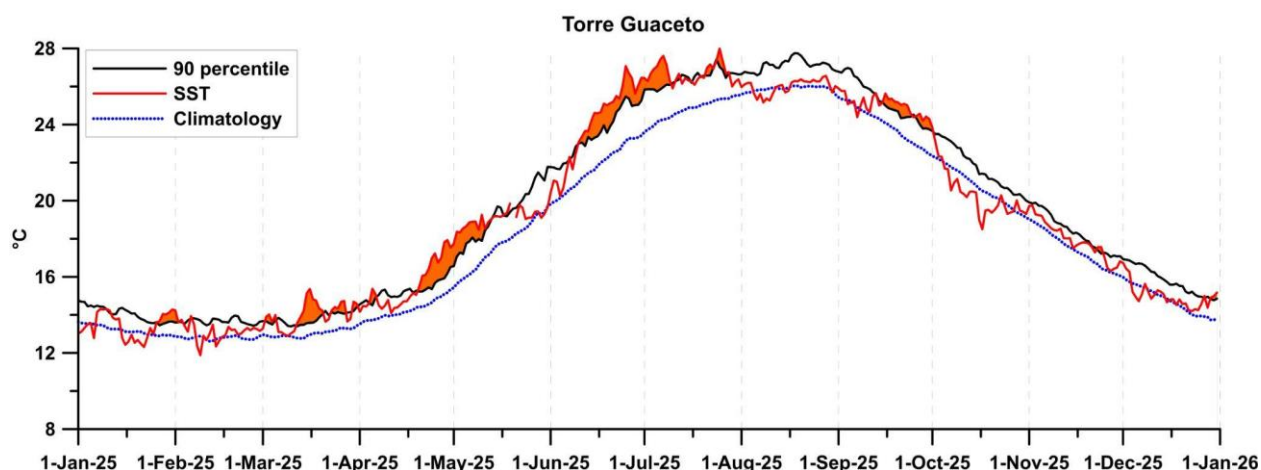


Figura 29. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Capo Carbonara

Nel corso del 2025 si sono verificati tredici episodi distinti di MHW nell'AMP di Capo Carbonara, distribuiti lungo quasi tutto l'anno, da gennaio a dicembre (Fig. 30). I primi eventi si sono manifestati già nelle prime settimane dell'anno: un primo episodio si è verificato tra il 5 e il 9 gennaio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di circa 0,22 °C e una massima di 0,40 °C. A questo ha fatto seguito un secondo evento tra il 20 e il 30 gennaio, della durata di 11 giorni, con intensità media di circa 0,23 °C e massima di 0,50 °C. Nel mese di febbraio l'attività è proseguita con due ulteriori episodi, il primo tra il 2 e il 12 febbraio, durato 11 giorni, con intensità media di circa 0,29 °C e massima di 0,76 °C, e il secondo tra il 14 e il 19 febbraio, più breve, di 6 giorni, con intensità media di circa 0,30 °C e massima di 0,46 °C.

Tra la fine di febbraio e l'inizio della primavera il fenomeno si è progressivamente rafforzato. Tra il 25 febbraio e il 2 marzo si è osservato un episodio di 6 giorni, con intensità media di circa 0,39 °C e massima di 0,67 °C, seguito da un evento più strutturato tra il 4 e il 18 marzo, della durata di 15 giorni, con intensità media di circa 0,62 °C e una massima di 1,19 °C. Successivamente si è sviluppato un lungo episodio primaverile tra il 20 marzo e il 13 maggio, che rappresenta uno dei più persistenti dell'anno, con una durata di ben 55 giorni, un'intensità media di circa 0,68 °C e una massima di 1,75 °C. Dopo una breve interruzione si è verificato un ulteriore episodio tra il 21 e il 25 maggio, di 5 giorni, con intensità media di circa 0,34 °C e massima di 0,80 °C.

La fase più intensa dell'intero anno si è però verificata tra la fine di maggio e la metà di luglio, quando si è sviluppato l'evento principale della serie: dal 30 maggio al 15 luglio si è registrata una MHW di 47 giorni, con intensità media pari a circa 1,84 °C e intensità massima di 3,46 °C. Dopo l'estate il fenomeno si ripresenta tra il 14 settembre e il 10 ottobre, con un episodio di 27 giorni, intensità media di circa 0,56 °C e massima di 1,16 °C, seguito da un ulteriore evento tra il 16 e il 24 ottobre, durato 9 giorni, con intensità media di circa 0,50 °C e massima di 0,80 °C.

Nella parte finale dell'anno si osservano infine due episodi più deboli ma comunque ben definiti: il primo tra il 16 e il 26 novembre, della durata di 11 giorni, con intensità media di circa 0,45 °C e massima di 0,77 °C, e l'ultimo tra il 14 e il 26 dicembre, durato 13 giorni, con intensità media di circa 0,21 °C e massima di 0,37 °C.

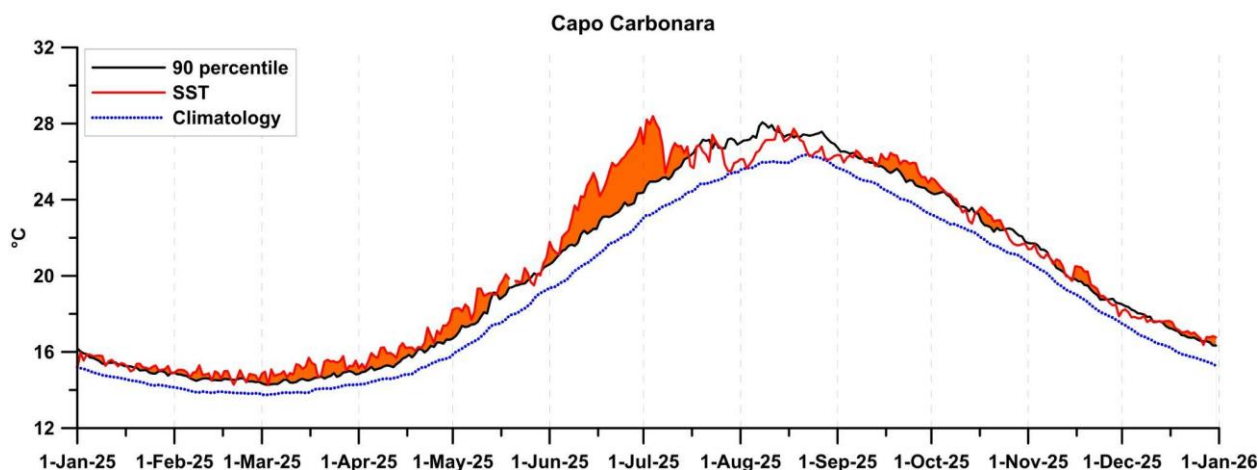


Figura 30. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Capo Milazzo

Nel corso del 2025 si sono verificati dodici episodi distinti di MHW nell'AMP di Capo Milazzo, distribuiti tra gennaio e dicembre e caratterizzati da una notevole persistenza del fenomeno per gran parte dell'anno (Fig. 31). I primi eventi si sono concentrati tra l'inverno e l'inizio della primavera, delineando una fase iniziale piuttosto continua ma di intensità moderata. Il primo episodio si è sviluppato tra il 20 gennaio e il 10 febbraio, con una durata di 22 giorni, un'intensità media di circa 0,42 °C e una massima di 0,86 °C. A questo è seguito un secondo evento tra il 12 e il 24 febbraio, durato 13 giorni, con intensità media di circa 0,47 °C e massima di 0,91 °C, e quindi un terzo episodio tra il 26 febbraio e il 15 marzo, della durata di 18 giorni, che ha mostrato un lieve rafforzamento, con intensità media di circa 0,61 °C e un valore massimo di 1,20 °C. Subito dopo si è verificato un ulteriore evento più breve, tra il 17 e il 23 marzo, di 7 giorni, con intensità media di circa 0,47 °C e massima di 0,89 °C.

Nel corso della primavera il segnale di MHW è proseguito con nuovi episodi, ancora moderati ma progressivamente più strutturati. Tra il 2 e l'11 aprile si è osservato un evento di 10 giorni, con intensità media di circa 0,51 °C e massima di 0,85 °C, seguito da un episodio più marcato tra il 27 aprile e il 10 maggio, durato 14 giorni, con intensità media di circa 0,69 °C e una massima di 1,78 °C. Tuttavia, la fase più rilevante dell'intero anno si è verificata tra il 1° giugno e l'11 luglio, quando si è sviluppato l'evento più lungo e intenso della serie, con una durata di 41 giorni, un'intensità media di circa 1,49 °C e una massima di 2,94 °C. Dopo questo evento principale, il fenomeno si è mantenuto ancora attivo ma con intensità più contenute. Tra il 18 e il 26 luglio si è osservato un episodio di 9 giorni con intensità media di circa 0,66 °C e massima di 1,03 °C, seguito da un breve evento estivo tra l'11 e il 15 agosto, della durata minima di 5 giorni, con intensità media di circa 0,28 °C e massima di 0,64 °C. Successivamente, tra il 12 e il 29 settembre, si è verificato un nuovo episodio di 18 giorni, con intensità media di circa 0,55 °C e massima di 1,10 °C, che rappresenta l'ultimo evento significativo della stagione estiva.

Nella parte finale dell'anno compaiono infine due episodi tardo-autunnali e invernali, entrambi deboli ma comunque persistenti: il primo tra il 14 e il 20 dicembre, con durata di 7 giorni, intensità media di circa 0,17 °C e massima di 0,24 °C, e il secondo tra il 22 e il 27 dicembre, di 6 giorni, con intensità media di circa 0,38 °C e massima di 0,54 °C.



Figura 31. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Plemmirio

Nel corso del 2025 si sono verificati quindici episodi distinti di MHW nell'AMP del Plemmirio, distribuiti lungo tutto l'anno, da gennaio a dicembre, e caratterizzati da una notevole persistenza del fenomeno, con una lunga successione di eventi ravvicinati soprattutto tra la fine dell'inverno, la primavera e l'estate (Fig. 32). I primi episodi si osservano già all'inizio dell'anno: il primo, dal 1° al 13 gennaio, è durato 13 giorni, con un'intensità media di circa 0,47 °C e una massima di 0,80 °C, seguito immediatamente da un secondo evento tra il 15 gennaio e il 12 febbraio, molto più lungo, della durata di 29 giorni, con intensità media di circa 0,44 °C e una massima ancora prossima a 0,80 °C. In febbraio si verificano poi due episodi più brevi e deboli, tra il 14 e il 19 febbraio e tra il 21 febbraio e il 3 marzo, rispettivamente di 6 e 11 giorni, con intensità medie comprese tra circa 0,10 e 0,28 °C e valori massimi inferiori a 0,50 °C, a indicare una fase ancora moderata del fenomeno. Con l'avanzare della primavera il segnale diventa più marcato. Tra il 9 e il 30 marzo si osserva un episodio di 22 giorni, con intensità media di circa 0,56 °C e massima di 1,62 °C, seguito da un evento più breve tra il 1° e il 7 aprile, della durata di 7 giorni, con intensità media di circa 0,32 °C e massima di 0,70 °C. Subito dopo si sviluppa una fase molto più persistente tra il 13 aprile e il 19 maggio, con un episodio di ben 37 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 0,81 °C e una massima di 1,52 °C. A questo fa seguito un ulteriore evento tra il 21 maggio e il 2 giugno, di 13 giorni, con intensità media di circa 1,15 °C e massima di 1,69 °C, che segna un chiaro rafforzamento del fenomeno verso l'inizio dell'estate.

La fase più rilevante dell'intero anno si colloca tra il 6 giugno e il 17 luglio, quando si sviluppa l'episodio più lungo e intenso della serie, con una durata di 42 giorni, un'intensità media di circa 1,36 °C e una massima di 2,71 °C. Dopo questa MHW ne compaiono due più brevi tra il 21 e il 25 luglio, della durata minima di 5 giorni, con intensità media di circa 0,52 °C e massima di 0,77 °C, e tra il 9 e il 16 agosto, più debole, con intensità media di circa 0,21 °C e massima di 0,62 °C.

Nella parte finale dell'anno il fenomeno rimane comunque attivo. Tra il 12 settembre e il 4 ottobre si osserva un episodio di 23 giorni, con intensità media di circa 0,74 °C e massima di 1,46 °C, seguito da un evento tardo-autunnale tra l'11 e il 26 novembre, durato 16 giorni, con intensità media di circa 0,55 °C e massima di 0,89 °C. Infine, dicembre mostra due ulteriori episodi, il primo tra il 4 e il 20 dicembre, della durata di 17 giorni, con intensità media di circa 0,44 °C e massima di 0,73 °C, e l'ultimo tra il 23 e il 31 dicembre, durato 9 giorni, con intensità media di circa 0,52 °C e massima di 0,94 °C.

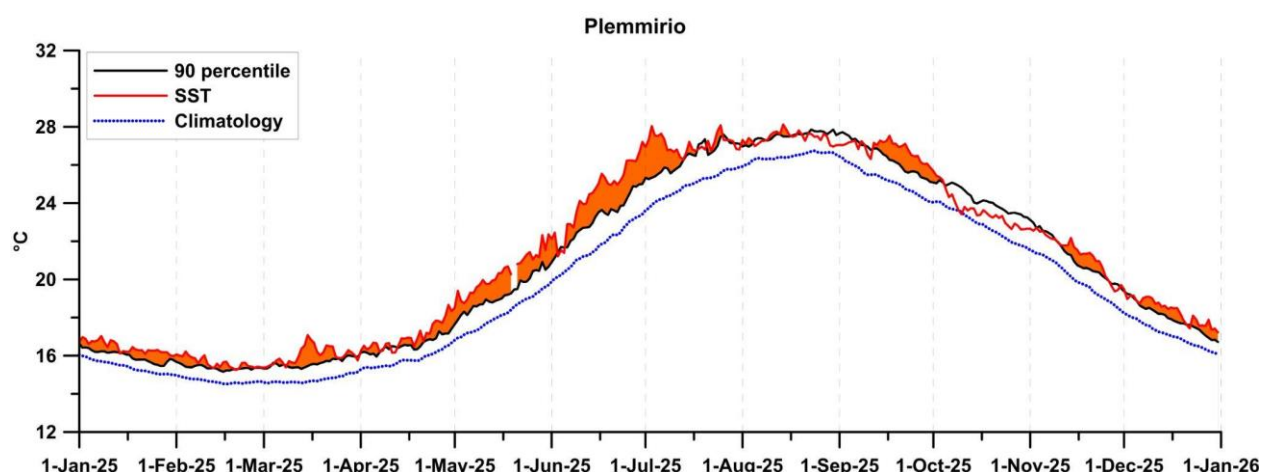


Figura 32. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Ustica

Nel corso del 2025, nell'AMP di Ustica sono stati identificati sei eventi di marine heatwave, per una durata complessiva di 148 giorni. La prima parte dell'anno è stata caratterizzata da una successione quasi continua di condizioni anormalmente calde. Dopo due eventi relativamente deboli, verificatisi dal 4 al 9 gennaio e dal 21 gennaio al 13 febbraio, la SST ha superato nuovamente il 90° percentile il 17 febbraio, dando origine all'evento più persistente dell'anno. Questa MHW è proseguita fino al 3 maggio per 76 giorni, con un'intensità media di 0,66 °C e una massima di 1,20 °C (Fig. 32).

All'inizio dell'estate è stato osservato un primo episodio breve, dal 6 all'11 giugno, seguito dall'evento più intenso dell'anno, sviluppatosi tra il 13 giugno e l'11 luglio. Questa MHW è durata 29 giorni e ha raggiunto un'intensità media di 0,94 °C e una massima di 1,77 °C.

Durante questo periodo la SST ha frequentemente raggiunto valori prossimi o superiori a 28 °C.

Dopo la metà di luglio, la SST è rimasta generalmente superiore alla climatologia, ma al di sotto della soglia del 90° percentile, interrompendo quindi le condizioni di MHW. Un ultimo evento, di debole intensità e limitato a sette giorni, è stato registrato tra il 25 settembre e il 1° ottobre. A partire dall'inizio di ottobre la temperatura superficiale è diminuita rapidamente, seguendo o scendendo localmente al di sotto dell'andamento climatologico, senza ulteriori eventi di MHW fino alla fine dell'anno.

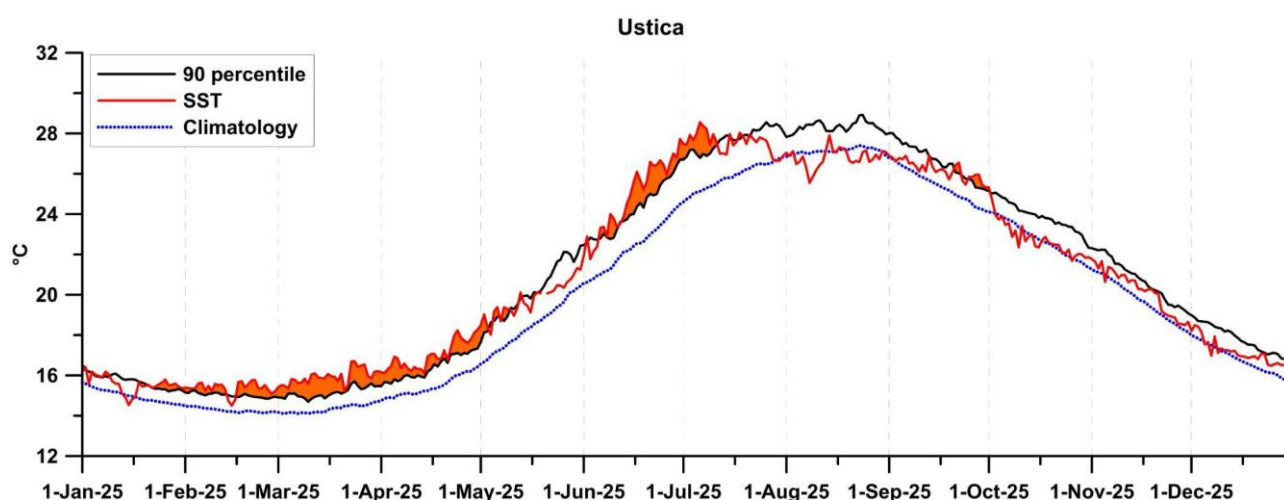


Figura 33. SST (linea arancione) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area ombreggiata rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

WIND-STRESS E TEMPERATURA LUNGO LA COLONNA D'ACQUA

AMP Miramare

Nel corso del 2025, l'area di Miramare mostra precipitazioni distribuite in numerosi episodi impulsivi durante l'anno, con una maggiore frequenza nei mesi di transizione e alcuni eventi particolarmente intensi. I massimi più evidenti si osservano in marzo, a inizio luglio e tra ottobre e novembre. L'episodio più rilevante si registra all'inizio di luglio, quando le precipitazioni raggiungono circa 120 mm d⁻¹. Un secondo evento importante compare all'inizio di novembre, con valori prossimi a 90 mm d⁻¹, mentre altri episodi si osservano tra fine novembre e dicembre (Fig. 34).

L'intensità del vento è generalmente più contenuta rispetto ad altre aree, con valori spesso deboli o moderati e numerosi impulsi brevi distribuiti lungo l'anno. I valori più frequenti restano inferiori a 0,05–0,06 N m⁻², ma si osservano alcuni episodi più evidenti in inverno e primavera. Nella parte finale dell'anno, soprattutto tra novembre e dicembre, il vento torna a intensificarsi, con un picco che raggiunge circa 0,17 N m⁻² a fine dicembre (Fig. 34).

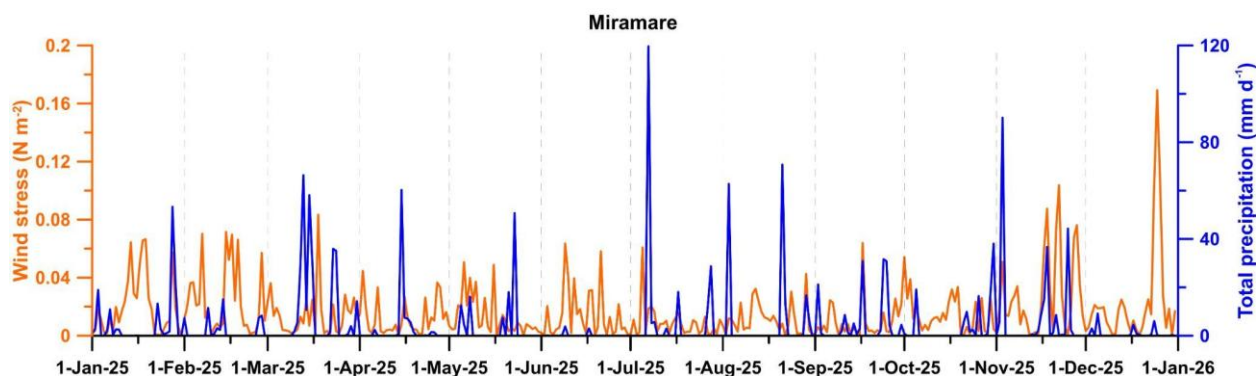


Figura 34. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Miramare mostra una dinamica diversa rispetto alle AMP più profonde, perché la colonna osservata è limitata ai primi 15–16 m (Fig. 35). Questo rende la risposta termica più rapida e più uniforme lungo la verticale. Tra febbraio e marzo la colonna d'acqua appare fredda e quasi omogenea, con temperature intorno a 10–13°C. Questa fase indica condizioni di forte mescolamento invernale e una stratificazione praticamente assente. Il raffreddamento interessa l'intera colonna osservata, non solo lo strato superficiale. Da aprile in poi si osserva un rapido riscaldamento, che coinvolge progressivamente tutta la colonna d'acqua. Tra maggio e giugno le temperature aumentano velocemente, passando da circa 16–18°C a oltre 22–24°C. La stratificazione termica superficiale risulta presente, ma meno marcata rispetto ai siti più profondi, perché il basso spessore della colonna favorisce un mescolamento più frequente e una distribuzione relativamente uniforme del calore. Tra luglio e agosto si raggiunge il massimo termico annuale, con temperature prossime a 26–27 °C lungo gran parte della colonna osservata. In questa fase non si osserva una forte separazione tra superficie e profondità: il calore interessa quasi tutto lo spessore disponibile. L'evento pluviometrico intenso di inizio luglio può aver temporaneamente modulato la temperatura superficiale, ma il diagramma non mostra una penetrazione verticale del calore paragonabile a quella osservata in AMP più profonde, come Capo Carbonara o Capo Milazzo. A Miramare prevale piuttosto una risposta quasi integrata dell'intera colonna d'acqua. Da settembre in poi inizia un raffreddamento progressivo. La diminuzione della temperatura interessa rapidamente tutta la colonna osservata, con valori che scendono da circa 25 °C a settembre a 18–20 °C tra ottobre e novembre. Gli episodi di precipitazione e l'aumento dell'intensità del vento nella fase autunnale sono coerenti con un rafforzamento del mescolamento e con una rapida erosione del calore accumulato durante l'estate. Nel complesso, Miramare rappresenta un caso costiero e poco profondo, caratterizzato da una colonna d'acqua molto reattiva alle condizioni atmosferiche. La fase invernale è fredda e ben mescolata, la primavera mostra un rapido accumulo di calore e l'estate è caratterizzata da temperature elevate distribuite quasi su tutta la colonna osservata. In autunno, il raffreddamento è rapido e coinvolge l'intero spessore disponibile, indicando una riduzione progressiva della stratificazione e un ritorno a condizioni più mescolate (Fig. 34).

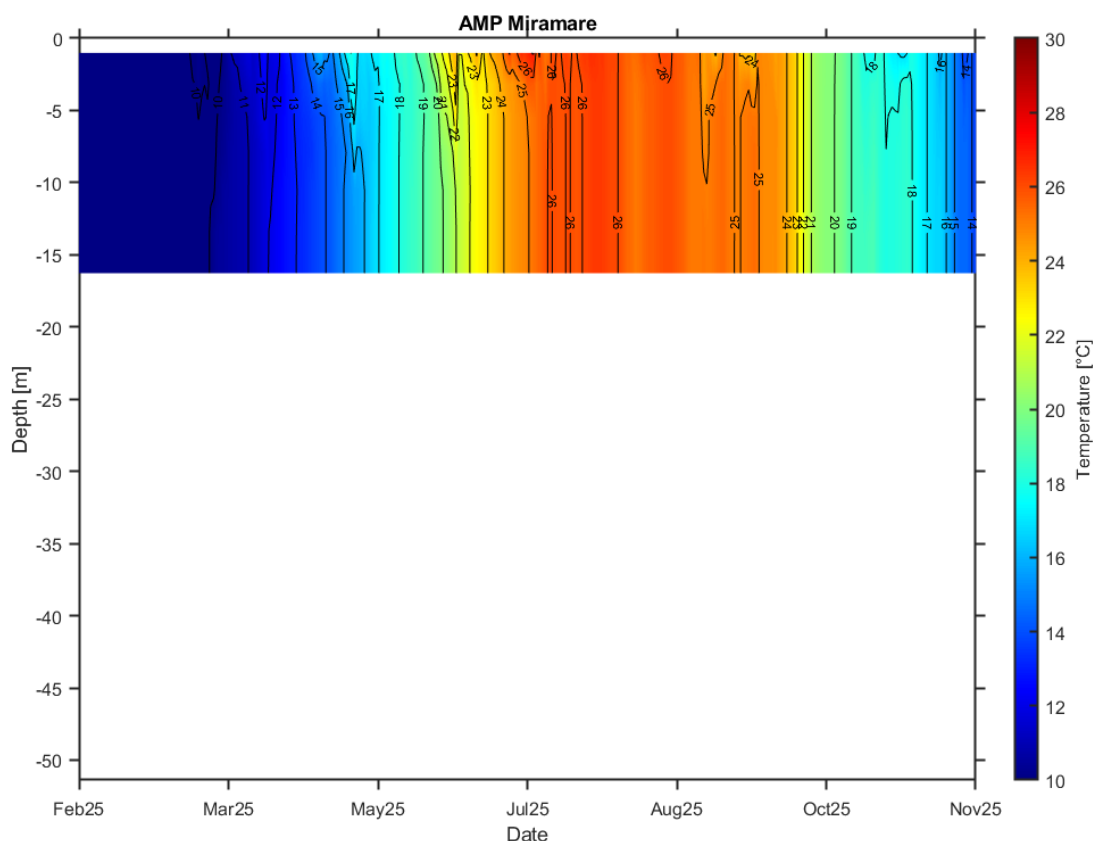


Figura 35. Hovmöller di Temperatura.

AMP Portofino

Nel corso del 2025, l'area di Portofino mostra precipitazioni episodiche ma localmente molto intense (Fig. 36). I principali eventi si osservano nella prima parte dell'anno, soprattutto tra gennaio e marzo, con un picco molto evidente a marzo che supera i 150 mm d⁻¹. Dopo una fase più irregolare tra primavera ed estate, una nuova fase precipitativa compare tra fine agosto e inizio settembre, con un evento importante prossimo a 100 mm d⁻¹. In autunno le precipitazioni tornano a essere più frequenti, soprattutto tra novembre e dicembre. Il massimo più marcato dell'intera serie si osserva alla fine di dicembre, con valori superiori a 160 mm d⁻¹.

L'intensità del vento presenta una forte variabilità lungo tutto l'anno. La fase più dinamica si osserva tra gennaio e marzo, quando sono presenti numerosi impulsi intensi, spesso superiori a 0,10–0,15 N m⁻² e localmente prossimi a 0,20 N m⁻². Durante la primavera e l'estate il vento tende a ridursi, pur mantenendo alcuni impulsi moderati tra giugno, luglio e agosto. Una nuova intensificazione si osserva tra fine agosto e settembre, in coincidenza con una ripresa degli eventi precipitativi, e poi nuovamente nella parte finale dell'anno, soprattutto tra novembre e dicembre (Fig. 37).

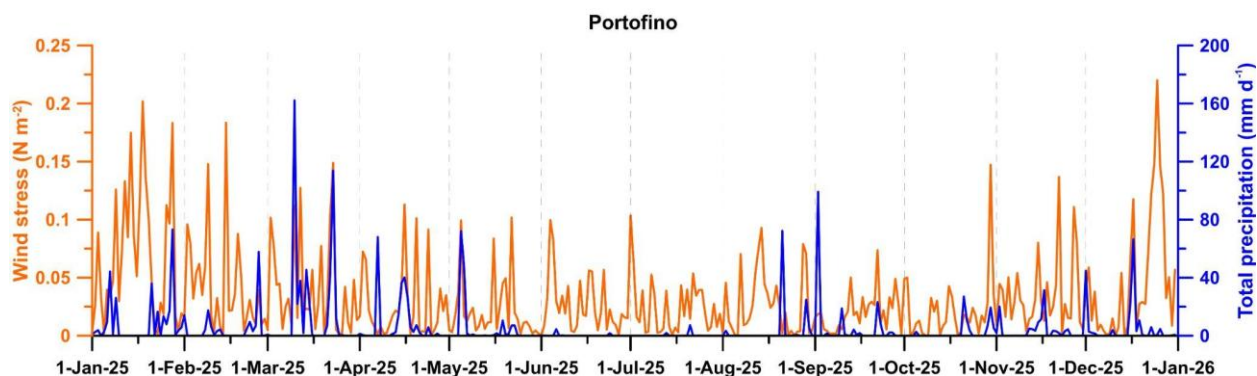


Figura 36. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Portofino, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una fase tardo-invernale relativamente fredda e omogenea (Fig. 37). Tra febbraio e aprile le temperature sono comprese prevalentemente tra 13 °C e 15 °C lungo buona parte della colonna, indicando condizioni di mescolamento verticale ancora efficaci e una stratificazione termica debole. A partire da maggio si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un aumento della stratificazione. Le isoterme più calde si sviluppano inizialmente nei primi metri, mentre gli strati profondi mantengono temperature inferiori, intorno a 16–18 °C. Tra giugno e luglio si instaura una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 26–28 °C e un termocline ben definito nei primi 20–30 metri. Tra luglio e agosto la variabilità termica diventa più marcata lungo la verticale. Il diagramma mostra episodi di approfondimento delle isoterme calde, in particolare quelle comprese tra 22 °C e 25 °C, che raggiungono progressivamente profondità maggiori. Questo comportamento è coerente con gli impulsi di vento osservati nello stesso periodo, che possono aver favorito un aumento del mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Il calore accumulato nello strato superficiale viene quindi in parte trasferito verso gli strati intermedi, riducendo localmente la forte stratificazione termica superficiale. Tra fine agosto e settembre, in corrispondenza di una nuova fase meteorologica più dinamica, con aumento dell'intensità del vento e precipitazioni più rilevanti, il diagramma mostra una ulteriore redistribuzione verticale del calore. Le isoterme calde rimangono presenti fino a circa 30–40 metri, indicando che il segnale termico estivo non resta confinato alla superficie, ma interessa anche gli strati intermedi della colonna d'acqua. Da ottobre verso novembre si osserva un raffreddamento progressivo, con temperature superficiali in diminuzione e una graduale erosione della stratificazione. Tuttavia, il calore accumulato durante l'estate permane ancora parzialmente negli strati intermedi, evidenziando una certa inerzia termica della colonna d'acqua. Nel complesso, Portofino mostra una transizione da una colonna tardo-invernale ben mescolata a una forte stratificazione termica superficiale estiva. La fase più interessante si colloca tra luglio e settembre, quando gli impulsi di vento e la maggiore variabilità meteorologica

favoriscono episodi di mescolamento verticale, approfondimento dello strato mescolato e trasferimento del calore verso profondità intermedie (Fig.36).

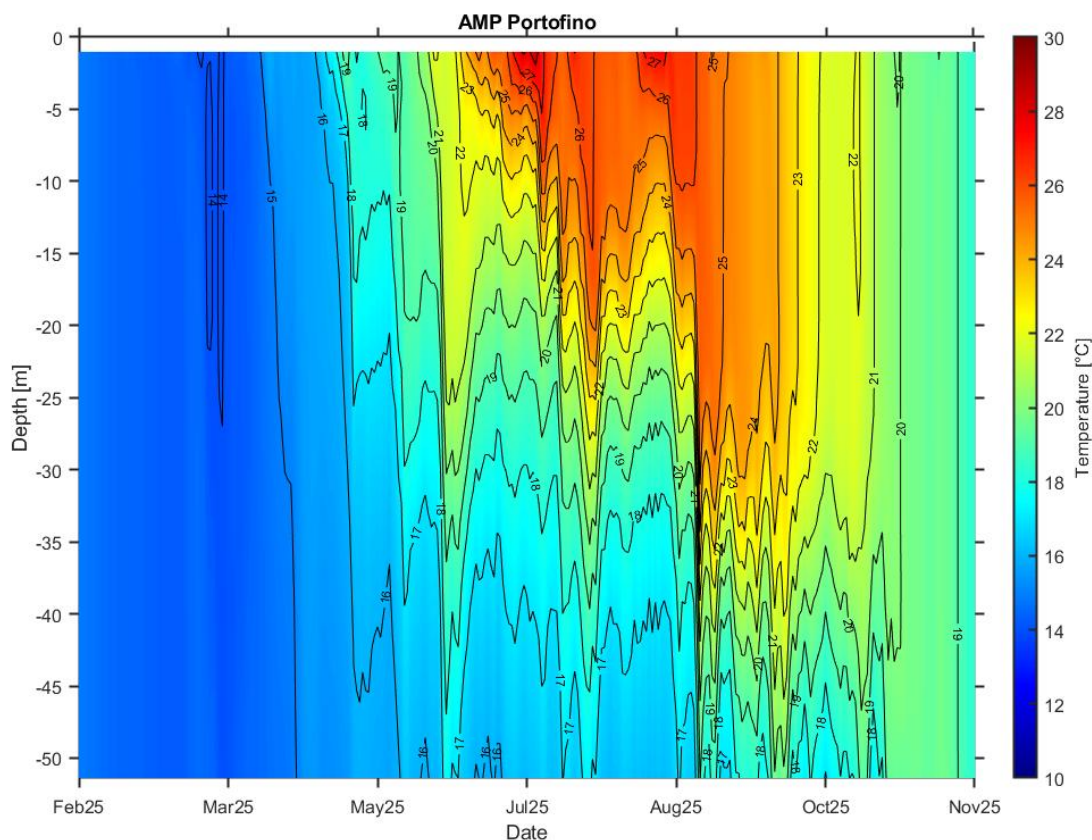


Figura 37. Hovmöller di Temperatura.

AMP Cinque Terre

Nel corso del 2025, l'area delle Cinque Terre mostra precipitazioni molto irregolari, distribuite in episodi brevi ma talvolta intensi (Fig. 38). I massimi pluviometrici più evidenti si osservano tra la fine dell'inverno e l'inizio della primavera, con un evento particolarmente rilevante a marzo che supera i 120 mm d^{-1} . Una nuova fase piovosa intensa compare tra la fine di agosto e l'inizio di settembre, con valori nuovamente superiori a 100 mm d^{-1} . Anche in autunno le precipitazioni risultano presenti con eventi localizzati, soprattutto tra ottobre e novembre, mentre nei mesi estivi prevalgono condizioni generalmente più secche, interrotte solo da pochi episodi isolati (Fig. 37).

L'intensità del vento mostra una forte variabilità episodica lungo tutto l'anno. Si osservano diversi impulsi nei mesi invernali e primaverili, con valori che in alcuni casi raggiungono o superano $0,15 \text{ N m}^{-2}$. Il massimo più evidente si registra all'inizio di luglio, con valori superiori a $0,20 \text{ N m}^{-2}$. Un'altra fase dinamica è evidente tra la fine di agosto e l'inizio di settembre, in coincidenza con gli episodi precipitativi più intensi. In autunno il vento torna a intensificarsi a più riprese, soprattutto tra ottobre e dicembre, pur alternandosi a periodi più calmi (Fig. 38).

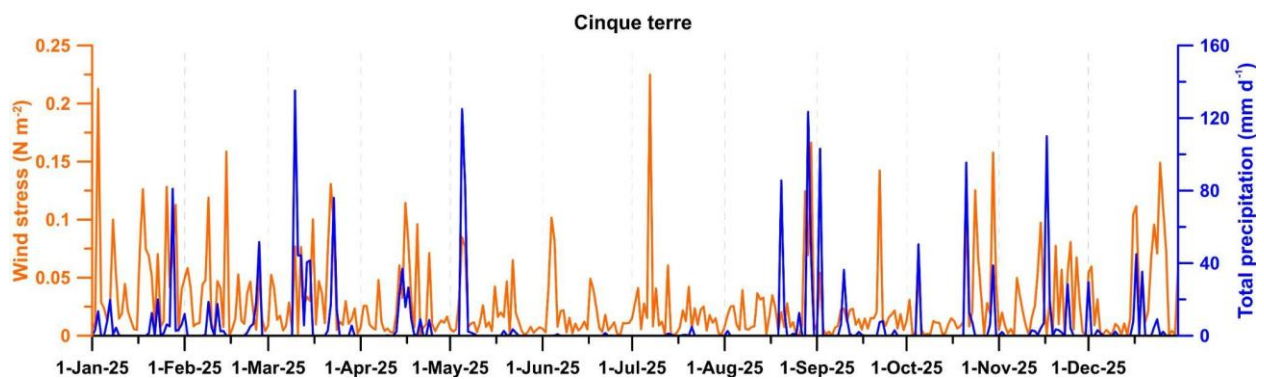


Figura 38. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura alle Cinque Terre, relativo ai primi 25 metri circa della colonna d'acqua, mostra una chiara evoluzione stagionale (Fig. 39). Tra febbraio e marzo la colonna appare fredda e abbastanza omogenea, con temperature comprese prevalentemente tra 13 °C e 15 °C. Questa fase è coerente con condizioni di mescolamento tardo-invernale ancora attive, che mantengono debole il gradiente termico verticale. A partire da aprile e soprattutto da maggio, si osserva un progressivo aumento della stratificazione. Il riscaldamento interessa inizialmente i primi metri, mentre gli strati più profondi rimangono più freddi. Tra giugno e inizio luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale: le temperature nei primi metri raggiungono valori prossimi a 27–29 °C, mentre sotto i 15–20 metri persistono temperature più basse, generalmente intorno a 18–21 °C. L'inizio di luglio rappresenta una fase particolarmente interessante. In corrispondenza del massimo dell'intensità del vento, il diagramma mostra un aumento del mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Questo è visibile dall'andamento più irregolare delle isoterme e dall'approfondimento delle isoterme calde verso la parte bassa della colonna osservata. Il calore accumulato nello strato superficiale viene quindi parzialmente redistribuito verso profondità maggiori, riducendo temporaneamente la forte stratificazione termica superficiale sviluppatasi nel mese di giugno. Tra agosto e settembre la colonna rimane comunque calda, ma continua a mostrare una certa variabilità verticale. Gli episodi di vento e precipitazione di fine agosto-inizio settembre sono coerenti con nuove fasi di mescolamento, che contribuiscono a modulare la struttura termica superficiale senza però determinare un raffreddamento immediato dell'intera colonna. Il calore resta infatti evidente anche negli strati intermedi. Da ottobre verso novembre si osserva un raffreddamento progressivo, con temperature superficiali che diminuiscono e stratificazione via via meno marcata. Nel complesso, alle Cinque Terre il 2025 mostra una fase iniziale ben mescolata, un rapido aumento della stratificazione tra primavera ed estate, e una successiva fase in cui gli impulsi di vento favoriscono episodi di mescolamento verticale e redistribuzione del calore verso il basso (Fig. 39).

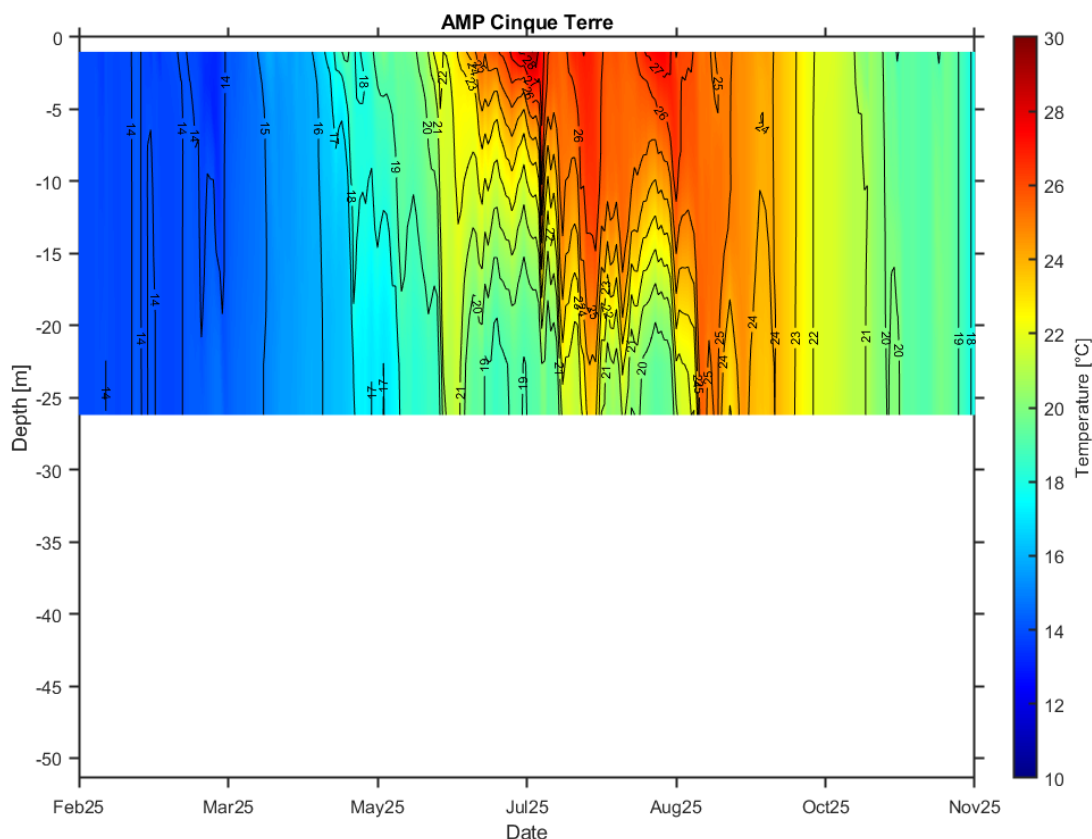


Figura 39. Hovmöller di Temperatura.

Isola d'Elba

Nel corso del 2025, l'area dell'Isola d'Elba mostra precipitazioni episodiche ma localmente intense, con una distribuzione irregolare durante l'anno (Fig. 40). I primi mesi sono caratterizzati da diversi eventi tra gennaio e aprile, con un massimo rilevante a marzo, quando le precipitazioni raggiungono valori prossimi o superiori a 100 mm d^{-1} . Dopo una fase più asciutta tra la tarda primavera e l'estate, le precipitazioni tornano a intensificarsi in autunno, con diversi episodi tra ottobre e dicembre (Fig. 40).

L'intensità del vento è elevata soprattutto nella prima parte dell'anno, con numerosi impulsi tra gennaio e aprile, spesso superiori a $0,10\text{--}0,15 \text{ N m}^{-2}$ e con picchi intorno a $0,25\text{--}0,30 \text{ N m}^{-2}$. Durante l'estate il vento risulta mediamente più debole, anche se sono presenti alcuni impulsi moderati.

Una nuova fase molto dinamica si osserva in autunno, in particolare tra ottobre e novembre, quando si registra il massimo annuale, con valori prossimi a $0,40 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 40).

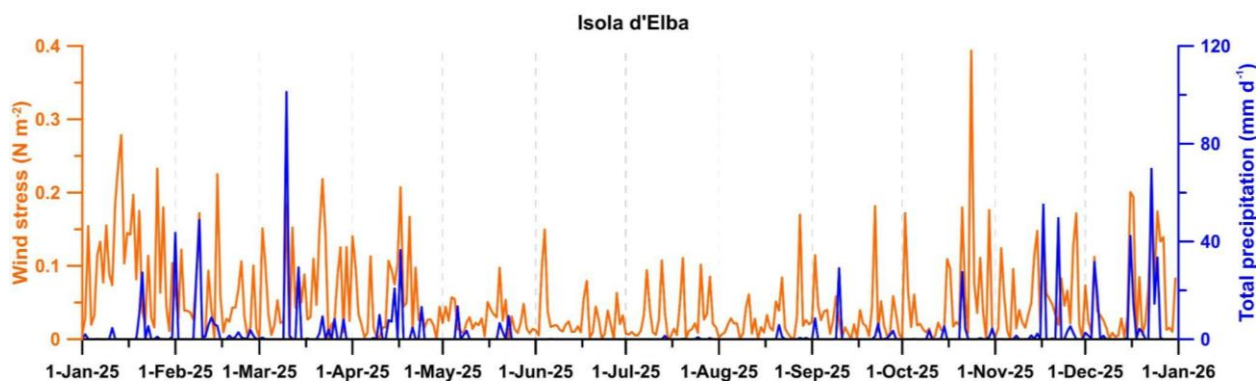


Figura 40. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura all'Isola d'Elba, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una fase tardo-invernale e primaverile inizialmente abbastanza omogenea (Fig. 41). Tra febbraio e aprile le temperature sono prevalentemente comprese tra 14 °C e 16 °C lungo gran parte della colonna, indicando condizioni di mescolamento verticale ancora efficaci e una stratificazione debole. A partire da maggio si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un aumento della stratificazione. Le isoterme più calde compaiono inizialmente nei primi metri e poi tendono ad approfondirsi. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 27–29 °C, mentre sotto i 25–30 metri persistono temperature più basse, intorno a 17–20 °C. Tra luglio e agosto il diagramma mostra una fase di marcata variabilità verticale. Le isoterme calde, in particolare quelle comprese tra 23 °C e 25 °C, si approfondiscono fino a circa 25–35 metri. Questo indica che parte del calore accumulato nello strato superficiale viene trasferito verso gli strati intermedi attraverso episodi di mescolamento verticale. In questa fase, quindi, il segnale non è limitato alla superficie: la colonna d'acqua mostra una chiara redistribuzione verticale del calore. Tra settembre e ottobre il calore resta ancora evidente in profondità, con isoterme intorno a 21–23 °C che raggiungono anche gli strati intermedi e profondi della colonna osservata. Questo comportamento suggerisce una forte inerzia termica della colonna d'acqua dopo il massimo estivo. L'aumento dell'intensità del vento in autunno, soprattutto tra ottobre e novembre, è coerente con un ulteriore approfondimento dello strato mescolato e con la progressiva erosione della stratificazione termica superficiale. Nel complesso, l'Isola d'Elba mostra una transizione ben definita da una colonna tardo-invernale relativamente omogenea a una forte stratificazione estiva. La fase più interessante riguarda il periodo tra luglio e ottobre, quando il calore accumulato in superficie viene progressivamente trasferito verso profondità maggiori, indicando episodi di mescolamento verticale e un marcato approfondimento dello strato mescolato nella seconda parte della stagione calda (Fig. 41).

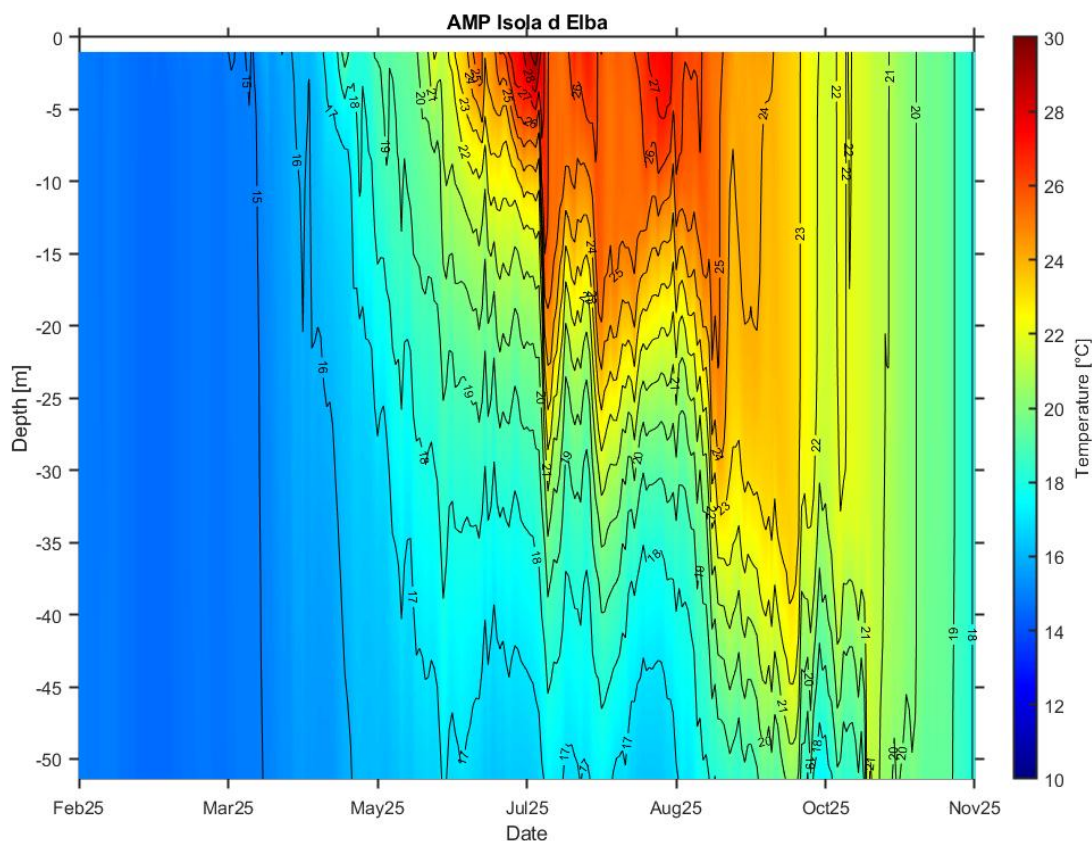


Figura 41. Hovmöller di Temperatura.

AMP Isole Tremiti

Nel corso del 2025, l'area delle Isole Tremiti mostra precipitazioni episodiche e irregolari, distribuite in eventi di breve durata nel corso dell'intero anno (Fig. 42). I picchi più importanti si osservano tra gennaio e aprile, con un massimo molto marcato alla fine di marzo che raggiunge circa 70–80 mm d⁻¹. Una nuova fase di precipitazioni si registra poi in autunno, in particolare tra ottobre e dicembre, con episodi frequenti ma in genere meno intensi, salvo alcuni eventi più rilevanti tra novembre e l'inizio di dicembre (Fig. 42).

L'intensità del vento presenta una variabilità continua, con una fase più attiva tra l'inverno e l'inizio della primavera e un nuovo rafforzamento in autunno. Nei primi mesi dell'anno si osservano diversi impulsi con valori compresi tra 0,10 e 0,20 N m⁻². Durante l'estate il vento si mantiene più debole ma ancora presente, con alcuni episodi moderati tra luglio e agosto. Tra ottobre e novembre si registra invece una nuova intensificazione, con un picco molto marcato a ottobre che supera 0,30 N m⁻², seguito da ulteriori episodi moderati fino alla fine dell'anno (Fig. 42).

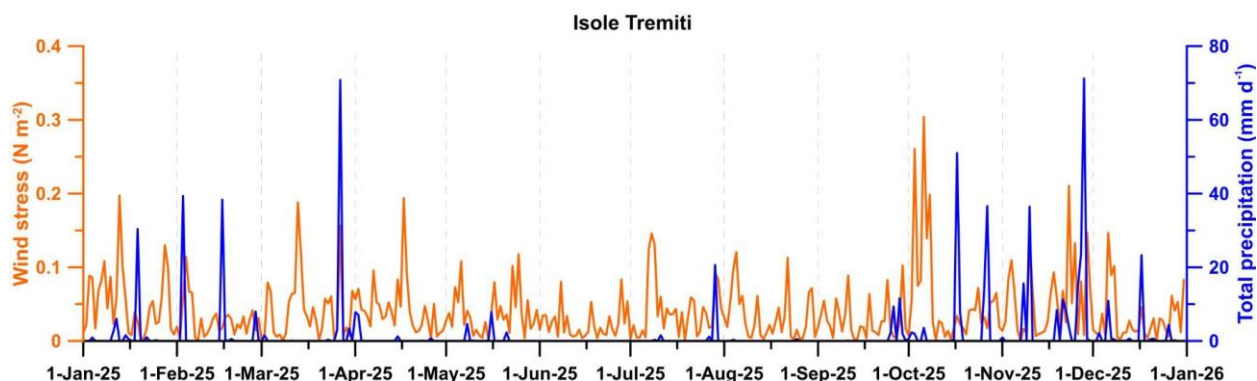


Figura 42. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura alle Isole Tremiti, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una forte stagionalità (Fig. 43). Tra febbraio e marzo la colonna è fredda e abbastanza omogenea, con temperature prevalentemente comprese tra 12 °C e 14 °C. In questa fase il mescolamento verticale appare ancora efficace e la stratificazione termica è molto debole. A partire da aprile si osserva un progressivo riscaldamento, inizialmente concentrato nello strato superficiale. Tra maggio e giugno aumenta rapidamente la stratificazione: le isoterme più calde si sviluppano nei primi metri, mentre sotto i 20–30 metri persistono temperature sensibilmente più basse, generalmente intorno a 15–18 °C. Tra giugno e luglio si instaura una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 27–28 °C. Il termoclino diventa ben evidente e separa lo strato superficiale caldo dagli strati più profondi ancora relativamente freschi. In questa fase il riscaldamento è intenso, ma non interessa inizialmente tutta la colonna. La fase più interessante si osserva tra la seconda metà di luglio e agosto. In questo periodo il diagramma mostra una marcata penetrazione verticale del calore, con l'approfondimento delle isoterme calde, in particolare quelle comprese tra 22 °C e 25 °C, verso profondità anche superiori a 30–40 metri. Questo comportamento è coerente con episodi di mescolamento verticale favoriti dagli impulsi di vento estivi. Il calore accumulato nello strato superficiale viene quindi trasferito verso gli strati intermedi e profondi, producendo un approfondimento temporaneo dello strato mescolato. In questa fase non sembra prevalere una semplice risalita di acque fredde, ma piuttosto una redistribuzione verticale del calore lungo la colonna d'acqua. Il segnale è particolarmente evidente perché, dopo il massimo riscaldamento superficiale, le isoterme calde si propagano verso il basso e rendono il calore estivo visibile anche negli strati profondi. Tra settembre e ottobre la colonna resta ancora relativamente calda, soprattutto negli strati superiori e intermedi. Tuttavia, con l'aumento dell'intensità del vento in autunno, si osserva una progressiva erosione della stratificazione. Il raffreddamento superficiale diventa più evidente da ottobre in poi, mentre il calore accumulato in estate permane ancora parzialmente negli strati intermedi, indicando una certa inerzia termica della colonna d'acqua. Nel complesso, le Isole Tremiti mostrano una fase tardo-invernale ben mescolata, un rapido aumento della stratificazione tra primavera ed estate e una fase estiva caratterizzata da forte stratificazione termica superficiale. Gli episodi di vento tra luglio e agosto sembrano

favorire il mescolamento verticale e il trasferimento del calore verso profondità maggiori, mentre la fase autunnale è dominata dalla progressiva riduzione della stratificazione e dal raffreddamento della colonna d'acqua (Fig. 43).

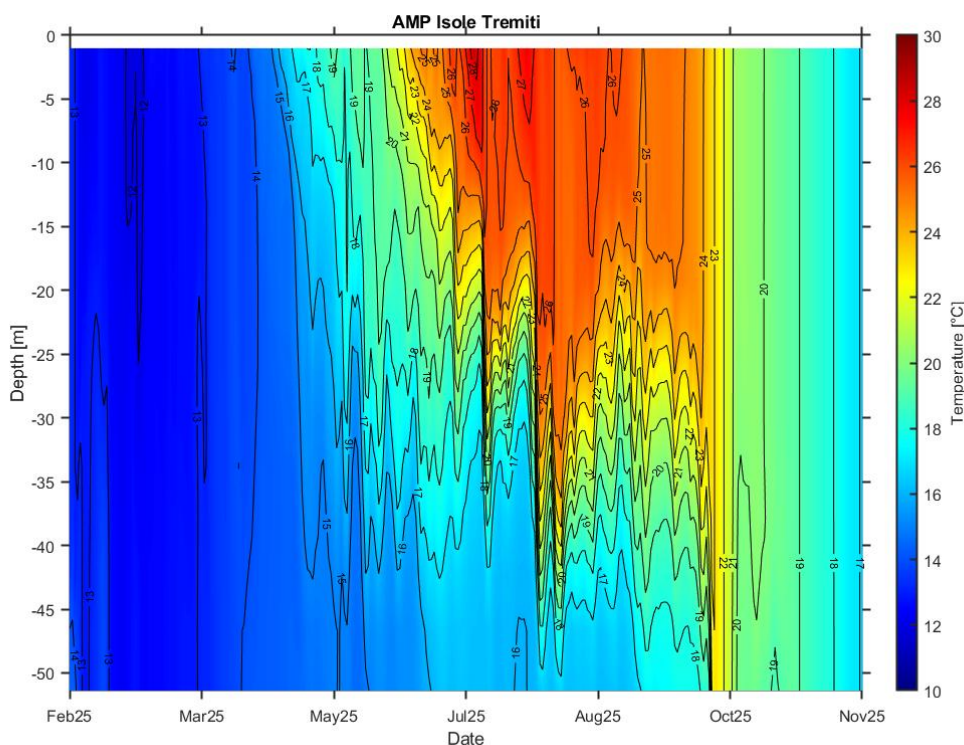


Figura 43. Hovmöller di Temperatura.

AMP Isola dell'Asinara

Nel corso del 2025, l'area dell'Asinara ha mostrato precipitazioni generalmente scarse e molto irregolari, concentrate in episodi brevi distribuiti soprattutto tra la fine dell'inverno, la primavera e l'autunno (Fig. 44). Gli eventi pluviometrici più rilevanti si osservano tra marzo e aprile, con un picco massimo che raggiunge circa 60 mm d^{-1} nella seconda metà di aprile. Dopo questa fase, durante l'estate le precipitazioni risultano quasi assenti o limitate a episodi molto deboli, mentre tra settembre e dicembre si registra una nuova sequenza di eventi intermittenti, con massimi generalmente compresi tra 20 e 30 mm d^{-1} (Fig. 44).

L'intensità del vento mostra una variabilità molto marcata nel corso dell'anno, con valori elevati soprattutto nei mesi invernali e primaverili. Tra gennaio e aprile si osservano numerosi episodi intensi, spesso superiori a $0,15\text{--}0,20 \text{ N m}^{-2}$, con impulsi rilevanti anche in tarda primavera. Durante l'estate il segnale tende in media a ridursi, pur rimanendo intervallato da alcuni episodi isolati, mentre in autunno torna a intensificarsi con nuovi eventi tra ottobre e dicembre. Il massimo più evidente si registra a fine ottobre, quando si raggiungono valori prossimi a $0,40 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 44).

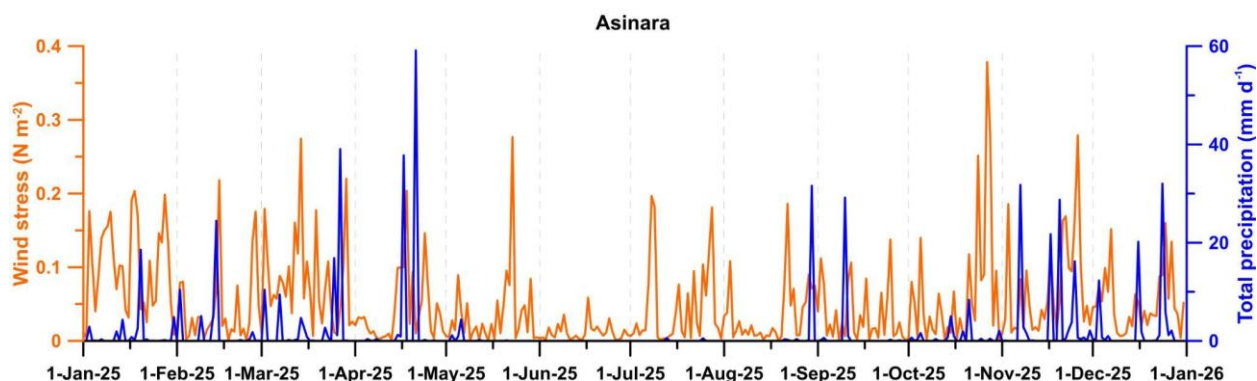


Figura 44. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura all'Isola dell'Asinara, relativo ai primi 25–26 metri della colonna d'acqua, mostra una chiara evoluzione stagionale (Fig. 45). Tra febbraio e marzo prevalgono condizioni relativamente omogenee, con temperature comprese in prevalenza tra 14 °C e 16 °C. In questa fase la colonna d'acqua appare poco stratificata, coerentemente con condizioni di mescolamento ancora efficaci nella parte superficiale. A partire da aprile si osserva un progressivo aumento della temperatura nei primi metri e, soprattutto tra maggio e giugno, un deciso aumento della stratificazione. Lo strato superficiale si riscalda rapidamente, mentre gli strati più profondi rimangono relativamente più freschi. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature che nei primi metri raggiungono valori prossimi a 28–29 °C, mentre intorno a 20–25 metri si mantengono valori sensibilmente inferiori. Nel corso dell'estate, e in particolare tra giugno, luglio e parte di agosto, il diagramma mostra una marcata variabilità delle isoterme nella parte intermedia e inferiore della colonna osservata. Questo comportamento suggerisce episodi ripetuti di mescolamento verticale, verosimilmente favoriti dagli impulsi di vento che caratterizzano anche la stagione estiva. In queste fasi si osserva infatti un approfondimento dello strato mescolato e una penetrazione del calore verso profondità maggiori, evidente dall'approfondimento delle isoterme più calde. Il segnale non indica quindi solo un riscaldamento superficiale, ma anche una redistribuzione verticale del calore lungo l'intera porzione osservata della colonna d'acqua. Tra agosto e settembre, pur in presenza di un graduale raffreddamento della superficie, la colonna mantiene ancora una stratificazione ben riconoscibile. Le temperature restano elevate nei primi metri e il raffreddamento interessa inizialmente soprattutto lo strato superficiale, mentre gli strati più profondi mostrano una risposta più graduale. Questo suggerisce una certa inerzia termica della colonna d'acqua e la persistenza di condizioni estive anche verso l'inizio dell'autunno. Tra ottobre e novembre il raffreddamento diventa più evidente e si osserva una progressiva riduzione della stratificazione. In concomitanza con l'aumento dell'intensità del vento nella parte finale dell'anno, il diagramma è coerente con un nuovo rafforzamento del mescolamento verticale, che contribuisce ad approfondire lo strato mescolato e a rendere la colonna d'acqua progressivamente più omogenea. Nel complesso, all'Isola dell'Asinara il 2025 è caratterizzato da una fase tardo-invernale poco stratificata, da un rapido aumento della

stratificazione in primavera e da una forte stratificazione termica superficiale durante l'estate. A questa fase si associano episodi di mescolamento verticale che favoriscono il trasferimento del calore verso gli strati più profondi, seguiti infine da una graduale erosione della stratificazione nel corso dell'autunno (Fig. 45).

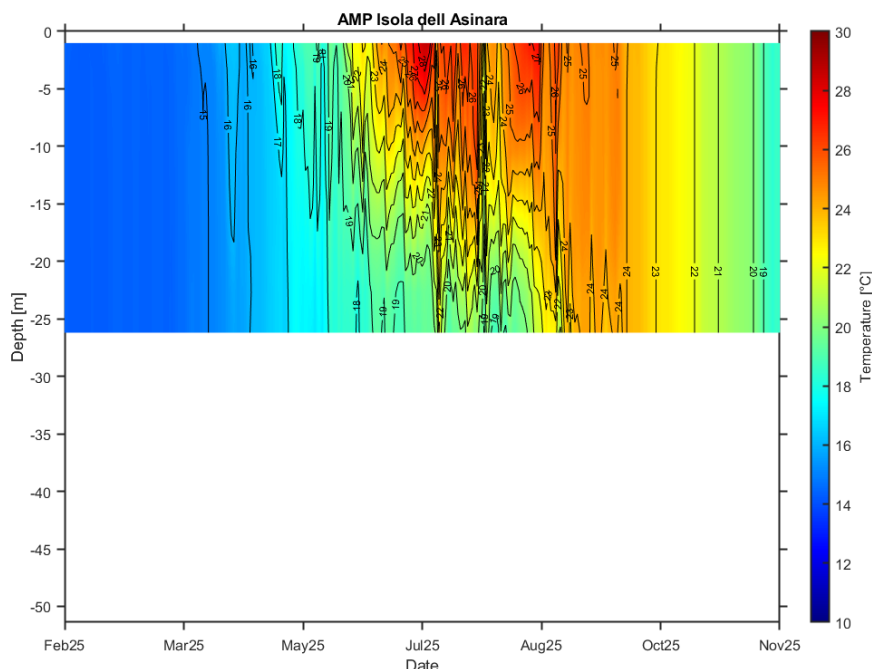


Figura 45. Hovmöller di Temperatura.

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nel corso del 2025, l'area di Tavolara Punta Coda Cavallo mostra precipitazioni deboli e molto irregolari, concentrate soprattutto nella prima parte dell'anno e poi nuovamente nella fase finale (Fig. 46). Gli episodi più evidenti si osservano tra gennaio e aprile, con alcuni massimi compresi intorno a 40–60 mm d⁻¹. Dopo aprile, le precipitazioni diventano molto scarse: durante l'estate prevalgono condizioni generalmente asciutte, con solo eventi isolati e di modesta entità. Una nuova fase di precipitazioni intermittenti compare tra novembre e dicembre, con alcuni episodi localmente più marcati (Fig. 46).

L'intensità del vento presenta invece una variabilità più continua. I mesi tra gennaio e aprile sono caratterizzati da diversi impulsi, alcuni dei quali raggiungono valori intorno a 0,15–0,20 N m⁻². Durante l'estate il vento è mediamente più debole, ma non assente: tra luglio e settembre compaiono diversi impulsi moderati, generalmente inferiori a quelli invernali e primaverili, ma potenzialmente rilevanti per il mescolamento della colonna d'acqua. Una nuova intensificazione si osserva poi in autunno, soprattutto tra ottobre e novembre, con un picco prossimo a 0,20 N m⁻² (Fig. 46).

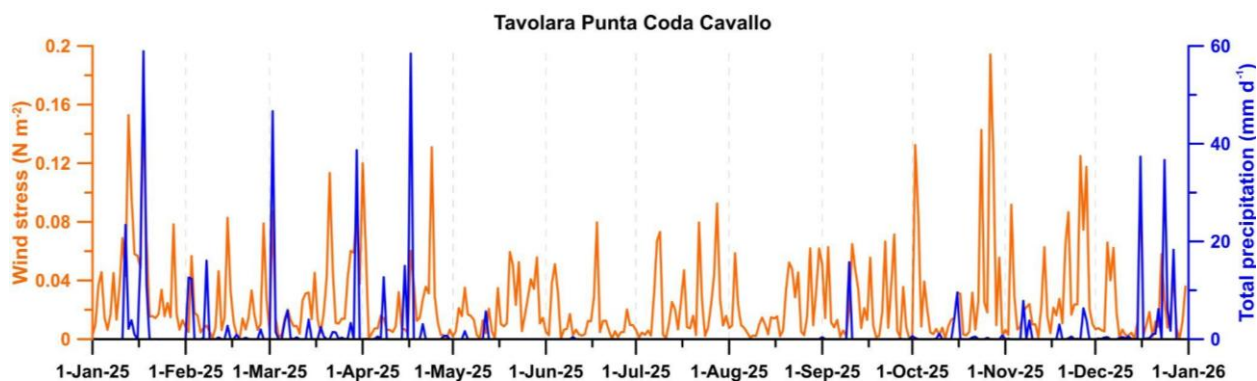


Figura 46. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Tavolara Punta Coda Cavallo, relativo ai primi 30–35 metri della colonna d'acqua, mostra una fase iniziale abbastanza omogenea tra febbraio e aprile (Fig. 47). In questo periodo le temperature sono prevalentemente comprese tra 14 °C e 16 °C e il gradiente verticale è debole, indicando condizioni di mescolamento tardo-invernale ancora efficaci. A partire da aprile e soprattutto da maggio si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un aumento della stratificazione. Le isoterme più calde compaiono inizialmente nei primi metri, mentre gli strati più profondi rimangono più freschi. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature che nei primi metri raggiungono valori prossimi a 27–29 °C. La fase più interessante si osserva tra luglio e agosto. In questo periodo il diagramma mostra una marcata variabilità verticale delle isoterme, con episodi di approfondimento delle isoterme calde verso la parte inferiore della colonna osservata. Questo comportamento è coerente con gli impulsi di vento presenti nello stesso periodo, che possono aver favorito un aumento del mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Il calore accumulato nello strato superficiale non rimane quindi confinato ai primi metri, ma viene in parte trasferito verso gli strati intermedi e profondi. In particolare, tra la seconda metà di luglio e agosto, l'approfondimento delle isoterme comprese tra circa 23 °C e 25 °C indica una penetrazione verticale del calore lungo quasi tutta la colonna disponibile. La variabilità termica appare quindi dominata da processi di mescolamento e redistribuzione verticale del calore, più che da una semplice variazione della temperatura superficiale. Tra settembre e ottobre la colonna d'acqua rimane ancora relativamente calda, con temperature elevate che persistono anche sotto lo strato superficiale. Questo indica una certa inerzia termica, dovuta al calore accumulato e redistribuito durante l'estate. Il raffreddamento diventa più evidente solo nella parte finale del periodo, quando l'aumento dell'intensità del vento e la ripresa degli episodi meteorologici autunnali favoriscono una progressiva erosione della stratificazione. Nel complesso, Tavolara Punta Coda Cavallo mostra una transizione da una colonna tardo-invernale ben mescolata a una forte stratificazione termica superficiale estiva. La fase estiva è caratterizzata da episodi di mescolamento verticale che favoriscono l'approfondimento dello strato mescolato e il

trasferimento del calore verso profondità maggiori, rendendo il segnale termico visibile lungo quasi tutta la colonna d'acqua osservata (Fig. 47).

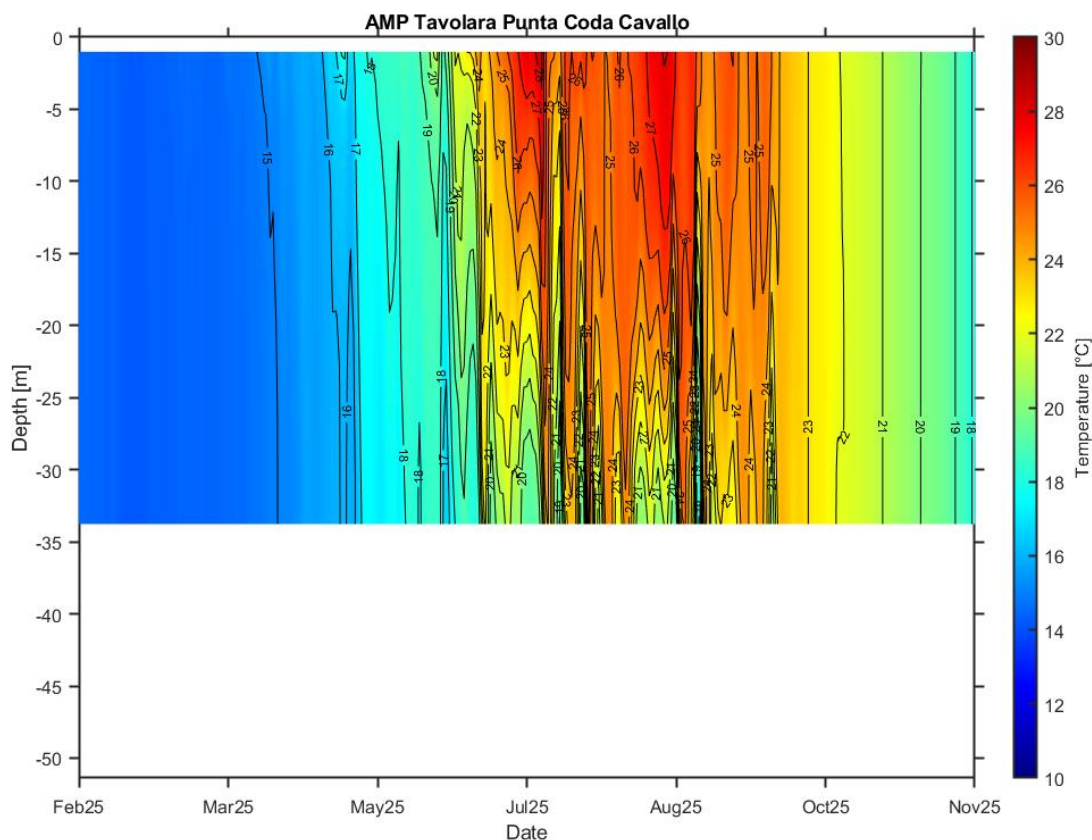


Figura 47. Hovmöller di Temperatura.

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

Nel corso del 2025, l'area delle Isole di Ventotene e Santo Stefano mostra precipitazioni generalmente deboli e molto irregolari, distribuite in episodi brevi durante tutto l'anno (Fig. 48). I principali eventi si osservano nei mesi invernali e primaverili, con alcuni picchi tra gennaio e aprile che raggiungono circa 30–40 mm d⁻¹. Un episodio particolarmente evidente si registra poi a settembre, con valori prossimi a 60 mm d⁻¹, seguito da una nuova fase di eventi intermittenti tra ottobre e dicembre (Fig. 48).

L'intensità del vento è elevata soprattutto nei mesi invernali e all'inizio della primavera. Tra gennaio e aprile si osservano numerosi impulsi, con valori che raggiungono circa 0,25–0,35 N m⁻². Durante l'estate il segnale si attenua sensibilmente, con valori generalmente più bassi, anche se sono presenti alcuni episodi moderati tra luglio e agosto. In autunno il vento torna a rafforzarsi, soprattutto tra ottobre e novembre, con un nuovo impulso molto evidente prossimo a 0,35 N m⁻². Anche alla fine di dicembre si osserva una nuova intensificazione, con valori superiori a 0,10 N m⁻² (Fig. 48).

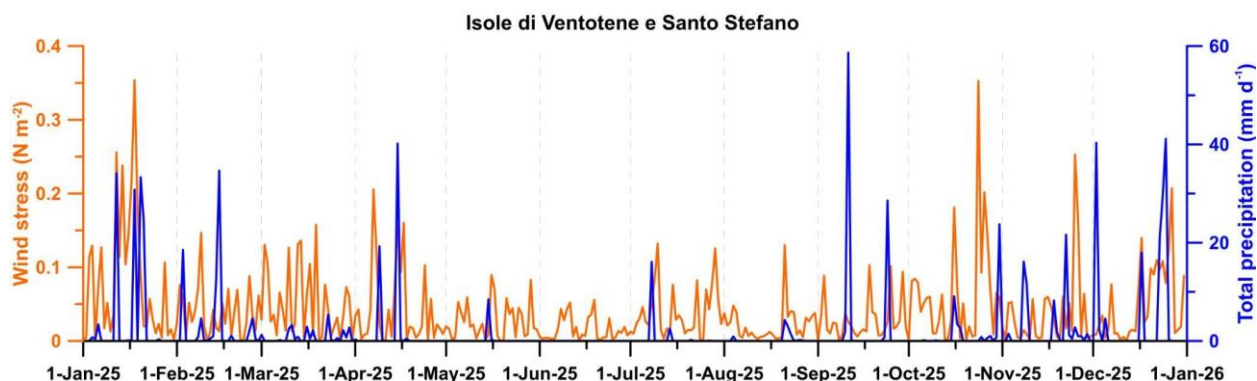


Figura 48. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura alle Isole di Ventotene e Santo Stefano, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una chiara evoluzione stagionale (Fig. 49). Tra febbraio e marzo la colonna appare relativamente omogenea, con temperature comprese prevalentemente tra 15 °C e 16 °C. In questa fase la stratificazione è debole e il mescolamento verticale risulta ancora efficace lungo gran parte della colonna osservata. A partire da aprile si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un aumento della stratificazione. Le isoterme più calde compaiono inizialmente nei primi metri, mentre gli strati più profondi mantengono temperature inferiori, generalmente intorno a 16–18 °C. Tra maggio e giugno il gradiente verticale diventa più marcato e si struttura un termoclino nei primi 15–25 metri. Tra giugno e agosto si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 27–28 °C. In questa fase il calore resta inizialmente concentrato nella parte superiore della colonna, mentre sotto i 25–30 metri persistono valori più bassi. Tuttavia, tra luglio e agosto, il diagramma mostra anche un progressivo approfondimento delle isoterme calde, in particolare quelle comprese tra 22 °C e 25 °C, che raggiungono profondità maggiori. Questo comportamento indica una redistribuzione verticale del calore lungo la colonna d'acqua. Gli impulsi di vento presenti durante l'estate, sebbene meno intensi rispetto a quelli invernali, possono aver favorito episodi di mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Il segnale principale non appare quindi come una semplice variazione superficiale, ma come un trasferimento del calore accumulato nei primi metri verso gli strati intermedi. Tra settembre e ottobre la colonna rimane ancora relativamente calda, con isoterme di 21–23 °C che interessano anche profondità intermedie. L'episodio precipitativo di settembre e il successivo aumento dell'intensità del vento in autunno sono coerenti con una progressiva erosione della stratificazione. In questa fase il raffreddamento superficiale diventa più evidente, mentre il calore accumulato durante l'estate persiste ancora parzialmente in profondità. Verso novembre si osserva una riduzione più marcata delle temperature e una progressiva omogeneizzazione della colonna. Nel complesso, le Isole di Ventotene e Santo Stefano mostrano una fase tardo-invernale ben mescolata, un aumento della stratificazione tra primavera ed estate e una fase estiva caratterizzata da forte stratificazione termica superficiale. Tra luglio e ottobre, il calore viene progressivamente trasferito verso

profondità maggiori, indicando episodi di mescolamento verticale e una significativa inerzia termica della colonna d'acqua (Fig. 49).

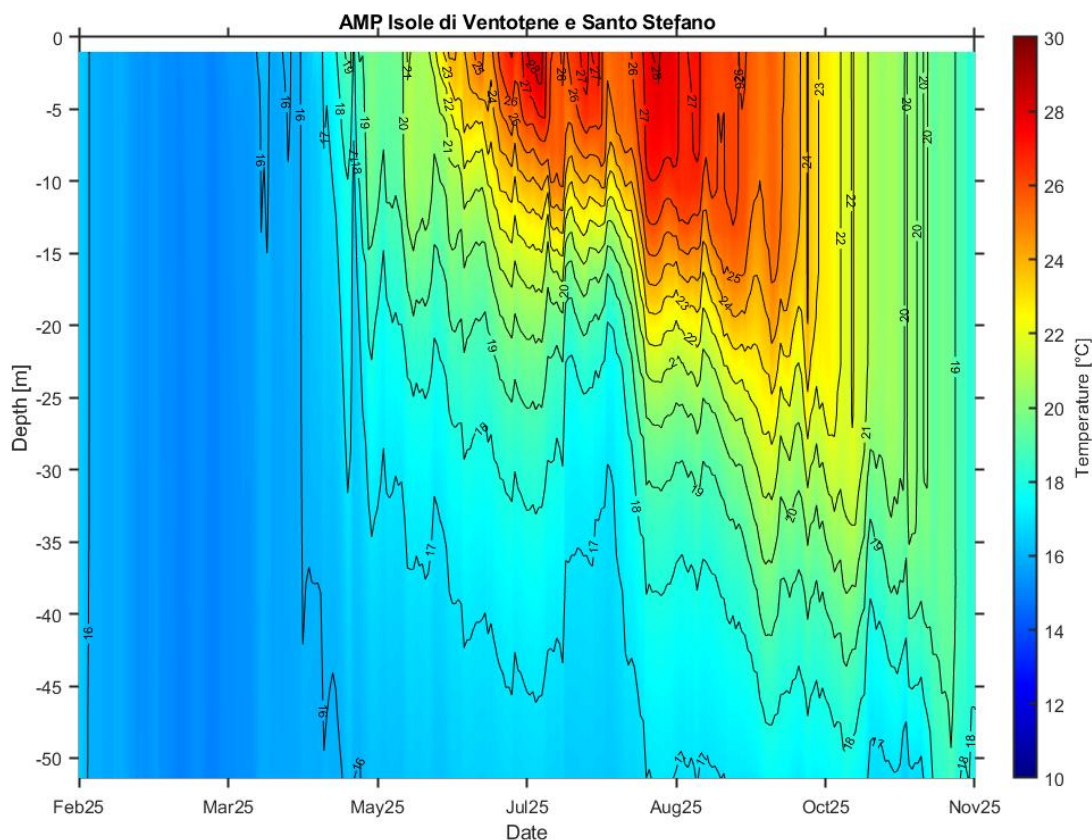


Figura 49. Hovmöller di Temperatura.

AMP Torre Guaceto

Nel corso del 2025, l'area di Torre Guaceto mostra precipitazioni generalmente molto scarse, concentrate in pochi episodi brevi ma talvolta intensi (Fig. 50). Per gran parte dell'anno le piogge risultano deboli o assenti, con eventi isolati tra marzo e aprile e una fase più significativa in autunno. Il massimo pluviometrico più evidente si osserva a novembre, quando le precipitazioni raggiungono circa 140 mm d^{-1} . Altri episodi compaiono tra ottobre e dicembre, ma restano separati da lunghi intervalli asciutti (Fig. 50).

L'intensità del vento è invece piuttosto attiva durante tutto l'anno, con numerosi impulsi distribuiti sia nella prima parte dell'anno sia durante l'estate e l'autunno. I valori sono spesso compresi tra $0,02$ e $0,08 \text{ N m}^{-2}$, ma diversi episodi raggiungono valori prossimi a $0,12$ – $0,16 \text{ N m}^{-2}$. Una fase particolarmente dinamica si osserva tra marzo e aprile, seguita da nuovi impulsi tra giugno, luglio e agosto. Anche tra ottobre e novembre il vento torna a intensificarsi, in concomitanza con la ripresa degli eventi precipitativi autunnali (Fig. 50).

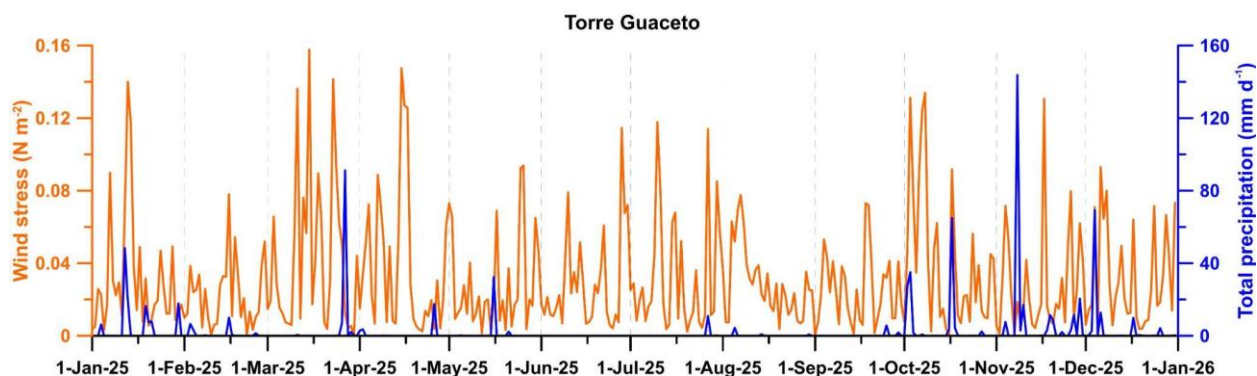


Figura 50. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Torre Guaceto, relativo ai primi 30 metri della colonna d'acqua, mostra una chiara evoluzione stagionale (Fig. 51). Tra febbraio e aprile la colonna è relativamente fredda e abbastanza omogenea, con temperature comprese prevalentemente tra 13 °C e 16 °C. In questa fase la stratificazione è debole e il mescolamento verticale appare ancora efficace lungo gran parte della colonna osservata. A partire da maggio si osserva un rapido riscaldamento dello strato superficiale, con un progressivo aumento della stratificazione. Le isoterme più calde compaiono inizialmente nei primi metri, mentre gli strati più profondi rimangono più freschi. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 27–29 °C. Rispetto ad altre aree più profonde, a Torre Guaceto il riscaldamento estivo coinvolge rapidamente quasi tutta la colonna osservata. Tra luglio e agosto, infatti, le isoterme calde si approfondiscono fino a circa 25–30 metri, indicando una marcata penetrazione verticale del calore. Questo comportamento è coerente con la presenza di impulsi ripetuti di vento durante l'estate, che possono aver favorito episodi di mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. In questa fase, il segnale principale non è una risalita di acque fredde, ma una redistribuzione verticale del calore. Il calore accumulato nello strato superficiale viene trasferito verso gli strati più profondi della colonna disponibile, rendendo la struttura termica estiva piuttosto uniforme fino a circa 30 metri. La forte stratificazione termica superficiale iniziale viene quindi parzialmente modulata dal mescolamento, pur mantenendo temperature elevate lungo tutta la colonna. Tra settembre e ottobre il calore rimane ancora evidente, con temperature elevate che persistono anche negli strati inferiori. Successivamente, da ottobre verso novembre, si osserva un raffreddamento progressivo, accompagnato da una riduzione della stratificazione. L'aumento dell'intensità del vento e gli episodi precipitativi autunnali sono coerenti con un rafforzamento del mescolamento verticale e con la progressiva erosione del calore accumulato durante l'estate. Nel complesso, Torre Guaceto mostra una colonna d'acqua inizialmente ben mescolata, un rapido aumento della stratificazione in primavera e una fase estiva in cui il calore penetra fino al fondo della colonna osservata. La variabilità termica del 2025 evidenzia quindi un sistema costiero poco profondo, fortemente sensibile agli impulsi di

vento, dove il mescolamento verticale favorisce una rapida redistribuzione del calore lungo tutta la colonna d'acqua (Fig. 51).

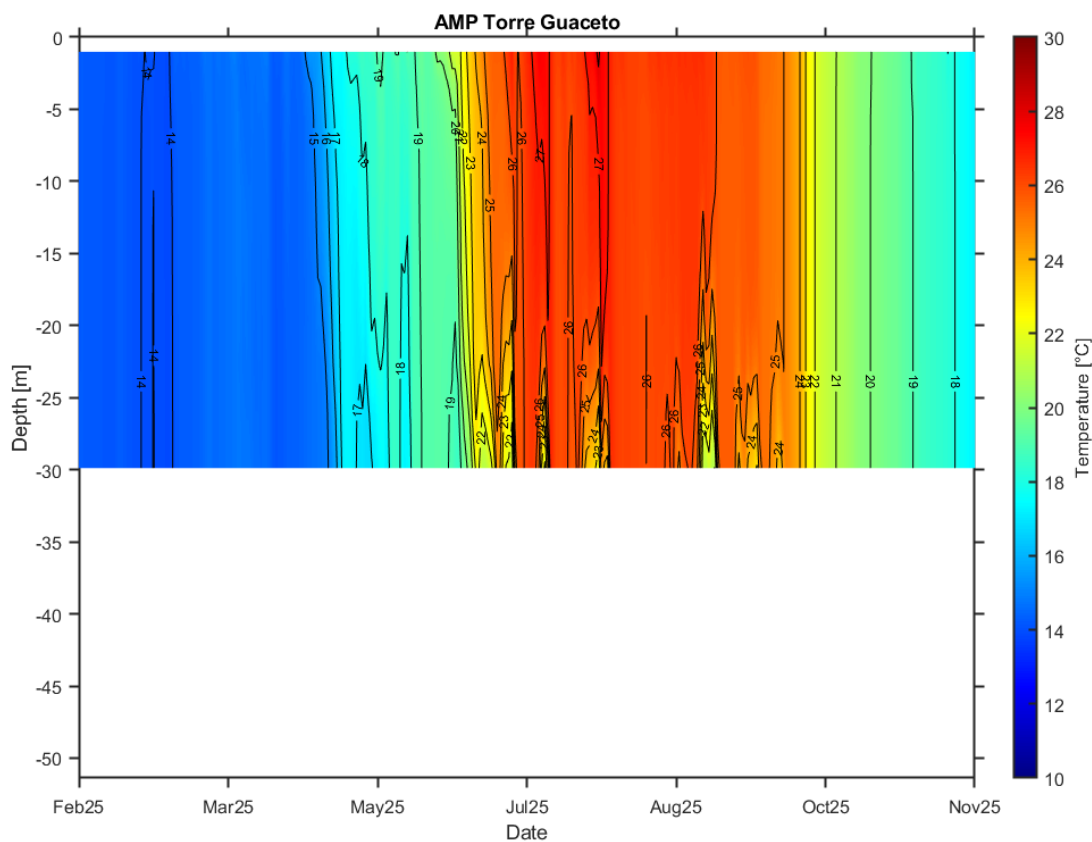


Figura 51. Hovmöller di Temperatura.

AMP Capo Carbonara

Nel corso del 2025, l'area di Capo Carbonara mostra precipitazioni generalmente scarse e distribuite in episodi brevi e intermittenti. Gli eventi più significativi si osservano tra gennaio e aprile, con un picco particolarmente marcato all'inizio di febbraio che raggiunge circa 80 mm d⁻¹ (Fig. 52). Successivamente, tra la tarda primavera e l'estate, le precipitazioni risultano molto più deboli e sporadiche. In autunno si osserva una nuova fase di instabilità con alcuni episodi concentrati soprattutto tra novembre e dicembre, generalmente di intensità più contenuta ma localmente prossimi a 30–35 mm d⁻¹ (Fig. 52).

L'intensità del vento presenta una variabilità continua ma moderata lungo tutto l'anno, con diversi impulsi distribuiti tra inverno, primavera, estate e autunno. I valori sono spesso compresi tra 0,02 e 0,10 N m⁻², ma alcuni episodi più intensi raggiungono circa 0,16–0,18 N m⁻². Una fase importante si osserva tra luglio e inizio settembre, quando una sequenza di impulsi di vento, pur non sempre estremi, appare particolarmente rilevante per la risposta termica della colonna d'acqua. Nuovi episodi di intensificazione sono presenti anche tra ottobre e novembre (Fig. 52).

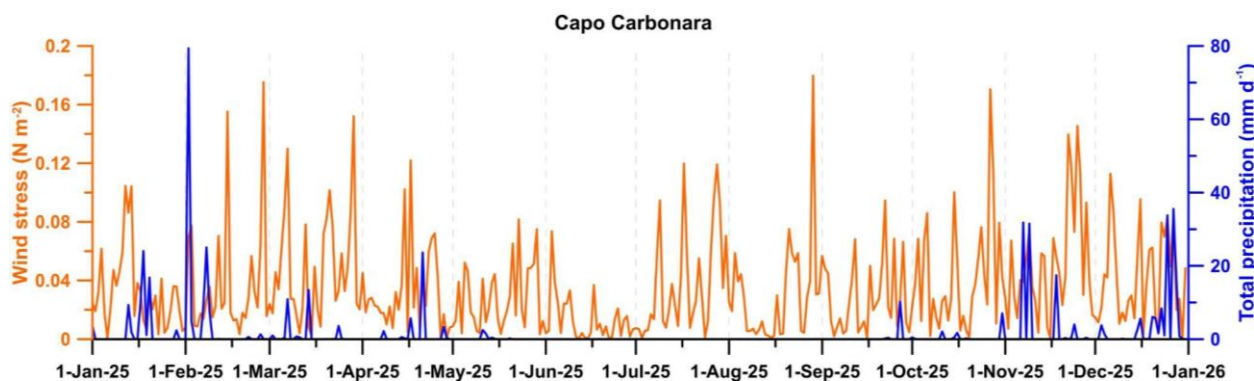


Figura 52. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Capo Carbonara mostra una chiara evoluzione stagionale nei primi 50 metri della colonna d'acqua (Fig. 53). Tra febbraio e marzo la colonna appare relativamente omogenea, con temperature comprese prevalentemente tra 14 °C e 15 °C. Questa fase indica condizioni di mescolamento tardo-invernale ancora efficaci, con un gradiente termico verticale molto debole. A partire da aprile e maggio si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale e un aumento della stratificazione. Le temperature più elevate restano inizialmente concentrate nei primi metri, mentre gli strati più profondi mantengono valori inferiori. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature nei primi metri prossime a 28–29 °C e un chiaro contrasto rispetto agli strati sottostanti. Tra luglio e agosto, il diagramma mostra episodi caratterizzati da una forte penetrazione verticale del calore, evidente dall'approfondimento dell'isoterma dei 18 °C e, più in generale, dall'abbassamento delle isoterme calde verso profondità maggiori. Questo comportamento è coerente con la sequenza di impulsi di vento osservata nello stesso periodo, che può aver favorito un aumento del mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. La variabilità termica osservata appare quindi dominata da un processo di mescolamento verticale e redistribuzione del calore lungo la colonna d'acqua. Il calore accumulato nello strato superficiale durante la fase di forte stratificazione non rimane confinato ai primi metri, ma viene trasferito verso gli strati intermedi e profondi. In questo caso, quindi, il segnale principale non sembra essere una risalita di acque fredde, ma piuttosto un trasporto verticale del calore indotto dal vento. Tra settembre e ottobre il calore resta ancora ben visibile nella colonna d'acqua, con valori elevati che raggiungono profondità importanti. Questo indica una forte inerzia termica e una persistenza del calore accumulato durante l'estate. Solo verso novembre si osserva un raffreddamento più evidente, accompagnato da una progressiva riduzione della stratificazione. Nel complesso, Capo Carbonara mostra una transizione da una colonna tardo-invernale ben mescolata a una forte stratificazione termica superficiale estiva. La fase più interessante è quella tra luglio e agosto, quando gli impulsi di vento sembrano favorire un approfondimento dello strato mescolato e una marcata redistribuzione verticale del calore, rendendo il segnale termico visibile fino a profondità elevate (Fig. 53).

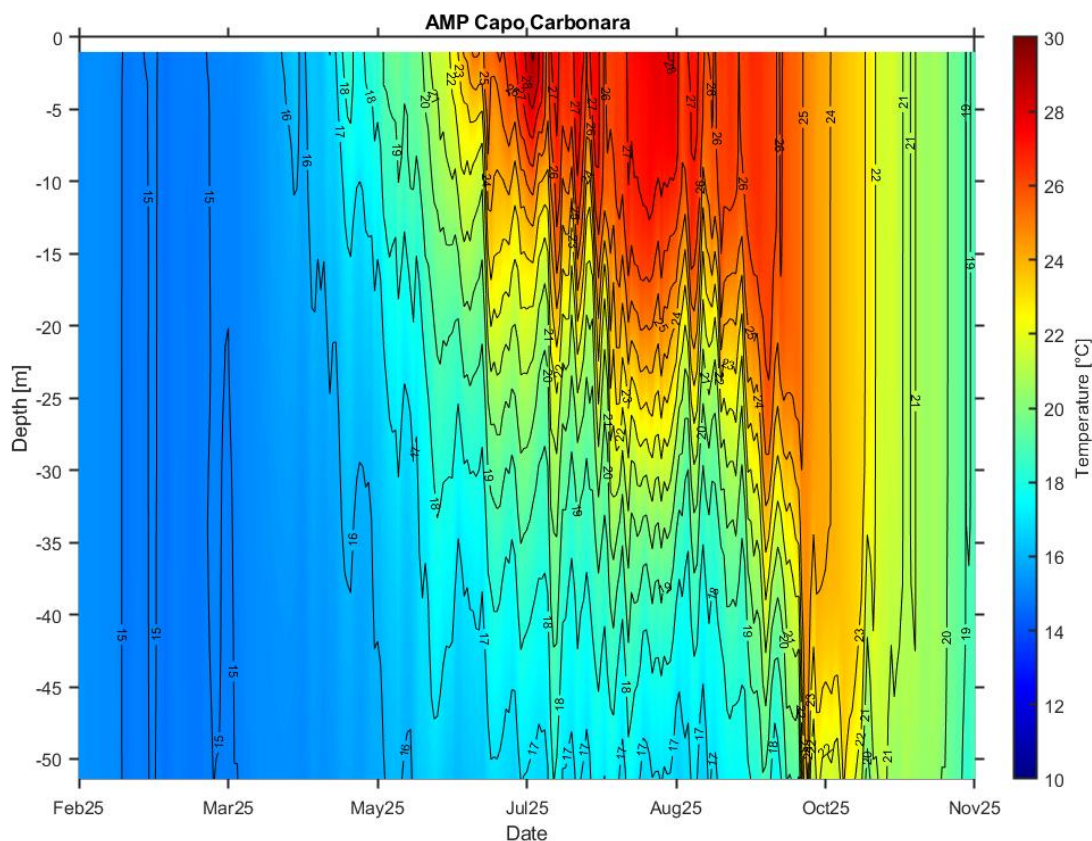


Figura 53. Hovmöller di Temperatura.

AMP Capo Milazzo

Nel corso del 2025, l'area di Capo Milazzo mostra precipitazioni generalmente scarse, distribuite in episodi brevi e discontinui (Fig. 54). I principali eventi pluviometrici si osservano tra gennaio e aprile, con valori localmente compresi tra circa 30 e 70 mm d⁻¹. Dopo una fase estiva quasi asciutta, una nuova fase di instabilità compare in autunno, in particolare tra ottobre e novembre, quando si registra un episodio più intenso che supera gli 80 mm d⁻². Tra novembre e dicembre le precipitazioni restano presenti, ma con eventi generalmente più deboli o moderati (Fig. 54).

L'intensità del vento appare più attiva nella prima parte dell'anno, soprattutto tra marzo e aprile, con diversi impulsi che raggiungono circa 0,10–0,13 N m⁻². Durante l'estate il segnale è mediamente più debole, ma non assente: tra luglio e agosto si osservano alcuni impulsi moderati, rilevanti per la risposta termica della colonna d'acqua. In autunno il vento torna a intensificarsi, in particolare tra ottobre e novembre, in concomitanza con la ripresa degli eventi piovosi (Fig. 54).

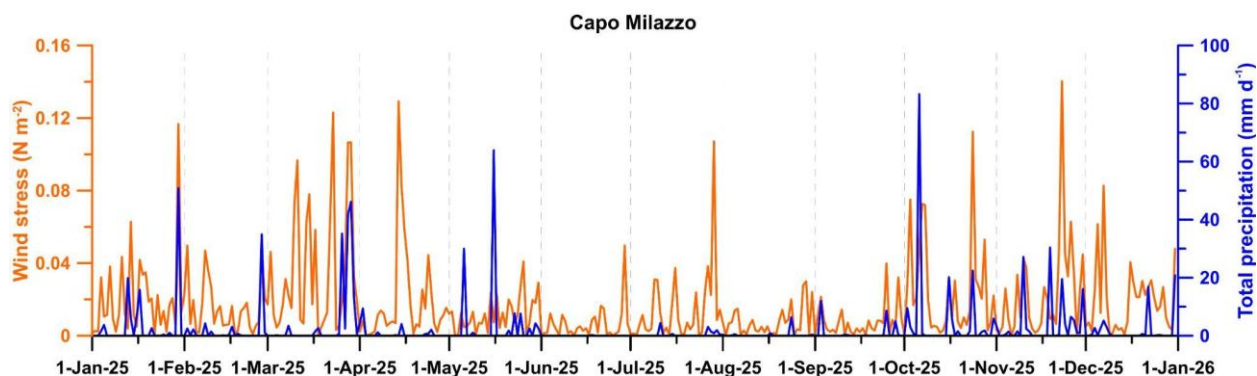


Figura 54. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura a Capo Milazzo, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una struttura stagionale molto evidente (Fig. 55). Tra febbraio e aprile la colonna appare relativamente omogenea, con temperature intorno a 15–16 °C lungo gran parte del profilo. Questa fase è coerente con condizioni di mescolamento tardo-invernale ancora efficaci e con una stratificazione termica debole. A partire da maggio si osserva un rapido riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un progressivo aumento della stratificazione. Le isoterme più calde compaiono inizialmente nei primi metri, mentre gli strati più profondi rimangono più freddi. Tra giugno e luglio si sviluppa una forte stratificazione termica superficiale, con temperature prossime a 28–29 °C nei primi metri e un termoclino che si approfondisce progressivamente verso 20–30 metri. La fase più interessante si osserva tra luglio e agosto. In questo periodo il diagramma mostra alcune attenuazioni temporanee del massimo termico superficiale, ma soprattutto una marcata penetrazione verticale del calore. Questo è evidente dall'approfondimento delle isoterme calde, in particolare quelle comprese tra circa 21 °C e 24 °C, che raggiungono progressivamente gli strati intermedi e profondi della colonna d'acqua. La struttura assume un andamento quasi “a scalino”, indicando che il calore accumulato nello strato superficiale viene trasferito verso il basso. Questa variabilità è coerente con gli impulsi di vento osservati tra luglio e agosto, che possono aver favorito un aumento del mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Il segnale principale non sembra quindi essere una semplice perdita di calore dalla superficie, né necessariamente una risalita di acque fredde, ma piuttosto una redistribuzione verticale del calore lungo la colonna d'acqua. In questo senso, Capo Milazzo rappresenta un caso molto chiaro di pompa verticale di calore, in cui il mescolamento indotto dal vento contribuisce a trasportare verso profondità maggiori parte del calore accumulato nei primi metri. Tra settembre e ottobre, il calore rimane ancora evidente negli strati intermedi, con isoterme di 21–23 °C che raggiungono profondità importanti. Questo indica una forte inerzia termica della colonna d'acqua dopo il massimo estivo. Solo nella parte finale del periodo, verso ottobre-novembre, si osserva un raffreddamento più netto della superficie e una progressiva riduzione della stratificazione, coerente con la maggiore instabilità atmosferica autunnale. Nel complesso, Capo Milazzo mostra una transizione da una colonna tardo-invernale ben mescolata a una forte

stratificazione termica superficiale estiva. La caratteristica più rilevante è la fase estiva, in cui gli impulsi di vento favoriscono il mescolamento verticale, l'approfondimento dello strato mescolato e il trasferimento del calore verso gli strati più profondi (Fig. 55).

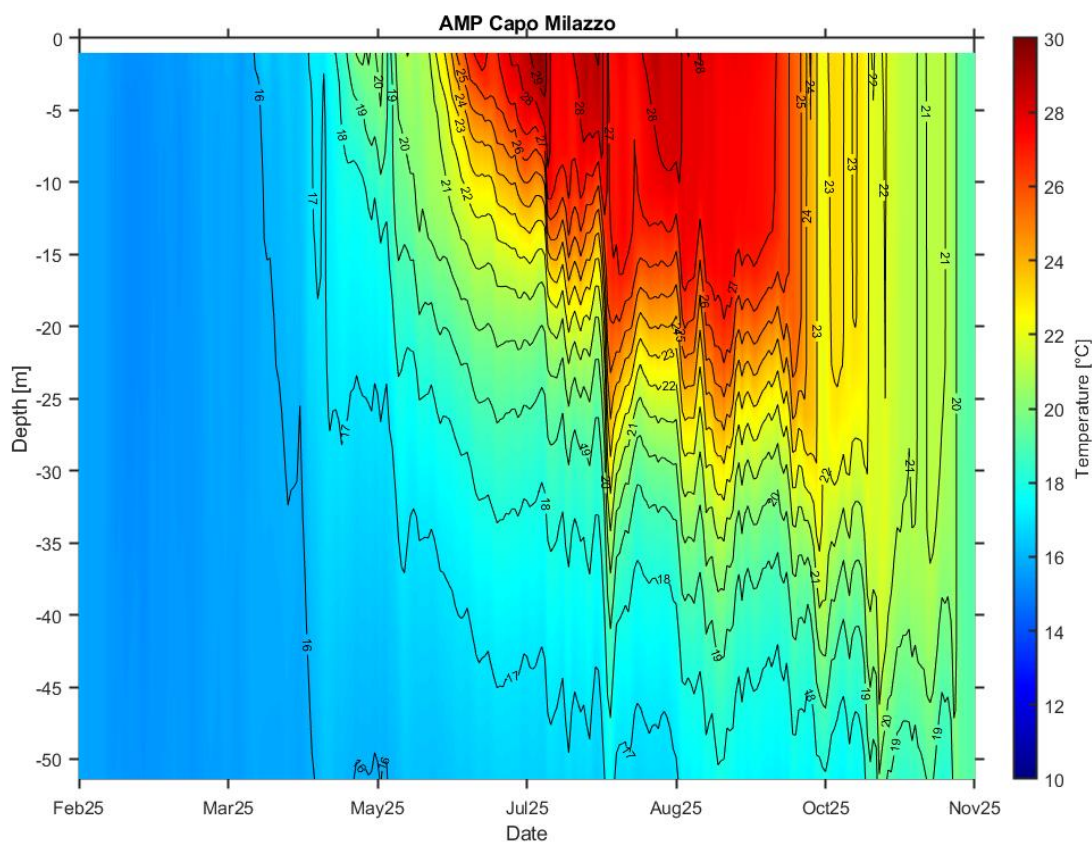


Figura 55. Hovmöller di Temperatura.

AMP Plemmirio

Nel corso del 2025, l'area del Plemmirio mostra precipitazioni generalmente deboli e sporadiche, concentrate in pochi episodi brevi ma localmente intensi (Fig. 56). Gli eventi più evidenti si osservano nella prima parte dell'anno, soprattutto tra gennaio e marzo, con alcuni picchi compresi intorno a 40–50 mm d⁻¹. Un altro episodio importante compare a fine maggio, quando le precipitazioni raggiungono nuovamente valori prossimi a 50 mm d⁻¹. Durante l'estate le piogge risultano quasi assenti o molto deboli, mentre tra ottobre e dicembre si osserva una nuova fase di instabilità, con episodi più frequenti e alcuni massimi significativi nella seconda metà di dicembre (Fig. 56).

L'intensità del vento è più marcata nei primi mesi dell'anno, in particolare tra gennaio e aprile, quando si osservano diversi impulsi che raggiungono circa 0,12–0,17 N m⁻². Durante la tarda primavera e l'estate il vento tende a ridursi, pur restando presente con episodi moderati e intermittenti. Una nuova fase più dinamica compare in autunno e all'inizio dell'inverno, soprattutto tra ottobre e dicembre, quando gli impulsi diventano nuovamente più frequenti e raggiungono valori intorno a 0,12–0,14 N m⁻² (Fig. 56).

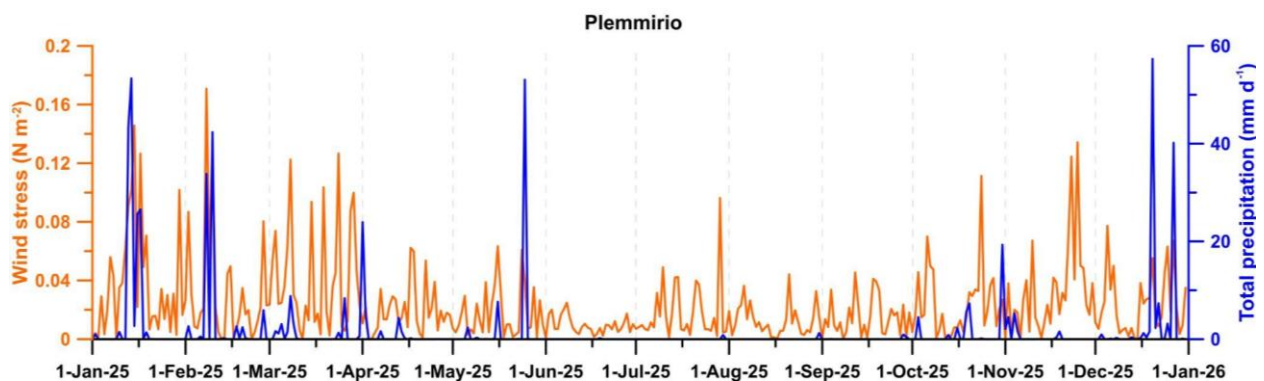


Figura 56. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura al Plemmirio, relativo ai primi 50 metri della colonna d'acqua, mostra una struttura stagionale ben definita (Fig. 57). Tra febbraio e aprile la colonna appare relativamente omogenea, con temperature comprese prevalentemente tra 16 °C e 17 °C. In questa fase il gradiente verticale è debole, indicando condizioni di mescolamento ancora attive nella parte finale dell'inverno e all'inizio della primavera. A partire da maggio si osserva un progressivo riscaldamento dello strato superficiale, accompagnato da un aumento della stratificazione. Le isoterme più calde si sviluppano inizialmente nei primi metri, mentre gli strati più profondi mantengono temperature inferiori. Tra giugno e luglio si instaura una forte stratificazione termica superficiale, con temperature prossime a 27–29 °C nei primi metri e valori più bassi sotto i 25–30 metri. Tra luglio e agosto il diagramma mostra una chiara penetrazione verticale del calore. Le isoterme calde, in particolare quelle comprese tra 22 °C e 25 °C, si approfondiscono progressivamente verso gli strati intermedi, raggiungendo in alcuni momenti profondità di circa 30–40 metri. Questo comportamento indica che il calore accumulato nello strato superficiale non rimane confinato in superficie, ma viene parzialmente trasferito verso il basso attraverso episodi di mescolamento verticale e approfondimento dello strato mescolato. Nel caso del Plemmirio, il segnale estivo non appare dominato da un raffreddamento superficiale netto, ma piuttosto da una redistribuzione verticale del calore lungo la colonna d'acqua. Gli impulsi di vento osservati durante l'estate, anche se meno intensi rispetto a quelli invernali, possono aver contribuito a modulare la forte stratificazione termica superficiale e a favorire il trasferimento di calore verso profondità maggiori. Tra settembre e ottobre il calore rimane ancora molto evidente nella colonna d'acqua. Le isoterme di 22–23 °C raggiungono profondità elevate, localmente anche oltre 40 metri, indicando una forte inerzia termica dopo il massimo estivo. In questa fase la stratificazione non viene eliminata rapidamente, ma tende a essere progressivamente erosa, mentre il calore accumulato durante l'estate persiste negli strati intermedi. Verso novembre si osserva un raffreddamento più marcato, con temperature che diminuiscono sia in superficie sia lungo la colonna. La ripresa degli episodi di vento e precipitazione nella parte finale dell'anno è coerente con un

rafforzamento del mescolamento verticale e con una progressiva riduzione della stratificazione. Nel complesso, il Plemmirio mostra una transizione da una colonna tardo-invernale relativamente omogenea a una forte stratificazione termica superficiale estiva. La caratteristica più rilevante è la persistenza del calore in profondità tra agosto e ottobre, che indica una marcata redistribuzione verticale del calore e una forte inerzia termica della colonna d'acqua (Fig. 57).

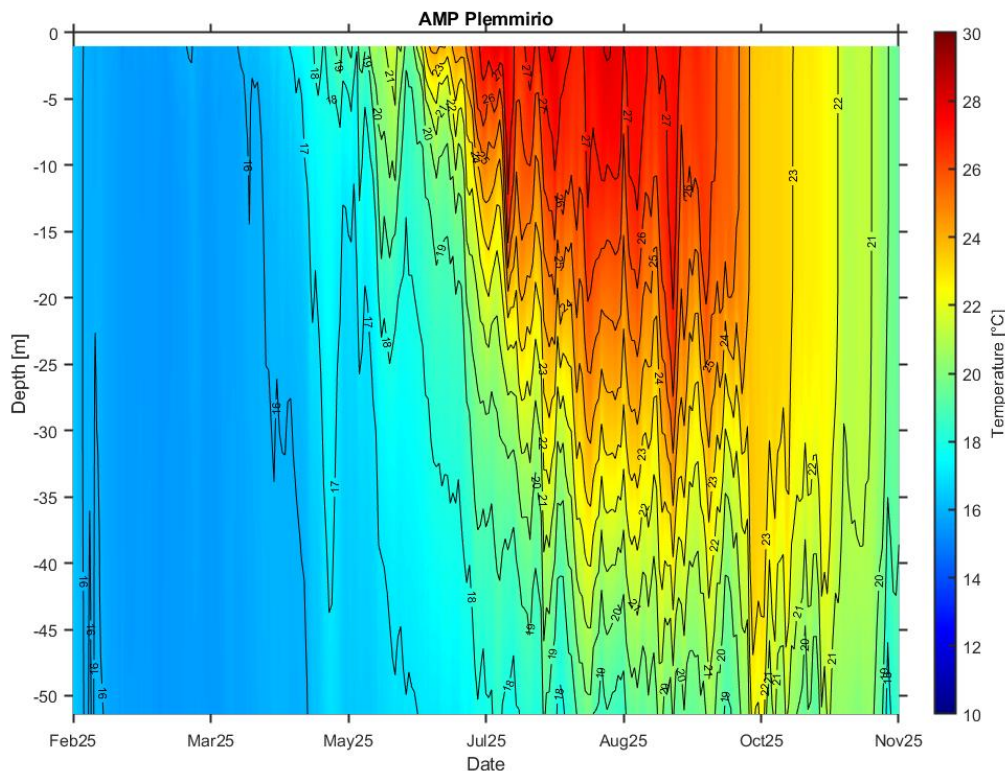


Figura 57. Hovmöller di Temperatura.

AMP Ustica

Nel corso del 2025, l'area di Ustica mostra precipitazioni generalmente deboli e discontinue, concentrate in pochi episodi brevi ma localmente intensi (Fig. 58). L'evento più rilevante della prima parte dell'anno si osserva a gennaio, quando le precipitazioni raggiungono valori superiori a 60 mm d^{-1} . Tra febbraio e agosto gli apporti risultano complessivamente limitati, con alcuni episodi moderati tra febbraio e marzo e precipitazioni quasi assenti durante gran parte della stagione estiva. Una nuova fase di instabilità compare a settembre, con un picco nuovamente prossimo a 60 mm d^{-1} . Tra ottobre e novembre gli eventi diventano più frequenti, con diversi massimi compresi tra circa 20 e 40 mm d^{-1} , mentre a dicembre le precipitazioni tornano generalmente deboli e sporadiche (Fig. 58).

L'intensità del vento si mantiene generalmente contenuta durante gran parte dell'anno, con impulsi brevi e intermittenti (Fig. 58). Nella prima parte dell'anno gli episodi più evidenti si osservano tra gennaio e marzo, con valori dello stress del vento che raggiungono circa $0,02\text{--}0,03 \text{ N m}^{-2}$. Durante la primavera e l'estate il vento risulta prevalentemente debole, sebbene siano presenti alcuni impulsi moderati a luglio e all'inizio di settembre. Una fase più dinamica interessa il periodo autunnale, in particolare tra ottobre e novembre, quando gli episodi diventano più frequenti e intensi. Il massimo annuale viene raggiunto alla fine di ottobre, con valori prossimi a $0,05 \text{ N m}^{-2}$, mentre a dicembre il vento tende nuovamente a diminuire (Fig. 58).

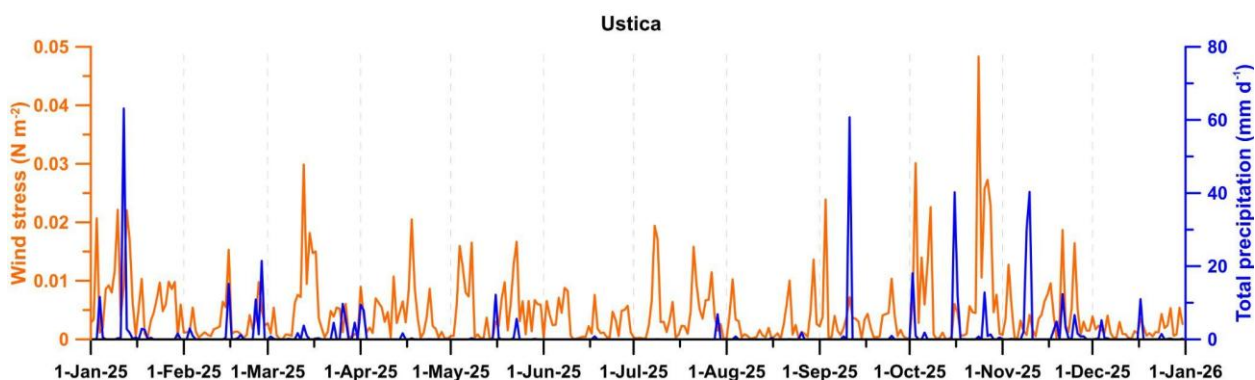


Figura 58. Serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu).

Il diagramma Hovmöller della temperatura nell'AMP di Ustica, relativo ai primi 40 metri della colonna d'acqua, mostra una chiara evoluzione stagionale ed un marcato incremento termico tra la fine di giugno e novembre 2025 (Fig. 59). All'inizio del periodo analizzato la struttura della colonna d'acqua è ben mescolata con una temperatura di 15°C . Ad inizio giugno si osserva già una forte stratificazione termica: nei primi 10–15 metri le temperature raggiungono circa $27\text{--}28^{\circ}\text{C}$, mentre al di sotto dei 25–30 metri si mantengono generalmente comprese tra 17°C e 20°C . Il termoclino risulta quindi ben sviluppato, con un gradiente verticale particolarmente intenso tra circa 15 e 25 metri.

Tra luglio e agosto lo strato superficiale caldo persiste, ma lo spessore e la profondità del termoclino mostrano numerose oscillazioni. Le isoterme comprese tra 21°C e 24°C si sollevano e si approfondiscono ripetutamente, indicando una struttura verticale dinamica, modulata da episodi di mescolamento e da possibili processi di risalita delle acque più fredde. Nonostante tali variazioni, le temperature più elevate rimangono prevalentemente confinate nello strato superiore, mentre le acque profonde conservano valori sensibilmente inferiori.

Tra la fine di agosto e l'inizio di settembre si osserva l'episodio di raffreddamento più evidente dell'intero periodo. Acque con temperature comprese tra circa 18°C e 21°C risalgono fino a profondità di 15–20 metri, determinando un forte assottigliamento dello strato caldo superficiale e un marcato sollevamento del termoclino (Fig. 59). Questo

segnale coincide con una fase caratterizzata da un aumento della variabilità meteorologica e da un importante episodio di precipitazione all'inizio di settembre, che potrebbe avere contribuito, insieme alla dinamica locale, alla temporanea riorganizzazione della colonna d'acqua.

Dopo questo evento, durante settembre, si osserva un approfondimento dello strato più caldo e una progressiva penetrazione del calore verso profondità maggiori. L'isoterma di 24 °C si approfondisce gradualmente, raggiungendo circa 25–30 metri nella seconda metà di settembre e localmente profondità prossime ai 35–40 metri tra la fine di settembre e l'inizio di ottobre. In questa fase le temperature elevate non rimangono quindi limitate alla superficie, ma interessano gran parte della colonna d'acqua, evidenziando una significativa redistribuzione verticale del calore.

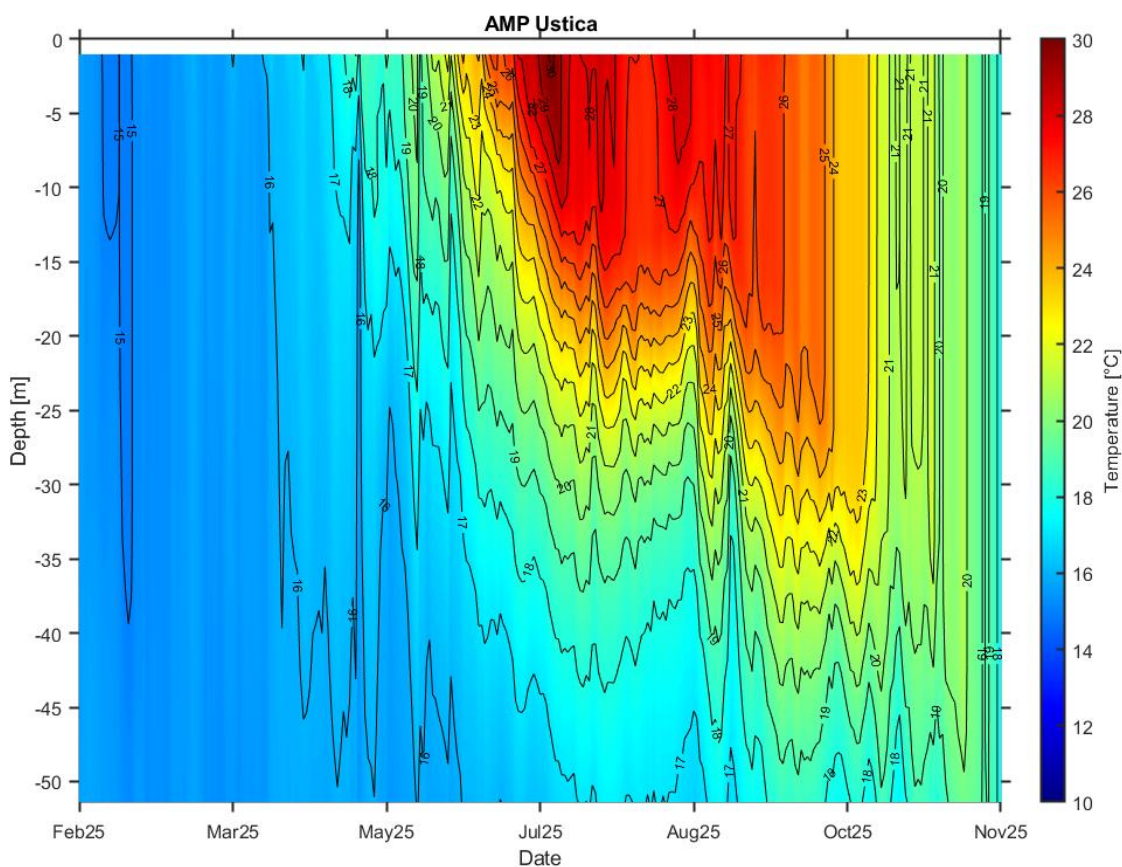


Figura 59. Hovmöller di Temperatura.

Attenuazione superficiale e propagazione subsuperficiale della MHW tra luglio e agosto 2025

Tra la seconda metà di luglio e l'inizio di agosto 2025, diverse aree dei mari costieri italiani mostrano una temporanea attenuazione del segnale superficiale della MHW. Questo comportamento non sembra indicare una reale dissipazione del calore accumulato durante il forte riscaldamento di giugno e della prima metà di luglio, ma piuttosto una sua redistribuzione verticale lungo la colonna d'acqua. Dopo il massimo riscaldamento estivo, molte aree presentano una forte stratificazione termica superficiale, con temperature molto elevate concentrate nei primi metri e un netto gradiente termico rispetto agli strati sottostanti. In questa fase, la MHW è particolarmente evidente in superficie, dove la temperatura supera la soglia climatologica, ma il calore resta inizialmente confinato nello strato superficiale. Tra luglio e agosto, gli impulsi di vento osservati in diverse aree sembrano aver favorito episodi di mescolamento verticale e un temporaneo approfondimento dello strato mescolato. Nei diagrammi Hovmöller questo processo è evidente attraverso l'approfondimento delle isoterme calde, in particolare quelle comprese tra circa 22 °C e 25 °C, che in molti siti raggiungono profondità maggiori rispetto alla fase precedente. Il segnale non appare quindi come un semplice raffreddamento superficiale, ma come un trasferimento verticale del calore dagli strati superficiali verso quelli intermedi e profondi. In questo senso, la MHW mostra una componente subsuperficiale: il segnale caldo può attenuarsi temporaneamente in superficie, ma propagarsi verso il basso lungo la colonna d'acqua. Questo comportamento è particolarmente evidente in aree come Capo Milazzo, Capo Carbonara, Plemmirio, Portofino, Isola d'Elba e Isole Tremiti, dove l'approfondimento delle isoterme calde suggerisce una penetrazione verticale del calore fino a profondità significative. Nei siti meno profondi, come Torre Guaceto, Tavolara, Miramare o in parte le Cinque Terre, questo processo può coinvolgere quasi tutta la colonna osservata, rendendo il riscaldamento evidente anche negli strati prossimi al fondo. L'attenuazione superficiale della MHW tra luglio e agosto non va quindi interpretata come una semplice interruzione dell'evento caldo, ma come una fase di riorganizzazione verticale della colonna d'acqua. Il vento, aumentando il mescolamento verticale, può ridurre temporaneamente la forte stratificazione termica superficiale e trasferire parte del calore accumulato verso profondità maggiori. In questo modo, la MHW può risultare meno evidente in superficie, ma il contenuto di calore permane nella colonna d'acqua e può raggiungere anche gli strati profondi o bentonici nelle aree costiere meno profonde. Nel complesso, questo episodio evidenzia che le MHW costiere non devono essere considerate solo come fenomeni superficiali. Sebbene la loro identificazione sia basata sulla SST, la risposta della colonna d'acqua mostra che il calore associato all'evento può essere trasferito verticalmente attraverso il mescolamento e l'approfondimento dello strato mescolato. La temporanea attenuazione della MHW superficiale osservata tra luglio e agosto 2025 rappresenta quindi una fase in cui il calore non scompare, ma viene redistribuito lungo la colonna d'acqua, con possibili implicazioni importanti per gli ecosistemi costieri e per gli ambienti bentonici.

STRUTTURA E STATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ BENTONICHE

L'analisi della struttura e della composizione delle comunità bentoniche dell'Isola d'Elba, dell'AMP Isola dell'Asinara, e dell'AMP Torre Guaceto ha permesso di caratterizzare gli ecosistemi di scogliera in queste tre aree di studio. 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.

Isola d'Elba

All'Isola d'Elba sono state rilevate un totale di 41 specie bentoniche sessili tra le quali 19 specie vegetali e 24 specie animali. In particolare, il 44% (N=18) è rappresentato da alghe, il 22% (N=9) da poriferi, il 15% (N=6) da cnidari, il 7% (N=3) da anellidi, il 5% (N=2) da briozoi, il 5% (N=2) da molluschi, e il 2% (N=1) da fanerogame (Fig. 60).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate, risulta 1,97 (i.e. 10 m: $H'=1,87$; 20 m: $H'=2,03$; 30 m: $H'=1,59$; 40m: $H'=2,15$) evidenziando uno scarso stato ecologico delle comunità di scogliera dell'Isola d'Elba (Fig. 61).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate, ad eccezione dei 30 m dove il valore è più alto (i.e. 10 m: $D'=0,17$; 20 m: $D'=0,14$; 30 m: $D'=0,35$; $D'=0,13$). Questi risultati indicano quindi una generale buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'Isola d'Elba (Fig. 61).

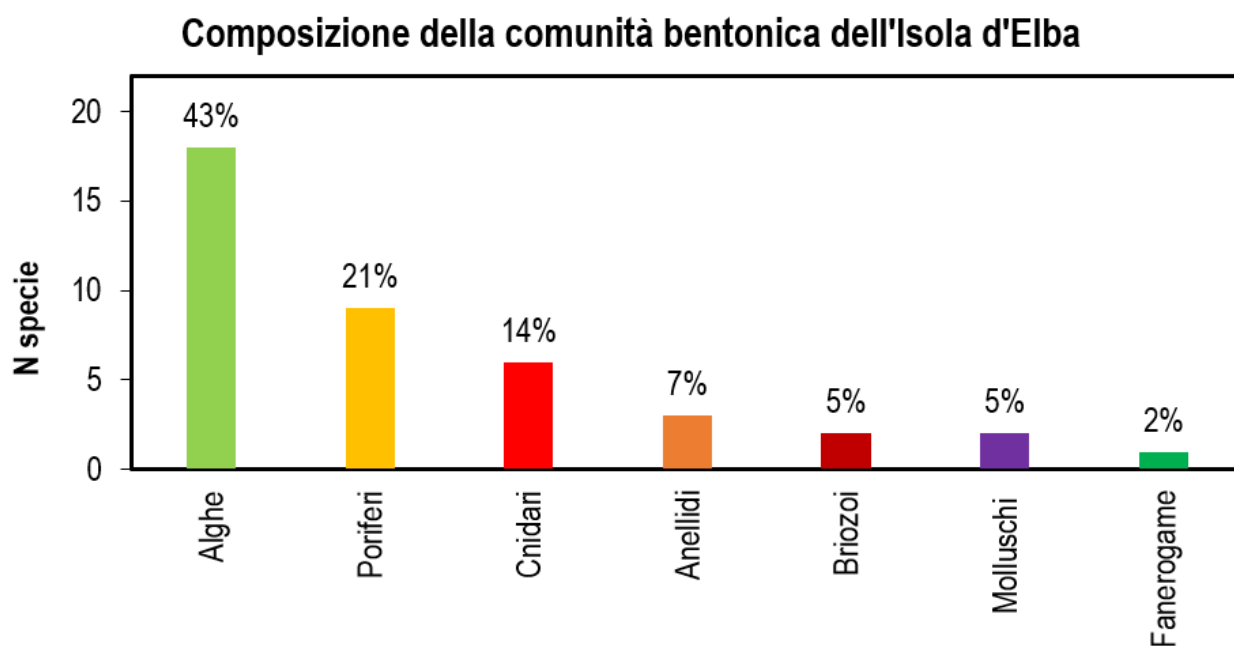


Figura 60. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'Isola d'Elba. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

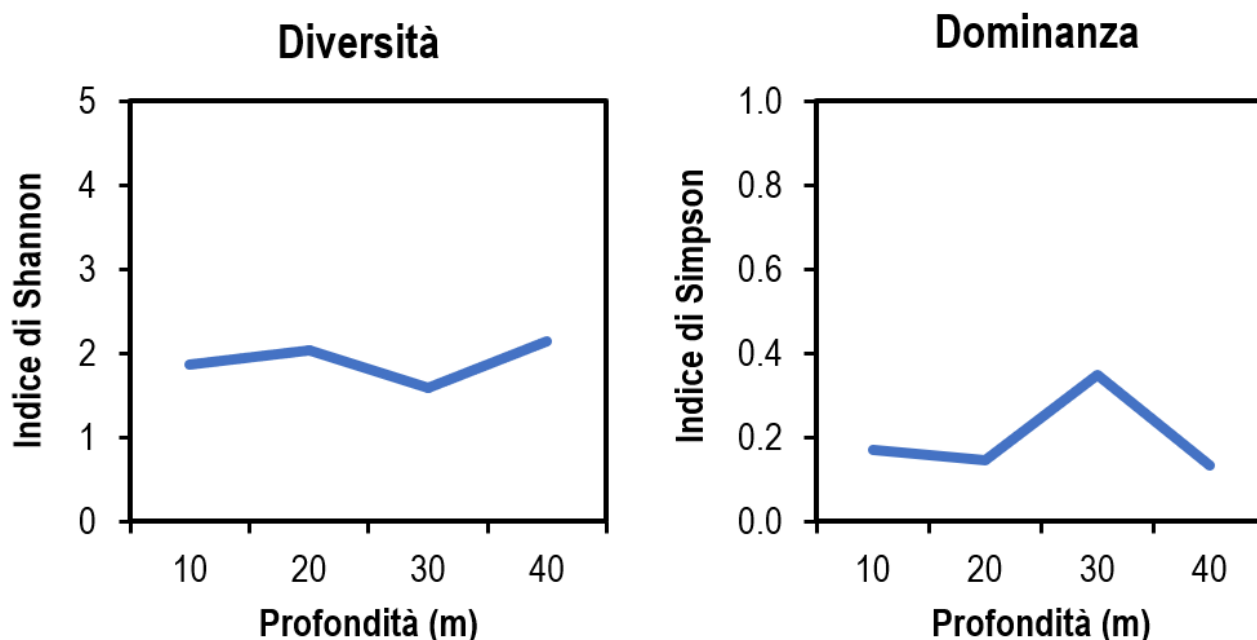


Figura 61. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico dell'Isola d'Elba.

AMP Isola dell'Asinara

Nell'AMP Isola dell'Asinara sono state rilevate un totale di 65 specie bentoniche sessili tra le quali 35 specie vegetali e 30 specie animali. In particolare, il 52% (N=34) è rappresentato da alghe, il 18% (N=12) da poriferi, il 12% (N=8) da cnidari, l'8% (N=5) da briozoi, il 6% (N=4) da anellidi, il 2% (N=1), e il 2% (N=1) da molluschi (Fig. 62).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate, risulta 2,13 (i.e. 10 m: $H'=1,83$; 20 m: $H'=2,24$; 30 m: $H'=1,96$; 40 m: $H'=2,50$), evidenziando un moderato stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Isola dell'Asinara (Fig. 63).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate (i.e. 10 m: $D'=0,21$; 20 m: $D'=0,12$; 30 m: $D'=0,19$; 40 m: $D'=0,09$), a indicare quindi una buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Isola dell'Asinara (Fig. 63).

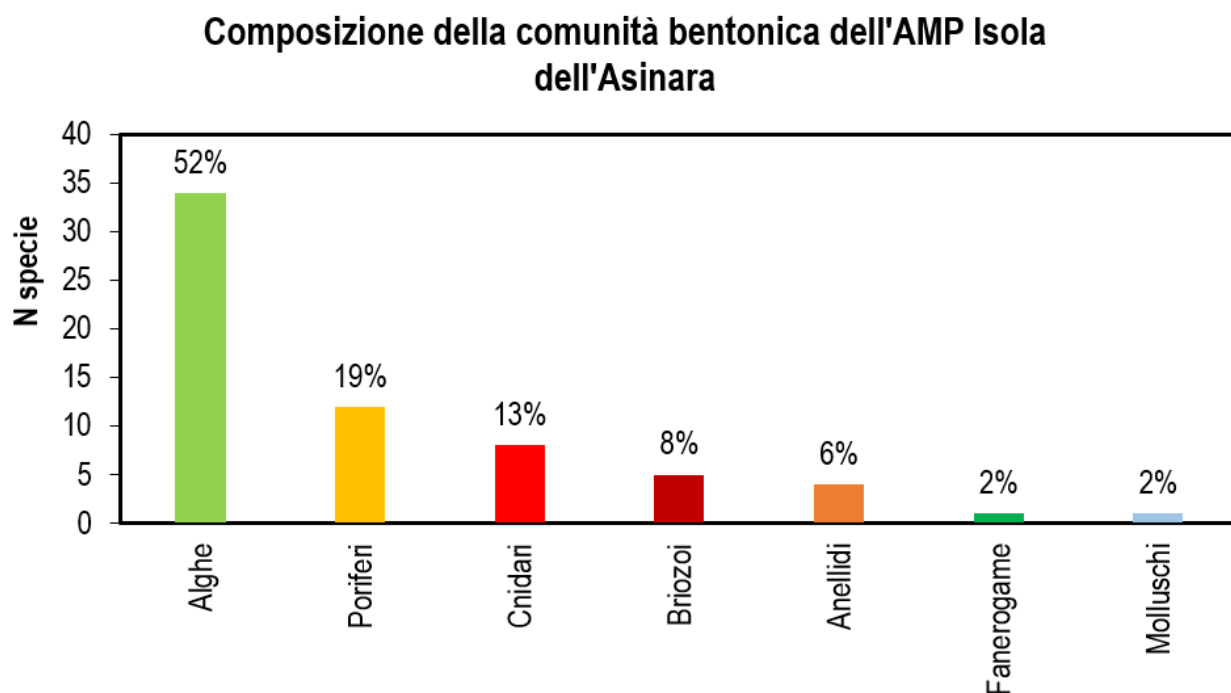


Figura 62. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Isola dell'Asinara. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

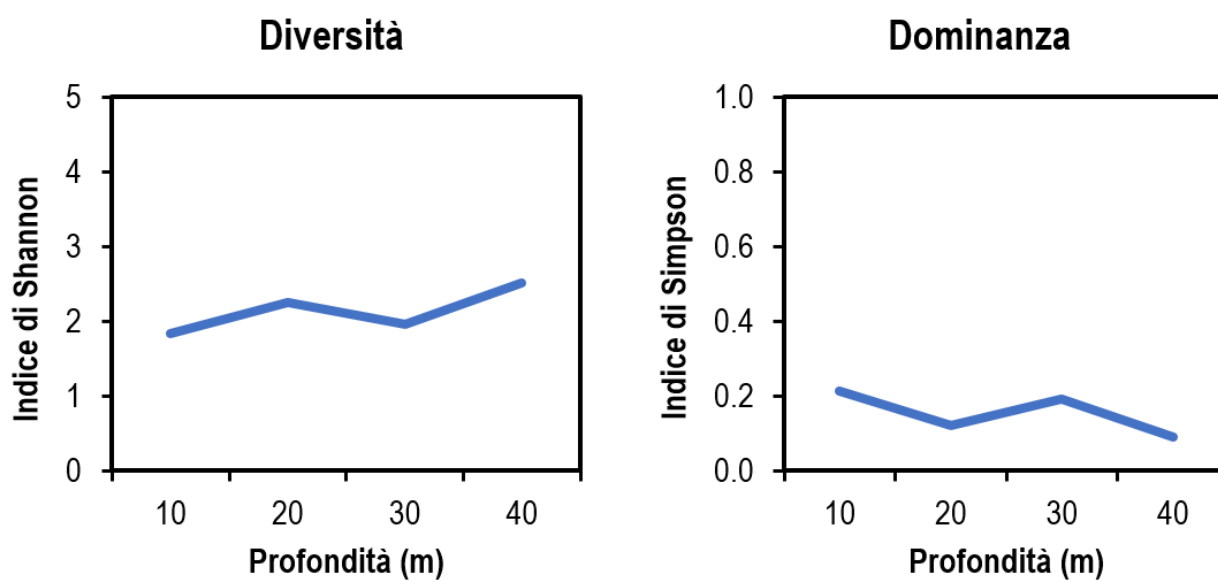


Figura 63. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Isola dell'Asinara.

AMP Torre Guaceto

Nell'AMP Torre Guaceto sono state rilevate un totale di 59 specie bentoniche sessili tra le quali 19 specie vegetali e 40 specie animali. In particolare, il 38% (N=18) è rappresentato da alghe, il 23% (N=11) da cnidari, il 23% (N=11) da poriferi, l'8% (N=4) da briozoi, il 6% (N=3) da anellidi, e il 2% (N=1) da fanerogame (Fig. 64).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate risulta 3,1 (i.e. 10 m: $H'=2,92$; 20 m: $H'=3,64$; 30 m: $H'=2,44$; 40 m: $H'=3,47$), evidenziando un buono stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Torre Guaceto (Fig. 65).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate (i.e. 10 m: $D'=0,05$; 20 m: $D'=0,02$; 30 m: $D'=0,35$; 40 m: $D'=0,02$) a indicare quindi una buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Torre Guaceto (Fig. 65).

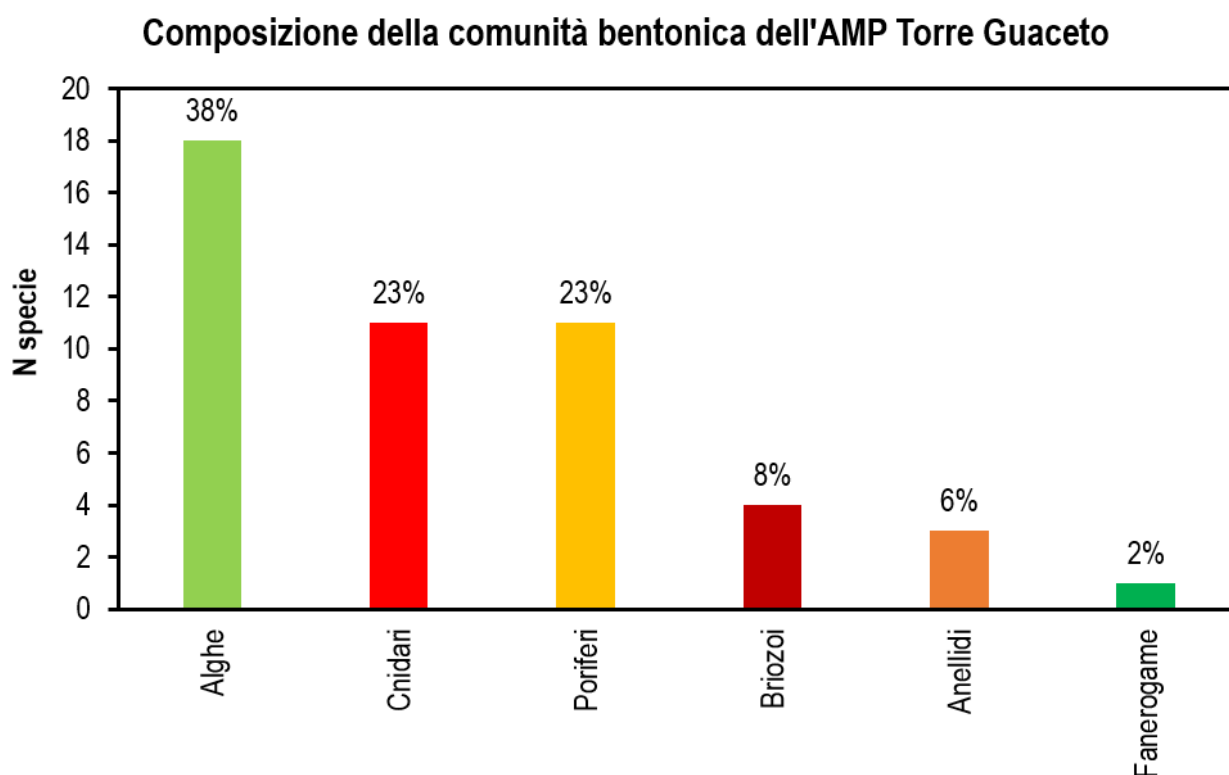


Figura 64. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Torre Guaceto. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

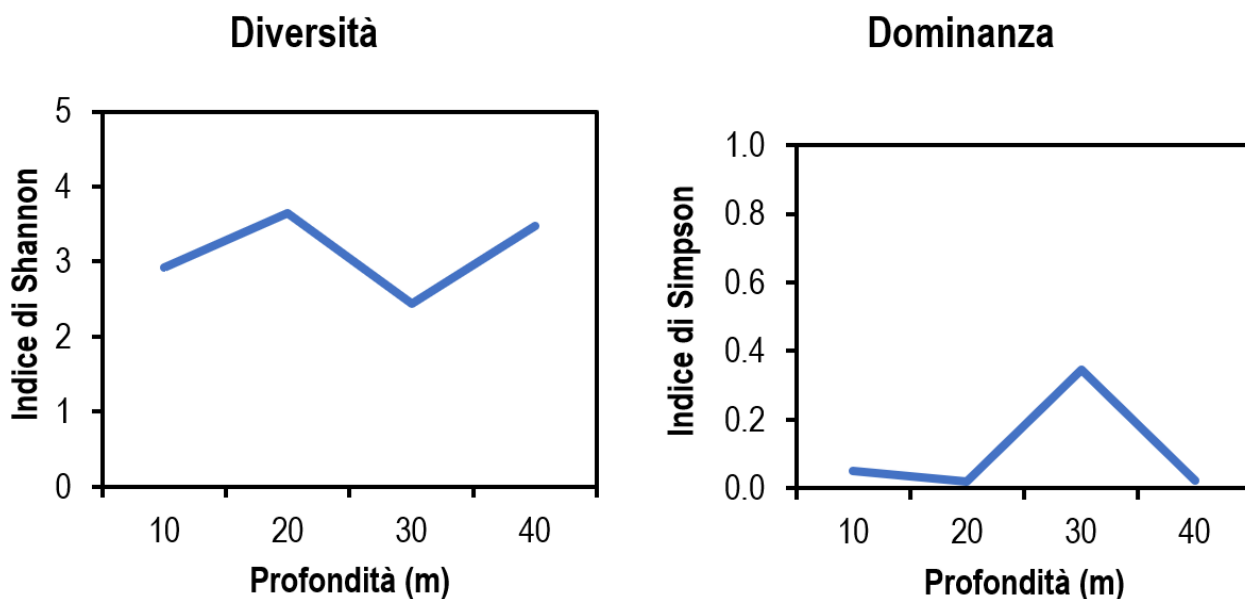


Figura 65. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Torre Guaceto.

Confronto della struttura e dello stato ecologico delle comunità bentoniche nelle dodici aree monitorate

Il confronto della composizione e della struttura delle comunità bentoniche nelle dodici aree di studio monitorate nell'ambito dei sei anni di progetto Mare Caldo ha permesso di evidenziare come i maggiori valori di biodiversità, in termini di numero di specie bentoniche sessili, siano stati rilevati nell'AMP Capo Carbonara (N=84), seguita dalle AMP Portofino (N=80), AMP Plemmirio (N=70), AMP Isole Tremiti (N=69), AMP Isola dell'Asinara (N=65), AMP Torre Guaceto (N=59), AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (N=48), AMP Capo Milazzo (N=44), AMP Miramare (N=43), AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (N=43), Isola d'Elba (N=41) e AMP Cinque Terre (N=39). I gruppi più rappresentati in termini di numero di specie sono risultati le alghe, i poriferi, gli cnidari e i briozoi (Fig. 66, 67).

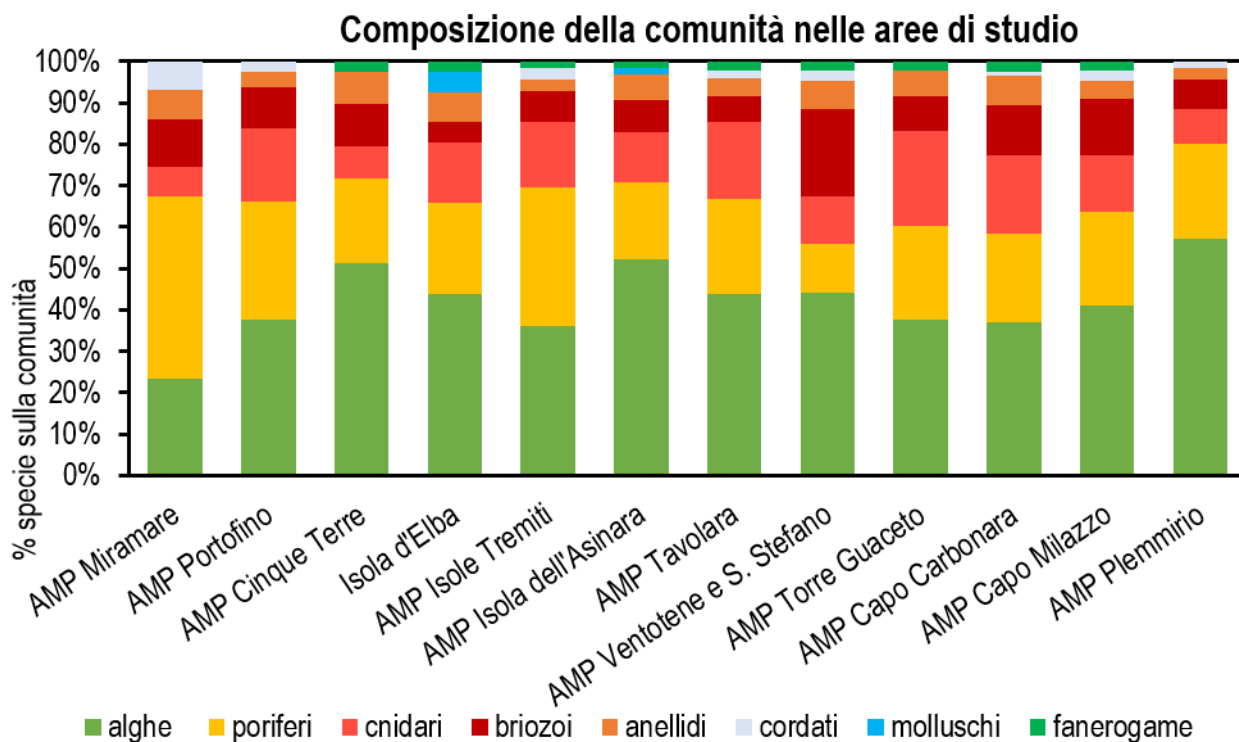


Figura 66. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità bentonica nelle dodici aree di studio indagate nei sei anni di progetto Mare Caldo.

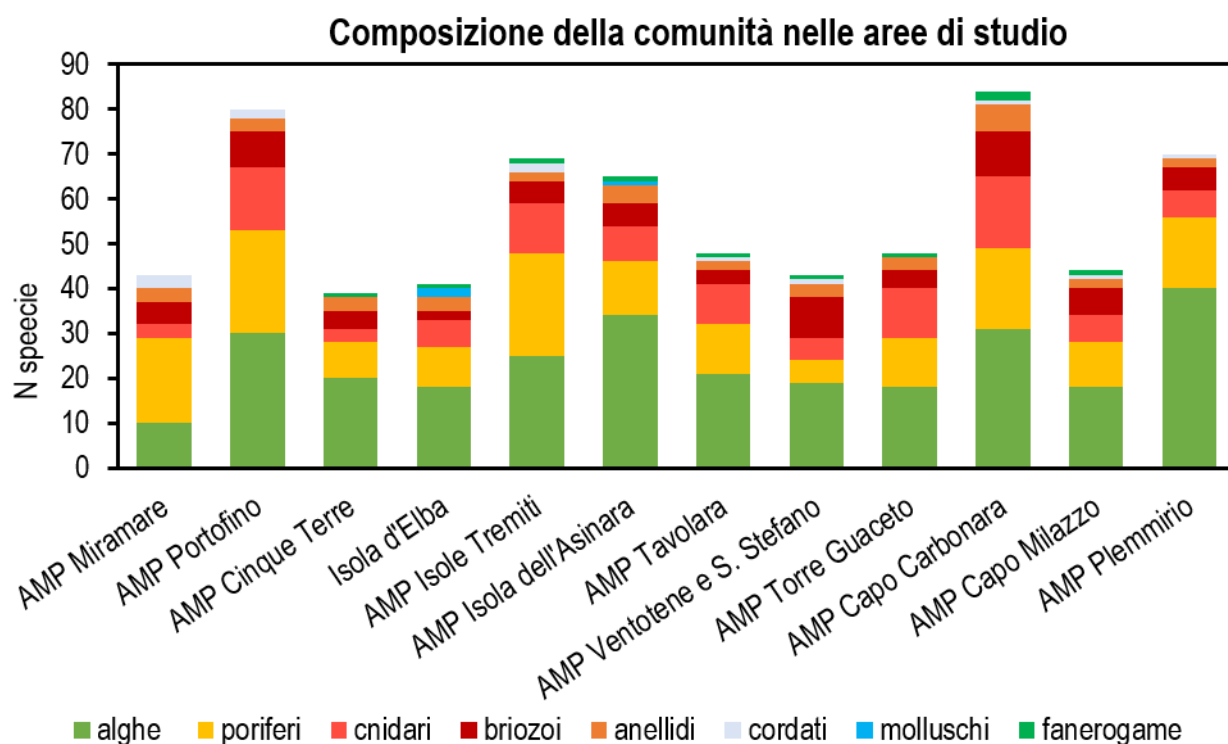


Figura 67. Percentuale di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità bentonica nelle dodici aree di studio indagate nei sei anni di progetto Mare Caldo.

I valori dell'indice di diversità di Shannon indicano un elevato stato ecologico per l'AMP Capo Carbonara, mentre un buono stato ecologico per l'AMP Miramare e l'AMP Torre Guaceto. Una moderata qualità ecologica è stata invece rilevata per l'AMP Portofino, l'AMP Cinque Terre (che sono sotto-campionate rispetto alle altre aree, avendo monitorato solo due siti invece di quattro) e per, l'AMP Isola dell'Asinara, l'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, l'AMP Isole Tremiti, l'AMP Isole Ventotene e Santo Stefano, l'AMP Capo Milazzo, e per l'AMP Plemmirio. Infine, per l'Isola d'Elba è stato rilevato uno scarso stato ecologico (Fig. 68).

I valori dell'indice di Dominanza confermano un minor stato ecologico delle comunità dell'Isola d'Elba rispetto a tutte le altre aree indagate. Seppure i valori dell'indice risultano bassi, le comunità in quest'area mostrano una maggiore dominanza da parte di alcune specie e, di conseguenza, risultano essere meno resilienti (Fig. 69). Viceversa, a fronte di un impatto, le comunità delle altre aree di studio con bassi valori di dominanza sono meno 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).

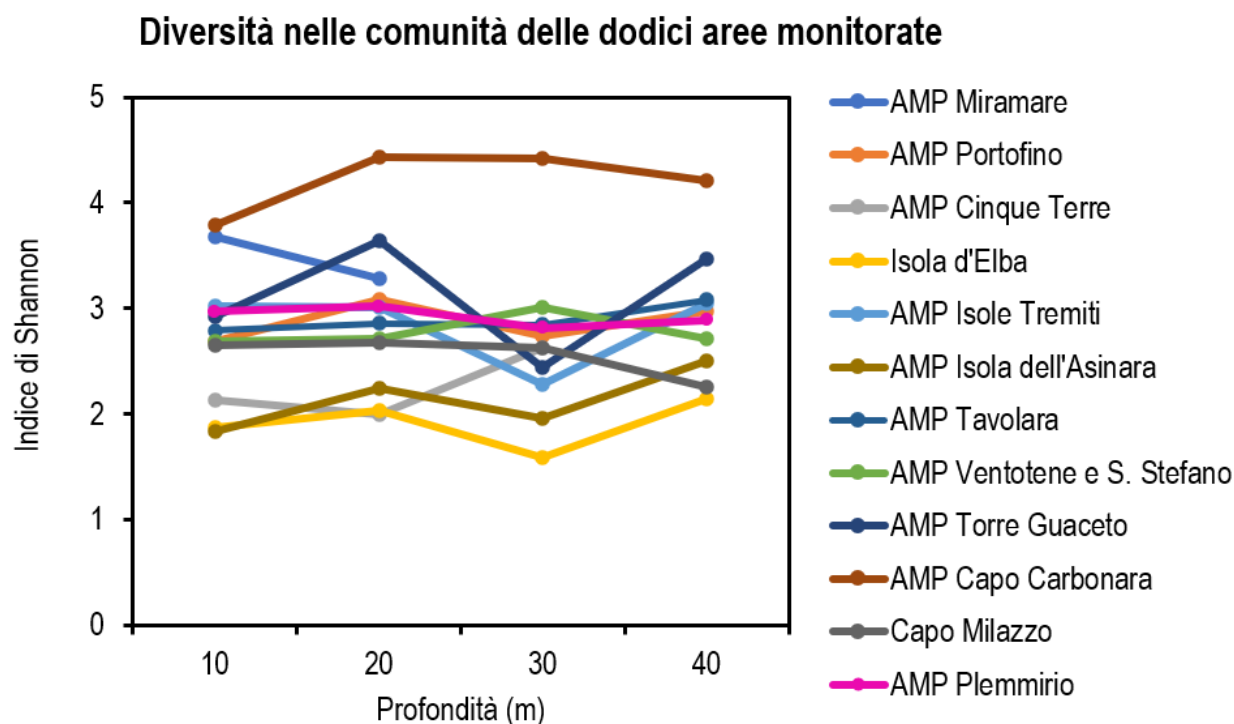


Figura 68. Grafico dell'andamento dell'Indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nelle dodici aree monitorate.

Dominanza nelle comunità delle dodici aree monitorate

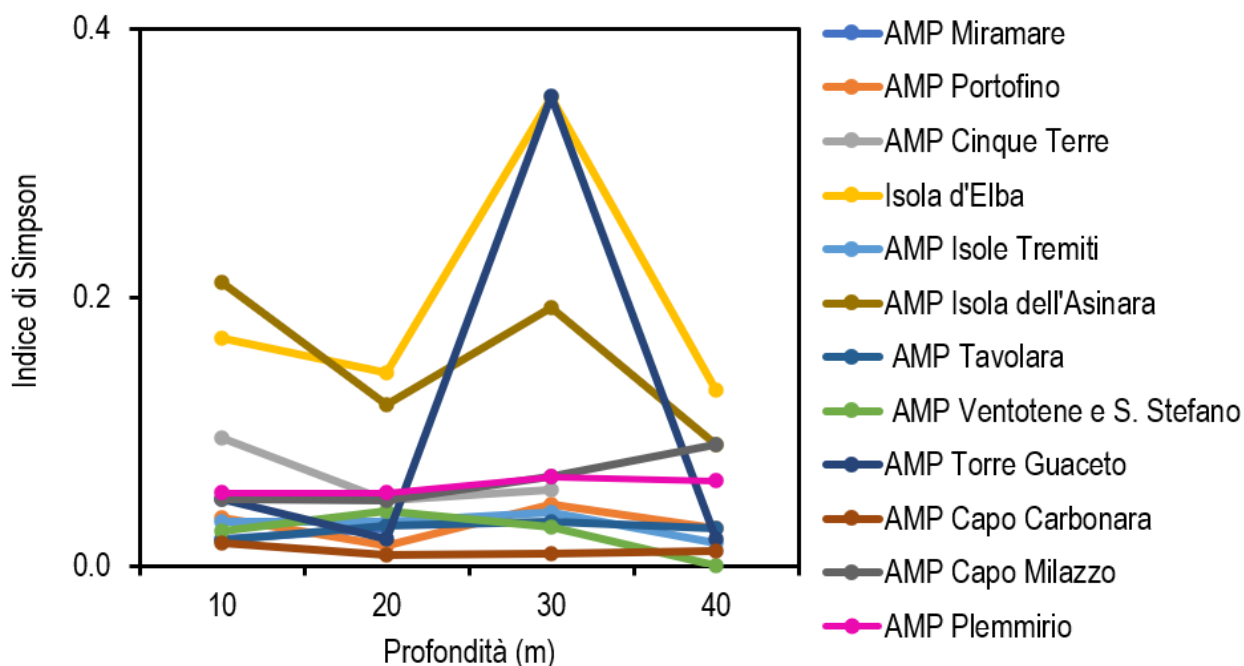


Figura 69. Grafico dell'andamento dell'Indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nelle dodici aree monitorate.

MONITORAGGIO DELLE MORIE DI MASSA

Nel corso degli studi condotti nei sei anni del progetto Mare Caldo in nessuna delle aree analizzate sono stati rilevati eventi eccezionali di morie di massa riconducibili ad anomalie termiche verificatesi dal 2020 al 2025.

Tuttavia, per ogni area di studio, l'analisi dei dati sulle colonie (o individui) che mostravano segni di necrosi o sbiancamento ha permesso di stabilire quali siano le specie maggiormente colpite dal riscaldamento e il relativo grado di impatto (i.e. basso, moderato, severo).

Isola d'Elba

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target all'Isola d'Elba (Tab. 3) hanno evidenziato un generale moderato impatto attribuibile agli effetti dell'innalzamento delle temperature su alcune specie più vulnerabili.

La specie che ha mostrato i maggiori segnali di impatto è risultata *Eunicella cavolini*, per la quale sono stati osservati segnali di morie del 30-60 % delle colonie monitorate a diverse profondità, sebbene il grado di impatto sia sempre risultato moderato (Tab. 3).

La specie che hanno mostrato un grado di impatto severo sono risultate: il corallo madreporario *Cladocora caespitosa*, sebbene le colonie monitorate siano state solo 3, e la specie di mollusco bivalve *Pinna nobilis*, per la quale la moria è attribuibile a eventi passati registrati a partire dal 2018 in tutto il Mediterraneo (Tab. 3).

Tabella 3. Risultati del monitoraggio delle morie di massa all'Isola d'Elba. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie (o area per gli organismi incrostanti) riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = 60%.

Sito	Specie	Prof (m)	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	% colonie impattate	Grado di impatto
Le Formiche della Zanca	<i>Balanophyllia europea</i>	5	1	13	7	B
Le Formiche della Zanca	<i>Cladocora caespitosa</i>	11	2	1	67	S
Le Formiche della Zanca	<i>Eunicella cavolini</i>	40	1	2	33	M
Le Formiche della Zanca	<i>Eunicella cavolini</i>	30	21	15	58	M
Lo Scoglietto di Portoferraio	<i>Eunicella cavolini</i>	25	17	15	53	M
Lo Scoglietto di Portoferraio	<i>Eunicella cavolini</i>	30	7	12	37	M
Lo Scoglietto di Portoferraio	<i>Eunicella cavolini</i>	40	12	17	41	M
Le Formiche della Zanca	<i>Eunicella singularis</i>	40	1	1	50	M
Le Formiche della Zanca	<i>Eunicella singularis</i>	30	2	2	50	M
Le Formiche della Zanca	<i>Paramuricea clavata</i>	40	17	33	34	M
Lo Scoglietto di Portoferraio	<i>Pinna nobilis</i>	27	8	0	100	S

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Grado di impatto
Le Formiche della Zanca	Alge corallinacee incrostanti	20	20	100	20	B

AMP Isola dell'Isola Asinara

I dati relativi alle morie di massa delle specie target nell'AMP Isola dell'Asinara (Tab. 4) hanno evidenziato alcuni effetti negativi dell'innalzamento delle temperature. Gli organismi più sensibili sono risultati quelli della specie *Myriapora truncata*, dove in due siti a diverse profondità è stato registrato un severo grado di impatto con il 60-80% delle colonie monitorate che riportavano segnali di impatto (Tab. 4).

Inoltre, nel sito Baia Scarno, è stato registrato un severo grado di impatto per le alghe corallinacee incrostanti, alcune delle quali sono risultate completamente sbiancate (Tab. 4).

Tabella 4. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Isola dell'Asinara. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie (o area per gli organismi incrostanti) riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = 60%.

Sito	Specie	Prof (m)	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	% colonie impattate	Status
Punta Sabina	<i>Balanophyllia europea</i>	10	42	34	55	M
Punta dei corvi	<i>Caryophyllia</i> sp.	10	2	0	100	S
Punta Sabina	<i>Eunicella cavolini</i>	19	8	3	73	S
Baia scarno	<i>Myriapora truncata</i>	35	11	6	65	S
Baia scarno	<i>Myriapora truncata</i>	30	5	2	71	S
Baia scarno	<i>Myriapora truncata</i>	20	10	2	83	S
Baia scarno	<i>Myriapora truncata</i>	10	2	1	67	S
Punta Sabina	<i>Myriapora truncata</i>	19	10	11	48	M
Pedra Bianca	<i>Myriapora truncata</i>	35	8	2	80	S
Pedra Bianca	<i>Myriapora truncata</i>	30	7	1	88	S
Pedra Bianca	<i>Myriapora truncata</i>	10	11	4	73	S
Punta Sabina	<i>Spondilus</i> sp.	10	3	0	100	S

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Status
Baia scarno	Alghe corallinacee incrostanti	35	9	1	90	S
Baia scarno	Alghe corallinacee incrostanti	30	27	3	90	S
Baia scarno	Alghe corallinacee incrostanti	20	20	0	100	S
Pedra Bianca	Alghe corallinacee incrostanti	36	4	16	20	B
Pedra Bianca	Alghe corallinacee incrostanti	30	3	27	10	B
Pedra Bianca	Alghe corallinacee incrostanti	20	12	8	60	S

AMP Torre Guaceto

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Torre Guaceto (Tab. 5) hanno evidenziato un generale basso grado di impatto attribuibile agli effetti dell'innalzamento delle temperature su alcune specie più vulnerabili.

La specie che ha mostrato i maggiori segnali di impatto è risultata l'alga corallinacea *Lithophyllum* sp. per la quale sono stati registrati valori di moria fino al 90-100% (Tab. 5).

Inoltre, un impatto severo è stato registrato per le specie *Cladocora caespitosa* e *Leptogorgia sarmentosa*, per le quali tuttavia sono state osservate un numero esigue di colonie (Tab. 5).

Tabella 5. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Torre Guaceto. 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%.

Sito	Specie	Prof (m)	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	% colonie impattate	Status
Ancora 26	<i>Cladocora caespitosa</i>	28	4	0	100	S
Panettoni profondi	<i>Eunicella singularis</i>	40	0	1	0	B
Panettoni profondi	<i>Leptogorgia sarmentosa</i>	40	5	2	71	S
Ancora 26	<i>Myriapora truncata</i>	26	1	2	33	M
Ancora 26	<i>Petrosia ficiformis</i>	26	1	5	17	B
Stazione 15-20 m	<i>Petrosia ficiformis</i>	20	2	11	15	B
Stazione 15-20 m	<i>Smittina cervicornis</i>	20	2	8	20	B
Stazione 15-20 m	<i>Smittina cervicornis</i>	20	1	10	9	B

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Status
Ancora 26	<i>Halimeda tuna</i>	28	30	70	30	M
Stazione 15-20 m	<i>Halimeda tuna</i>	20	6	14	30	M
Stazione 15-20 m	<i>Halimeda tuna</i>	20	20	80	20	B
Panettoni profondi	Alghe corallinacee incrostanti	40	4	16	20	B
Ancora 26	Alghe corallinacee incrostanti.	26	3	27	10	B
Ancora 26	Alghe corallinacee incrostanti	28	20	80	20	B
Ancora 26	Alghe corallinacee incrostanti	28	1	19	5	B
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	15	15	50	M
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	30	0	100	S
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	30	0	100	S
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	4.5	10.5	30	M
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	18	2	90	S
Stazione 15-20 m	Alghe corallinacee incrostanti	15	6	60	90	S

Confronto delle aree monitorate nell'ambito dei sei anni di progetto

Nell'ambito dei dati relativi ai sei anni di progetto, considerando tutte le aree monitorate, indipendentemente dal diverso livello di protezione e dalla diversa latitudine, sono stati sempre osservati fenomeni di morie su colonie animali e organismi vegetali in tutte le aree di studio. Per la specie *Balanophyllia europea* il maggior grado di impatto è stato registrato nell'AMP Isola dell'Asinara nel 2025, seguita dall'AMP Torre Guaceto nel 2021 (Fig. 70). L'AMP Capo Carbonara nel 2021 e l'AMP Torre Guaceto nel 2025 sono risultate, invece, le aree dove sono stati rilevati i maggiori segnali di sofferenza sulle colonie del madreporario *Cladocora caespitosa*, per il quale tutte le colonie riportavano segnali di sbiancamento o necrosi (Fig. 70). Nell'AMP Capo Carbonara nel 2021 e poi all'Isola d'Elba

nel 2025 sono stati rilevati i maggiori segnali di impatto per le colonie di *Paramuricea clavata* (Fig. 71). Per la specie *Eunicella cavolini*, invece, la maggior percentuale di impatto è stata osservata nell'AMP Isola dell'Asinara seguita dall'Isola d'Elba, entrambe nel 2025, mentre per la specie *Eunicella singularis* la maggior percentuale di impatto è stata osservata all'Isola d'Elba nel 2025 seguita dall'AMP Capo Milazzo nel 2023 (Fig. 71). Per quanto riguarda le alghe calcaree incrostanti, i maggiori impatti sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara nel 2021, seguita dall'AMP Isola dell'Asinara nel 2025 (Fig. 73).

In generale, quindi, nel 2021 e nel 2025 sono stati rilevati i maggiori segnali di impatto. Ovviamente dati provenienti da diverse aree raccolti in anni diversi risultano solo parzialmente confrontabili, ma possono rappresentare una *baseline* per futuri monitoraggi nel tempo.

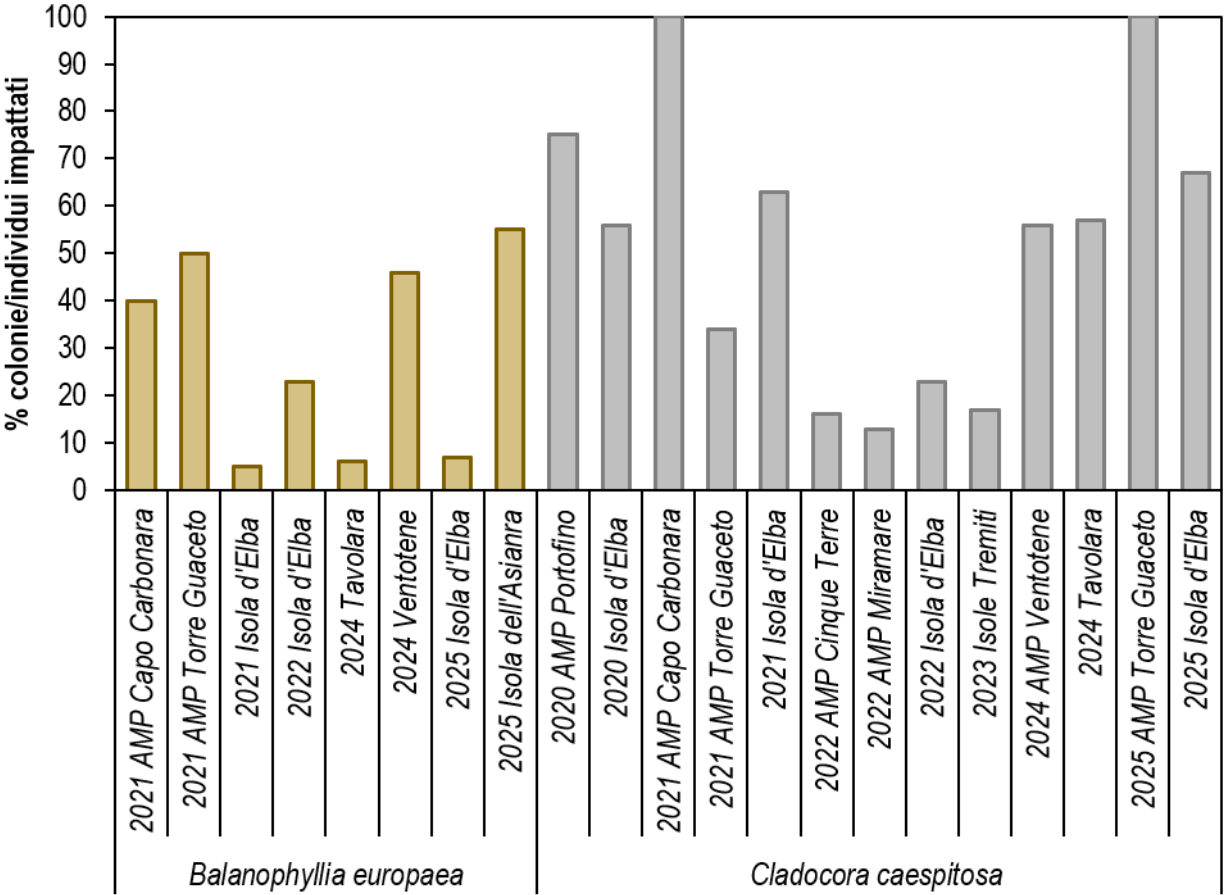


Figura 70. Percentuale (%) di colonie o individui di sclerattinie riportanti segni di sbiancamento.

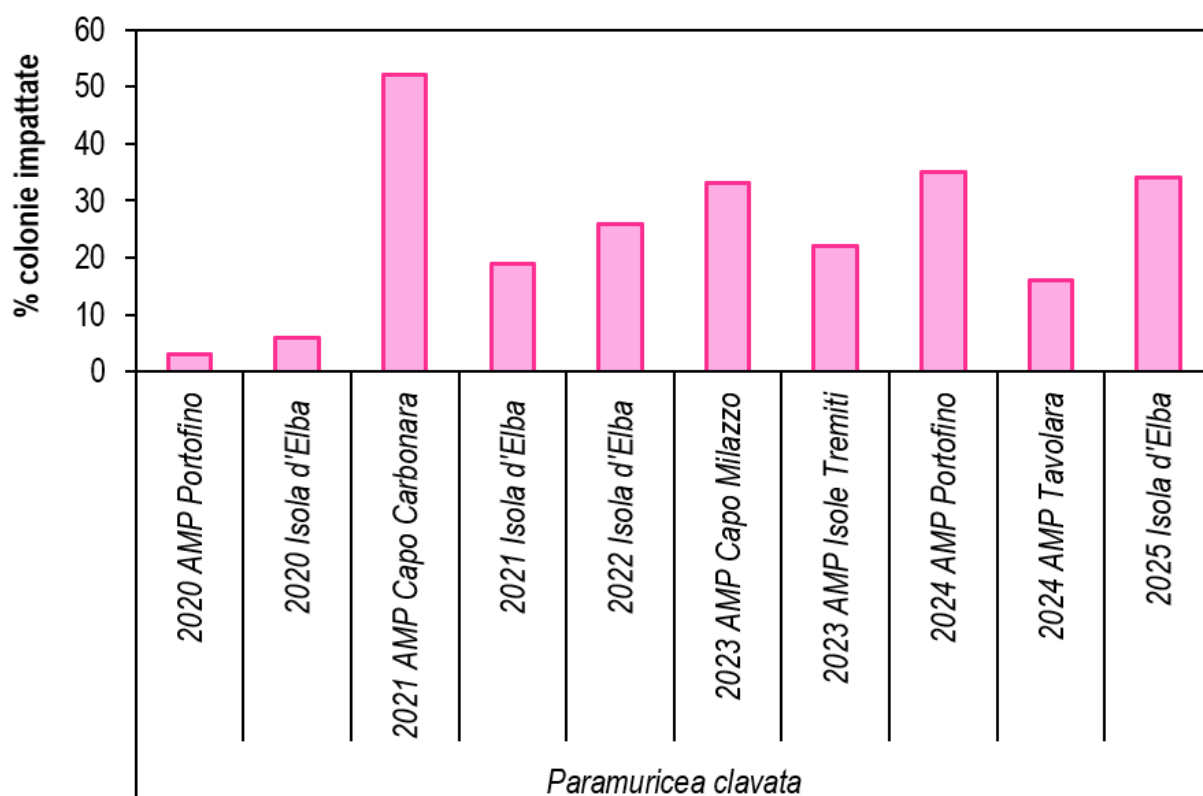


Figura 71. Percentuale (%) di colonie di gorgonie della specie *Paramuricea clavata* riportanti segni di necrosi.

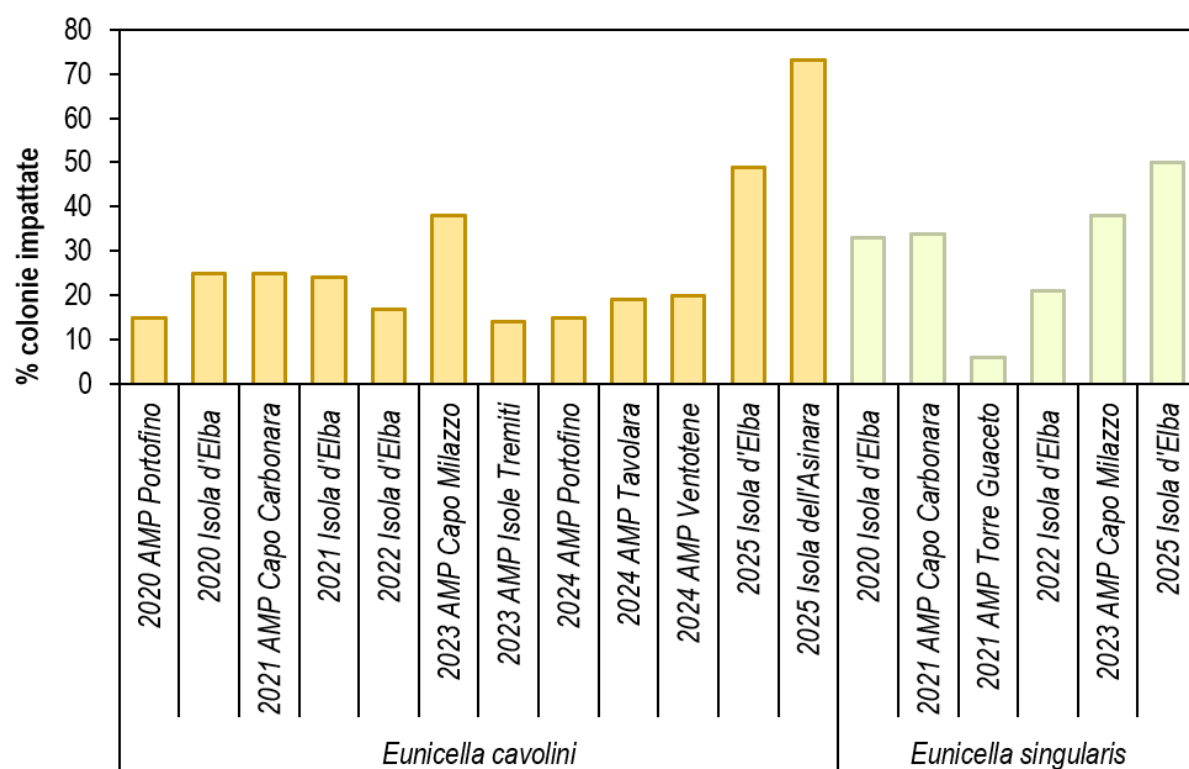


Figura 72. Percentuale (%) di colonie di gorgonie del genere *Eunicella* riportanti segni di necrosi.

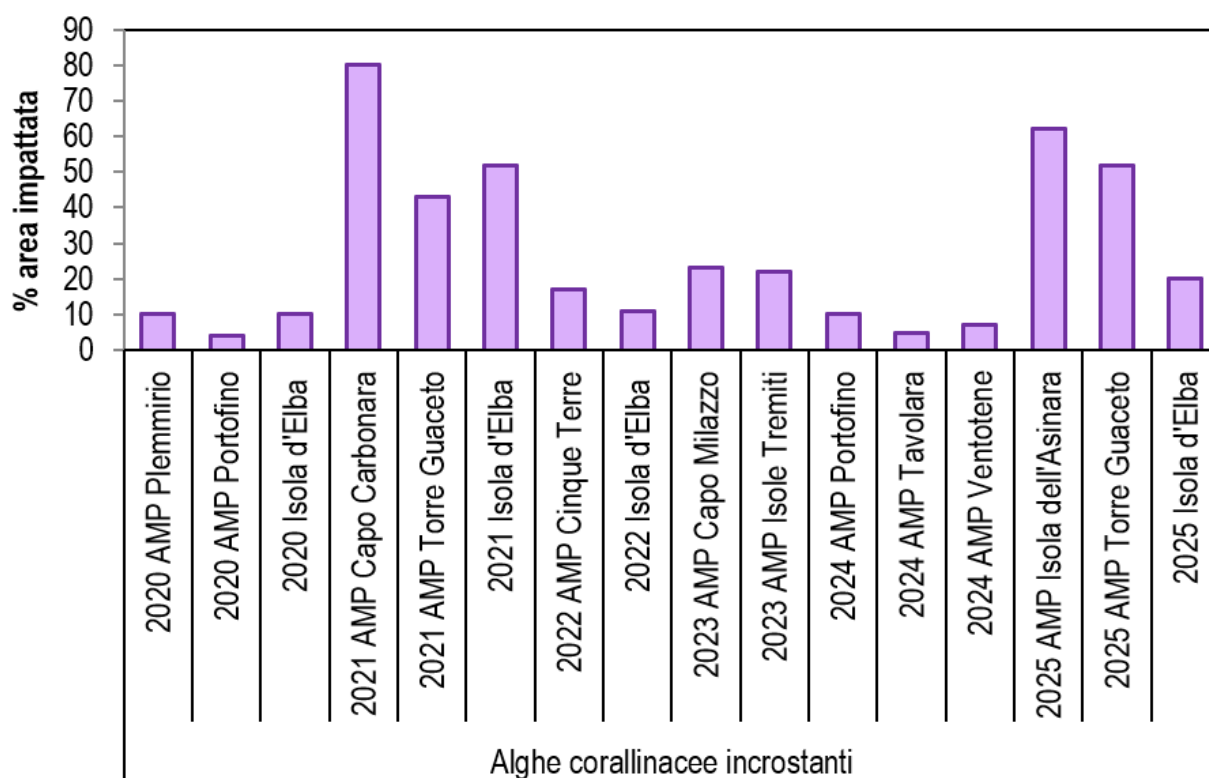


Figura 73. Percentuale (%) di alghe incrostanti sbiancate nelle aree di monitoraggio.

MONITORAGGIO DELLE SPECIE TERMOFILE

Isola d'Elba

I dati relativi ai monitoraggi del sesto anno di progetto Mare Caldo mostrano che all'Isola d'Elba sono state rilevate un totale di 7 specie termofile, di cui 1 aliena (~ 14%) e 6 native (~ 86%) (Tab. 6).

Tabella 6. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile dell'Isola d'Elba. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza semi-quantitativa (1,2,3)	Status
Lo scoglietto	<i>Caulerpa cylindracea</i>	6	1	A
Le formiche della Zanca	<i>Caulerpa cylindracea</i>	23	1	A
Lo scoglietto	<i>Caulerpa cylindracea</i>	32	1	A
Le formiche della Zanca	<i>Lophocladia lallemandii</i>	37	1	A
Lo scoglietto	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	6	1	N
Lo scoglietto	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	15	1	N
Le formiche della Zanca	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	30	1	N
Lo scoglietto	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	35	1	N
Le formiche della Zanca	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	40	3	N
Le formiche della Zanca	<i>Sargassum hornschurchii</i>	32	1	N

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (N)	Status
Lo scoglietto	<i>Hacelia attenuata</i>	32	3	N
Le formiche della Zanca	<i>Sphyraena viridensis</i>	20	1	N
Lo scoglietto	<i>Thalassoma pavo</i>	6	5	N
Le formiche della Zanca	<i>Thalassoma pavo</i>	7	6	N
Le formiche della Zanca	<i>Thalassoma pavo</i>	10	12	N
Le formiche della Zanca	<i>Thalassoma pavo</i>	25	10	N

AMP Isola dell'Asinara

I dati relativi ai monitoraggi del sesto anno di progetto Mare Caldo mostrano che nell'AMP Isola dell'Asinara sono state rilevate un totale di 11 specie termofile, di cui 1 aliena (~ 9%), 1 criptogenica (~ 9%) e 9 native (~ 82%) (Tab. 7).

Tabella 7. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Isola dell'Asinara. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza semi-quantitativa (1,2,3)	Status
Pedra Bianca	<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	30	+	N
Pedra Bianca	<i>Caulerpa cylindracea</i>	35	3	A
Pedra Bianca	<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	3	A
Pedra Bianca	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	2	A
Pedra Bianca	<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	1	A
Baia scarno	<i>Caulerpa cylindracea</i>	35	3	A
Baia scarno	<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	3	A
Baia scarno	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	3	A
Baia scarno	<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	1	A
Punta sabina	<i>Caulerpa cylindracea</i>	19	1	A
Punta dei corvi	<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	2	A
Punta dei corvi	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	2	A
Punta dei corvi	<i>Caulerpa cylindracea</i>	38	2	A
Baia scarno	<i>Caulerpa cylindracea</i>	35	1	A
Punta sabina	<i>Pennaria disticha</i>	19	+	C
Pedra Bianca	<i>Phyllangia americana mouchezii</i>	10	1	N
Baia scarno	<i>Phyllangia americana mouchezii</i>	30	+	N
Baia scarno	<i>Phyllangia americana mouchezii</i>	10	2	N
Baia scarno	<i>Polysincraton lacazei</i>	10	1	N
Pedra Bianca	<i>Polysincraton lacazei</i>	10	0.5	N
Baia scarno	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	29	1	N
Pedra bianca	<i>Zonaria tournefortii</i>	11	+	N

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (N)	Status
Punta sabina	<i>Hacelia attenuata</i>	10	2	N
Baia Scarno	<i>Sphyraena viridensis</i>	18	80	N
Punta Sabina	<i>Sphyraena viridensis</i>	4	1	N
Punta Sabina	<i>Sphyraena viridensis</i>	tra 10 e 18	19	N
Baia scarno	<i>Thalassoma pavo</i>	20	1	N
Pedra Bianca	<i>Thalassoma pavo</i>	30	2	N
Pedra Bianca	<i>Thalassoma pavo</i>	20	1	N
Pedra Bianca	<i>Thalassoma pavo</i>	10	5	N
Baia scarno	<i>Thalassoma pavo</i>	10	7	N
Pedra Bianca	<i>Thalassoma pavo</i>	5	100	N
Punta dei corvi	<i>Thalassoma pavo</i>	25	1	N
Punta dei corvi	<i>Thalassoma pavo</i>	17	200	N
Punta sabina	<i>Thalassoma pavo</i>	10	60	N
Baia scarno	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	18	1	N

AMP Torre Guaceto

I dati relativi ai monitoraggi del sesto anno di progetto Mare Caldo mostrano che nell'AMP Torre Guaceto sono state rilevate un totale di 8 specie termofile, di cui 1 aliena (13%) e 7 native (87%) (Tab. 8).

Tabella 8. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Torre Guaceto. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N). Da sistemare la tabella ancora

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza semi-quantitativa (1,2,3)	Status
Ancora 26	<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	26	2	N
Ancora 26	<i>Acrosymphyton purpuriferum</i>	28	1	N
Ancora 26	<i>Caulerpa cylindracea</i>	26	3	A
Ancora 26	<i>Caulerpa cylindracea</i>	28	2	A
Stazione 15-20 m	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	3	A
Stazione 15-20 m	<i>Caulerpa prolifera</i>	20	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Caulerpa prolifera</i>	20	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Caulerpa prolifera</i>	15	2	N
Panettoni profondi	<i>Phyllangia americana mouchezii</i>	40	3	N
Panettoni profondi	<i>Phyllangia americana mouchezii</i>	40	3	N
Ancora 26	<i>Pseudoclorodesmis furcellata</i>	28	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Pseudoclorodesmis furcellata</i>	20	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Pseudoclorodesmis furcellata</i>	15	2	N

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (N)	Status
Panettoni profondi	<i>Axinella cannabina</i>	40	8	N
Panettoni profondi	<i>Axinella cannabina</i>	40	8	N
Ancora 26	<i>Axinella cannabina</i>	26	13	N
Ancora 26	<i>Axinella cannabina</i>	28	14	N
Stazione 15-20 m	<i>Axinella cannabina</i>	20	4	N
Stazione 15-20 m	<i>Axinella cannabina</i>	20	12	N
Ancora 26	<i>Thalassoma pavo</i>	26	2	N
Stazione 15-20 m	<i>Thalassoma pavo</i>	15	6	N
Laguna	<i>Thalassoma pavo</i>	10	1	N
Ancora 26	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	26	5	N
Ancora 26	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	28	3	N
Stazione 15-20 m	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	20	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	20	1	N
Stazione 15-20 m	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	15	1	N

Confronto delle aree monitorate nell'ambito dei sei anni di progetto

I dati relativi alle specie termofile mostrano un generale gradiente latitudinale con incremento di abbondanze da nord verso sud. Una maggiore presenza di specie termofile si osserva infatti nelle AMP Capo Carbonara, Capo Milazzo e Plemmirio, dove naturalmente abbondano le specie native termofile, ma sono anche diverse le specie aliene provenienti dal canale di Suez e dall'Atlantico. Il minor numero di specie termofile è stato registrato nelle aree più settentrionali, ovvero Portofino e Cinque Terre. Nell'AMP Miramare, area del progetto Mare Caldo più a nord, non sono state rilevate specie termofile (Fig. 74).

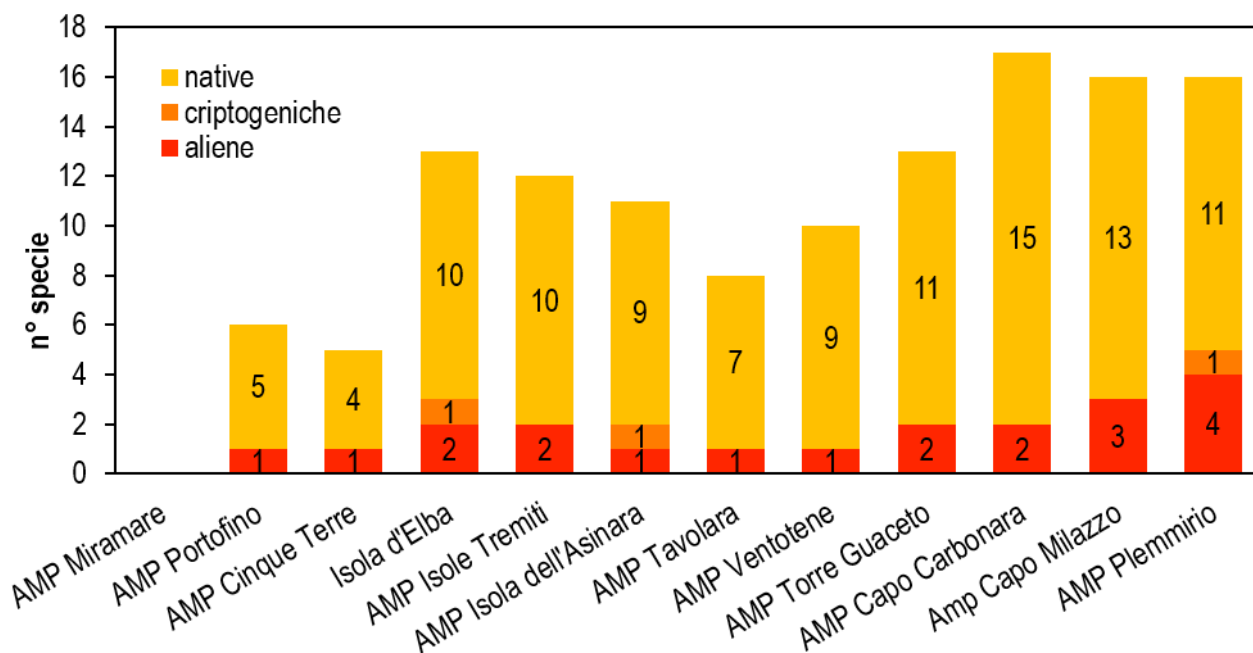


Figura 74. Numero di specie termofile aliene, criptogeniche e native per le undici aree di studio monitorate nell'ambito dei sei anni di progetto Mare Caldo.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

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: uno batimetrico lungo il 1° asse (orizzontale) e uno temporale lungo il 2° asse (verticale) (Fig. 75). 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 (freccie colorate, Fig. 75). Queste nell'ambito dei primi tre anni di progetto, con i soli dati raccolti nel 2020, 2021 e 2022, avevano mostrato un cambiamento irreversibile negli ultimi 30 anni per le stazioni a 10 m, 20 m e 30 m e un potenziale segnale di ritorno alla condizione iniziale per la stazione a 40 m (Azzola & Montefalcone, 2023). Le analisi integrate con i dati raccolti nell'ambito del sesto anno di progetto hanno invece evidenziato cambiamenti che appaiono irreversibili in tutte le comunità indagate, compresa quella a 40 m (Fig. 75). Tuttavia, il test di Kruskal-Wallis applicato ai valori delle traiettorie temporali alle quattro profondità nei 3 intervalli temporali non ha mostrato differenze significative ($p=0,725$). Solo tramite futuri monitoraggi sarà possibile continuare a stabilirne il trend di cambiamento.

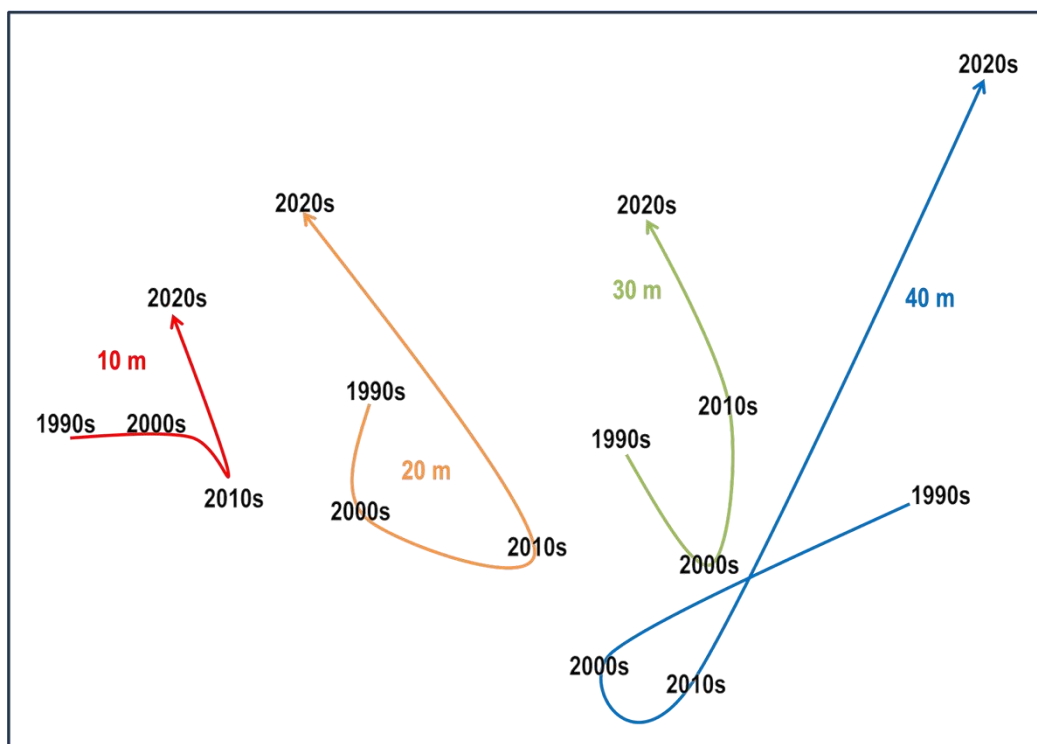


Figura 75. Grafico dell'analisi nMDS (stress=0,1341) applicata alla serie storica disponibile per l'Isola d'Elba con i dati raccolti a partire dal 2020 tramite transetti bionomici nell'ambito del progetto Mare Caldo. Il primo asse (orizzontale) rappresenta il gradiente batimetrico mentre il secondo asse (verticale) rappresenta il gradiente temporale. Gli anni rappresentano i centroidi per ogni periodo di studio, le fasce batimetriche sono identificate dalle scritte colorate, mentre le frecce rappresentano le traiettorie temporali per ogni fascia di profondità.

AMP Torre Guaceto

La disponibilità di dati risalenti all'anno 2021 ha permesso di valutare i cambiamenti nella composizione e nella struttura delle comunità bentoniche dell'AMP Torre Guaceto alle quattro diverse profondità indagate (i.e., 10 m, 20 m, 30 m, e 40 m) negli ultimi 4 anni. Come per l'Isola d'Elba l'analisi multivariata nMDS applicata alla matrice dei dati della comunità bentonica ha ordinato i punti lungo due gradienti: uno batimetrico lungo il 1° asse (orizzontale) e uno temporale lungo il 2° asse (verticale) (Fig. 76). In particolare, la distanza tra i punti nel piano dell'nMDS, che indicano i centroidi alle diverse profondità negli anni, mostra un trend di cambiamento a tutte le profondità, con un minor cambiamento a 40 m (freccette colorate, Fig. 76). Tuttavia, il test di Kruskal-Wallis applicato ai valori delle traiettorie temporali alle quattro profondità non ha mostrato differenze significative ($p=0,609$). Anche in questo caso quindi, solo tramite futuri monitoraggi sarà possibile continuare a stabilirne il trend di cambiamento.

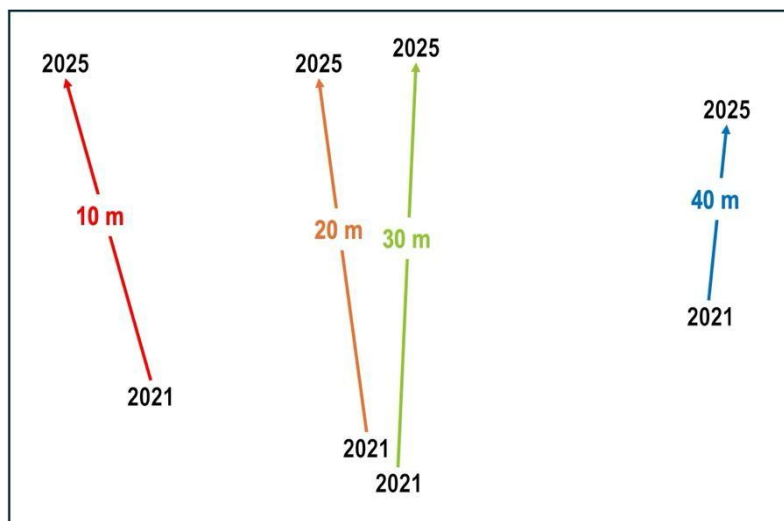


Figura 76. Grafico dell'analisi nMDS (stress= 0,1297) applicata alla matrice di dati raccolti nel 2021 e nel 2025 tramite transetti bionomici nell'ambito del progetto Mare Caldo. Il primo asse (orizzontale) rappresenta il gradiente batimetrico mentre il secondo asse (verticale) rappresenta il gradiente temporale. Gli anni rappresentano i centroidi per ogni periodo di studio, le fasce batimetriche sono identificate dalle scritte colorate, mentre le frecce rappresentano le traiettorie temporali per ogni fascia di profondità.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Al fine di comprendere gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini sono necessari monitoraggi a lungo termine che permettano di analizzare gli andamenti di temperatura e di evidenziare i cambiamenti nel tempo. Le indagini ad ampia scala temporale e spaziale possono, infatti, essere utilizzate per valutare le relazioni tra i fattori ambientali e i cambiamenti nelle comunità biologiche (Doney et al. 2012). Nell'ambito del progetto Mare Caldo, ci si è posti l'obiettivo di monitorare l'andamento delle temperature lungo la colonna d'acqua, fino a 40 m di profondità, al fine di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle comunità bentoniche di scogliera rocciosa.

Seppur il 2025 non ha raggiunto i record assoluti del 2024, è risultato essere il terzo anno più caldo mai registrato con condizioni eccezionalmente calde e una temperatura media di 0,59°C al di sopra della media recente (1991–2020) e con un valore di 1,47°C al di sopra del livello preindustriale. Di conseguenza, le temperature superficiali del mare (SST) eccezionalmente elevate sono state associate a numerose anomalie termiche diffuse e persistenti. In particolare, nel Mediterraneo nell'anno 2025 sono stati registrati valori medi compresi tra circa 1,5°C e 2,5°C sopra la media climatologica.

L'analisi delle temperature superficiali dell'acqua (SST) condotta grazie ai dati ottenuti dal servizio Copernicus Marine Services (*ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative*) ha mostrato come tutte le aree del progetto Mare Caldo siano state interessate da numerose *Marine Heat Waves* (MHW) durante il 2025, sia nella stagione estiva sia invernale, con picchi di temperatura mediamente maggiori di 0,5°C-1°C rispetto alla media climatologica, ma che in diverse aree hanno raggiunto picchi massimi di oltre 2,5°C (i.e., AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Isola dell'Asinara, AMP Plemmirio). Coerentemente, l'analisi degli andamenti delle temperature lungo la colonna d'acqua nei sei anni di progetto Mare Caldo ha evidenziato nel 2025 picchi di calore propagarsi verso il basso lungo la colonna d'acqua. Questo comportamento è particolarmente evidente nelle AMP Portofino, Isole Tremiti, Capo Milazzo, Capo Carbonara, Plemmirio, e nell'area dell'Isola d'Elba, dove l'approfondimento delle isoterme calde suggerisce una penetrazione verticale del calore fino a profondità significative (20-30 m). Nelle AMP Torre Guaceto, Tavolara Punta Coda Cavallo, Miramare e in parte Cinque Terre, questo processo può coinvolgere quasi tutta la colonna osservata, rendendo il riscaldamento evidente anche negli strati prossimi al fondo (30-40 m).

Al fine di valutare quali siano stati gli effetti dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi di scogliera, nell'ambito dei sei anni del progetto Mare Caldo sono stati condotti studi sulle comunità bentoniche di scogliera rocciosa in dodici aree di studio: AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Isole Tremiti, AMP Isola dell'Asinara, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara, AMP Capo Milazzo e AMP Plemmirio. I dati raccolti tramite transetti bionomici, in particolare, hanno permesso di caratterizzare la struttura e la composizione delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio.

Le aree a maggiore biodiversità sono risultate l'AMP Capo Carbonara (84 specie), seguita dall'AMP Portofino (80 specie), dall'AMP Plemmirio (70 specie), dall'AMP Isole Tremiti (69 specie), dall'AMP Isola dell'Asinara (65 specie), dall'AMP Torre Guaceto (59 specie), dall'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (48 specie), dall'AMP Capo Milazzo (44 specie), dall'AMP Miramare (43 specie), dall'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (43 specie), e dall'AMP Cinque Terre (39 specie).

I risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice di diversità di Shannon hanno mostrato un elevato stato ecologico ($H' > 4$) per l'AMP Capo Carbonara, un buono stato ecologico ($3 < H' \leq 4$) per l'AMP Miramare e l'AMP Torre Guaceto, un moderato stato ecologico ($2 < H' \leq 3$) per l'AMP Portofino, l'AMP Cinque Terre, l'AMP Isola dell'Asinara, l'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, l'AMP Isole Tremiti, l'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, l'AMP Capo Milazzo e l'AMP Plemmirio. Infine, uno scarso stato ecologico ($1 < H' \leq 2$) è stato rilevato per l'Isola d'Elba. L'indice di dominanza di Simpson ha confermato il minor stato ecologico di quest'ultima area rispetto alle altre aree, evidenziando una potenziale minore resilienza al disturbo delle comunità bentoniche soprattutto a 30 m. Un basso valore di equitabilità, infatti, rende una comunità più incline alla perdita di biodiversità (nel caso di scomparsa delle specie meno abbondanti) e di funzionamento dell'ecosistema (nel caso di scomparsa delle specie chiave).

Durante i sei anni di monitoraggio non sono stati osservati eventi di mortalità di massa paragonabili a quelli verificatisi nel 1990 e nel 2003 (Cerrano et al. 2000; Garrabou et al. 2009). Tuttavia, in tutte le aree di studio sono stati osservati segni di sbiancamento e necrosi delle specie target attribuibili all'effetto del riscaldamento delle acque. Sulle dodici aree monitorate, l'AMP Miramare situata più a nord è l'area dove sono stati registrati i minori valori di impatto, sia per quanto riguarda le specie di cnidari sia per le alghe calcaree. Tuttavia, in quest'area sono stati osservati i segnali di moria di massa del mollusco *Pinna nobilis*, che ha coinvolto tutte le popolazioni mediterranee di questa specie a partire dal 2018. Per le specie di coralli madreporari mediterranei *Balanophyllia europea* e *Cladocora caespitosa* i maggiori segnali di impatto sono stati registrati rispettivamente nell'AMP Isola dell'Asinara nel 2025 e l'AMP Torre Guaceto nel 2021 per la prima specie e nell'AMP Capo Carbonara nel 2021 e nell'AMP Torre Guaceto nel 2025 per la seconda specie. Per la specie *Paramuricea clavata* i maggiori segnali di impatto sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara nel 2021 e poi all'Isola d'Elba nel 2025. Per la specie *Eunicella cavolini*, invece, la maggior percentuale di impatto è stata osservata nell'AMP Isola dell'Asinara seguita dall'Isola d'Elba, entrambe nel 2025, mentre per la specie *Eunicella singularis* la maggior percentuale di impatto è stata osservata all'Isola d'Elba nel 2025 seguita dall'AMP Capo Milazzo nel 2023. Infine, per quanto riguarda le alghe calcaree incrostanti, i maggiori impatti sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara nel 2021, seguita dall'AMP Isola dell'Asinara nel 2025. In generale, quindi, nel 2021 e nel 2025 sono stati rilevati i maggiori segnali di impatto. Ovviamente dati provenienti da diverse aree

raccolti in anni diversi risultano solo parzialmente confrontabili, ma possono rappresentare una *baseline* per futuri monitoraggi nel tempo.

Le analisi condotte sulle specie termofile hanno rivelato un gradiente latitudinale coerente con i dati della temperatura. Nelle AMP più meridionali di Capo Carbonara, Capo Milazzo e Plemmirio è stato registrato il maggior numero di specie termofile. Le specie termofile autoctone sono naturalmente abbondanti in queste aree; tuttavia, il loro potenziale incremento e la diffusione di specie esotiche potrebbero portare a un impoverimento delle comunità autoctone (Occhipinti-Ambrogi 2007). Diverse specie termofile sono state osservate inaspettatamente anche all'Isola d'Elba, nell'AMP di Portofino e nell'AMP Cinque Terre, mentre non sono state osservate specie termofile nell'AMP Miramare.

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. 2017). Il confronto con i dati storici disponibili dagli anni '90 per l'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, che pare ad oggi irreversibile. Il confronto, infatti, con i nuovi dati raccolti durante i monitoraggi del 2025 ha permesso di confermare che la comunità bentonica dell'Isola d'Elba abbia ormai raggiunto un nuovo stato alternativo rispetto a quello delle comunità originali. Allo stesso modo nell'AMP Torre Guaceto il confronto con i dati raccolti nel 2021 e nel 2025 ha permesso di evidenziare cambiamenti nella composizione e struttura delle comunità bentoniche a tutte le profondità. Ulteriori monitoraggi saranno comunque necessari per avere un quadro più completo relativo ai trend di cambiamento in quest'area di studio.

In conclusione, i risultati del sesto anno del progetto Mare Caldo confermano le osservazioni riportate nell'ambito dei primi cinque anni di progetto (Azzola & Montefalcone, 2025). Gli effetti del cambiamento climatico e delle anomalie termiche sono evidenti in tutte le aree di monitoraggio, indipendentemente dalla diversa localizzazione geografica, dalla diversa latitudine e dal diverso livello di conservazione. Come evidenziato in tutti i precedenti report annuali di progetto, la mitigazione e la corretta gestione delle pressioni locali, anche grazie all'istituzione di aree marine protette, rappresentano le migliori strategie per aumentare la resilienza degli ecosistemi marini costieri, come evidenziato dai valori di stato ecologico più bassi dell'Isola d'Elba, che rappresenta l'unica stazione non ricadente in un'AMP. Tuttavia, pur essendo validi strumenti di conservazione, le AMP non sono sufficienti a contrastare gli effetti del cambiamento climatico, per i quali sono necessari anche interventi sinergici a livello globale. Per questo motivo risulta fondamentale lo sviluppo di reti di monitoraggio e ricerca a livello internazionale. I risultati ottenuti nei sei anni di progetto Mare Caldo, e il loro confronto con la rete mediterranea T-MEDNet, evidenziano l'importanza di valutare in maniera sinottica e comparativa gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini.

ALLEGATO I: il caso studio dell'Isola d'Elba

L'isola d'Elba è l'area dove nel corso dei sei anni di progetto mare caldo sono stati condotti il maggior numero di monitoraggi biologici (i.e., nel 2020, 2021, 2022 e 2025). Per questo motivo di seguito verrà riportato un approfondimento relativo agli andamenti di temperatura in quest'area e ai potenziali impatti che questi possono aver avuto sulle comunità bentoniche di scogliera rocciosa.

L'analisi dell'anomalia termica, calcolata rispetto alla climatologia giornaliera 1990–2019, evidenzia una marcata variabilità interannuale della colonna d'acqua nell'area di studio tra il 2020 e il 2026. La scelta di utilizzare un'anomalia rispetto alla climatologia trentennale consente di rimuovere il ciclo stagionale medio e di mettere in evidenza le anomalie positive e negative osservate considerando che queste non rappresentano semplicemente il normale riscaldamento estivo o raffreddamento invernale, ma indicano condizioni termiche anomale rispetto al comportamento climatologico dell'area (Pirro et al., 2024; Martellucci et al., 2025).

Le analisi di temperatura lungo la colonna d'acqua dell'Isola d'Elba hanno mostrato che quest'area è stata interessata da fasi di riscaldamento anomalo rispetto alle condizioni medie del periodo 1990–2019. In particolare, tra il 2023 e il 2024 si osservano anomalie termiche positive persistenti, cioè periodi in cui la temperatura della colonna d'acqua è risultata superiore a quella attesa per lo stesso periodo dell'anno. Questo aspetto è importante perché non si tratta semplicemente del normale riscaldamento estivo, ma di uno scostamento rispetto alla variabilità media giornaliera dell'area. Il segnale caldo non appare limitato alla superficie, ma in diversi momenti interessa anche gli strati più profondi della colonna d'acqua. Questo punto è particolarmente rilevante per gli organismi bentonici che vivono associati al fondale; a differenza di organismi mobili, infatti, molte specie bentoniche hanno una capacità limitata o nulla di spostarsi per evitare condizioni ambientali sfavorevoli. Per questo motivo, quando un'anomalia termica raggiunge le profondità in cui vivono, può rappresentare un fattore di stress importante. In particolare, gli organismi bentonici che vivono alle minori profondità (e.g. 10 e 20 m) sono ovviamente maggiormente esposti agli stress termici tuttavia in mari temperati, quali il Mediterraneo, sono anche solitamente più adattati agli sbalzi termici dovuti alla normale stagionalità. Al contrario, gli organismi che vivono a maggiori profondità (e.g. 30 e 40 m) sono generalmente meno adattati ai cambiamenti di temperatura e quindi più sensibili a eventuali anomalie termiche che raggiungono queste profondità (Bensoussan et al., 2010).

Dalle analisi condotte sulle comunità bentoniche nei quattro anni di monitoraggio, i risultati mostrano segnali coerenti con una riduzione dello stato ecologico delle comunità bentoniche nell'area dell'Isola d'Elba. Questo deterioramento emerge sia dall'aumento degli organismi che presentano segni visibili di impatto (*affected*), sia dalla riduzione del numero complessivo di colonie o individui osservati nel tempo (Fig. A1b,c). È importante leggere questi due elementi insieme, perché la sola percentuale di organismi *affected* non è sufficiente per descrivere lo stato reale della popolazione. Una percentuale apparentemente più bassa di organismi danneggiati, infatti, può non indicare

necessariamente un recupero, se nello stesso periodo il numero totale di colonie o individui si è ridotto.

In particolare, per *Eunicella cavolini* e *Paramuricea clavata* si osserva un incremento delle colonie classificate come *affected* (Fig. A1b), accompagnato da una diminuzione del numero complessivo di colonie osservate. Questo doppio segnale è particolarmente significativo: da un lato indica che una quota crescente delle colonie mostra segni visibili di stress o danneggiamento, dall'altro suggerisce una possibile perdita di colonie nel tempo. In altre parole, il sistema non mostra soltanto un aumento del danno sulle colonie presenti, ma anche una potenziale riduzione della componente strutturante della comunità bentonica. Questo aspetto è rilevante perché specie come *Eunicella cavolini* e *Paramuricea clavata* contribuiscono alla complessità e alla tridimensionalità degli habitat bentonici di scogliera rocciosa.

Un andamento simile emerge anche per *Balanophyllia europaea* i cui segnali di moria aumentano tra il 2021 e il 2022, mentre nel 2025 la percentuale di individui *affected* risulta inferiore (Fig. A1c). Tuttavia, questa diminuzione percentuale deve essere interpretata con cautela, perché è associata a una riduzione del numero totale di individui osservati. Anche in questo caso, quindi, una minore percentuale di individui danneggiati non deve essere automaticamente letta come un segnale di recupero della popolazione. Potrebbe invece riflettere una mortalità pregressa, con la scomparsa degli individui più compromessi e la permanenza di una frazione residua apparentemente meno colpita.

Le analisi condotte sulle comunità bentoniche tramite gli indici di diversità hanno permesso di descriverne la composizione e la struttura complessiva. L'indice di Margalef (Fig. A1d) è un indicatore della ricchezza in specie: in termini semplici, aiuta a valutare quante specie diverse sono presenti, tenendo conto anche del numero complessivo di individui osservati. Valori più alti indicano una comunità più ricca in specie, mentre valori più bassi possono suggerire una riduzione della ricchezza specifica. Nel caso dell'Isola d'Elba, l'indice di Margalef non mostra una diminuzione lineare e continua tra il 2020 e il 2025. Al contrario, evidenzia una marcata variabilità interannuale: i valori aumentano tra il 2020 e il 2021, diminuiscono nel 2022 e mostrano nel 2025 un nuovo incremento ad alcune profondità (i.e. 20 e 40 m). Questo andamento suggerisce che la risposta della comunità non possa essere descritta semplicemente come una perdita progressiva di diversità, ma debba essere interpretata come una dinamica più complessa, probabilmente legata a cambiamenti nella composizione biologica e nella distribuzione relativa delle specie.

L'indice di Shannon (Fig. A1f), fornisce un'informazione complementare perché tiene conto sia del numero di specie presenti sia di quanto queste siano distribuite in modo equilibrato all'interno della comunità. Una comunità con molte specie distribuite in modo relativamente uniforme tende ad avere valori di Shannon più elevati; al contrario, se poche specie diventano dominanti e le altre sono rare, l'indice tende a diminuire. Anche Shannon non indica una perdita generalizzata e uniforme della diversità tra il 2020 e il 2025. I valori restano relativamente elevati a 10 m, 20 m e 40 m, mentre il segnale più critico si osserva a 30 m, dove nel 2025 l'indice raggiunge il valore più basso della serie.

L'indice di Simpson (Fig. A1e), aiuta invece a valutare il grado di dominanza all'interno della comunità. In questa formulazione, valori più elevati indicano una maggiore dominanza di poche specie, mentre valori più bassi suggeriscono una comunità più equilibrata. Anche in questo caso, il segnale più evidente nel 2025 riguarda la profondità di 30 m, dove Simpson raggiunge il valore più alto. Questo risultato è coerente con la diminuzione di Shannon alla stessa profondità e suggerisce che, a 30 m, l'equitabilità in termini di abbondanza in specie si sia ridotta e la comunità sia più dominata da un numero ridotto di specie.

Nel complesso, Margalef, Shannon e Simpson indicano che la comunità bentonica non risponde con una semplice diminuzione lineare della biodiversità. Gli indici mostrano invece una dinamica più articolata, caratterizzata da variabilità interannuale, differenze tra profondità e possibili cambiamenti nella composizione e nell'equilibrio tra le specie. Questo risultato non contraddice i segnali di deterioramento osservati negli organismi strutturanti, ma suggerisce che l'impatto dello stress ambientale possa manifestarsi non solo attraverso la riduzione numerica di alcune specie, ma anche attraverso una riorganizzazione della comunità.

Questa distinzione è importante per l'interpretazione ecologica delle osservazioni svolte. I risultati relativi alle morie di massa mostrano segnali più diretti di stress biologico, con colonie o individui *affected* e variazioni nel numero totale di organismi osservati. I risultati relativi agli indici di diversità descrivono, invece, la risposta della comunità nel suo insieme. Una comunità può mantenere valori relativamente elevati di ricchezza o diversità complessiva e, allo stesso tempo, perdere organismi strutturanti, mostrare segnali di moria o modificare la propria composizione interna. Per questo motivo, gli indici di diversità devono essere letti insieme agli altri indicatori biologici e alla componente fisica rappresentata dall'anomalia termica.

Il confronto tra la componente fisica e quella biologica suggerisce quindi una possibile relazione tra la persistenza di condizioni più calde della norma e la riorganizzazione osservata della comunità bentonica. Il periodo 2023–2024, caratterizzato da anomalie termiche positive persistenti nella colonna d'acqua, potrebbe aver rappresentato una fase di stress rilevante per gli organismi bentonici. Gli effetti osservati nel 2025 potrebbero quindi non manifestarsi necessariamente come una semplice diminuzione di tutti gli indici di diversità, ma come una risposta più articolata: aumento degli organismi *affected*, riduzione del numero totale di alcune colonie o individui, e cambiamenti nella struttura relativa della comunità alle diverse profondità.

Questa lettura è coerente con il concetto di effetto cumulativo dello stress termico. Gli organismi bentonici possono non rispondere immediatamente a un'anomalia di temperatura, ma subire un progressivo indebolimento fisiologico. Nel tempo, questo può tradursi in maggiore vulnerabilità, riduzione della capacità di recupero, mortalità parziale o totale e perdita selettiva delle componenti più sensibili della comunità. Di conseguenza, gli effetti osservati nel 2025 potrebbero rappresentare una risposta ritardata a condizioni termiche sfavorevoli verificatesi negli anni precedenti.

Questa interpretazione trova supporto anche nella letteratura recente sul Mediterraneo, dove anomalie termiche positive e *marine heatwaves* sono state associate a eventi di mortalità di massa in comunità bentoniche costiere, interessando gorgonie, coralli, spugne e altri organismi sessili (Garrahou et al., 2022). In diversi casi è stato evidenziato che gli impatti non si limitano alla superficie, ma possono estendersi fino a diverse decine di metri di profondità, coinvolgendo organismi longevi e strutturanti. Altri lavori hanno mostrato che eventi estremi di riscaldamento possono trasformare habitat complessi in comunità più semplici, con cambiamenti nella ricchezza specifica, nella dominanza e nella struttura ecologica complessiva (Bianchi et al., 2019; Morri et al., 2019; Azzola et al., 2024).

È comunque necessario mantenere una formulazione prudente. I monitoraggi biologici non sono stati effettuati sempre nella stessa stagione, e questo può aver influito sul numero di specie osservate e quindi anche gli indici di diversità. Inoltre, la temperatura non è l'unico fattore che può agire sulle comunità bentoniche: anche correnti, disponibilità di cibo, sedimentazione, torbidità, patologie, eventi di disturbo locale e differenze nello sforzo di campionamento possono contribuire a modificare lo stato degli organismi. Tuttavia, la coerenza tra il periodo di forte anomalia termica, i segnali di impatto sugli organismi strutturanti e la risposta non lineare degli indici di diversità rafforza l'ipotesi che il riscaldamento abbia rappresentato un fattore di stress rilevante.

Nel complesso, i risultati suggeriscono una possibile riorganizzazione della comunità bentonica in un contesto di crescente stress termico. La componente fisica mostra la presenza di anomalie termiche positive persistenti; i dati sugli organismi strutturanti mostrano segnali di impatto e variazioni numeriche; gli indici di diversità indicano una risposta non lineare, con differenze tra profondità e un segnale particolarmente evidente a 30 m. Più che una perdita uniforme di biodiversità, il quadro complessivo suggerisce quindi una trasformazione della comunità, probabilmente legata all'interazione tra stress termico, vulnerabilità degli organismi strutturanti e variabilità ecologica locale.

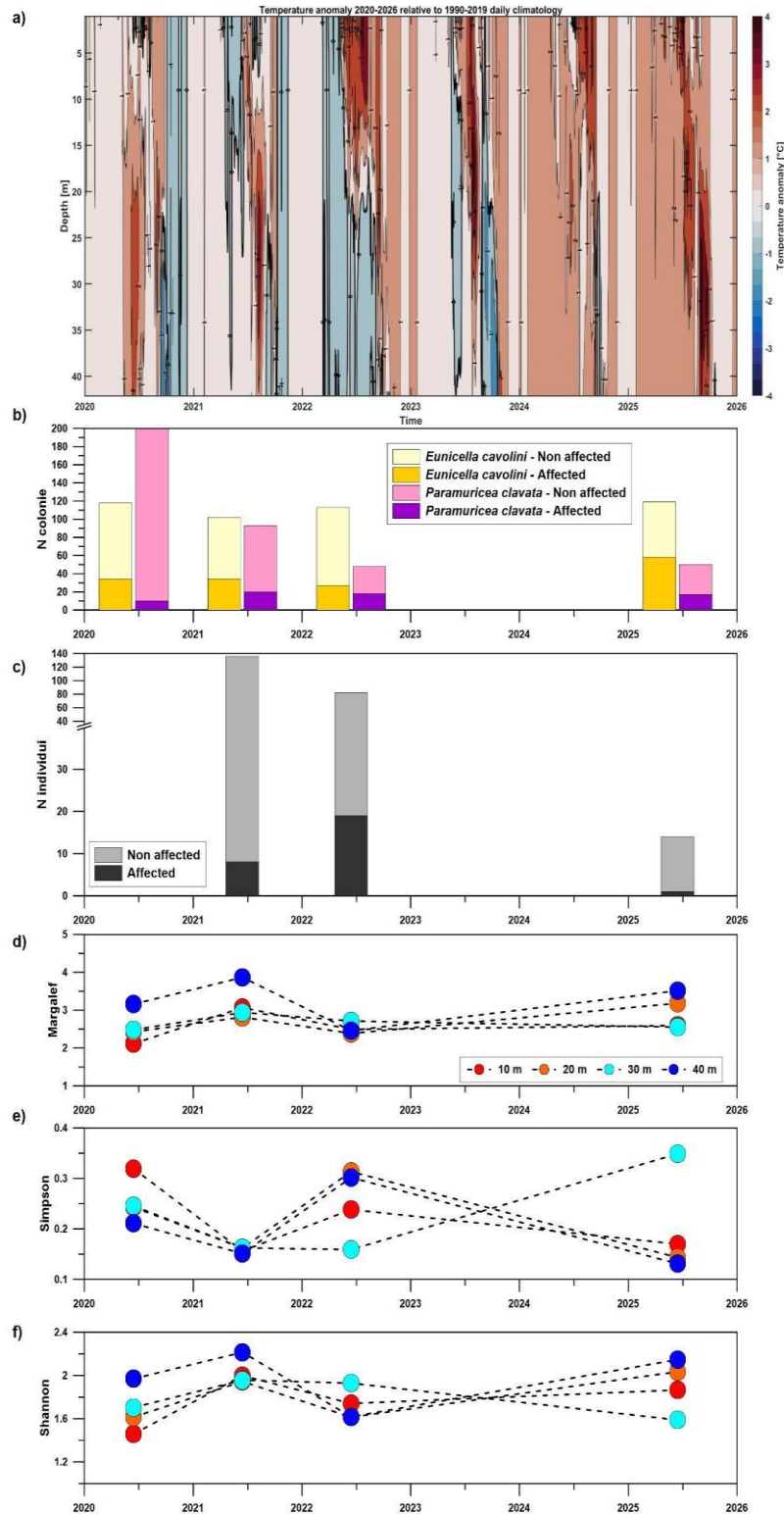


Figura A1. Relazione tra variabilità termica e risposta biologica nelle comunità bentoniche dell'Isola d'Elba nel periodo 2020–2025. **a)** Anomalia termica della colonna d'acqua nel periodo 2020–2026, calcolata rispetto alla climatologia giornaliera 1990–2019; valori positivi indicano condizioni più calde rispetto alla media climatologica, mentre valori negativi indicano condizioni più fredde; **b)** numero di colonie *affected* e non *affected* di *Eunicella cavolini* e *Paramuricea clavata*; **c)** numero di individui *affected* e non *affected* di *Balanophyllia europaea*; **d–f)** andamento degli indici di diversità della comunità bentonica alle profondità di 10, 20, 30 e 40 m: **d)** indice di Margalef, indicativo della ricchezza in specie; **e)** indice di Simpson, indicativo del grado di dominanza/equilibrio della comunità; **f)** indice di Shannon, che integra ricchezza specifica ed equidistribuzione delle specie.

ALLEGATO II: monitoraggi tramite DNA ambientale

Nell'ambito delle attività svolte nelle AMP dell'Isola dell'Asinara e di Torre Guaceto, oltre ai monitoraggi delle comunità bentoniche di scogliera rocciosa previsti dal protocollo Mare Caldo, sono state condotte dalla Prof.ssa Antonella Penna, Prof.ssa Silvia Casabianca e Dott.ssa Giorgia Ravera, Dipartimento di Scienze Biomolecolari, Università di Urbino attività di campionamento e analisi del DNA ambientale (*environmental* DNA, eDNA). L'eDNA comprende l'insieme delle tracce genetiche rilasciate dagli organismi nell'ambiente e rappresenta uno strumento innovativo per il monitoraggio della biodiversità e dello stato degli ecosistemi, consentendo valutazioni rapide, non invasive ed efficaci (Penna & Procaccini, 2026; Casabianca et al., 2025).

I campionamenti effettuati hanno consentito di acquisire informazioni sia sulla componente planctonica sia sulle comunità bentoniche. In particolare, attraverso l'analisi dell'eDNA è stato possibile rilevare la presenza di numerose specie bentoniche, sia sessili, sia vagili, ampliando il quadro conoscitivo ottenuto mediante i tradizionali rilevamenti visivi.

Confrontando le specie bentoniche sessili rilevate nell'AMP Isola dell'Asinara tramite i transetti bionomici previsti dal protocollo Mare Caldo con quelle identificate mediante analisi dell'eDNA, è emerso che questa tecnica ha permesso di rilevare 8 specie non osservate durante i rilevamenti visivi (Tab. A2a). La specie *Jania rubens* è stata invece identificata da entrambe le metodologie.

Tabella A2a. Elenco delle specie bentoniche sessili cospicue, utili al monitoraggio delle comunità bentoniche di scogliera rocciosa previsto dal protocollo Mare Caldo, rilevate tramite analisi dell'eDNA nell'AMP Isola dell'Asinara. Le specie non indigene sono contrassegnate da un asterisco (*)

Phylum	Class	Order	Family	Species
Ochrophyta	Phaeophyceae	Fucales	Sargassaceae	<i>Sargassum thunbergii</i> *
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Ceramiceae	<i>Ceramium</i> sp.
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Laurencia</i> sp.
Rhodophyta	Florideophyceae	Corallinales	Corallinaceae	<i>Jania rubens</i>
Rhodophyta	Florideophyceae	Corallinales	Spongitiaceae	<i>Spongites yendoi</i> *
Rhodophyta	Stylonematophyceae	Stylonematales	Stylonemataceae	<i>Stylonema alsidii</i>
Porifera	Calcarea	Clathrinida	Clathrinidae	<i>Clathrina</i> sp.
Mollusca	Bivalvia	Venerida	Chamidae	<i>Chama</i> sp.
Mollusca	Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Limaria hians</i>

Analogamente, il confronto tra le specie bentoniche sessili rilevate nell'AMP Torre Guaceto mediante transetti bionomici e quelle individuate attraverso le analisi di eDNA ha evidenziato la presenza di 11 specie rilevate esclusivamente tramite l'eDNA. La specie *Laurencia* sp. è risultata invece comune a entrambe le metodologie di indagine (Tab. A2b).

Tabella A2b. Elenco delle specie bentoniche sessili cospicue, utili al monitoraggio delle comunità bentoniche di scogliera rocciosa previsto dal protocollo Mare Caldo, rilevate tramite analisi dell'eDNA nell'AMP Torre Guaceto. Le specie non indigene sono contrassegnate da un asterisco (*).

Phylum	Class	Order	Family	Species
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Chondria</i> sp.
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Laurencia</i> sp.
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Polysiphonia</i> sp.
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Wrangeliaceae	<i>Griffithsia corallinoides</i> *
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Wrangeliaceae	<i>Wrangelia</i> sp.
Annelida		Sipuncula	Aspidosiphonidae	<i>Aspidosiphon</i> sp.
Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Syllidae	<i>Sphaerosyllis</i> sp.
Mollusca	Bivalvia	Venerida	Chamidae	<i>Chama</i> sp.
Mollusca	Bivalvia	Gastrochaenida	Gastrochaenidae	<i>Rocellaria dubia</i>
Mollusca	Bivalvia	Limida	Limidae	<i>Limaria hians</i>
Mollusca	Bivalvia	Mytilida	Mytilidae	<i>Musculus</i> sp.
Chordata	Ascidacea	Phlebobranchia	Asciidiidae	<i>Phallusia nigra</i> *

Di particolare interesse per il progetto Mare Caldo risulta il rilevamento di specie non indigene tramite analisi dell'eDNA. In particolare, sono stati registrati due specie non indigene nell'AMP Isola dell'Asinara (*Sargassum thunbergii* e *Spongites yendoi*) e due nell'AMP Torre Guaceto (*Griffithsia corallinoides* e *Phallusia nigra*).

Oltre alle specie target considerate nei protocolli Mare Caldo, le analisi dell'eDNA hanno inoltre consentito di rilevare numerose specie non cospicue, difficilmente identificabili mediante rilevamenti visivi, nonché organismi endosimbionti. Tali risultati evidenziano il potenziale dell'eDNA come strumento complementare ai monitoraggi tradizionali, in grado di integrare e ampliare le informazioni sulla biodiversità delle comunità di scogliera rocciosa.

L'integrazione dei dati derivanti dalle analisi di eDNA con quelli raccolti mediante i protocolli Mare Caldo, unitamente alla prosecuzione delle attività di monitoraggio, consentirà di ottenere una valutazione più completa della biodiversità e dello stato ecologico delle aree coinvolte nel progetto.

ALLEGATO III: Confronto tra osservazioni in situ e modello numerico

Prima di utilizzare i dati del modello numerico per descrivere l'evoluzione termica delle Aree Marine Protette, è stata valutata la sua capacità di riprodurre le principali caratteristiche osservate nella colonna d'acqua. A questo scopo, per l'AMP di Ustica è stato confrontato il diagramma Hovmöller ottenuto dalle misure in situ con quello ricavato dalla temperatura potenziale del modello numerico nello stesso intervallo temporale e alle corrispondenti profondità (Fig. A2).

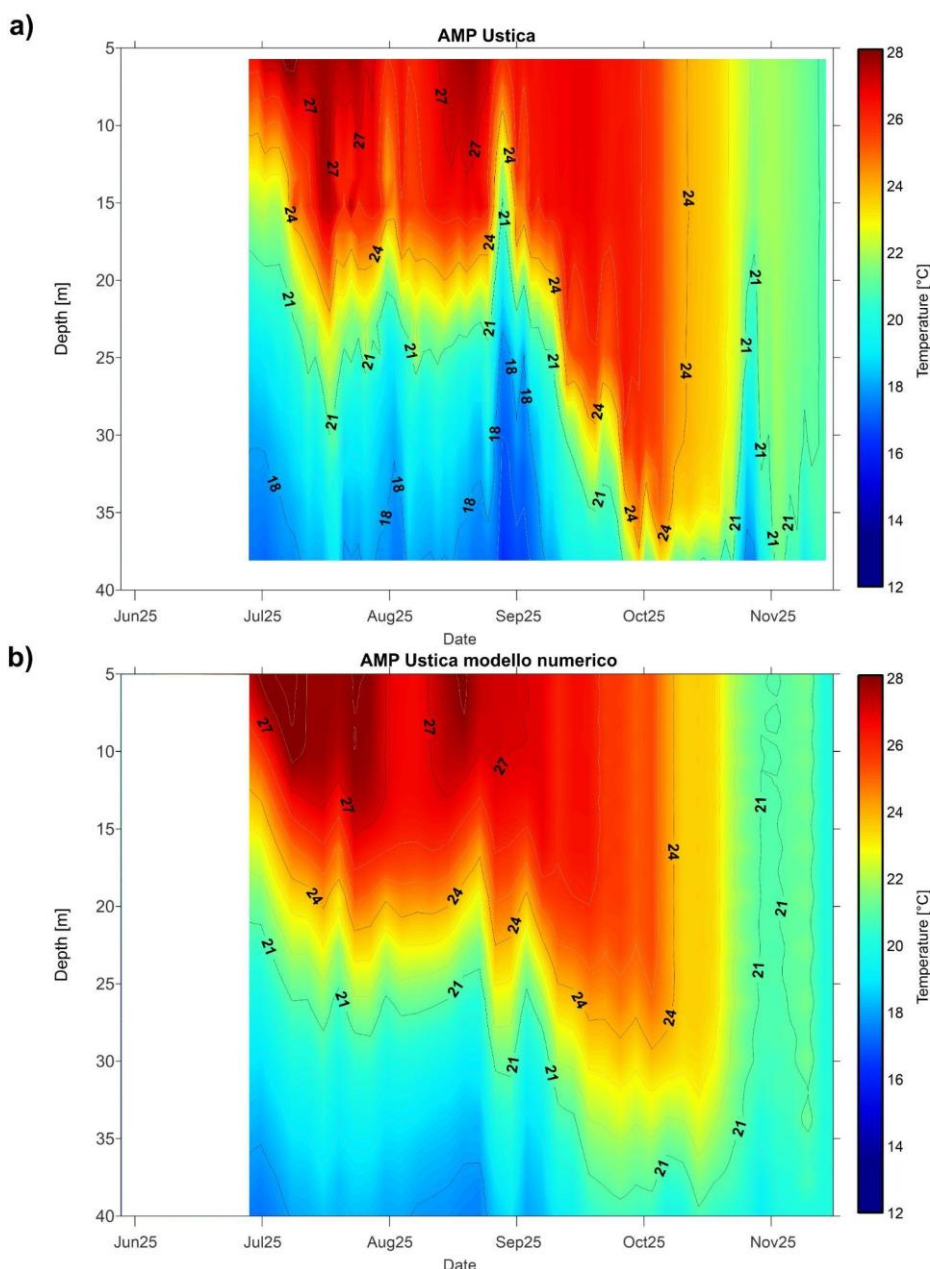


Figura A2. Confronto tra la struttura termica osservata e simulata nell'AMP di Ustica durante il periodo luglio–novembre 2025. (a) Diagramma Hovmöller della temperatura ottenuto dalle misure puntuali dei logger alle diverse profondità. (b) Diagramma Hovmöller della temperatura potenziale estratta dai nodi della griglia numerica più vicini al punto di osservazione.

È importante sottolineare che i due dataset rappresentano scale spaziali differenti. Le osservazioni derivano da misure puntuali effettuate in una specifica posizione dell'AMP e sono quindi sensibili anche a processi locali e di breve durata. I dati modellistici, invece, sono estratti dai nodi della griglia numerica più vicini al punto di osservazione e rappresentano le condizioni medie simulate all'interno delle rispettive celle. Di conseguenza, il modello tende inevitabilmente a produrre campi più regolari e a smussare parte della variabilità ad alta frequenza registrata dagli strumenti.

Il confronto qualitativo (Fig. A2) mostra una buona coerenza nella rappresentazione dell'evoluzione stagionale della struttura termica, il modello riproduce la formazione della stratificazione estiva, la posizione media del termoclino, l'approfondimento autunnale dello strato caldo e il successivo raffreddamento. Tra luglio e agosto, osservazioni e modello mostrano uno strato superficiale caldo, superiore a 27 °C, e un termoclino collocato mediamente tra 15 e 25 m. Le misure in situ evidenziano però oscillazioni più rapide e marcate, mentre il modello restituisce una struttura più regolare.

Le principali discrepanze riguardano la variabilità di breve periodo e gli eventi più localizzati, che nel modello risultano generalmente smussati. Ciò è particolarmente evidente tra la fine di agosto e l'inizio di settembre, quando il raffreddamento e la risalita delle acque profonde appaiono più intensi nelle osservazioni. Successivamente, tra settembre e ottobre, i due dataset tornano a mostrare un'evoluzione più coerente, con l'approfondimento del calore fino a 30–40 m, seguito dal progressivo raffreddamento e dall'erosione della stratificazione durante novembre (Fig. A2).

Il confronto quantitativo (Fig. A3), effettuato su 810 coppie di dati distribuite su sei profondità, conferma la buona corrispondenza complessiva tra osservazioni e modello. La regressione lineare è descritta dall'equazione:

$$T_{modello} = 3.735 + 0.835 T_{logger}$$

La relazione presenta un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0.868$, una correlazione di Pearson di $r = 0.932$ e un p-value inferiore a 0.001. Il bias medio, calcolato come modello meno osservazione, è limitato a +0.117 °C e non è statisticamente significativo ($p = 0.169$), indicando l'assenza di una sovrastima o sottostima uniforme sull'intero dataset. Il modello tende quindi a comprimere l'intervallo delle temperature: le variazioni osservate dai logger vengono generalmente riprodotte con un'ampiezza inferiore. Questo comportamento è coerente con la maggiore regolarità visibile nel diagramma Hovmöller modellistico.

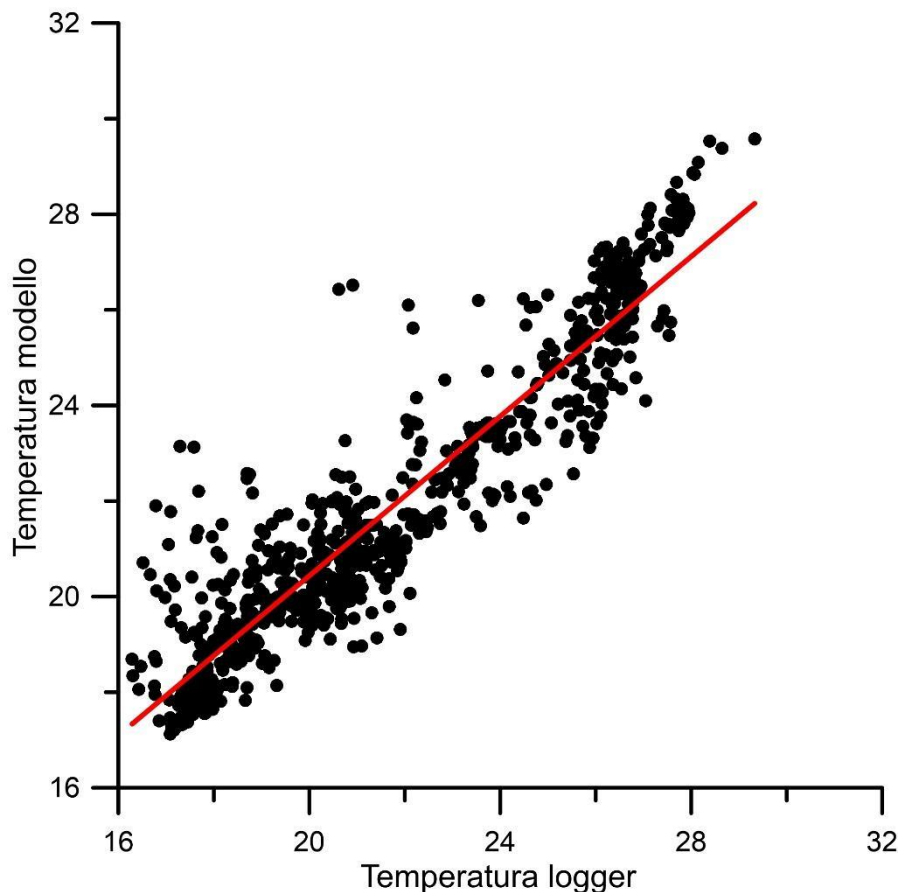


Figura A3. Confronto tra la temperatura media giornaliera misurata dai logger e la temperatura potenziale estratta dal modello numerico alle corrispondenti date e profondità nell'AMP di Ustica.

La capacità di riprodurre le osservazioni varia inoltre sensibilmente con la profondità, la migliore corrispondenza si osserva a 5.5 m, con $R^2 = 0.965$ e $RMSE = 0.595$ °C, mentre a 16.3 m la dispersione aumenta. Le differenze maggiori si concentrano tra 26 e 34 m, nella zona del termoclino, dove R^2 varia tra 0.625 e 0.711 e l' $RMSE$ raggiunge 1.365–1.459 °C; le pendenze inferiori all'unità indicano inoltre un'attenuazione delle variazioni termiche. A 42.1 m il bias è quasi nullo e l' $RMSE$ scende a 0.928 °C, ma il modello riproduce solo parzialmente la variabilità giornaliera.

Nel complesso, i risultati mostrano che il modello è adatto a descrivere l'evoluzione stagionale, la posizione media del termoclino e la redistribuzione verticale del calore. Maggiore cautela è invece necessaria nell'interpretazione di eventi puntuali e di breve durata, soprattutto nella fascia del termoclino, dove la variabilità locale risulta più intensa di quella riprodotta dalla griglia numerica.

BIBLIOGRAFIA

- Azzola, A., Bianchi, C.N., Merotto, L., Nota, A., Tiralongo, F., Morri, C., & Oprandi, A. (2024). The changing biogeography of the Ligurian Sea: seawater warming and further records of southern species. *Diversity*, 16(3), 159.
- Azzola, A. & Montefalcone, M. (2023). Relazione del terzo anno di progetto Mare Caldo (2021-2022). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Azzola, A. & Montefalcone, M. (2024). Relazione del quarto anno di progetto Mare Caldo (2022-2023). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Azzola, A. & Montefalcone, M. (2025). Relazione del quinto anno di progetto Mare Caldo (2024-2025). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Bensoussan, N., Romano, J. C., Harmelin, J. G., & Garrabou, J. (2010). High resolution characterization of northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: to better understand responses of benthic communities to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(3), 431-441.
- Bianchi, C. N., Azzola, A., Bertolino, M., Betti, F., Bo, M., Cattaneo-Vietti, R., ... & Bavestrello, G. (2019). Consequences of the marine climate and ecosystem shift of the 1980-90s on the Ligurian Sea biodiversity (NW Mediterranean). *The European Zoological Journal*, 86(1), 458-487.
- Casabianca, S., Capellacci, S., Ricci, F., Ravera, G., Signa, G., Scardi, M., & Penna, A. (2025). RNA/DNA ratios for the estimation of metabolic and functional traits in diatom species from the northwestern Adriatic Sea, a possible impact on quality of mussel populations. *Biologia Marina Mediterranea*, 29(1), 154-157.
- Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi, C.N., Cattaneo-Vietti, R., Bava, S., Morganti, C., Morri, C., Picco, P., Sara, G., Schiaparelli, S., et al. (2000). A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. *Ecology Letters*, 3(4), 284-293.
- Copernicus Climate Change Service (2025). Global Climate Highlights 2024. The 2024 Annual Climate Summary (<https://climate.copernicus.eu>).
- Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A., Galindo, H.M., Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B., Knowlton, N., et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4: 11-37.
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Gigliano, D., Diaz, D., Harmelin, J.G., Gambi, M.C., Kersting, D., et al. (2009). Mass mortality in northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology*, 15: 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(1): 528-538.
- Guglielmo, F., Nicolas, J., Vamborg, F., Emerton, R., Simmons, A., Burgess, S. (2026). Global Climate Highlights (GCH) report, Copernicus Climate Change Service (C3S), DOI:<https://doi.org/10.24381/b3nm-p354>.
- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C., ... & Wernberg T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in oceanography*, 141: 227-238.
- Juza, M. (2026). SOCIB Annual Report 2025: Global warming impacts in the Mediterranean Sea and Balearic Islands region [Report]. SOCIB. <https://doi.org/10.25704/rvn1-1y57>
- Martellucci, R., Tiralongo, F., Darmaraki, S. F., D'Alessandro, M., Mancinelli, G., Mancini, E., ... & Mauri, E. (2025). Mediterranean marine heatwave 2023: ecosystem and fisheries impacts in Italian waters. In 9th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR9) (pp. 1-15).
- Montefalcone, M. & Azzola, A. (2020). Relazione del primo anno di progetto (2019-2020). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Montefalcone, M. & Azzola, A. (2022). Relazione del secondo anno di progetto (2020-2021). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- 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(9), 146.
- Occhipinti-Ambrogi A. (2007) Global change and marine communities: alien species and climate change. *Marine Pollution Bulletin*, 55(7-9): 342-352.
- Penna, A., & Procaccini, G. (2026). Biodiversity and functioning through environmental dna analysis: biodiversità e funzionamento attraverso approcci di analisi di dna ambientale. *Biologia Marina Mediterranea*, 30(1), 7-9.
- Pirro, A., Martellucci, R., Gallo, A., Kubin, E., Mauri, E., Juza, M., ... & Menna, M. (2024). Subsurface warming derived from Argo floats during the 2022 Mediterranean marine heat wave. of the Copernicus Ocean State Report (OSR8), edited by: von Schuckmann, K., Moreira, L., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J., and Neukermans, G., Copernicus Publications, State Planet.

Zettler, M. L., Schiedek, D., & Bobertz, B. (2007). Benthic biodiversity indices versus salinity gradient in the southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1-6), 258-270.