

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL MOLISE



DIPARTIMENTO DI BIOSCIENZE E TERRITORIO

---

DOTTORATO DI RICERCA IN ECOLOGIA E TERRITORIO  
XXXVI Ciclo

*Settore scientifico-disciplinare  
Geografia fisica e Geomorfologia (Geo/04)*

**FRAGILITÀ GEOMORFOLOGICA, TUTELA E  
VALORIZZAZIONE DI AREE COSTIERE DI  
ELEVATO PREGIO AMBIENTALE DEL  
MEDITERRANEO: ANALISI  
MULTITEMPORALE DELL'EVOLUZIONE  
ANTROPO-GEOMORFICA RECENTE**

Tutor

**Prof.ssa Carmen Maria Rosskopf**

Coordinatore

**Prof. Bruno Lasserre**

Co-Tutor

**Dott. Gianluigi Di Paola**

Dottoranda:

**Dott.ssa Grazia Dilauro**

---

ANNO ACCADEMICO 2022-2023



# **INDICE**

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo I</b>	<b>8</b>
<b>Aspetti di morfodinamica, gestione e salvaguardia dei litorali</b>	
Introduzione	8
1.1 Sistema costiero: definizione, morfologia e classificazione	8
1.1.1 Definizione di costa	8
1.1.2 Morfologia della spiaggia	9
1.1.2.1 Profilo della spiaggia	9
1.1.2.2 Classificazione delle spiagge	11
1.1.2.3 Relazione tra tipi di spiaggia e processi di rottura dell'onda	14
1.1.3 Fonti energetiche costiere	16
1.2 Evoluzione costiera	16
1.3 Vulnerabilità costiera	17
1.4 Piano legale ed amministrativo sulla gestione delle aree costiere	19
Bibliografia citata	21
<b>Capitolo II</b>	<b>25</b>
<b>Caratteri geografici, geologici e geomorfologici delle aree di studio</b>	
Introduzione	25
2.1 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Biferno	25
2.2 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Mingardo	28
2.3 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Sinni	32
Bibliografia citata	37
<b>Capitolo III</b>	<b>39</b>
<b>Valutazione del clima meteo marino delle aree di studio</b>	
Introduzione	39
3.1 Fattori meteomarini e processi morfologici costieri	39

3.2	Analisi del clima meteo-marino: strumenti e metodi	42
3.3	Inquadramento e risultati del clima meteo-marino sulle zone costiere prese in esame	45
3.3.1	Dinamica del clima meteo-marino in Area Biferno	45
3.3.2	Dinamica del clima meteo-marino in Area Mingardo	48
3.3.3	Dinamica del clima meteo-marino in Area Sinni	51
3.4	Confronto delle caratteristiche meteo-marine ricostruite per le tre aree di studio	54
	Bibliografia citata	55
	<b>Capitolo IV</b>	<b>57</b>
	<b>Analisi delle caratteristiche morfo-sedimentarie del sistema spiaggia</b>	
4.1	Materiali e metodi	57
4.1.1	I rilievi topografici	57
4.1.2	Metodologia di rilievo per le aree di studio	58
4.1.3	L'analisi granulometrica	60
4.1.3.1	Metodologia di analisi	62
4.1.3.2	Risultati dell'analisi granulometrica in Area Biferno	64
4.1.3.3	Risultati dell'analisi granulometrica in Area Mingardo	65
4.1.3.4	Risultati dell'analisi granulometrica in Area Sinni	67
4.2	Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Biferno	68
4.3	Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Mingardo	84
4.4	Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Sinni	101
4.5	Risultati e considerazioni	121
	Bibliografia citata	123
	<b>Capitolo V</b>	<b>124</b>
	<b>Evoluzione della linea di riva nei settori costieri studiati</b>	
	Introduzione	124
5.1	Materiali e metodi	124
5.2	Variazione della linea di riva in area Biferno tra il 1954 e il 2023	126
5.3	Variazione della linea di riva in area Mingardo tra il 1956 e il 2023	130
5.4	Variazione della linea di riva in area Sinni tra il 1949 e il 2023	132
5.5	Risultati e considerazioni	135

Bibliografia citata	138
<b>Capitolo VI</b>	<b>140</b>
<b>Discussione dei risultati e previsioni future</b>	
6.1 Discussione dei risultati	140
6.1.1 Area Biferno	140
6.1.2 Area Mingardo	142
6.1.3 Area Sinni	143
6.2 Imminent Collapse Zone e previsioni sulla posizione futura della linea di riva	145
6.2.1 Metodologia	146
6.2.2 Imminent Collapse Zone e Shoreline Forecasting in Area Biferno	147
6.2.3 Imminent Collapse Zone e Shoreline Forecasting in Area Mingardo	153
6.2.4 Imminent Collapse Zone e Shoreline Forecasting in Area Sinni	161
6.2.5 Discussione dei risultati sull'ICZ e sulla posizione futura della linea di riva	167
Bibliografia citata	169
<b>Conclusioni</b>	<b>171</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>175</b>

*Ai miei genitori,  
a mia sorella,  
a mio fratello,  
voi siete la mia fonte di ispirazione.  
A Francesco,  
senza te non sarei dove sono.*

## **Ringraziamenti**

Questa tesi è il risultato di tre anni di profonda crescita e formazione, pertanto desidero ringraziare coloro che in maniera differente hanno contribuito a questo percorso e che in diversi modi mi hanno sostenuta e mi hanno permesso di raggiungere risultati oltre ogni mia aspettativa. Ringrazio sentitamente anzitutto la mia tutor, la professoressa Carmen M. Roskopf, per la sua guida sapiente e il suo costante supporto. Un ringraziamento speciale va al Dott. Gianluigi Di Paola per la sua infinita disponibilità, gentilezza e per gli insegnamenti preziosi ricevuti nel corso di questi tre anni. Senza il Professor Marcello Schiattarella, non avrei avuto il coraggio di intraprendere un percorso così importante, pertanto gli rivolgo il mio sentito ringraziamento. Ringrazio il Prof. Pietro P.C. Aucelli per i suoi preziosi consigli e stimolanti spunti di riflessione. Un ringraziamento particolare va al Prof. Giorgio Anfuso, che mi ha accolta presso l'Università di Cádiz e mi ha fornito importanti contributi per il mio lavoro di ricerca. Desidero anche esprimere la mia gratitudine alla Dott.ssa Margherita Ciccaglione per il suo fondamentale aiuto nel reperire i dati sul clima meteo-marino delle aree di studio. Un sentito ringraziamento va alla mia famiglia, la cui presenza e supporto sono stati fondamentali per darmi la motivazione necessaria per perseguire questo importante percorso. Vorrei inoltre ringraziare il mio compagno di vita, Francesco, che con il suo costante sostegno mi ha spinto sempre a dare il meglio di me. Infine, desidero ringraziare i miei cari amici, Federico, Gianni, Francesco, Marie e Sergio, che hanno condiviso con me le gioie e le sfide di questi anni, riempiendo di colore anche le giornate più grigie.

## **Introduzione**

L'evoluzione dei litorali rappresenta una delle incessanti attività di modellamento cui la morfologia terrestre è sottoposta. La costa è, dunque, un elemento particolarmente mobile e sensibile, in quanto risente di tutti i fenomeni geotettonici, climatici e antropici che agiscono su di essa.

Le aree costiere rappresentano sistemi ambientali complessi, controllati da un numero elevato di variabili interagenti su scale temporali diverse.

Molte ricerche interdisciplinari sviluppatasi nell'ultimo ventennio hanno messo in evidenza che, a scala mondiale, gran parte delle aree costiere è soggetta ad erosione ed inondazione costiera a causa dell'ingressione marina dovuta a fattori naturali (globali e locali) ed antropici (Aucelli et al., 2017).

L'erosione costiera, infatti, rappresenta una delle questioni ambientali più urgenti legate al cambiamento climatico in corso e al relativo innalzamento del livello del mare (Antonioli e Silenzi, 2007; Nicholls et al., 2007; Pfeffer et al., 2008; Benassai et al., 2015; Pranzini et al., 2015; Fitton et al., 2016; Pellicani et al., 2020; IPCC, 2021).

L'IPCC (2021) ha messo in evidenza che il fenomeno del riscaldamento globale attualmente in corso porterà ad una sensibile risalita del livello del mare che può variare da circa 0,6 metri a oltre 1 metro entro il 2100. Questo valore, però va ridimensionato a scala del Mediterraneo. In uno scenario in cui vengono adottate misure significative di mitigazione delle emissioni di gas serra (scenario a basse emissioni), l'innalzamento del livello del mare può essere limitato a circa 0,3-0,6 metri entro il 2100. È importante notare che queste sono solo stime e che ci sono incertezze associate alle proiezioni del livello del mare, specialmente per quanto riguarda le dinamiche dei ghiacciai e delle calotte polari. Tuttavia, queste proiezioni forniscono una guida importante per comprendere l'impatto potenziale del cambiamento climatico sul livello del mare e per orientare le politiche di adattamento e mitigazione. Sempre secondo l'IPCC, un altro effetto, dovuto al cambiamento climatico in corso, riguarda l'aumento di frequenza, energia e distribuzione spaziale di più eventi meteorologici estremi che avvengono contemporaneamente o a breve distanza l'uno dall'altro; si tratta dei cosiddetti eventi multipli. Gli eventi multipli possono avere un impatto sulla natura e sull'uomo ancora maggiore di quello che questi fenomeni causerebbero singolarmente, con un livello medio del mare più elevato, una forte tempesta aumenta il rischio di un simultaneo aumento estremo del livello del mare e di forti precipitazioni, con conseguenti inondazioni costiere.

Nel corso degli anni sono stati realizzati diversi studi a livello nazionale ed internazionale per approfondire i processi costieri e per ottenere un'efficace prevedibilità evolutiva che tenga conto dei diversi aspetti legati ai fattori naturali e antropici che agiscono sull'ambiente costiero.

Il progetto europeo EROSION (2004), ad esempio, ha rilevato che tutti i paesi dell'unione Europea hanno subito, in una certa misura, gli effetti dell'erosione sulle spiagge nonostante la presenza di

opere di protezione costiera. In particolare, in questo studio, è emerso che per la penisola italiana con circa 7500 km di costa, il rischio di esposizione va da moderata a molto elevata.

A scala nazionale, uno studio effettuato dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nel 2017, ha evidenziato che tra il 1960 e il 2012, 1.534 km di costa (corrispondenti al 23% del totale) hanno subito un arretramento quantificabile in 92 kmq; mentre lungo tratti complessivi di 1306 (corrispondenti al 19% del totale) ha registrato un avanzamento di 57 kmq.

Lo stesso studio ha poi quantificato e individuato i tratti di costa a “potenziale rischio di erosione” prendendo in considerazione i beni esposti lungo la costa (centri urbani, strade e ferrovie) che ricadono entro la linea di riva risultata in arretramento (Tab. 1).

Regioni	1960-1994		1994-2012		Lunghezza complessiva costa regionale peninsulare	Lunghezza complessiva tratti a potenziale rischio di erosione
	arretramento	avanzamento	arretramento	avanzamento		
ABRUZZO	27.4%	36.6%	26.3%	31.3%	138.7	20.3%
BASILICATA	26.9%	32.6%	38.9%	15.8%	65.3	0.9%
CALABRIA	40.3%	28.4%	30.4%	30.5%	726.4	23.1%
CAMPANIA	18.2%	13.1%	14.5%	9.1%	420.5	9.2%
EMILIA R	43.4%	38.1%	13.3%	29.9%	153.3	18.6%
FRIULI VG	23.1%	24.6%	13.8%	22.5%	154.6	7.7%
LAZIO	23.8%	35.4%	24.3%	32.8%	308.8	12.7%
LIGURIA	11.7%	14.1%	1.3%	8.0%	406.5	7.9%
MARCHE	34.1%	29.2%	21.3%	24.9%	189.6	25.2%
MOLISE	37.6%	35.7%	39.5%	46.1%	37.9	9.2%
PUGLIA	11.5%	12.3%	7.6%	9.4%	881.2	5.0%
SARDEGNA	4.8%	3.9%	3.7%	2.1%	1530.4	1.0%
SICILIA	28.4%	15.6%	16.6%	8.4%	1181.1	14.2%
TOSCANA	21.3%	21.9%	17.9%	20.2%	367.5	7.4%
VENETO	38.6%	40.5%	26.5%	46.0%	172.3	10.4%
<b>Totale complessivo</b>	<b>20.5%</b>	<b>17.3%</b>	<b>14.1%</b>	<b>14.3%</b>	<b>6734.2</b>	<b>9.9%</b>

Tab. 1: Valori percentuali delle lunghezze dei tratti con variazione della linea di costa dal 1960 al 1994 e dal 1994 al 2012, e delle lunghezze dei tratti a potenziale rischio di erosione. Fonte: Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Report sull’erosione costiera in Italia (2017).

La tabella 1 evidenzia che nel primo periodo le percentuali maggiori di lunghezza dei tratti costieri in arretramento risultano quelle delle regioni Calabria, Emilia Romagna, Marche, Molise e Veneto, mentre nel secondo periodo risultano essere quelle delle regioni Basilicata e Molise.

Il dato nazionale medio indica che il 10% circa della costa bassa italiana risulta esposta a potenziale rischio di erosione.

Numerosi studi a scala regionale (Sabato et al., 2012; Aucelli et al., 2016, 2017, 2018; Roskopf et al., 2017; Guida e Valente, 2019; Pellicani et al., 2020; Di Paola et al., 2022) hanno dimostrato, inoltre, come alcune aree del Molise, della Basilicata e della Campania, siano maggiormente soggette ad erosione e meritevoli di maggiore tutela poiché, oltre ai beni esposti quali centri abitati, strade e ferrovie, sono sede di habitat naturali e/o siti di interesse comunitario (SIC).

Il presente studio si propone di analizzare e comparare, soprattutto dal punto di vista geomorfologico, diverse aree di costa bassa al fine di fornire una conoscenza quanto più approfondita ed aggiornata in relazione alle problematiche legate all'erosione costiera onde contribuire a valorizzare e salvaguardare gli ambienti costieri particolarmente vulnerabili e/o di pregio ambientale. Le aree prese in esame sono: il tratto costiero molisano che va dal porto di Termoli al porto di Campomarino, denominato "Area Biferno", poiché comprende la foce del Fiume Biferno; il tratto costiero campano che va dalla foce del Fiume Mingardo al promontorio di Cala del Cefalo, denominato "Area Mingardo", e il tratto costiero lucano, denominato "Area Sinni", che va dall'Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro al confine regionale tra Basilicata e Campania e che comprende al suo interno la foce del Fiume Sinni (Fig 1).



Fig. 1: Ubicazione delle tre aree di studio

La scelta delle aree appena citate è stata motivata in primo luogo dalla volontà di comparare tre aree di costa bassa caratterizzate da componenti geo-ambientali differenti, in secondo luogo dalla volontà di comprendere le differenti dinamiche che interagiscono su queste tre aree per fornire una valida

base conoscitiva utile per la progettazione di interventi mirati alla tutela e alla valorizzazione di queste aree, sede di habitat naturali e siti di interesse comunitario (SIC).

Per mitigare gli effetti dell'erosione costiera, risulta fondamentale comprendere l'interazione dinamica tra gli agenti naturali e umani che modellano e influenzano le coste. In particolare, l'analisi delle dinamiche costiere è cruciale per sviluppare strategie di gestione sostenibile che possano preservare l'integrità degli ecosistemi costieri, nonché proteggere le comunità costiere dall'erosione e dagli eventi meteorologici estremi.

Attraverso un'analisi multitemporale in ambiente GIS di carte storiche, foto aeree, ortofoto e rilievi *ex novo* sul campo sono state ricavate le informazioni necessarie alla stima delle variazioni della linea di costa, del complesso spiaggia-duna e delle aree di foce negli ultimi secoli.

Il valore aggiunto è rappresentato dal lavoro di mappatura di dettaglio dei sistemi spiaggia-duna, poiché i dati acquisiti potrebbero essere propedeutici alla progettazione di più mirati interventi di ripristino e protezione ambientale e dunque costituire un valido strumento per il management costiero, specialmente se resi fruibili attraverso un sistema webGIS.

Lo studio dei sistemi costieri risulta spesso complesso, pertanto è stato necessario analizzarlo nelle sue diverse componenti con una metodologia di ricerca che ha tenuto conto di un approccio multidisciplinare e che ha guardato alle diverse tematiche associate alla morfodinamica, quali – tra gli altri – il cambiamento climatico e la pressione antropica.

Di seguito, dunque, si propone una tabella riassuntiva degli obiettivi, materiali e metodi e dei risultati previsti dal seguente progetto di ricerca (Tab. 2):

<b><u>Obiettivi</u></b>	<b><u>Materiali</u></b>	<b><u>Analisi e Metodi</u></b>	<b><u>Risultati</u></b>
<b>Inquadramento geologico-ambientale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Letteratura/Studi pregressi</li> <li>Cartografia tematica preesistente</li> <li>Carte topografiche recenti</li> <li>Immagini Google earth</li> <li>Dati ondametrici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analisi caratteristiche geologiche e sedimentologiche</li> <li>Definizione Unità fisiografica ed eventuali sotto-unità fisiografiche</li> <li>Suddivisione in tratti costieri omogenei</li> <li>Caratterizzazione geo-ambientale delle aree costiere</li> <li>Analisi/caratterizzazione clima marino</li> <li>Individuazione degli elementi di pregio ambientale (es. presenza/caratteristiche fascia dunale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caratterizzazione fisiografica della costa</li> <li>Individuazione dei morfotipi costieri presenti</li> <li>Caratterizzazione geologica della costa</li> </ul>
<b>Caratterizzazione</b>	<p>Morfologico-topografica e sedimentologica della spiaggia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Letteratura/Studi pregressi</li> <li>Rilievi topografici di profili trasversali di spiaggia</li> <li>Posizioni della linea di costa di varia data e del fronte dunale (da rilievi e dati pregressi)</li> <li>Campioni sedimenti spiaggia</li> </ul> <p>Clima meteo-marino</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Letteratura</li> <li>Materiale disponibile (dati ondametrici da rete RON – piattaforma Marine Copernicus)</li> </ul> <p>Aspetti antropici</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Letteratura/Studi pregressi</li> <li>Cartografia disponibile</li> <li>Immagini Google Earth</li> <li>Rilievi in campo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Delineazione della linea di costa di varia data attraverso misure topografiche con GPS</li> <li>Realizzazione di profili di spiaggia</li> <li>Cartografazione e analisi dei sistemi dunali</li> <li>Analisi granulometriche</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Individuazione degli eventi di mareggiata</li> <li>Calcolo dello Storm Power Index</li> <li>Suddivisione in classi in base all'energia degli eventi di mareggiata in base all'energia</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Censimento e cartografazione delle opere antropiche (opere di difesa)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinazione delle principali caratteristiche morfometriche della spiaggia</li> <li>Caratterizzazione sedimentologica della spiaggia</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Caratterizzazione del clima meteo-marino</li> <li>Individuazione degli eventi di mareggiata con maggiore energia</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>Individuazione delle cause naturali ed antropiche che hanno influito sull'evoluzione del sistema spiaggia-duna</li> </ul>
<b>Ricostruzione dell'evoluzione spazio-temporale del sistema spiaggia e analisi dell'impatto antropico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Letteratura/Studi pregressi</li> <li>Carte storiche e carte topografiche recenti</li> <li>Rilievi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analisi diacronica linee di riva (DSAS) – Short, medium e long term</li> <li>Analisi evoluzione storica sistemi dunali</li> <li>Analisi rapporto evoluzione sistema costiero e cause (alimentazione sistema costiero, opere antropiche, dinamica meteo-marina)</li> <li>Censimento e cartografazione delle opere antropiche (opere di difesa)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individuazione delle aree costiere a maggior tasso di erosione, più sensibili all'erosione costiera</li> <li>Ricostruzione dei possibili rapporti tra evoluzione costiera di breve e lungo termine e fattori di controllo naturali ed antropici considerati, con particolare attenzione alle opere di difesa costiera e al clima meteo-marino</li> </ul>
<b>Costruzione di un geodatabase in ambiente Gis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dati grezzi e derivanti da analisi effettuate, elaborati cartografici acquisiti e realizzati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impostazione di un progetto Gis e realizzazione di un geodatabase con i dati acquisiti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geodatabase con tutti i dati raccolti</li> </ul>



- Porre le basi conoscitive e metodologiche per un monitoraggio futuro delle aree di studio prese in esame
- Rendere fruibili i dati in un sistema WebGis implementabile ed aggiornabile

Tab. 2: obiettivi, materiali, metodi e risultati del progetto di ricerca

## Bibliografia citata

- ANTONIOLI F., SILENZI A. (2007) – *Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane*. Quaderni della Società Geologica Italiana, 2, 1-29.
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2018) – *Present day and future scenarios of coastal erosion and flooding processes along the Italian Adriatic coast: the case of Molise region*. Environmental Earth Sciences, **77**, 371.
- AUCELLI P.P.C., RIZZO A., DI LEO P., GIOIA D., SCHIATTARELLA M. (2016) – *Coastal erosion and inundation assessment along the Ionian coast of Basilicata, southern Italy*. Rend. Online Soc. Geol. IT., n.1 vol. 40.
- BENASSAI G., DI PAOLA G., PUGLIANO G., ROSSKOPF C.M. (2015) – *UAV Calibration of the shoreline evolution for coastal protection of Kaulonia Archeological Site*. Heritage and Technology, Mind Knowledge Experience. XIII International Forum, Le Vie dei Mercanti, Aversa, Capri 11-12-13 June 2015.
- DI PAOLA G., MINERVINO A. A., DILAURO G., RODRIGUEZ G., ROSSKOPF C.M. (2022) – *Shoreline evolution and erosion vulnerability assessment along the central Adriatic coast with the contribution of UAV beach monitoring*. Geosciences, **12**, 353.
- EUROSION (2004) – *EuroSION - living with coastal erosion in Europe*. European Commission, Luxembourg.
- FITTON J.M., HANSOM J.D., RENNIE A.F. (2016) – *A national coastal erosion susceptibility model for Scotland*. Ocean & Coastal Management, **32**, 80–89.
- GUIDA D., VALENTE A. (2019) – *Terrestrial and Marine Landforms along the Cilento Coastland (Southern Italy)*. Water, **11**, 2618.
- IPCC (2021) – *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- NICHOLLS R.J., WONG P.P., BURKETT V.R., CODIGNOTTO J.O., HAY J.E., MCLEAN R.F., RAGOONADEN S., WOODROFFE C.D. (2007) – *Coastal systems and low lying areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden and CE Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

- PELLICANI R., ARGENTIERO I., FIDELIBUS M.D., MOTTA ZANIN G., PARISI A., SPILOTRO G. (2020) – *Dynamics of the Basilicata Ionian coast: human and natural drivers*. Rend. Fis. Acc. Lincei, **31**, 353–364
- PFEFFER W., HARPER J., O’NEEL S. (2008) – *Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise*. Science, **321**, 1340-1343.
- PRANZINI E., WETZEL L., WILLIAMS A.T. (2015) – *Aspects of coastal erosion and protection in Europe*. Journal of Coastal Conservation, **19**, 445-459.
- ROSSKOPF C.M., DI PAOLA G., ATKINSON D.E. RODRIGUEZ G., WALKER I.J. (2017) – *Recent shoreline evolution and beach erosion along the central Adriatic coast of Italy: the case of Molise region*. Journal of Coastal Conservation, Planning and Management.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2012) – *Sedimentological and morpho-evolution maps of the ‘Bosco Pantano di Policoro’ coastal system (Gulf of Taranto, southern Italy)*. Journal of Maps, disponibile online: <http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>, 1-8.

# **Capitolo I - Aspetti di morfodinamica, gestione e salvaguardia dei litorali**

## **Introduzione**

I litorali rappresentano uno degli ambienti più dinamici ed ecologicamente complessi del nostro pianeta, con una vasta gamma di processi geologici, biologici e antropici che convergono in un delicato equilibrio. La gestione efficace di questi sistemi costieri è diventata una priorità cruciale, poiché la crescente pressione antropica e i cambiamenti climatici impongono sfide sempre più urgenti per la loro conservazione.

Il sistema costiero, definito come l'interfaccia tra il mondo terrestre e marino, è un intricato intreccio di interazioni tra processi naturali e attività umane. La comprensione approfondita di questo sistema richiede un'analisi attenta dei fattori che lo plasmano, dalla dinamica delle onde e delle maree alle azioni antropiche come l'urbanizzazione costiera e lo sfruttamento delle risorse marine.

In questo contesto, l'energia riveste un ruolo cruciale nella definizione e nella modellazione dei litorali. L'energia delle onde, ad esempio, svolge un ruolo chiave nella formazione e nella trasformazione delle coste, influenzando la morfologia e la distribuzione dei sedimenti. L'approccio alla gestione dei litorali deve quindi integrare la comprensione della dinamica energetica con la necessità di preservare la biodiversità e garantire la sostenibilità delle attività umane.

Questo capitolo si propone di esplorare le sfide e le opportunità legate alla gestione e alla salvaguardia dei litorali, delineando un quadro concettuale che abbracci sia gli aspetti naturali che quelli antropici. Attraverso l'analisi delle definizioni, delle energie coinvolte e della classificazione delle spiagge, ci si propone di gettare le basi per un approccio integrato e sostenibile che sia di supporto alla gestione di questi delicati ecosistemi.

## **1.1 Il Sistema costiero: definizione, morfologia e classificazione**

### **1.1.1 Definizione di costa**

La costa è definita come il punto in cui la terra incontra il mare. Tuttavia l'applicazione di questa affermazione non è così semplice.

La definizione di costa, infatti, in ambito geomorfologico, è un concetto complesso che riflette l'interazione dinamica tra l'ambiente marino e l'ambiente terrestre, un'entità dinamica soggetta a complessi processi di erosione e sedimentazione. Secondo gli studi di Leatherman in "Coastal Geomorphology" (1994), la definizione di costa si estende oltre la semplice linea di contatto tra terra e mare, incorporando elementi quali spiagge, scogliere, e pianure costiere, il cui sviluppo è plasmato dalle forze marine e dai processi geologici. Il contributo di Komar all'argomento, come espresso in "Longshore sand transport on beaches" (1970), sottolinea l'importanza delle forze di trasporto

costiero, come onde e correnti, nel plasmare la forma delle coste, e il lavoro di Bird (2008) fornisce approfondimenti sulla diversità delle tipologie costiere e sulle dinamiche di cambiamento, evidenziando l'influenza di fattori come il clima e l'azione antropica. La definizione di costa, pertanto, emerge come un concetto in continua evoluzione, guidato dalle interazioni complesse tra processi geologici, climatici e antropici la cui comprensione richiede un approccio integrato che consideri le dinamiche complesse derivanti dall'interazione tra fattori geologici, climatici e antropici.

## **1.1.2 Morfologia della spiaggia**

### **1.1.2.1 Profilo della spiaggia**

Nel contesto dei molteplici ambienti di deposizione costiera, le spiagge possono essere descritte come accumuli detritici di sabbia, ghiaia o ciottoli. Subiscono un trasporto costante sia in direzione trasversale che longitudinale (Johnson, 1919; King, 1972; Bird, 1984; Summerfield, 1991) sotto l'influenza delle onde, che rappresentano l'agente dinamico predominante (Carter, 1988).

Guillén e Díaz (1990) evidenziano una notevole ambiguità nella terminologia utilizzata e nella descrizione delle varie parti della spiaggia. Questa confusione è attribuibile al fatto che, negli ultimi decenni, le spiagge sono state oggetto di studio da parte di professionisti appartenenti a diverse discipline e, inoltre, la maggior parte dei termini adottati deriva da traduzioni di espressioni anglosassoni.

Segue una descrizione delle varie componenti di un profilo ideale di spiaggia (Fig. 1.1) secondo il Coastal Management Glossary, che ne individua e definisce i termini fondamentali.

Partendo da terra, possiamo distinguere:

Le dune definite come creste di sabbia vegetate e non vegetate che si formano sul retro di una spiaggia. Sono costituite da sabbia asciutta che è stata trasportata verso terra e intrappolata da piante e altre ostruzioni. Le dune di sabbia stabili fungono da cuscinetto contro i danni provocati dalle onde durante le tempeste, proteggendo il terreno retrostante dall'intrusione di acqua salata, dagli spruzzi marini e dai forti venti. Le dune costiere fungono anche da riserva di sabbia per ricostruire e mantenere la spiaggia nei periodi di erosione. Il piede di duna è il punto limite in cui finisce la duna e comincia la spiaggia o *backshore*.

La spiaggia emersa, o *backshore*, è quella zona compresa tra il piede di duna e la battigia e comprende la berma ordinaria (*berm*), un altopiano quasi orizzontale sul fronte della spiaggia formato dalla deposizione di materiale della spiaggia per azione delle onde, e la berma di tempesta (*storm berm*) su cui le onde agiscono solo in caso di forti tempeste, soprattutto se accompagnate da acque eccezionalmente alte. In condizioni normali la spiaggia è asciutta e non presenta vegetazione.

Komar (1998) ha fissato il limite superiore del *backshore* con l'inizio della vegetazione o con il cambiamento della fisiografia.

La linea di costa, o *shoreline*, è l'intersezione tra la linea media di acqua alta e la costa. La linea di costa non è facile da identificare, i metodi per definire la linea di riva variano e possono basarsi su un livello verticale fisso o sull'interfaccia apparente tra acqua e terra utilizzando un particolare mezzo di rilevamento, come la fotografia aerea. La linea di costa segna il limite tra la spiaggia emersa (*backshore*) e la spiaggia intertidale (*foreshore*).

La spiaggia intertidale, o *foreshore*, è l'area compresa tra la massima e la minima marea astronomica. La battigia può essere definita come la parte della costa che è bagnata a causa della variazione della marea e del moto ondoso in condizioni normali. Ciò significa che la battigia in termini morfologici si estende più in alto sulla spiaggia fino all'intersezione tra il livello medio della marea e il profilo costiero. Tuttavia, per ragioni pratiche, la delimitazione amministrativa superiore della battigia è definita come l'intersezione tra la linea di riva e il profilo costiero.

La *shoreface* è la zona subtidale che si estende verso il mare dal limite inferiore del foreshore fino a una certa distanza oltre la zona dei frangenti, all'interno della quale l'azione delle onde governa i processi sedimentari: il trasporto lungo la costa, detto anche deriva litorale, e il trasporto trasversale alla costa. L'ampiezza della shoreface varia a seconda delle condizioni dell'onda.

La zona definita *nearshore*, che comprende la zona di frangimento (con onde che si rompono) e la zona di riflusso (coperta quando ogni onda risale il foreshore), si sposta anch'essa avanti e indietro con le maree. La zona di interruzione (dove le onde vengono disturbate) è delimitata a mare dalla zona *offshore*, che si estende fino a un limite arbitrario in acque profonde. I termini *offshore*, *onshore* e *longshore* vengono anche utilizzati per descrivere le direzioni del flusso di vento, acqua o sedimento (Bird, 2008).

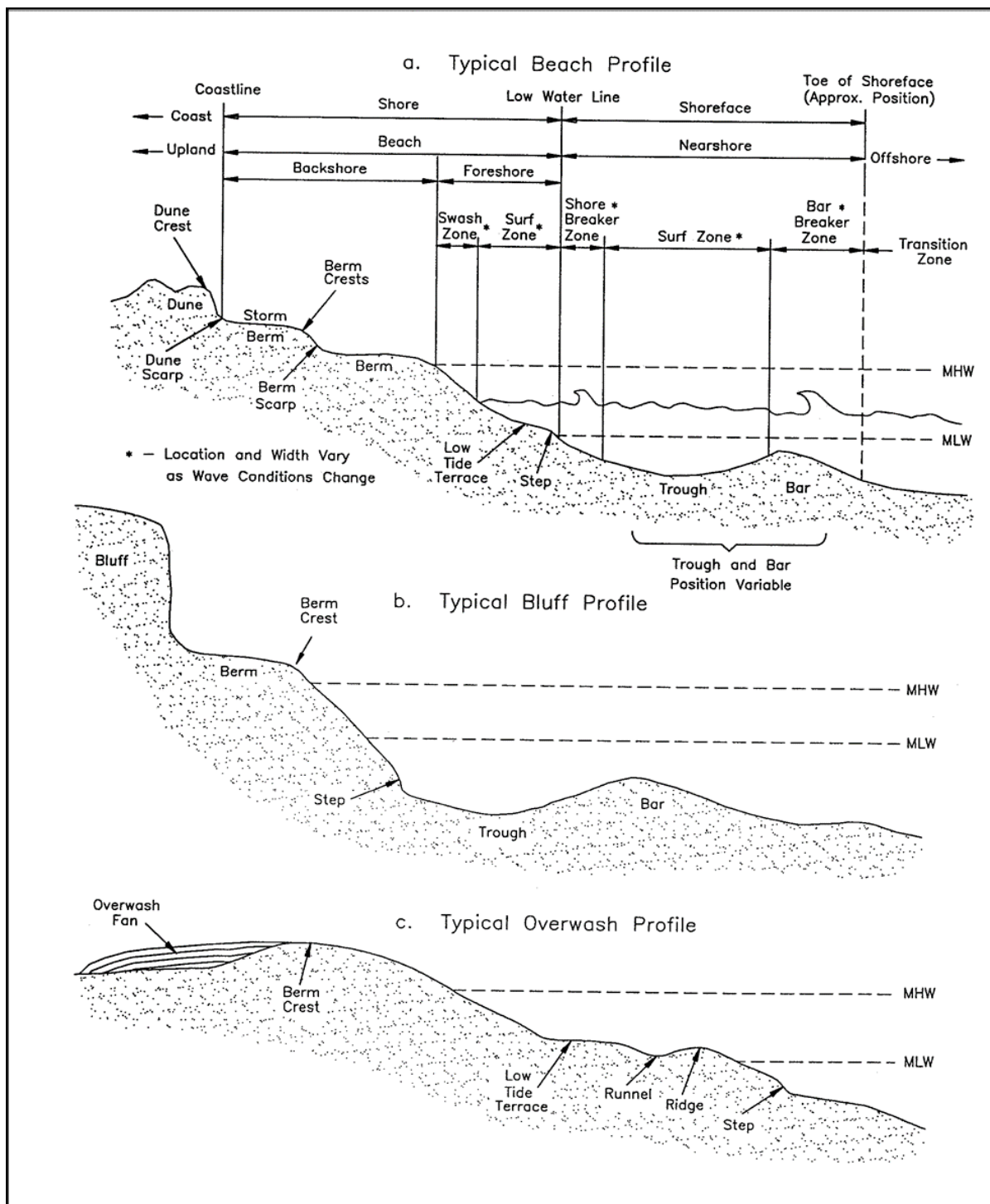


Fig. 1.1: Profilo ideale di spiaggia. (Fonte Glossary of Coastal Terminology, 2003)

### 1.1.2.2 Classificazione delle spiagge

La classificazione delle coste costituisce un elemento fondamentale nella comprensione della varietà e complessità dei paesaggi costieri. Gli studiosi adottano diversi approcci per categorizzare le coste in base a caratteristiche morfologiche, processi dinamici e altri parametri geologici o climatici. Questa suddivisione consente di creare schemi categoriali che facilitano l'analisi e la comprensione delle specificità di ciascuna zona costiera. La classificazione può riguardare aspetti quali la forma generale

della linea di costa, la presenza di elementi geologici specifici, l'influenza delle maree e delle correnti, e altro ancora. Ogni tipo di costa può richiedere strategie di gestione e conservazione uniche, pertanto la classificazione fornisce un quadro utile per sviluppare politiche e interventi mirati. L'importanza di tale categorizzazione si estende oltre il campo scientifico, influenzando la pianificazione territoriale, la gestione delle risorse naturali e la protezione dell'ambiente marino.

Le spiagge, in particolare, possono essere classificate in base alla pendenza della zona intertidale, ovvero l'area compresa tra la massima e la minima marea astronomica, e al conseguente modo in cui le onde interagiscono con la costa.

Bascom (1951), King (1972) e Nordstrom e Jackson (1992) distinguono le spiagge in “riflettive” e “dissipative”, due tipologie di ambienti costieri che si distinguono principalmente per la morfologia della loro battigia e per il modo in cui le onde interagiscono con la costa. Le spiagge riflettive sono caratterizzate da una pendenza relativamente ripida ( $\tan \beta \cong 0,10$ ), da sedimenti grossolani, come sabbia grossa o ciottoli e da onde che si rompono direttamente sulla battigia, come descritto da Wright e Short (1984). Questo tipo di spiagge sono spesso associate a condizioni oceaniche più energetiche e possono essere trovate in luoghi con onde più forti e correnti più intense.

Le spiagge dissipative, invece, sono ambienti dove le onde si rompono più lontano dalla costa e la pendenza del profilo è più dolce ( $\tan \beta \cong 0,02$ ) e sono costituite da sedimenti sabbiosi di dimensioni medie, fini o molto fini (Wright e Short, 1984). A differenza delle spiagge riflettive, questo tipo di spiaggia può presentare formazioni di barre sottomarine più sviluppate, contribuendo ad una maggiore dissipazione dell'energia delle onde.

Tra questi due tipi di spiaggia, esistono diversi stati intermedi (Fig. 1.2).

### BEACH STATE MODEL MODIFIED AFTER WRIGHT and SHORT (1984)

Wave-dominated beaches with unlimited sand supply, limited influence of tide and geology, enough incident wave energy to create nearshore bar

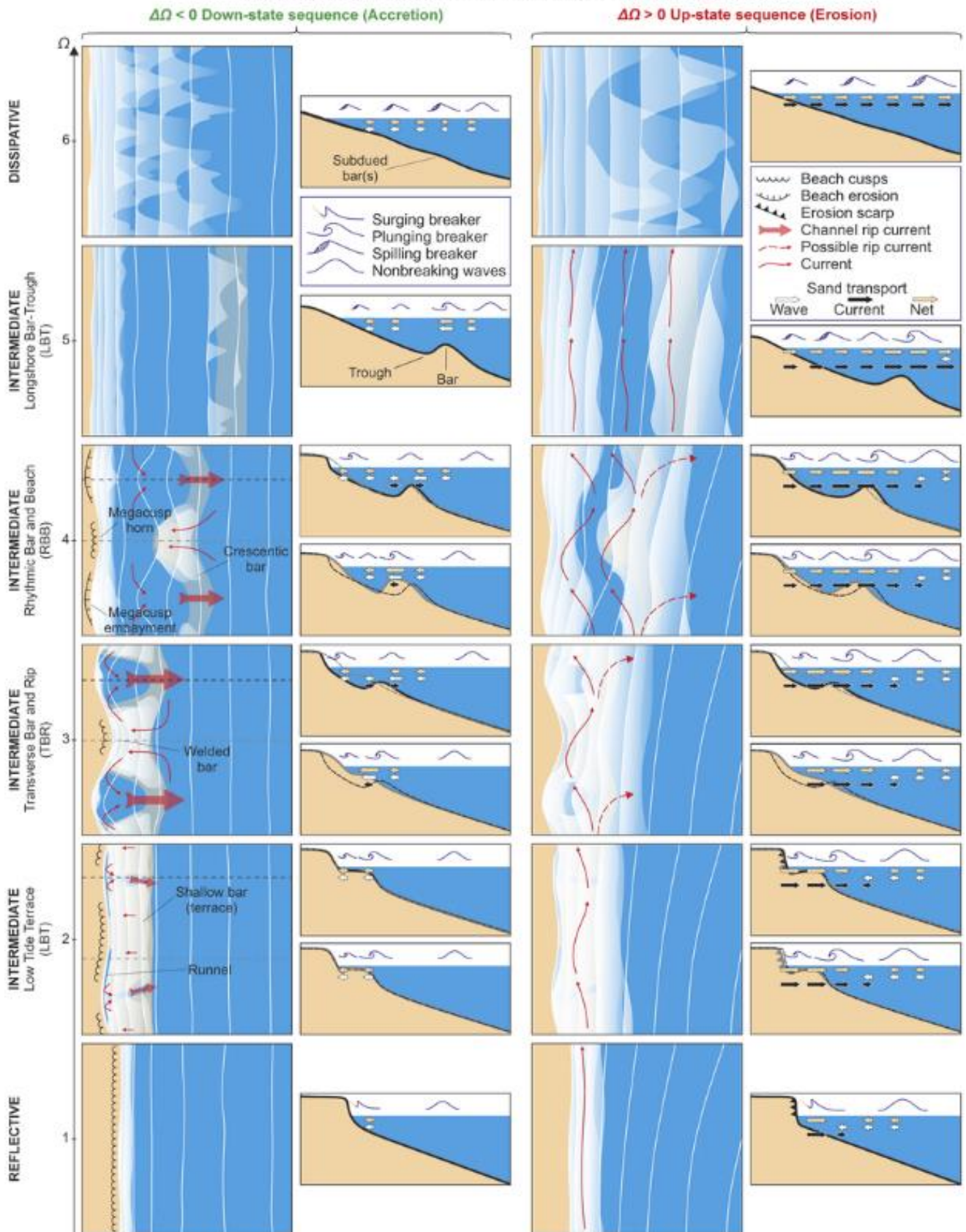


Figura 2.2: Pianta e profilo dei sei stati morfodinamici descritti da Wright e Short (1984) e modificati da Castelle e Masselink (2020).

La comprensione di questa classificazione delle spiagge e delle relative caratteristiche è importante per la gestione costiera e la previsione dei cambiamenti nell'ambiente costiero.

Oltre alla suddivisione in riflettiva e dissipativa, Ergin e Williams (2004) propongono una classificazione delle spiagge in naturale o artificiale e in base alla forma: pocket beach (piccola spiaggia compresa tra due promontori, con dimensioni variabili, condizionate dal movimento dei sedimenti a o da terra, in mare aperto, ma poco lungo la riva) spiagge lineari sabbiose (spiagge sabbiose molto lunghe con una deriva dei sedimenti pronunciata lungo la riva), spiagge a spirale logaritmica, detta anche *Zeta curve* (spiagge caratterizzate da una forma curva da una estremità all'altra).

Su base del clima meteomarinario, Short (1991) sostiene che un sistema costiero è strettamente legato a quattro fattori fondamentali che costituiscono il parametro  $\Omega$ :

$$\Omega = \frac{H_b}{TR \cdot W_s} \quad (1.1)$$

dove  $H_b$  è l'altezza d'onda, T è il periodo di ritorno dell'onda,  $W_s$  è la dimensione del sedimento e TR è la velocità di marea. Lo stato di una spiaggia è basato sul parametro  $\Omega$  e RTR.

Sulla base di questo parametro, ogni spiaggia può essere ulteriormente classificata in:

- Wave-dominated (RTR <3);
- Tide-modified (RTR 3-10);
- Tide-dominated (RTR >10).

Su base antropica esistono varie tipologie di classificazioni, come ad esempio quella utilizzata nelle Barbados nei Caraibi (CEES, 2006), dove le spiagge vengono classificate in base al loro utilizzo (intenso, medio e scarso).

### **1.1.2.3 Relazione tra tipi di spiaggia e processi di rottura dell'onda**

I frangenti delle onde, noti anche come rompentì o zone di rottura, sono le aree in cui le onde si rompono sulla superficie dell'acqua. Questo fenomeno avviene quando le onde entrano in acque più basse e la loro parte anteriore si alza più velocemente rispetto alla parte posteriore, causando la rottura dell'onda. I frangenti sono un elemento chiave nella dinamica delle onde e giocano un ruolo significativo nella formazione della morfologia costiera.

Galvin (1968), dopo aver condotto numerosi esperimenti in vasche di surge con onde di diverse altezze e lunghezze associate a diversi valori di pendenze di spiaggia, ha individuato quattro tipi di frangenti: *spilling*, *plunging*, *collapsing* e *surging*. (Fig. 1.3)

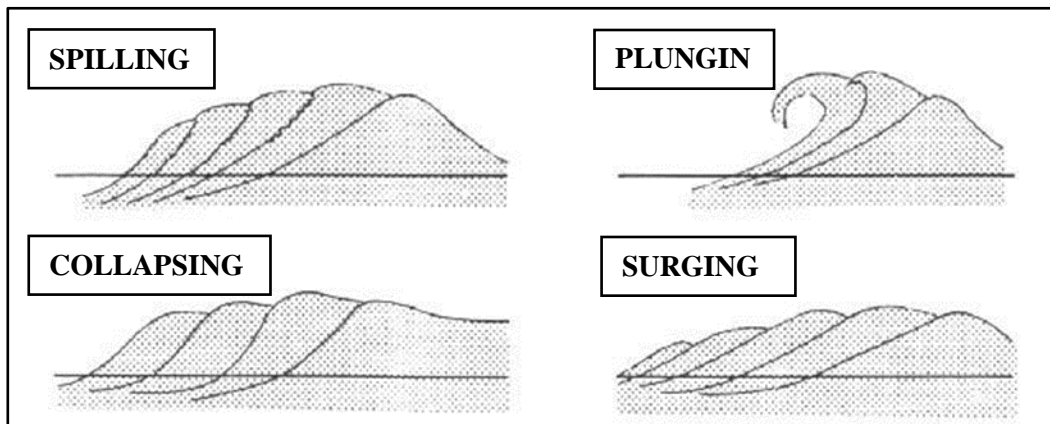


Fig. 1.3: Tipi di frangenti secondo la classificazione di Galvin (1968)

Battjes (1974) ha utilizzato l'indice di *surf similarity* per prevedere il tipo di *surf break*. Questo indice è stato definito inizialmente da Iribarren e Nogales (1949) per calcolare il punto di rottura delle onde:

$$\xi = \tan\beta / (H_b/L_0)^{0.5} \quad (1.2)$$

dove  $\beta$  è la pendenza media della spiaggia nella zona intertidale,  $H_b$  è l'altezza dell'onda al frangente e  $L_0$  è la lunghezza dell'onda in acque profonde. Questo indice predice il tipo di frangente, dal *surging* e dal *collapsing* ( $\xi > 2$ ), al *plunging* ( $0,4 < \xi < 2$ ), fino ai frangenti di *spilling* ( $\xi < 0,4$ ) (Fredsoe e Deigaard, 1992).

Per determinare lo stato morfodinamico della spiaggia, Guza e Inman (1975) hanno proposto il parametro *surf scaling*:

$$\varepsilon = \sigma^2 H_b / 2 g \tan^2 \beta \quad (1.3)$$

dove  $\sigma$  è la frequenza dell'onda in radianti,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\beta$  la pendenza della spiaggia. Il parametro permette di differenziare le condizioni delle zone di surf riflettente ( $\varepsilon < 2,5$ ), intermedio ( $2,5 < \varepsilon < 30$ ) e dissipativo ( $\varepsilon > 30$ ) (Guza e Inman, 1975).

### **1.1.3 Fonti energetiche costiere**

Le aree costiere sono ambienti altamente dinamici. I processi di erosione, trasporto e deposizione dei sedimenti, contribuiscono al continuo cambiamento fisico che ne caratterizza e distingue l'ambiente. Questo dinamismo richiede fonti di energia che giocano un ruolo cruciale nella dinamica ed evoluzione della costa.

I processi che influenzano la morfologia costiera possono essere distinti in endogeni ed esogeni, ognuno dei quali svolge un ruolo significativo nella formazione e nell'evoluzione delle coste. Riguardo ai processi endogeni, come evidenziato da Harbor in "Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology" (1988), le attività tettoniche, tra cui l'affondamento e l'innalzamento del suolo, contribuiscono in modo sostanziale alla configurazione geologica delle aree costiere.

Dall'altra parte, i processi esogeni, inclusi onde, correnti e vento, sono responsabili dell'erosione e della deposizione dei sedimenti lungo la linea di costa.

Inoltre, la combinazione di processi endogeni ed esogeni può portare a fenomeni complessi come il sollevamento e l'abbassamento del livello del mare. Bird (2008), esplora dettagliatamente come questi processi interagiscano per determinare la forma finale delle coste.

L'integrazione di approcci endogeni ed esogeni nella ricerca scientifica, infatti, è essenziale per comprendere appieno la dinamica costiera e sviluppare strategie di gestione sostenibile.

### **1.2 Evoluzione costiera**

La costa è in continua evoluzione, influenzata da vari fattori come l'ampiezza delle onde, la velocità del vento, la profondità del mare, la potenza delle maree e le variazioni del livello marino, insieme a fenomeni atmosferici come piogge, tempeste e intensità del vento. Le differenze lungo la costa sono spesso determinate dalla resistenza delle rocce, formando promontori e altopiani, o da rocce più tenere che danno luogo a zone topograficamente più basse e fronti costieri dalle morfologie più dolci.

Le influenze geologiche si combinano con fattori climatici come la pressione atmosferica, la temperatura, la velocità del vento e le precipitazioni, che hanno impatto sulla geologia costiera. Questi processi naturali, non uniformi e caratterizzati da fasi di attività particolari nel corso degli ultimi 2.000 anni, sono oggetto di studi scientifici mirati a comprendere le loro cause e ad anticipare possibili cambiamenti ambientali nei prossimi secoli.

Tuttavia, l'equilibrio naturale della costa è minacciato soprattutto dalle pressioni antropiche, che intensificano i fenomeni erosivi e provocano la perdita di un prezioso patrimonio ambientale ed economico. Le principali cause di tale accentuazione includono il decremento del trasporto solido dei fiumi, l'urbanizzazione costiera con la distruzione delle dune, la realizzazione di opere rigide vicino alla battigia, l'incremento del turismo balneare e l'azione del clima marittimo.

Intervenire sulle cause principali di questa criticità è essenziale per gestire la situazione attuale e prevenire ulteriori danni. La diminuzione del trasporto solido dei fiumi, l'urbanizzazione, le opere di ingegneria costiera, l'aumento del turismo e le variazioni del clima marittimo, sono tutte sfide che richiedono soluzioni e strategie a lungo termine per garantire la sostenibilità delle zone costiere.

Per quanto concerne la diminuzione del trasporto solido dei fiumi, si osserva un fenomeno in aumento negli ultimi anni, le cui cause sono da attribuirsi principalmente ad una sostanziale diminuzione delle portate, dovuta alla costruzione di bacini di invaso lungo i corsi d'acqua. Le dighe, infatti, intercettano il trasporto solido di fondo, intrappolandolo a monte e impedendone l'arrivo sulla spiaggia. Un contributo significativo proviene anche dal prelievo incontrollato di sabbia e inerti all'interno degli alvei dei corsi d'acqua.

Un ulteriore motivo che ha accentuato l'erosione costiera negli ultimi anni è rappresentato dall'incremento dell'urbanizzazione delle zone costiere con la conseguente distruzione e frammentazione delle dune. Le dune, infatti, svolgono un ruolo cruciale nel contrastare l'erosione costiera, rappresentando un naturale ripascimento della spiaggia. Tuttavia, per rispondere alle esigenze di sviluppo residenziale o infrastrutturale, spesso si commettono errori significativi, come la distruzione delle stesse.

L'erosione costiera è fortemente influenzata, inoltre, anche dalle mareggiate e dal clima marittimo in generale.

### **1.3 Vulnerabilità costiera**

La vulnerabilità costiera si riferisce alla suscettibilità delle aree costiere agli impatti negativi causati da vari fattori, tra cui cambiamenti climatici, eventi meteorologici estremi, attività antropiche e altri processi ambientali. Le zone costiere sono particolarmente sensibili a molteplici minacce, e la loro vulnerabilità dipende da una combinazione di fattori fisici, ambientali e socio-economici.

La gestione della vulnerabilità costiera richiede approcci integrati che considerino la sostenibilità ambientale, la resilienza delle comunità e la protezione degli ecosistemi marini. La pianificazione del territorio, la protezione delle risorse naturali e la promozione di pratiche sostenibili sono essenziali per ridurre la vulnerabilità costiera e affrontare gli impatti futuri.

Il Protocollo di Kyoto (2005), oltre a sottolineare l'importanza della riduzione delle emissioni di gas serra per mitigare il cambiamento climatico, incoraggia i governi mondiali a implementare politiche e misure volte a minimizzare gli effetti negativi, inclusi quelli avversi del cambiamento climatico (articolo 2, comma 3, del Protocollo di Kyoto: della Convenzione sui Cambiamenti Climatici). Nelle zone costiere, queste indicazioni si traducono nella necessità di pianificare il territorio considerando

sia l'innalzamento del livello del mare (rischi a lungo termine, 50-100 anni) che l'intensificarsi degli eventi climatici estremi (rischi a breve termine, 5-15 anni).

Sebbene il Mediterraneo non sia tra le aree più a rischio per le popolazioni, gli ecosistemi costieri mostrano un'alta vulnerabilità, e si registra un rapido processo di erosione delle coste. Le coste mediterranee (46.000 km) e, in particolare, quelle nazionali (7.500 km) presentano alcuni fattori sfavorevoli relativi al rischio di allagamento marino.

In Italia, molte aree costiere basse sono già oggi a rischio di allagamenti entro i prossimi 100 anni, in particolare sulle coste Tirreniche e Ioniche, per un totale di circa 4500 km<sup>2</sup>. Secondo il report dell'Unione Europea "Impact assessment" del 10 gennaio 2007, si prevede che entro la fine del XXI secolo i valori minimi di innalzamento eustatico saranno di circa + 0,22 m (Antonioli & Silenzi, 2007). I movimenti attuali, espressi in mm/anno, includono i valori isostatici (Lambeck et al., 2004a), quelli tettonici (Ferranti et al., 2007) e quelli eustatici per l'Italia (Lambeck et al., 2004b; pari a 1.02 mm/anno).

Risultano fondamentali, dunque, indagini di dettaglio e valutazioni sul comportamento naturale delle coste al variare del livello del mare. Questa risposta varia a seconda delle caratteristiche fisiche degli ambienti costieri, come l'ampiezza delle spiagge, la presenza e lo stato di conservazione delle dune costiere, l'intensità e la frequenza delle mareggiate, l'eventuale presenza di opere di difesa e l'impatto antropico in generale.

Nell'ambito delle metodologie per la gestione di aree esposte a rischio ambientale, esistono diversi approcci metodologici. Sempre più frequentemente vengono utilizzati metodi multidisciplinari che integrano dati provenienti dall'analisi storica e attuale dell'area costiera. Questi metodi consentono l'identificazione e la quantificazione della frequenza, dell'intensità e della distribuzione spaziale e temporale degli eventi naturali potenzialmente distruttivi. Contestualmente, si tiene conto delle interferenze e delle sinergie tra questi parametri e le attività umane. Nel valutare la vulnerabilità di un litorale, le scienze geologiche svolgono un ruolo cruciale, analizzando la geomorfologia e le caratteristiche sedimentologiche dei litorali e studiando i processi evolutivi che hanno strutturato gli attuali assetti morfologici e stratigrafici nel corso del tempo.

Negli ultimi decenni, è stata progressivamente abbandonata la concezione di conservazione passiva dell'ambiente a favore di un concetto di conservazione attiva. Ciò ha portato all'adozione di programmi d'azione finalizzati al perseguimento dello sviluppo sostenibile, come evidenziato dall'implementazione dell'"Agenda 21".

La Comunità Europea, a partire dal 1996, ha avviato programmi mirati a sviluppare una prassi per la gestione integrata delle zone costiere (GIZC) al fine di promuovere lo sviluppo sostenibile in queste aree.

La letteratura scientifica ha proposto diverse metodologie per quantificare la vulnerabilità costiera, tra cui le più diffuse e utilizzate sono l'IPCC Common Methodology, Le Technical Guidelines, l'UNEP Handbook Methodology, il South Pacific Islands Methodology e il Caribbean Disaster Mitigation Project. L'identificazione e la valutazione degli indici di vulnerabilità di una costa rispetto a perturbazioni idrodinamiche, climatiche o antropiche sono state oggetto di numerosi studi, negli ultimi decenni (si veda per esempio Dal Cin & Simeoni, 1994; Gornitz et al., 1994; Berger & Iams, 1996; Busch et al., 1999; Brewster, 2002; Simeoni et al., 2003; Benassai et al., 2009; Aucelli et al., 2017; Roskopf et al., 2017; Di Luccio et al., 2019a, 2019b; Di Paola et al., 2020).

#### **1.4 Piano legale ed amministrativo sulla gestione delle aree costiere**

La geologia e la morfologia delle coste europee presentano una vasta gamma di condizioni, pericoli naturali e sfide correlate allo sviluppo in siti parzialmente stabili o non adatti. L'interazione tra erosione costiera, stabilità del suolo e urbanizzazione richiede un quadro legale e di pianificazione per promuovere uno sviluppo sostenibile e una gestione complessiva della costa. In alcuni contesti, l'erosione costiera e le inondazioni possono essere fenomeni frequenti, mentre in altre aree si verificano in modo occasionale, attivati da eventi climatici o interventi antropici. Indipendentemente dalla natura del problema, è essenziale adottare un approccio valido per pianificare lo sviluppo sostenibile delle aree costiere, considerando attentamente i fattori geologico-ambientali.

Lo sviluppo sostenibile e la gestione integrata delle risorse costiere rappresentano due settori chiave di intervento.

Il concetto di sostenibilità è stato introdotto durante la Conferenza delle Nazioni Unite a Rio de Janeiro nel 1992, culminando con l'adozione di Agenda 21 da parte di oltre 178 governi. Agenda 21 è un piano d'azione globale, nazionale e locale per affrontare l'impatto umano sull'ambiente, con il Capitolo 17 dedicato alla "protezione degli oceani, dei mari e delle aree costiere" e il paragrafo 5 impegnato alla gestione integrata e allo sviluppo sostenibile delle aree costiere.

Successivamente, sono emerse iniziative significative a livello globale e regionale per una corretta gestione delle coste, sottolineando la necessità di una strategia globale, integrata e sostenibile per l'ambiente costiero. Esempi includono la raccomandazione dell'OCSE del 1992 sulla gestione integrata delle zone costiere, il Codice di condotta della FAO per una pesca responsabile del 1995, il modello normativo sulla gestione sostenibile delle aree costiere ed il Codice Europeo di condotta applicabile alle aree costiere elaborati dal Consiglio d'Europa nel 1999. Queste iniziative mirano a ispirare normative nazionali per l'integrazione territoriale, la pianificazione e la cooperazione internazionale tra le aree costiere transfrontaliere.

Le politiche internazionali sui cambiamenti climatici hanno incontrato difficoltà nel raggiungere un accordo globale. Nel 1988 è stato istituito l'IPCC, un cartello intergovernativo sul cambiamento climatico, per riunire scienziati di tutto il mondo. Nel 2005, il Protocollo di Kyoto ha impegnato 55 paesi industrializzati a ridurre significativamente le emissioni di gas serra entro il 2012. L'IDNDR del 1990-1999 e la Strategia Internazionale per la Riduzione dei Disastri (ISDR) del 2000 hanno contribuito a sollevare il dibattito sulle cause socio-economiche dei rischi da disastro. La Dichiarazione di Intenti del 1999 ha evidenziato la crescente minaccia di disastri su larga scala e ha impegnato i paesi a agire per garantire un mondo più sicuro. La successiva ISDR, fondata nel 2000, si concentra su processi di consapevolezza, valutazione e gestione dei rischi da disastro.

In Europa, la gestione delle coste è guidata dalla Direttiva Quadro sulla Strategia Marina (MFS, 2008), che mira a raggiungere o mantenere il buono stato ecologico del mare entro il 2020. Questo quadro europeo ha promosso l'approccio di Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC), cercando di armonizzare gli sforzi di gestione e coinvolgere tutte le parti interessate nella pianificazione costiera. Inoltre, l'Europa è impegnata nella valutazione e mitigazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle coste, con strategie specifiche per affrontare l'innalzamento del livello del mare e proteggere le zone più vulnerabili. Gli sforzi a livello europeo si concentrano anche sulla ricerca e il monitoraggio costante delle coste per comprendere meglio i cambiamenti in corso e sviluppare strategie di gestione a lungo termine. La partecipazione pubblica è ritenuta un elemento essenziale per coinvolgere le comunità locali e le organizzazioni non governative, garantendo decisioni più consapevoli e sostenibili.

In Italia, la gestione delle coste è guidata dalla Legge Quadro sulle Aree Costiere del 1997, fornendo il quadro generale, mentre i Piani di Assetto delle Zone Costiere (PAZC) a livello regionale definiscono le strategie di gestione in base alle caratteristiche locali. Il paese affronta sfide simili a quelle europee, con le coste esposte a rischi come l'erosione, l'innalzamento del livello del mare e i cambiamenti climatici. Alcune aree costiere italiane sono particolarmente vulnerabili, con sfide aggiuntive legate all'urbanizzazione e al turismo costiero. L'adozione di un concetto di conservazione attiva, come evidenziato in "Agenda 21", riflette un cambiamento nell'approccio, cercando di bilanciare la conservazione ambientale con lo sviluppo sostenibile.

## Bibliografia citata

- ANTONIOLI F., SILENZI A. (2007) – *Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane*. Quaderni della Società Geologica Italiana, 2, 1-29.
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90
- BASCOM W.N. (1951) – *The relationship between sand size and beach face slope*. Trans. Am. Geophys Un, **32**, 866-874.
- BATTJES J.A. (1974) – *Surf Similarity*. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE, 466 - 480.
- BENASSAI G., CHIRICO F., CORSINI S. (2009) – *Una metodologia per la definizione del rischio da inondazione costiera*. Studi Costieri, **16**, 51 – 72.
- BERGER A.R. & IAMS, W.J. (1996) *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth system*. Rotterdam: A.A. Balkema
- BIRD, E.C.F. (1984) – *Coasts: An introduction to coastal geomorphology*. Basil Blackwell, 320 pp.
- BIRD E.C.F. (2008) – *Coastal Geomorphology, An Introduction*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 405 pp.
- BREWSTER L.F.S. (2002) – *The development of a comprehensive littoral vulnerability assessment approach for a small island developing state: a case study for Barbados*. Littoral 2002, The Changing Coast. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, 189-198.
- BUSH D.M., NEAL W.J., YOUNGH R.S., PILKEY O.H. (1999) – *Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation*. Ocean & Coastal Management, **42**, 647-670.
- CARTER R.W.G. (1988): *Coastal environments*. Academic Press, 617 pp.
- CASTELLE B., MASSELINK G. (2023) – *Morphodynamics of wave-dominated beaches*. Cambridge Prisms: Coastal Futures, **1**, 1-13.
- CEES (2006) – *Beach management project: Best practices guidelines for 50 beaches along the coastline of Barbados*. Draft report submitted to the Government of Barbados, St. Michel, Barbados, Coastal & Environmental Engineering Solutions Inc.
- CONFERENZA DELLE PARTI 'COP 3' DELLA CONVENZIONE QUADRO DELLE NAZIONI UNITE SUI CAMBIAMENTI CLIMATICI (UNFCCC) (1997) – *Protocollo di Kyoto*. Kyoto, Giappone.
- DAL CIN R., SIMEONI, U. (1994) – *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal Coastal Research, **10** (1), 18-29.
- DI LUCCIO D., BENASSAI G., DI PAOLA G., MUCERINO L., BUONO A., ROSSKOPF C.M., NUNZIATA F., MIGLIACCIO M., URCIUOLI A., MONTELLA R. (2019a) – *Shoreline Rotation Analysis of Embayed Beaches by Means of In situ and Remote Surveys*. MDPI, Sustainability, **11**, 00725.

- DI LUCCIO D., BENASSAI G., DI PAOLA G., ROSSKOPF C.M., MUCCERINO L., MONTELLA R., CONTESTABILE P. (2019b) – *Monitoring and Modelling Coastal Vulnerability and Mitigation Proposal for an Archeological Site (Kaulonia, Southern Italy)*. MDPI, Sustainability, **10**, 02017.
- DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., BUCCINO M., ROSSKOPF C.M. (2020) – *Influence of hard defence structures on shoreline erosion along Molise coast (southern Italy): a preliminary investigation*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., **51**, <https://doi.org/10.3301/ROL.2020.10>.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004) – *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological incidents in Europe*. Environmental issue report, 35
- ERGIN A., KARAESMEN E., MICALLEF A., WILLIAMS A.T., (2004) – *A new methodology for evaluating coastal scenery: Fuzzy logic systems*. Area, **26** (4), 367-386.
- EUROPEAN COMMISSION (1999a) – *Lessons from the European Commission's Demonstration Programme on Integrated Coastal Zone Management (ICZM)*. Luxemburg.
- EUROPEAN COMMISSION (1999b) – *Towards a European Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Strategy: General Principles and Policy Options*. Luxemburg.
- EUROPEAN COMMISSION (2006) – *Proposal for a Directive on the assessment and management of floods*. Brussels.
- EUROSIN (2004) – *Eurosion - living with coastal erosion in Europe*. European Commission, Luxembourg.
- FERRANTI L., MONACO C., ANTONIOLI F., MASCHIO L., KERSHAW S., VERRUBBI V. (2007) – *The contribution of regional uplift and coseismic slip to the vertical crustal motion in the Messina Straits, southern Italy: Evidence from raised Late Holocene shorelines*. Journal of Geophysical Research, 112, B06401, doi:10.1029/2006JB004473
- FREDSOE J., DEIGAARD R. (1992) – *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced series on Ocean Engineering, vol.3, World Scientific, 366 p.
- GALVIN, C. J. (1968): *Breaker type classification on three laboratory beaches*. Jour. Geophys. Res., **73**, 3651-3659.
- GORNITZ V.M., WHITE T.W. & CUSHMAN, R.M. (1991) *Vulnerability of the US to future sea level rise*. Coastal Zone, **91**, Proceedings of the 7th Symposium on Coastal and Ocean Management. American Society of Civil Engineers, 1345-1359
- GUILLÉN J., DÍAZ J. I. (1990) – *Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro*. Sci. Mar. **54** (4), 359-373.
- GUZA R.T., INMAN D.L. (1975) – *Edge waves and beach cusps*. Jour. Geophys. Res., **80** (21): 2997-3012.
- HARBOR J. (1988) – *Earth's Changing Surface: An introduction to geomorphology*. Quaternary research, **29** (1), 85-86.

- IPCC (2001) – *Third Assessment Report – Climate Change 2001*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2021) – *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IRIBARREN C.R., NOGALES C. (1949) – *Protection des ports*. Section II. Comm. 4, XVII Int. Nav. Congress. Lisbona. 31-80.
- JOHNSON D.W. (1919) – *Shore processes and shoreline development*. Stanhope Press, 584 pp.
- KING C.A.M. (1972) – *Beaches and Coasts*. Edward Arnold. 570 pp.
- KOMAR, P.D. (1998) – *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall. 544 pp
- KOMAR P.D., INMAN D.L. (1970) – *Longshore Sand Transport on Beaches*. Journal of Geophysical Research, **70**, n.30.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., PURCELL A., SILENZI S. (2004a) – *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. Quaternary Science Reviews, **23**, 1567-1598.
- LAMBECK K., ANZIDEI M., ANTONIOLI F., BENINI A., ESPOSITO, A. (2004b) – *Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. Earth and Planetary Science Letter, **224**, 563-575.
- LEATHERMAN S.P., DAVISON A. T., NICHOLLS R.J. (1994) – *Coastal geomorphology*. In: Environmental Science in the Coastal Zone: Issues for Further Research, 44-48.
- NORDSTROM K.F., JACKSON N.L. (1992) – *Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries*. Zeit. für Geomorph., **36** (4): 465 - 478
- ROSSKOPF C.M., DI PAOLA G., ATKINSON D.E. RODRIGUEZ G., WALKER I.J. (2017) – *Recent shoreline evolution and beach erosion along the central Adriatic coast of Italy: the case of Molise region*. Journal of Coastal Conservation, Planning and Management.
- SHORT, A.D. (1991) – *Macro-meso tidal beach morphodynamics. An overview*. Jour. Coastal Res., **7**, 417 - 436.
- SIMEONI U., DEL GRANDE C., GABIANELLI G. (2003) – *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi Costieri, **7**, 81-93.
- STATE OF NSW AND OFFICE OF ENVIRONMENT AND HERITAGE (2018) – *Coastal Management Glossary*
- SUMMERFIELD M.A. (1991) – *Global geomorphology*. Longman Scientific y Technical, 537 pp.

WRIGHT L.D., SHORT, A.D. (1984) – *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, **56**, 93-118.

## **Capitolo II - Caratteri geografici, geologici e geomorfologici delle aree di studio**

### **Introduzione**

Lungo la costa le differenze più evidenti sono spesso create dal contrasto tra rocce più resistenti, che formano promontori e altopiani, e quelle più morbide, che formano aree topograficamente depresse e fronti costieri a morfologie dolci.

La caratterizzazione geografica fornisce informazioni fondamentali sulla posizione, l'estensione e le caratteristiche topografiche delle aree prese in esame, mentre la caratterizzazione geologica ci offre un'immersione profonda nella sua storia geologica, che ci permette di comprendere appieno le dinamiche ambientali, le risorse naturali e i processi evolutivi che le hanno interessate.

In questo capitolo viene proposto un quadro esplicativo delle aree di studio dal punto di vista geografico, geologico e geomorfologico al fine di ottenere un quadro chiaro delle zone costiere prese in esame.

### **2.1 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Biferno**

Il litorale molisano si estende per una lunghezza di circa 36 km e confina a nord con le coste abruzzesi e a sud con quelle pugliesi.

I suoi confini sono tracciati a nord dallo sbocco sul mare del Canale Formale del Molino e a sud dalla foce del Torrente Saccione.

La costa molisana è costituita in prevalenza da costa bassa, comprendente piccole pianure alluvionali costiere e cordoni dunali con antistanti spiagge, e da brevi tratti di costa alta, localizzati in corrispondenza del promontorio di Termoli e lungo il versante di Petacciato, tra la foce del Sinarca e Punta Pizzo, ed è caratterizzata da una tipica morfologia a terrazzo (Zunica, 1987) dove si distinguono vari ordini di terrazzi quaternari impostati su sedimenti sabbioso-pelitici di ambiente marino e su depositi sabbiosi e ciottolosi di ambiente litorale ed alluvionale (Parea, 1978). Le superfici terrazzate più esterne sono delimitate verso la costa da scarpate di erosione marina alte fino ad una trentina di metri, oggi inattive e in posizione arretrata rispetto alla linea di costa (Aucelli et al., 2007). La costa alta è impostata su formazioni riferibili al ciclo regressivo pliocenico-pleistocenico (Patacca et al., 1990). Queste formazioni, nel settore in sinistra del Sinarca sono rappresentate (Fig. 3) dalle Argille di Montesecco e dalle Sabbie di Serracapriola (Foglio n. 148 della Carta Geologica d'Italia). La prima formazione è costituita da terreni prevalentemente argillosi, la seconda da termini sabbioso-arenacei. Nel settore a destra del Sinarca sono presenti le formazioni delle Sabbie di Serracapriola e dei Conglomerati di Campomarino (Foglio n. 153 della Carta Geologica d'Italia), caratterizzate

nell'insieme da terreni prevalentemente sabbiosi e conglomeratici, mentre il tratto a sud del promontorio di Termoli è prevalentemente occupato dall'ampia piana deltizia del Fiume Biferno.

I tratti di costa bassa comprendono, oltre alle piccole pianure alluvionali costiere costruite dai principali corsi d'acqua, una fascia litorale più o meno ampia antistante i rilievi collinari costituita, oltre che dal sistema spiaggia-duna attuale, da sistemi dunali storici e relative aree sia intra- che retrodunali, topograficamente più depresse.

I principali corsi d'acqua che sfociano lungo il litorale molisano sono il Trigno, il Biferno e il Saccione. I loro bacini idrografici sono impostati in prevalenza su terreni arenaceo-marnosi e pelitico-argillosi con affioramenti limitati di terreni calcarei, che godono di un'elevata erodibilità, confermata dalla diffusa presenza di fenomeni franosi e di erosione idrica accelerata. Ciò si traduce in apporti alle foci prevalentemente pelitico-sabbiosi (Aucelli et al., 2004). Le spiagge presenti lungo il litorale, di conseguenza, sono a granulometria prevalentemente fine.

Il litorale molisano è riferibile ad un'unica grande unità fisiografica, delimitata a nord da Punta Penna (Vasto, Abruzzo) e a sud da Punta Pietre Nere (Lesina, Puglia) (Girardi et al., 1985). La presenza del promontorio di Termoli, che rappresenta un chiaro elemento di separazione, porta a suddividere il litorale molisano in due porzioni principali, dotati di elevata indipendenza per quanto riguarda il bilancio sedimentario e caratterizzati da una linea di costa orientata in direzione WNW-ESE e NW-SE (Aucelli et al., 2009). Il trasporto litoraneo ha un andamento prevalente nord-sud, come già osservato da Aucelli (2007).

Procedendo da nord verso sud lungo il litorale molisano, si susseguono le spiagge di Costa Verde, Marinelle, Marina di Petacciato, Litorale Termoli Nord, Foce dell'Angelo, Sant'Antonio, Rio Vivo, Lido di Campomarino, Marinelle Nuove, Nuova Cliternia e Ramitelli.

Queste spiagge, generalmente sabbiose e larghe da alcune decine di metri fino a duecento metri, sono delimitate verso l'interno da dune oppure si trovano a diretto contatto con rilievi terrazzati o collinari digradanti, con le pianure alluvionali costiere o con terreni interessati da strutture ed attività antropiche legate all'occupazione edilizia o alla fruizione balneare.

Il litorale molisano risulta essere esposto ai venti dei quadranti settentrionali (Maestrale, Tramontana e Grecale).

Il settore costiero preso in esame, compreso tra il porto di Termoli e il porto di Campomarino, si trova all'interno dei confini amministrativi della Regione Molise, si estende per circa 7 km e comprende le spiagge di Rio Vivo, Marinelle e Lido di Campomarino. Tra Rio Vivo e Marinelle si trova la foce del fiume Biferno (Fig. 2.1).



Fig. 2.3: Area Biferno: Porto di Termoli – Porto di Campomarino.

Le spiagge sono sabbiose e hanno larghezze variabili che vanno da pochi metri a circa 90 m (Roskopf et al., 2017). L’area presa in esame risulta essere particolarmente soggetta ad arretramento, per questo, per offrire una maggiore protezione del litorale dal moto ondoso, sono state costruite, durante gli ultimi vent’anni, numerose opere di protezione quali scogliere sommerse, emerse ed aderenti, e pennelli lungo le spiagge di Rio Vivo e Marinelle. Allo stato attuale, le opere realizzate appaiono insufficienti per porre un freno definitivo ai fenomeni erosivi, ed in diversi casi hanno innescato effetti di rifrazione causando un’amplificazione dei fenomeni stessi (Aucelli et al., 2003, Di Paola et al., 2020).

L’Area Biferno è sede dell’Area SIC “Foce Biferno – Litorale di Campomarino” (Rete Natura 2000 Code: IT222216) (Fig. 2.2). I SIC sono stati istituiti dagli stati membri ai sensi della Direttiva 92/43/CEE “HabitaT” per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario.



Fig. 2.2: Estensione dell'Area SIC "Foce Biferno – Litorale di Campomarino" (Natura 2000 Code: IT222216)

Il sito presenta un numero considerevole di habitat con elevato grado di conservazione e naturalità e costituisce un'area ecologicamente importante per molte specie di ornitofauna e per la presenza della *Testudo Hermanni* (Tartaruga di Terra) e della *Emys Orbicularis* (Testuggine palustre Europea) (Aucelli et al., 2017).

## 2.2 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Mingardo

La costa del Cilento (Salerno, Campania) si trova nella regione Campania e si estende per oltre 100km lungo un ampio promontorio rettangolare tra il Golfo di Salerno (nord-ovest) e il Golfo di Policastro (sud-est) sul margine tirrenico meridionale della penisola italiana.

Gran parte della costa cilentana è inclusa nel Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni, uno dei più grandi parchi nazionali d'Europa e Patrimonio dell'Umanità dal 1998. Al suo interno sono presenti numerosi habitat naturali che permettono una fauna abbastanza ricca, tra cui particolare menzione merita la tartaruga marina *Caretta caretta*, che sceglie proprio le spiagge della costa cilentana per nidificare indisturbata e protetta attraverso programmi di monitoraggio delle spiagge di nidificazione ad opera di organizzazioni di volontariato e di istituzioni.

L'area presenta una morfologia complessa, caratterizzata da strette pianure alluvionali e rilievi montuosi che raggiungono la costa. La complessità della morfologia è da attribuire alla tettonica post-orogena della catena appenninica che si è verificata dall'inizio del Pliocene al Pleistocene medio attraverso faglie estensionali che hanno profondamente modificato questo settore della catena

appenninica e rappresenta il settore centrale del “fold-and-thrust belt” che si è formato nella Tetide centrale a partire dal tardo Cretaceo a causa dell’interazione tra la placca europea e quella africana, dell’apertura del bacino oceanico tirrenico e dalla rotazione in senso antiorario del fronte orogenico (Patacca et al., 1990).

Lungo la costa affiorano diverse unità litologiche. Le unità più interne sono composte principalmente da argille marnose con facies sedimentarie appartenenti al fondo oceanico e trasportate verso l’alto, e da calcareniti e calcilutiti, da scisti, da arenarie e rari conglomerati formati in ambiente torbidico distale. Le unità esterne sono composte, invece, da carbonati mesozoico-terziari (Guida & Valente, 2019) (Fig. 2.3).

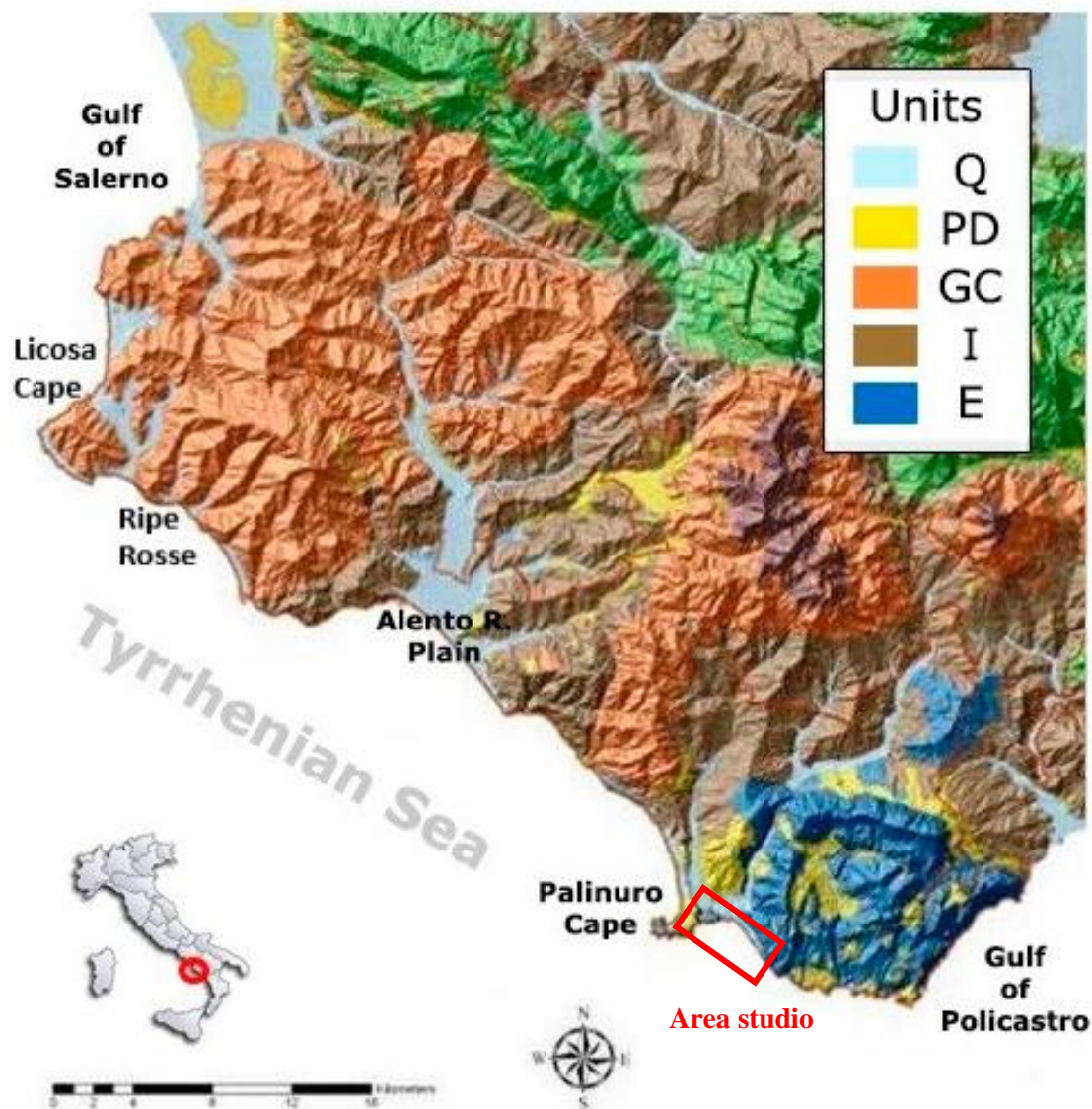


Fig. 4.3: Mappa geologica DEM (Digital Elevation Model), dalla Cartografia Tecnica della Regione Campania scala 1:5000  
 Legenda: Q—Quaternary post-orogenic units; PD—Pliocene deposits; GC—Middle Miocene syn-orogenic units (Cilento Group); I—Lower Tertiary internal units; E—Mesozoic–Lower Tertiary external unit. Fonte Guida & Valente 2019.

L'area di studio, compresa tra l'Arco Naturale di Palinuro e Marina di Camerota (SA), denominata Cala del Cefalo è costituita da una spiaggia lunga circa 3 Km e larga, in media 200-300 metri (Fig. 2.4).

La porzione di territorio presa in esame comprende la maggior parte del versante meridionale del massiccio del Monte Bulgheria, una delle cime più importanti di questa parte del Cilento. Dal punto di vista geologico, la successione rocciosa affiorante rappresenta la transizione fra la serie carbonatica e quella costituita dal flysch del Cilento e comprende depositi la cui età varia dal Triassico al Miocene (Muscio & Sello, 2007).

Al piede dei rilievi carbonatici sono presenti dei depositi detritici, derivanti dall'erosione dei versanti, sui quali poggiano depositi sabbiosi più recenti che costituiscono depositi di spiaggia antica e quelli di spiaggia attuale ai quali si associa la retrostante fascia dunale.

Morfologicamente l'area è caratterizzata da una costa bassa che si sviluppa molto all'interno, fino ad incontrare i rilievi carbonatici che si presentano con pareti alte e strapiombanti, e rappresentano antiche falesie, ormai non più attive.

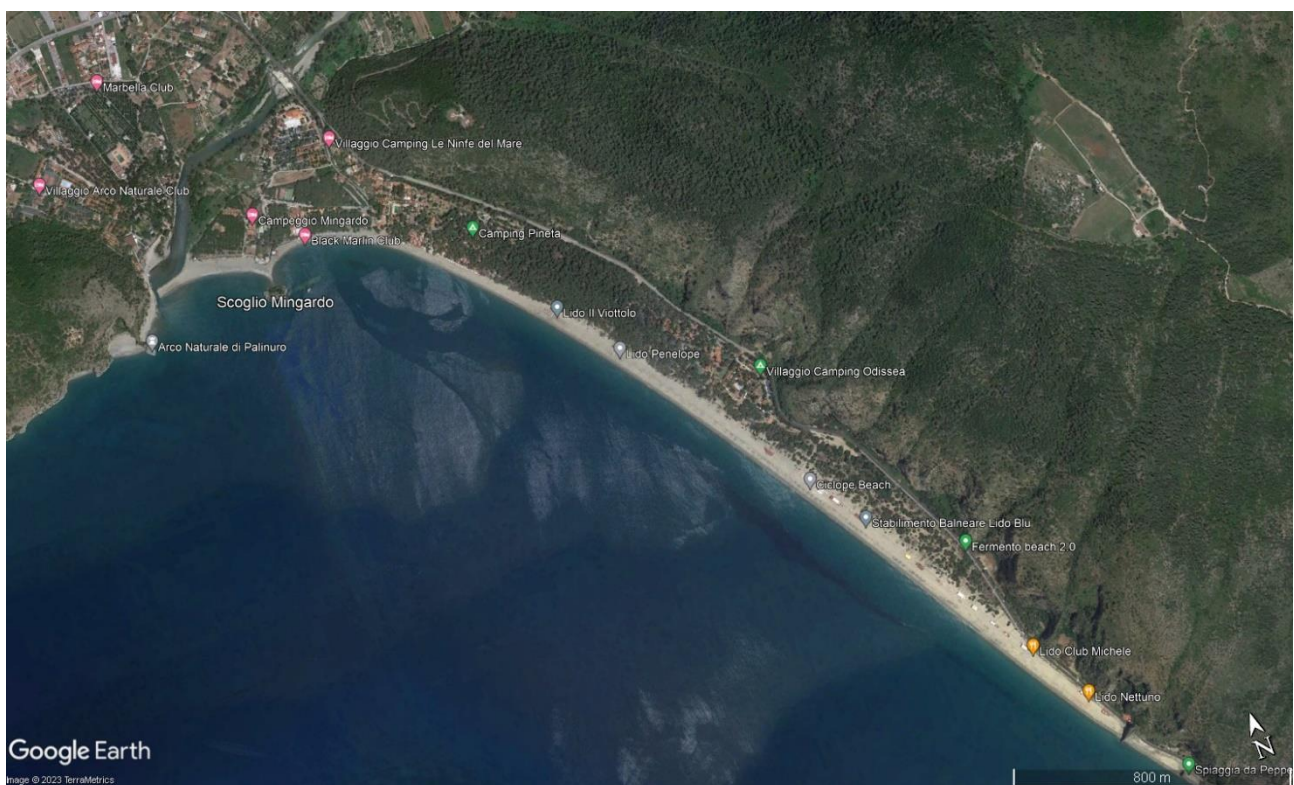


Fig.2.4: Area Mingardo: Foce del fiume Mingardo – Promontorio di Cala del Cefalo.

Proprio al piede di queste pareti rocciose, che bordano in modo pressoché continuo la strada, si aprono una serie di grotte, caratterizzate da ampi ingressi e da sviluppo, generalmente, orizzontale.

Al piede delle pareti rocciose, a monte della strada, sono state individuate 13 grotte: Cp 312 grotta del Pesce, Cp 321 grotta I di Torre Muzza, Cp 322 grotta II di Torre Muzza, Cp 323 grotta III di Torre

Muzza, Cp 324 grotta della Cala del Cefalo, Cp 325 grotta dell' Autaro, Cp 326 grotta II di Piazza Bianca, Cp 327 grotta I dei Morti, Cp 328 grotta II dei Morti, Cp 329 grotta III di Piazza Bianca, Cp 330 grotta delle Capre, Cp 592 grotta IV di Torre Muzza, Cp 596 grotta V di Torre Muzza (Del Vecchio, 2005) (Fig. 2.5).

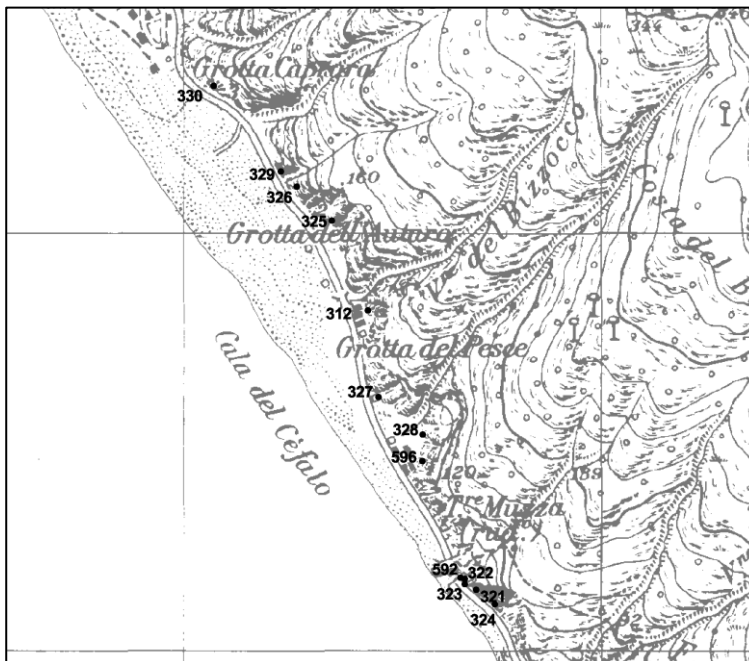


Fig.2.5: Ubicazione delle 13 grotte di Cala del Cefalo. (Fonte Del Vecchio et al., 2005).

L'Area Mingardo è sede di 5 Aree SIC (Fig. 2.6) riconosciuti dalla Rete Natura 2000, progetto dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità.



Fig. 2.6: Aree SIC in Area Mingardo – Fonte: <https://www.itinerarinaturacamerota.com/>

Il Sito di Importanza Comunitaria (SIC) "Spiaggia del Mingardo e scoglio di Cala del Cefalo", in particolare, non solo è considerato una delle spiagge più belle e suggestive della regione costiera, ma

racchiude anche uno degli ultimi ecosistemi dunali meglio conservati in Italia. Questo valore ambientale ha portato alla sua protezione a livello europeo, inclusa la designazione come SIC. All'interno di questo sito è stato creato un sentiero naturale che inizia dal lato est del parcheggio situato alla base della strada statale 562. Attraverso apposite segnaletiche illustrative, il sentiero naturale permette ai visitatori di esplorare l'ecosistema dunale. Questo ecosistema non solo protegge la spiaggia dall'erosione costiera, ma ospita anche una ricca varietà di flora e fauna con adattamenti simili a quelli delle specie desertiche, molte delle quali sono rare e protette. (<https://www.itinerarinaturacamerota.com/>)

### **2.3 Inquadramento geografico, geologico e geomorfologico dell'Area Sinni**

L'Area Sinni è delimitata a nord-est dall'Oasi Bosco Pantano di Policoro e a sud-ovest dal confine amministrativo con la regione Calabria (Fig. 2.7) e ricade nel quadrante sud-orientale della Basilicata, in provincia di Matera. Essa fa parte del litorale ionico lucano che si estende per una lunghezza di circa 37 km e confina a nordest con le coste pugliesi e a sudovest con quelle calabresi e costituisce la parte centrale del Golfo di Taranto.

I principali corsi d'acqua che sfociano nel mare antistante il litorale ionico lucano sono, procedendo da nordest verso sudovest, il Bradano, il Basento, l'Agri e il Sinni, provenienti dalle unità appenniniche e drenano – nei loro tratti mediani e bassi – la fossa bradanica. Hanno andamenti pressoché paralleli tra loro, sviluppandosi dapprima da ovest verso est, per poi piegare verso sud-est, fino a disporsi perpendicolarmente alla linea di costa. In particolare, i confini del litorale ionico sono tracciati a nord-est dal complesso di foce del Fiume Bradano, più precisamente in corrispondenza di Masseria Marinella, a sud-ovest dal Fiume Sinni, poco oltre l'abitato di Marina di Nova Siri.

La costa ionica lucana coincide con una unità fisiografica ben definita sulla costa ed è delimita verso l'interno dai rilievi collinari costituiti dai depositi di Avanfossa bradanica delimitati a loro volta a NE dai rilievi collinari calcarei delle Murge e a SO dalla catena appenninica.

La catena appenninica è un edificio tettonico formato da più coltri di ricoprimento: un thrust system costituito da varie unità stratigrafico-strutturali, di differente e varia natura litologica, sovrapposte le une alle altre e vergenti verso oriente. L'Avanfossa bradanica è, invece, un'ampia depressione, estesa tra la catena appenninica ad ovest e l'avampaese apulo ad est. Si tratta di una vasta area di abbassamento, prodottosi in relazione al peso delle falde, nonché dei sedimenti che in essa si depositarono nel corso del Pleistocene. Dal Pleistocene medio in poi, alla subsidenza seguì il graduale sollevamento dell'area, connesso all'aggiustamento isostatico della stessa.



Fig. 2.7: Area Sinni: Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro – Confine regionale Basilicata - Calabria

L'estrema propaggine meridionale della Fossa bradanica è caratterizzata dalla presenza di depositi marini terrazzati localmente riferibili al Pleistocene superiore, e depositi sabbiosi, sabbioso-ghiaiosi e sabbioso-limosi della piana costiera ionica di età olocenica. I primi studi sui caratteri stratigrafici dei depositi marini si devono a Vezzani (1967) che, nell'area compresa tra i depositi marini terrazzati più recenti e i cordoni dunali più interni, descrive una successione sedimentaria di sabbie, sabbie argillose e ghiaie, con spessore variabile da 20 m a 40 m, depositatasi sulle “argille marnose azzurre” del Calabriano in seguito all'alternanza di condizioni continentali e marine.

Studi recenti sui caratteri stratigrafici dei depositi marini terrazzati hanno portato al riconoscimento di diversi ordini di terrazzi, interpretati come la conseguenza del sollevamento dell'area del bacino di avanfossa a partire dal Pleistocene medio, che avrebbe provocato l'esposizione e l'erosione della porzione sommitale delle coltri di riempimento della Fossa bradanica. Variazioni cicliche quaternarie del livello del mare avrebbero poi prodotto una serie di terrazzi marini che poggeranno in discordanza sui depositi di avanfossa affioranti. I depositi della piana costiera individuati nell'area compresa tra i depositi marini terrazzati più recenti e i cordoni dunali più interni, sono costituiti da una successione sedimentaria di sabbie, sabbie argillose e ghiaie, di età post-Tirreniano (Tropeano et al., 2011; Sabato et al., 2012).

Alla fine del Tirreniano (Pleistocene superiore), una importante e forte regressione portò il livello del mare ad oltre 100 metri al di sotto di quello attuale. Un abbassamento così forte del livello del mare comportò un conseguente abbassamento del livello di base della rete idrografica superficiale dei

principali corsi d'acqua e, dunque, una fase di erosione accentuata e di notevoli apporti solidi a mare. Questi ingenti apporti solidi riversati a mare portarono ad una fase di sovralluvionamento della piana costiera e di progradazione della costa testimoniata soprattutto nella zona del Sinni.

I reticoli idrografici di questi corsi d'acqua sono, ad oggi, il risultato di diversi processi geodinamici e antropici che hanno interessato l'area in esame nel corso del tempo: il progressivo sollevamento del fronte della catena, la potente distensione, nel Pleistocene inferiore, di gran parte della Fossa bradanica, l'interazione tra le oscillazioni glacio-eustatiche del livello marino e i movimenti tettonici verticali che interessano l'area in esame durante il Quaternario e, in tempi più recenti, l'estrazione degli inerti lungo gli alvei e la costruzione di invasi. I diversi corsi d'acqua, prima della manomissione antropica dei bacini, recapitavano a mare cospicui depositi, avendo estesi bacini idrografici sviluppati in terreni prevalentemente sciolti come sabbie e argille Plio-pleistoceniche e sedimenti terziari in facies di flysch. In particolare, mentre il Sinni riversa a mare materiale di natura sabbio-ghiaiosa trasportato sul fondo, gli altri corsi d'acqua presentano un trasporto con prevalenza di materiali fini in sospensione.

Il litorale lucano è impostato sugli appalti deltizi dei principali corsi d'acqua afferenti alla costa ionica e presenta spiagge basse e sabbiose, a tratti ciottolose, limitate verso l'interno da zone acquitrinose o da cordoni dunari. Vezzani (1967) descrive la fascia litorale composta da dune costiere costituite da sabbia fine di colore variabile dal grigio al giallastro che formano una fascia di cordoni paralleli all'attuale linea di costa con ampiezza che aumenta da S verso N, e dalla spiaggia sabbiosa attuale di ampiezza variabile da 10 m a 200 m in cui riconosce gli ambienti di avanspiaggia, cordone di spiaggia e retrospiaggia,

Secondo Cocco et al. (1975) il tratto di costa in cui ricade l'Area Sinni, è caratterizzata da una spiaggia composta da sabbia grossolana e scura verso Policoro e via via più fine e chiara verso Ginosa Marina. Alle spalle della spiaggia si rinvengono cordoni dunali che aumentano gradualmente di estensione e importanza verso Ginosa Marina, delimitati verso terra da depositi argilloso-limosi scuri di ambiente palustre. Gli stessi Autori indicano come questo tratto di spiaggia sia in generale sottoposto ad erosione evidenziando che in alcune località il mare, attraverso varchi nel cordone dunale, invade durante le mareggiate le paludi del retroterra, depositando sabbie che giacciono sui depositi palustri. La presenza dei cordoni dunali, infatti, ostacola il deflusso delle acque superficiali interne portando alla formazione di aree acquitrinose e paludose, tra cui proprio quella del Bosco Pantano di Policoro. Secondo quanto riportato da Lazzari & Palmentola (2008), queste aree paludose sono state oggetto di interventi di bonifica a partire dal 1931 sia per fini di igiene sia per recuperare territori da destinare all'agricoltura.

Le irregolarità del litorale lucano ionico si evidenziano prevalentemente in corrispondenza dei complessi di foce dei corsi d'acqua più importanti anche se l'originaria forma a cuspidi dei delta fluviali risulta oggi quasi completamente smantellata dalla dinamica erosiva lungo la costa.

La conformazione morfologica del litorale lucano è inoltre caratterizzata dalla presenza di segmenti di spiaggia che mostrano un avvicendamento di lobi e concavità, ondulazioni ritmiche note in letteratura come sand waves o shorelines rhythms. La loro origine è ritenuta simile a quella connessa allo sviluppo dei meandri fluviali e agevolata da un fondo poco acclive e abbondanza di sedimenti (Cocco, 1975). Altri Autori, sulla base di studi sperimentali in laboratorio, correlano la formazione di cuspidi giganti con celle di circolazione prodotte dalla combinazione di correnti di risucchio (rip currents) e correnti lungo costa. Le sand waves del litorale ionico hanno lunghezze mediamente variabili tra 30 e 350 metri e ampiezza compresa tra 5 e 25 metri (Schiattarella et al., 2011b).

Un fattore che incide significativamente sulla dinamica costiera, e quindi anche sulla sua evoluzione morfologica, risulta essere l'attività antropica: costruzioni di aree portuali e interventi di vario genere, realizzazione di bacini artificiali costruiti dal secondo dopoguerra per l'approvvigionamento idrico di tipo potabile, irriguo e idroelettrico. In particolare, le opere di sbarramento fluviale provvedono da decenni ad intrappolare i sedimenti erosi nelle aree interne ad opera dei corsi d'acqua, causando così una notevole riduzione degli apporti fluviali alle foci che sono fondamentali per il ripascimento naturale della costa (Schiattarella et al, 2011 a e b).

La fascia costiera è inoltre luogo di villeggiatura con le spiagge ancora dall'aspetto naturale. Dal punto di vista floristico, si caratterizza per la diffusa presenza del giglio marino e dell'eringio spinoso, pianta erbacea perenne che, grazie al suo esteso apparato radicale, opera un'azione di consolidamento delle dune.

L'Area Sinni è sede dell'area SIC "Bosco Pantano di Policoro e Costa Ionica Foce Sinni" (Fig. 2.8) e sotto tutela nell'ambito del progetto PROVIDUNE (LIFE07NAT/IT/000519) un importante contributo dell'Unione Europea (Programma LIFE+ Nature and Biodiversity) che si occupa di conservazione e ripristino di habitat dunali (Sabato et al., 2011).



Fig. 2.8: Aree SIC "Bosco Pantano di Policoro e Costa Ionica Foce Sinni" – Fonte: <https://sites.unica.it/providune/2014/03/26/bosco-pantano-di-policoro-e-costa-ionica-foce-sinni-introduzione-e-inquadramento-generale/>

## Bibliografia citata

- AUCELLI P.P.C., IANNANTUONO E. & ROSSKOPF C.M. (2003) - *Evolutionary trends and present morphodynamics along the Molise coast and their relationship to shore protection structures (Southern Italy)*. Atti del Convegno: 4th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems. Bologna, Giugno 2003, pp. 157-159.
- AUCELLI P.P.C., FALLACE P.I., PELLEGRINO P., ROSSKOPF C.M., SCAPILLATI N. (2004) – *L'evoluzione recente della costa molisana (Italia Meridionale)*. AIQUA, Italian Journal of Quaternary sciences, **17**(1), 21-31.
- AUCELLI P.P.C., DE PIPPO T., IANNANTUONO E. & ROSSKOPF C.M. (2007) – Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Italia meridionale). Studi Costieri, **13**, 75-92.
- AUCELLI P.P.C., IANNANTUONO E., ROSSKOPF C.M. (2009) – *Evoluzione recente e rischio di erosione della costa molisana*. Boll. Soc. Geol. It., **128**, n.3, 759-771.
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2018) – *Present day and future scenarios of coastal erosion and flooding processes along the Italian Adriatic coast: the case of Molise region*. Environmental Earth Sciences, **77**, 371.
- COCCO E., (1975) – *Forme costiere ritmiche "Sand Waves" lung oil litorale alto ionico (Golfo di Taranto)*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 861-869.
- COCCO E., CRAVERO E., DI GERONIMO S., MEZZADRI G., PAREA G.C., PESCATORE T., VALLONI R., VINCI A. (1975) – *Lineamenti geomorfologici e sedimentologici del litorale alto ionico (Golfo di Taranto)*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 993-1051.
- DEL VECCHIO (2005) – *Grotte costiere di Marina di Camerota*. Sentiero degli Dei, L'appennino meridionale, periodico di cultura e informazione della Sezione di Napoli del Club Alpino Italiano. Anno II. Fascicolo I. pp. 45-58
- DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., BUCCINO M., ROSSKOPF C.M. (2020) – *Influence of hard defence structures on shoreline erosion along Molise coast (southern Italy): a preliminary investigation*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., **51**, <https://doi.org/10.3301/ROL.2020.10>.
- GIRARDI A., COLTELLACCI M., PAREA G.C., ZUNICA M. (1985a) – Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 155 - San Severo (scala 1:100.000). C.N.R. - P.F. «Conservazione del Suolo», Sottoprogetto «Dinamica dei litorali», S.EL.CA., Firenze.
- GIRARDI A., PAREA G.C., ZUNICA M. (1985b) – Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 147 - Lanciano, Foglio 148 - Vasto (scala 1:100.000). C.N.R. - P.F. «Conservazione del Suolo», Sottoprogetto «Dinamica dei litorali», S.EL.CA., Firenze.
- GUIDA D., VALENTE A. (2019) – *Terrestrial and Marine Landforms along the Cilento Coastland (Southern Italy)*. Water, **11**, 2618.

- LAZZARI M., PALMENTOLA G. (2008) – *Il processo di antropizzazione del litorale jonico lucano in relazione allo stato di conservazione della morfologia costiera*. Atti del Secondo Simposio Internazionale sul Monitoraggio Costiero, Napoli.
- MUSCIO G., SELLO U (2007) – *Carsismo del Basso Cilento*. Atti del Convegno Regionale di Speleologia “Campania Speleologica”. 1-3 giugno 2007. Oliveto Citra (SA).
- PAREA G. C. (1978) – *Trasporto dei sedimenti ed erosione costiera lungo il litorale fra il Tronto ed il Fortore (Adriatico Centrale)*. Mem. Soc. Geol. It., 19: 361-367.
- PATACCA E., SARTORI R., SCANDONE P. (1990) – *Tyrrhenian basin and Appenninic arcs: kinematic relations since late tortonian times*. Mem. Soc. Geol. It. **45**, 425-451.
- REGIONE BASILICATA, DIPARTIMENTO AMBIENTE E TERRITORIO. (2005) – *Monitoraggio dell’erosione costiera e caratterizzazione quali-quantitativa dei sedimenti a mare*. Relazione generale. 160pp.
- ROSSKOPF C.M., DI PAOLA G., ATKINSON D.E. RODRIGUEZ G., WALKER I.J. (2017) – *Recent shoreline evolution and beach erosion along the central Adriatic coast of Italy: the case of Molise region*. Journal of Coastal Conservation, Planning and Management.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2011) – *Studio sedimentologico e dinamica marino-costiera del sistema litorale di Bosco Pantano di Policoro (Basilicata, Italia meridionale)*. Rend. Online Soc. Geol.It., 17, 161-168.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2012) – *Sedimentological and morpho-evolution maps of the ‘Bosco Pantano di Policoro’ coastal system (Gulf of Taranto, southern Italy)*. Journal of Maps, disponibile online: <http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>, 1-8.
- SCHIATTARELLA M., GIANO S.I., LONGHITANO S., BENEDEUCE P. (2011a) – *Il Mar Ionio*. In: La Costa d’Italia (tavole generali), a cura di S. Ginesu, 49-60. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- SCHIATTARELLA M., GIANO S.I., LONGHITANO S., BENEDEUCE P. (2011b) – *La costa della Basilicata*. In: La Costa d’Italia (tavole regionali), a cura di S. Ginesu, 249-268. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- TROPEANO M., CILUMBRIELLO A., SABATO L., ANDRIANI G.F., GALLICCHIO S., GRIPPA A., ROSSI C.A., SPILOTRO G., WALSH N. (2011) – *Stratigrafia e Idrostratigrafia preliminare del sottosuolo della piana costiera metapontina (Basilicata – Italia meridionale)*. In: Le modificazioni climatiche e i rischi naturali. A cura di: M. Polemio, CNR IRPI, Bari, 149-152.
- VEZZANI L. (1967) – *I depositi plio-pleistocenici del litorale ionico della Lucania*. Atti Acc. Gioenia Sc. Nat. in Catania s. **VI**, 18, 159-180.
- ZUNICA M. (1987) – *Lo spazio costiero italiano*. Valerio Levi Editore, 212 pp.

## Capitolo III - Valutazione del clima meteo-marino delle aree di studio

### Introduzione

Le zone costiere in tutto il mondo sono costantemente modellate dall'effetto delle onde, un processo che influenza in modo significativo l'evoluzione morfologica delle spiagge. Queste variazioni sono particolarmente legate all'energia generata dal movimento delle onde, principalmente causato dall'azione dei venti nelle vicinanze della costa e dalle fluttuazioni del livello del mare.

È possibile classificare le fasce costiere in spiagge ad alta energia, esposte a forti azioni delle onde, principalmente presenti sulle coste oceaniche, e spiagge a bassa energia, tipiche delle coste di mari interni e golfi.

Oltre agli effetti delle onde, le coste sono influenzate su ampi intervalli temporali dalle variazioni del livello del mare, causate da oscillazioni climatiche, fenomeni isostatici e subsidenza del terreno (Pranzini, 2004; Antonioni & Silenzi, 2007).

In questo capitolo viene esaminato il clima meteomarino delle zone prese in esame, inteso come una formulazione statistica delle caratteristiche fondamentali delle onde, come altezza, direzione e periodo. Il clima meteomarino verrà poi utilizzato per classificare gli eventi di mareggiata in base alla loro energia con il metodo proposto da Dolan e Davis (1992).

### 3.1 Fattori meteomarini e processi morfologici costieri

I fattori meteomarini svolgono un ruolo cruciale nell'influenzare i processi morfologici costieri. Questi fattori, che coinvolgono gli effetti combinati di elementi meteorologici e marini, hanno implicazioni significative nella formazione del paesaggio costiero. Alcuni fattori meteomarini chiave di rilievo per i processi morfologici costieri includono:

- **Vento:** Il vento gioca un ruolo nella formazione delle dune costiere, influisce sulla creazione e altezza delle dune e contribuisce al trasporto dei sedimenti. I processi guidati dal vento possono portare alla formazione e migrazione delle dune e alla formazione di berme sulla spiaggia.
- **Azione delle Onde:** Le caratteristiche delle onde, come altezza, direzione e periodo, influenzano il trasporto del sedimento, l'erosione e la deposizione lungo la costa. Le onde ad alta energia tendono a modellare le coste attraverso processi erosivi, mentre onde a bassa energia contribuiscono alla deposizione del sedimento. Inoltre, eventi meteorologici estremi come le tempeste, durante le quali si ha un sovrizzo del livello del mare chiamato *storm surge*, cioè un temporaneo aumento del livello del mare che contribuisce ad

innescare processi di erosione costiera, di inondazione e di cambiamenti nel trasporto del sedimento.

- **Correnti:** Esistono differenti tipi di correnti, quelle più energetiche sono legate al moto ondoso, si formano cioè dopo la rottura dei fronti d'onda e contribuiscono al trasporto litorale ed ai processi di erosione/sedimentazione. Le correnti mareali sono in genere di limitata importanza e dipendono chiaramente dal rango mareale della zona. In genere acquisiscono una certa importanza là dove il moto ondoso ha poca rilevanza e la morfologia costiera favorisce un aumento della loro intensità, essenzialmente in zone protette, specialmente estuari e baie. Infine esistono le correnti dovute alla circolazione generale delle masse d'acqua che interessano ampie zone costiere, dell'ordine delle centinaia di chilometri e che, in genere, hanno poca influenza sul trasporto dei sedimenti
- **Maree:** Le maree astronomiche, influenzate dalle forze gravitazionali principalmente della Luna e del Sole, contribuiscono alle variazioni di livello del mare. Le maree possono influenzare il trasporto, l'erosione e la deposizione dei sedimenti in certe aree costiere, in genere riparate, dove il moto ondoso ha poca influenza.

Le maree possono essere suddivise in tre categorie: macro, meso e microtidali. Questa suddivisione è basata sull'ampiezza delle maree, cioè la differenza di altezza tra l'alta e la bassa marea durante un ciclo di marea. Questa classificazione aiuta a descrivere le caratteristiche delle maree in diverse aree del mondo.

**Maree macrotidali:** caratterizzate da un'ampia differenza tra alta e bassa marea, tipiche di alcune aree costiere dell'Atlantico settentrionale, come la Baia del Fundy in Canada e il canale della Manica.

**Maree mesotidali:** caratterizzate da una differenza moderata tra alta e bassa marea, comuni in molte aree costiere del mondo, inclusi tratti della costa orientale degli Stati Uniti e alcune regioni europee.

**Maree microtidali:** caratterizzate da una piccola differenza tra l'alta e la bassa marea, prevalenti sulle coste dell'oceano Indiano, in alcune regioni del Pacifico e nelle zone interne del Mar Mediterraneo.

La classificazione delle maree come macro, meso o microtidali non è rigida e può variare in base a fattori locali quali la morfologia della costa, la forma della baia o del golfo, la presenza di canali stretti e altre caratteristiche locali che influenzano le dimensioni delle maree in una determinata area.

- **Pressione Atmosferica:** Variazioni nella pressione atmosferica possono influenzare il livello del mare e così favorire i processi di inondazione ed erosione. Una bassa pressione

atmosferica può portare ad un aumento del livello del mare aggravando l'impatto degli eventi di tempesta sulla morfologia costiera.

- Temperatura: Le variazioni nella temperatura del mare possono influenzare le proprietà fisiche dell'acqua e influire sugli ecosistemi marini. I gradienti di temperatura possono influenzare la distribuzione della vita marina e contribuire alla salute complessiva degli ambienti costieri.

I processi che includono venti, onde, maree e correnti, forniscono, dunque l'energia che modella e modifica un'area costiera.

Il moto ondoso, in particolare, è generato dalla forza del vento che agisce sulla superficie del mare, provocando tensioni tangenziali. Queste tensioni, insieme alle variazioni di pressione causate dalla turbolenza dell'aria in movimento, sono responsabili della creazione delle onde. Le prime increspature iniziano un processo di feedback positivo in quanto si verifica una differenza di pressione tra il lato esposto al vento (sopravento) e quello protetto dal vento (sottovento). Questa differenza di pressione contribuisce all'aumento progressivo dell'altezza e della lunghezza delle onde. Le onde, rimanendo nella regione in cui è presente il vento, continuano ad assorbire energia e a crescere, raggiungendo dimensioni massime che dipendono dalla velocità del vento, dalla sua durata e dalla lunghezza della distesa d'acqua su cui soffia (fetch). Quando le onde si diffondono nella regione in cui sono state generate, vengono definite "sea waves". Queste onde sono erosive, caratterizzate da un periodo breve e generano un mare estremamente caotico, con fronti ondosi poco definiti provenienti da diverse direzioni. Al contrario, il termine "swell waves" si riferisce a condizioni in cui le onde si propagano al di fuori della zona di generazione, raggiungendo la costa con fronti ondosi ben definiti e periodi più lunghi. Questo tipo di movimento ondoso è costruttivo e favorisce il rilascio dei sedimenti erosi verso la costa.

In una prima approssimazione, è possibile considerare le onde che si propagano in acque profonde come oscillazioni sinusoidali, le cui caratteristiche possono essere descritte da:

- $H_0$ : altezza dell'onda, distanza verticale tra il punto più basso del cavo e il punto più alto della cresta.
- $H_s$ : altezza d'onda significativa, una misura statistica che rappresenta la media quadratica delle altezze delle onde più alte di un certo percentile, di solito il 1/3 delle onde più alte. È una stima della "tipica" altezza delle onde in un dato periodo di tempo e tiene conto delle onde più rappresentative nell'intero spettro.
- $L_0$ : lunghezza dell'onda, distanza tra due creste successive.

- $T$ : periodo dell'onda, tempo tra il passaggio di due creste successive nello stesso punto fisso.

Questi parametri definiscono le caratteristiche fondamentali delle onde, influenzate direttamente dalla dinamica del vento e dalle condizioni del mare circostante.

### **3.2 Analisi del clima meteo-marino: strumenti e metodi**

Per la caratterizzazione del clima ondoso al largo di una costa, è necessario acquisire una serie temporale statisticamente significativa di dati rappresentativi delle condizioni delle onde incidenti, in particolare altezza significativa dell'onda ( $H_s$ ), direzione media delle onde ( $\alpha$ ), periodo di picco ( $T_p$ ). Questi dati vengono elaborati sia per ricostruire il clima medio delle onde, espresso attraverso la distribuzione di frequenza delle classi di altezza, direzione e periodo delle onde, sia per stimare le caratteristiche delle onde estreme attese corrispondenti a un intervallo temporale specifico (periodo di ritorno).

I dati sulle onde possono essere ottenuti attraverso vari metodi, che possono essere suddivisi in due categorie principali:

1. Metodi indiretti: metodi empirici e modelli matematici in cui le caratteristiche delle onde vengono ricostruite basandosi su dati meteorologici, in particolare dati anemometrici.
2. Metodi diretti: la misurazione delle caratteristiche delle onde in un sito mediante strumentazione adeguata (ad esempio, boe ondamiche).

Nei metodi indiretti, le caratteristiche delle onde sono derivate o stimate in base ad altri dati meteorologici, specialmente dati provenienti da anemometri. D'altro canto, i metodi diretti coinvolgono l'uso di strumenti specifici per misurare direttamente le caratteristiche delle onde nel sito di interesse.

In particolare, per la caratterizzazione del clima ondoso al largo della costa del Molise, della Campania e della Basilicata, sono stati identificati due potenziali set di dati meteorologici marini, adatti agli scopi di questo lavoro di ricerca. Uno proviene dalla Rete Ondametrica Nazionale (ISPRA) (Fig. 3.1 A), rispettivamente boa di Ortona (Area Biferno), boa di Ponza (Area Mingardo) (di cui viene mostrato il posizionamento nella fig. 3.1 B, come esempio) e boa di Crotona (Area Sinni), l'altro è risultato dal modello matematico MEDSEA. Questi set di dati sono considerati rilevanti per lo studio e l'analisi in corso.



Fig. 3.1: boa ondometrica della rete RON(A); posizionamento della boa ondometrica di Ponza (B).

I dati acquisiti dalla boa direzionale situata nelle acque al largo della città di Ortona, a 56 km a nord del porto di Termoli, sono stati utilizzati per inferire il clima ondoso lungo il tratto di costa analizzato per l'area molisana. Il dispositivo è ancorato a una profondità di 70 m sotto il livello delle basse maree, alla latitudine di 42°24'54.0" N e longitudine di 14°30'20.99" E.

I dati acquisiti dalla boa direzionale situata nelle acque al largo della città di Ponza, a circa 200 km a nord della foce del Fiume Mingardo, sono stati utilizzati per inferire il clima ondoso lungo il tratto di costa analizzato per l'area campana. Il dispositivo è ancorato a una profondità di 70 m sotto il livello delle basse maree, alla latitudine di 40°54'00" N e longitudine di 12°57'00" E.

I dati acquisiti dalla boa direzionale situata nelle acque al largo della città di Crotona, a circa 80 km a sud dell'Area Sinni, sono stati utilizzati per inferire il clima ondoso lungo il tratto di costa analizzato per l'area lucana. Il dispositivo è ancorato a una profondità di 70 m sotto il livello delle basse maree, alla latitudine di 39°02'70" N e longitudine di 17°20'70" E.

Altezza significativa dell'onda ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e azimuth della direzione media delle onde ( $\alpha$ ) sono stati registrati nel periodo 1989-2012, con un intervallo medio di 3 ore. Altezze e periodi delle onde sono stati adattati al largo delle coste analizzate ("boa virtuale" nella Figura 3.2 mostrata come esempio per l'Area Biferno), secondo le relazioni introdotte originariamente da Hasselmann (1973) nel contesto del progetto JONSWAP. Seguendo la metodologia di Contini e De Girolamo (1998), e assumendo che lo stesso vento soffi nelle posizioni della boa "reale" e "virtuale", si ottiene facilmente che:

(3.1)

$$\frac{H_{s,VIRT}}{H_{s,REAL}} = \left(\frac{F_{VIRT}}{F_{REAL}}\right)^2$$

$$\frac{T_{p,VIRT}}{T_{p,REAL}} = \left(\frac{F_{VIRT}}{F_{REAL}}\right)^2$$

(3.2)

dove  $F$  indica il "fetch efficace" (Saville, 1954). Si noti che, in coerenza con Hasselmann (1973), si è supposto che la direzione media delle onde coincidesse con quella del vento.



Fig. 3.2: Ubicazione boa di Ortona e boa virtuale del Molise

Il modello MEDSEA (Mediterranean Multi-year Sea Waves), basato sul modello WAM, fornisce dati istantanei orari dei parametri spettrali delle onde calcolati su una griglia con una risoluzione di  $(1/24)^\circ$ , approssimativamente 4,6 km, che copre il Mar Mediterraneo e una porzione adiacente dell'Oceano Atlantico. Il modello simula la generazione e la propagazione del moto ondoso utilizzando valori medi giornalieri dei dati correnti e del vento provenienti dal ECMWF (Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Raggio). I risultati sono disponibili sotto forma di due diversi set di dati.

Il primo set di dati (Reanalysis) fornisce una serie temporale riprocessata attraverso il confronto dei risultati con misurazioni satellitari e dati da boe ondometriche, caratterizzata quindi da una maggiore precisione. Il secondo set di dati (Analysis and Forecast) fornisce i dati più recenti, non ancora completamente riprocessati, ma incorpora comunque un processo di assimilazione dati reale.

I dati sono accessibili tramite il sito web del Servizio Marino Copernicus ([https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA\\_MULTIYEAR\\_WAV\\_006\\_012/download?dataset=med-hcmr-wav-rean-h](https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012/download?dataset=med-hcmr-wav-rean-h)).

Per il presente studio, in particolare, sono stati acquisiti i dati della serie temporale dell'altezza significativa dell'onda, la direzione media delle onde e il periodo di picco del "MEDSEA Reanalysis".

Questo set di dati, per le tre aree, copre il periodo dal 01/01/1993 00:00 al 30/06/2021 23:00, con un intervallo di un'ora, al fine di integrare il "set di dati della boa" di Ortona, di Ponza e di Crotona.

Per determinare gli eventi di tempesta, è stata utilizzata la definizione data da Boccotti (2000), ovvero: una tempesta nel Mediterraneo è una sequenza di stati marini in cui l'altezza d'onda significativa supera la soglia ( $h_t$ ) e non scende al di sotto di tale soglia per un intervallo di tempo continuo superiore a 12 ore. Lo stesso autore, inoltre, suggerisce che l'intervallo di tempo tra singole tempeste consecutive sia superiore a 12 ore.

Molti studi, tra cui Mendoza et al. (2008 e 2011), Anfuso et al. (2016) e Molina et al. (2019), hanno basato la classificazione delle tempeste sull'uso dello "Storm Power Index" di Dolan e Davis (1992 e 1994), un parametro, che classifica gli eventi tempestosi in base alla loro energia.

Per il presente studio, le mareggiate individuate, grazie ai dati ottenuti per le tre aree, sono state classificate attraverso l'utilizzo dello Storm Power Index, secondo la seguente equazione:

$$\text{SPI} = H_s^2 t_d \quad (3.2)$$

dove  $H_s$  è l'altezza massima dell'onda significativa (in metri) registrata durante l'evento tempestoso e  $t_d$  è la durata della tempesta in ore.

Dopo aver calcolato l'SPI di tutti gli eventi, utilizzando il valore massimo dell'altezza d'onda registrato durante l'evento e il numero di ore della tempesta, questi sono stati categorizzati in cinque classi, dalla Classe I (eventi deboli) alla Classe V (eventi estremi), mediante l'analisi della funzione di "natural breaks" suggerita da Jenks e Caspall (1971).

### **3.3 Inquadramento del clima meteo-marino sulle zone costiere prese in esame**

#### **3.3.1 Dinamica del clima meteo-marino in Area Biferno**

La zona costiera oggetto di studio si colloca all'interno del settore di attraversamento compreso tra i 310° e i 110°N (Fig. 3.3), con direzioni che si estendono da Punta Penna a Punta Pietre Nere. Tuttavia, per quanto riguarda la propagazione lungo la costa, viene preso in considerazione solo il tratto compreso tra i 350° e i 95°N (Aucelli et al., 2007).

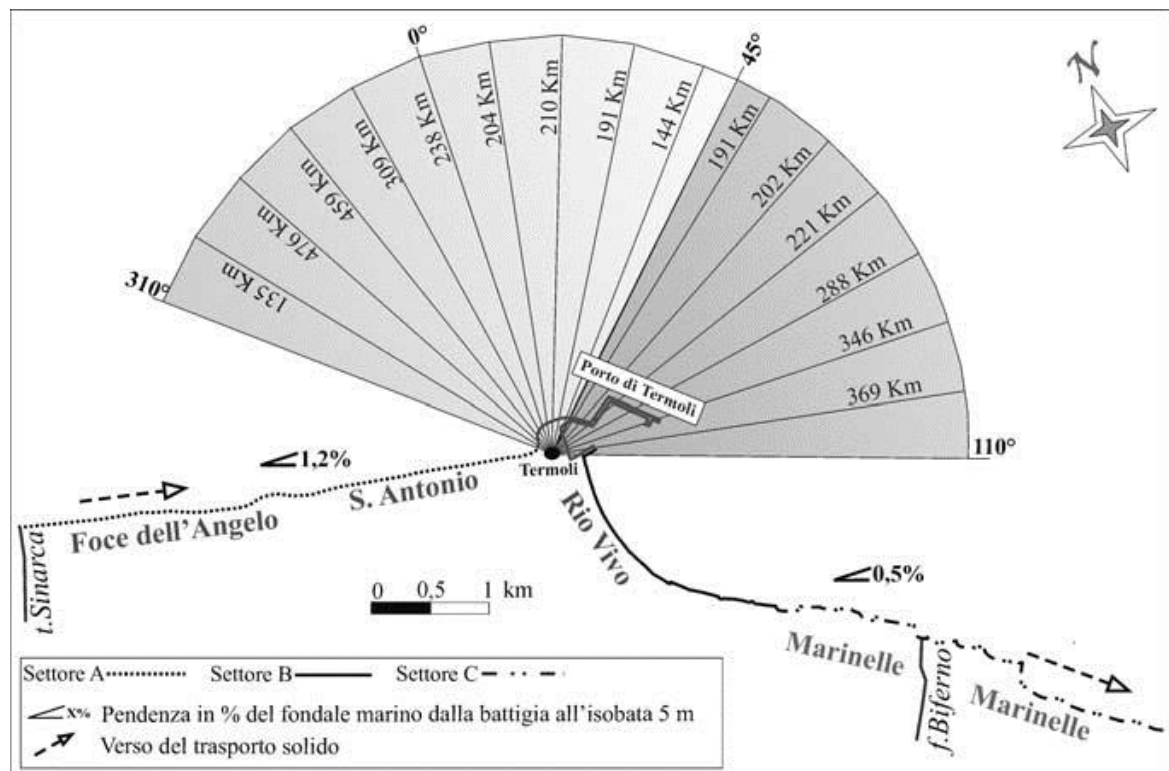


Figura 3.3: Visualizzazione del settore di traversia in cui ricade il settore costiero in esame con l'indicazione del verso del trasporto sedimentario lungo costa – da Aucelli et al. (2007)

Esaminando il dataset ottenuto per l'Area Biferno, per il periodo che va dal 1989 al 2021, sono stati individuati 181 eventi di mareggiata.

Attraverso l'equazione proposta da Dolan e Davis (1992) sono stati classificati, in base all'energia, tutti gli eventi di mareggiata individuati.

Con il dataset ottenuto e la caratterizzazione del clima meteomarinario attraverso l'utilizzo dello "Storm Power Index" è stato possibile ottenere importanti informazioni riguardo il numero, la durata, la direzione e la potenza degli eventi di mareggiata.

La caratterizzazione degli anni tempestosi deve essere effettuata considerando il numero annuale di giorni con tempeste, il numero annuale di eventi tempestosi e lo Storm Power Index (Almeida et al., 2011; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2013). In questo studio, gli anni caratterizzati da un numero elevato e/o una durata estesa annuale di tutte le classi di tempeste non sono stati inclusi come rappresentativi degli anni tempestosi secondo la definizione data da Anfuso et al. (2016). Questa scelta è motivata dal fatto che tali anni sono associati a numerosi eventi delle classi I e II, i quali, sebbene siano numerosi e abbiano una durata cumulativa considerevole, non hanno impatti significativi sugli ambienti costieri e sulle strutture umane (Rangel-Buitrago e Anfuso, 2011).

Per ottenere un quadro esplicativo degli eventi che maggiormente possono aver influito sulla morfologia del tratto di costa analizzato, quindi, sono stati presi in considerazione solo gli eventi di classi III, IV e V (Fig.3.4).

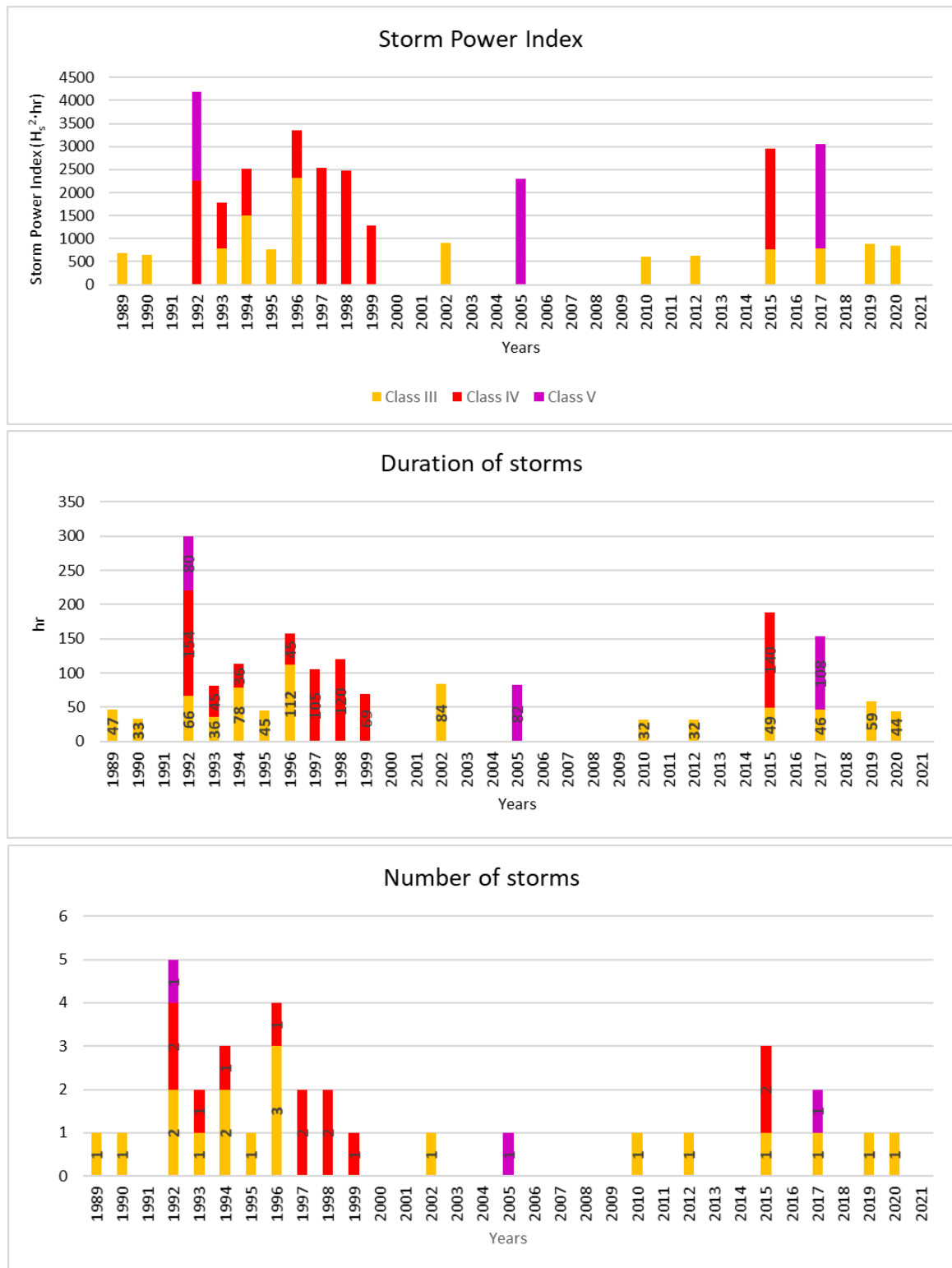


Fig. 3.4: Grafici Storm Power Index. A – valori Storm Power Index; B – Durata in ore di ogni evento; C – Numero di eventi per anno in Area Biferno

Dalla figura 3.4 si può osservare come gli eventi di mareggiata con classe energetica elevata si siano registrati tra il 1992 e il 1999. In questi sette anni, infatti, si sono susseguiti eventi di classe III e IV e, in particolare, uno dei tre eventi di classe V con una durata di 80 ore. Gli altri eventi di classe V

sono stati registrati nel 2005 e nel 2017, quest'ultimo, inoltre, ha registrato anche un evento di classe III.

Gli anni menzionati, con un numero elevato di tempeste, con una lunga durata degli eventi e con un valore elevato di Storm Power Index possono essere definiti, pertanto, come anni tempestosi.

Un altro dato importante evidenziato dall'analisi, fa riferimento alla ciclicità con cui eventi di classe V si verificano nel tempo. Si può osservare, infatti come, nel caso dell'area di studio presa in esame, gli eventi più energetici si siano verificati ogni 12 anni circa. Questo dato può dunque considerarsi rappresentativo del periodo di ritorno di temporali di classe V.

Si è ritenuto, inoltre, fondamentale indagare sulla direzione degli eventi di mareggiata con classe energetica elevata. La figura 3.5 mostra come quasi la totalità degli eventi di tempesta siano stati registrati nel I ottante (1-45°N) a conferma di quanto analizzato negli studi precedenti sulla costa molisana (Aucelli et al.,2007; Buccino et al.,2020).

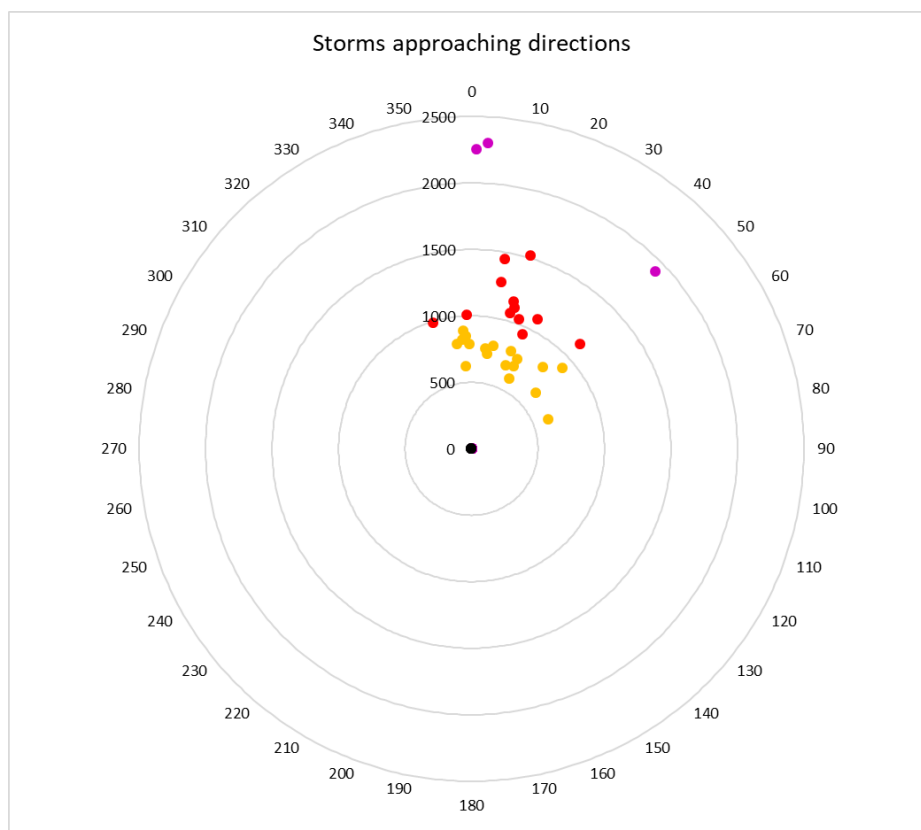


Fig. 3.5: Direzione degli eventi di tempesta di classe III, IV e V in Area Biferno

### 3.3.2 Dinamica del clima meteo-marino in Area Mingardo

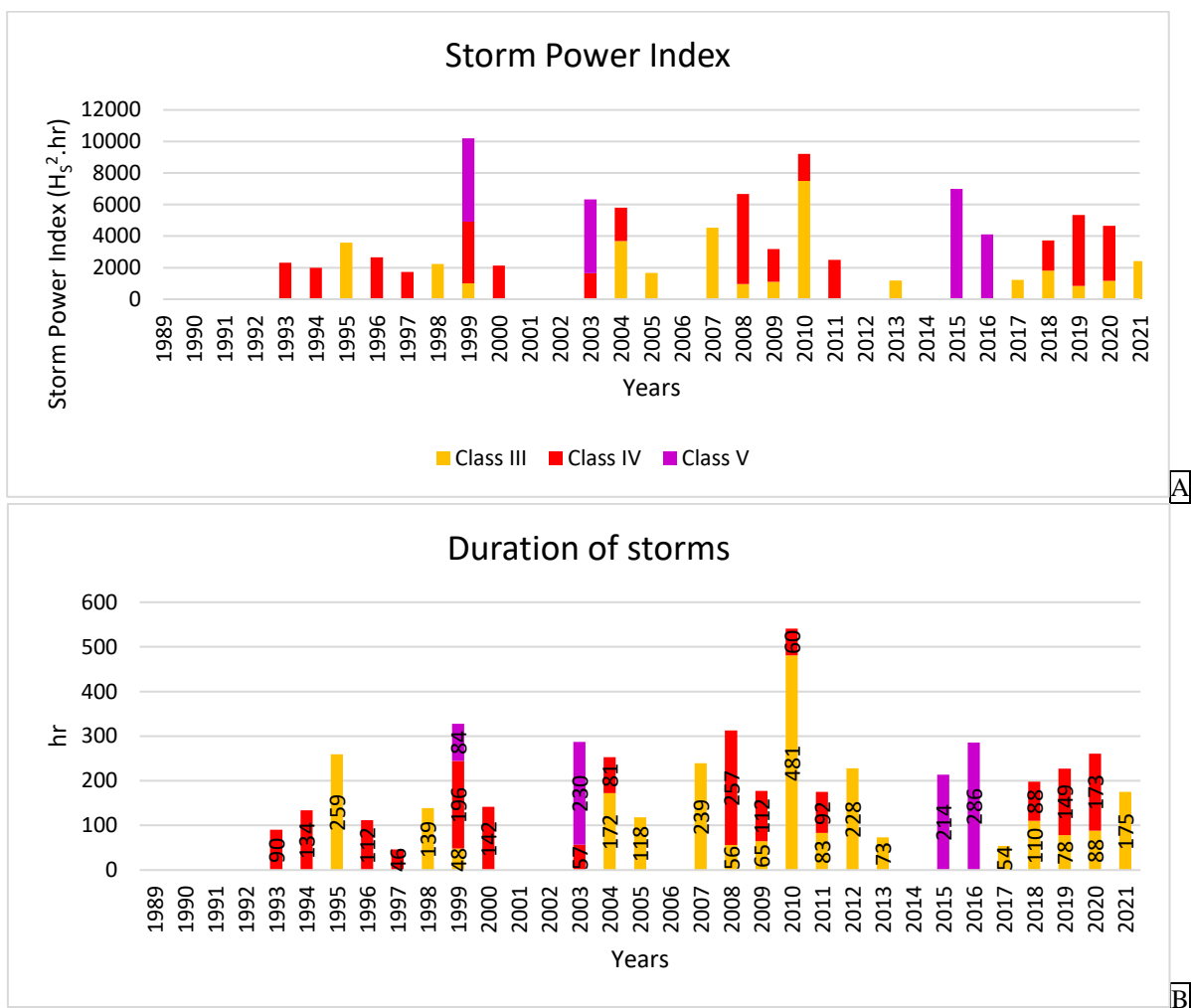
La zona costiera oggetto di studio si colloca all'interno del settore di attraversamento compreso tra i 230° e i 280°N

Esaminando il dataset ottenuto per l'Area Mingardo, per il periodo che va dal 1989 al 2021, sono stati individuati 365 eventi di mareggiata.

Attraverso l'equazione proposta da Dolan e Davis (1992) sono stati classificati, in base all'energia, tutti gli eventi di mareggiata individuati. Con il dataset ottenuto e la caratterizzazione del clima meteomarinò attraverso l'utilizzo dello "Storm Power Index" è stato possibile ottenere importanti informazioni riguardo il numero, la durata, la direzione e la potenza degli eventi di mareggiata.

In questo studio, gli anni caratterizzati da un numero elevato e/o una durata estesa annuale di tutte le classi di tempeste non sono stati inclusi come rappresentativi degli anni tempestosi.

Per ottenere un quadro esplicativo degli eventi che maggiormente possono aver influito sulla morfologia del tratto di costa analizzato, sono stati presi in considerazione solo gli eventi di classi III, IV e V (Fig.3.6).



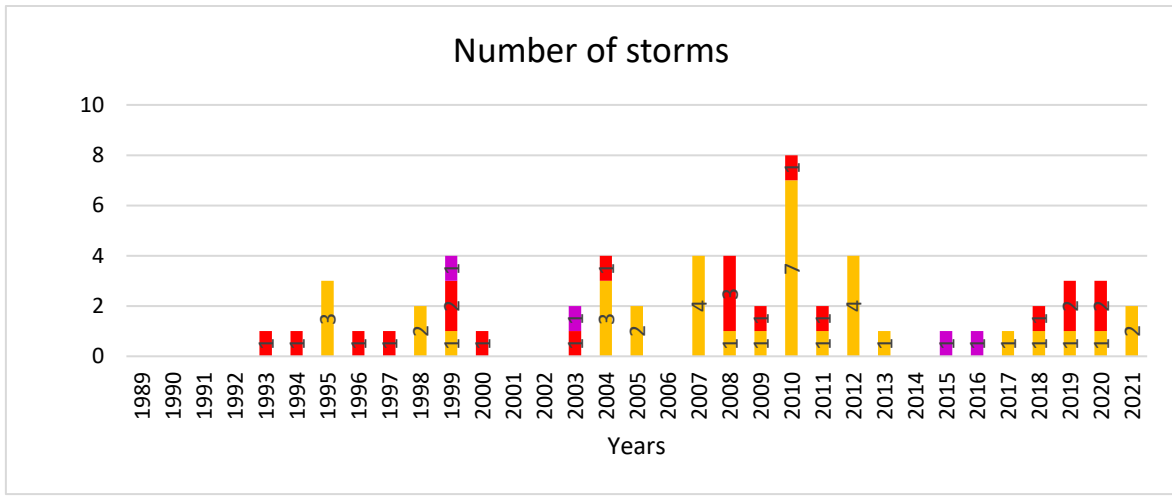


Figura 3.6: Grafici Storm Power Index. A – valori Storm Power Index; B – Durata in ore di ogni evento; C – Numero di eventi per anno in Area Mingardo

Dai grafici degli eventi di mareggiata individuati, con classe elevata, emerge come questi siano distribuiti nel tempo, principalmente tra il 1993 e il 2000, tra il 2003 e il 2013 ad esclusione del 2006 e tra il 2015 e il 2021. Una maggiore concentrazione è stata registrata tra il 2003 e il 2012, con l'esclusione del 2006 che non presenta eventi con energia elevata, con un picco nel 2010 in cui sono stati registrati 7 eventi di classe III e un evento di classe IV tra i primi mesi e gli ultimi mesi dell'anno. Dagli eventi di mareggiata individuati, emerge come questi siano stati caratterizzati da un'altezza d'onda significativa molto alta, con valori che arrivano a raggiungere circa 8 m (Fig. 3.7).

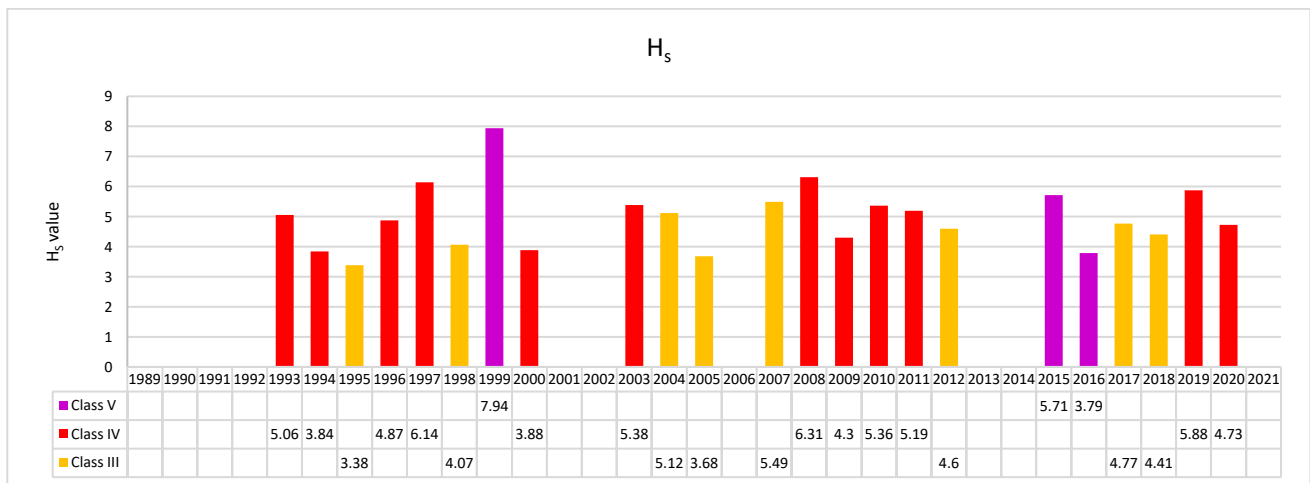


Figura 3.7: Valori di altezza d'onda significativa più alta registrata annualmente per gli eventi classi III, IV e V in Area Mingardo.

Si è ritenuto, inoltre, fondamentale indagare sulla direzione degli eventi di mareggiata con classe energetica elevata. La figura 3.8 mostra come quasi la totalità degli eventi di tempesta siano stati registrati nel VI ottante (225-270°N).

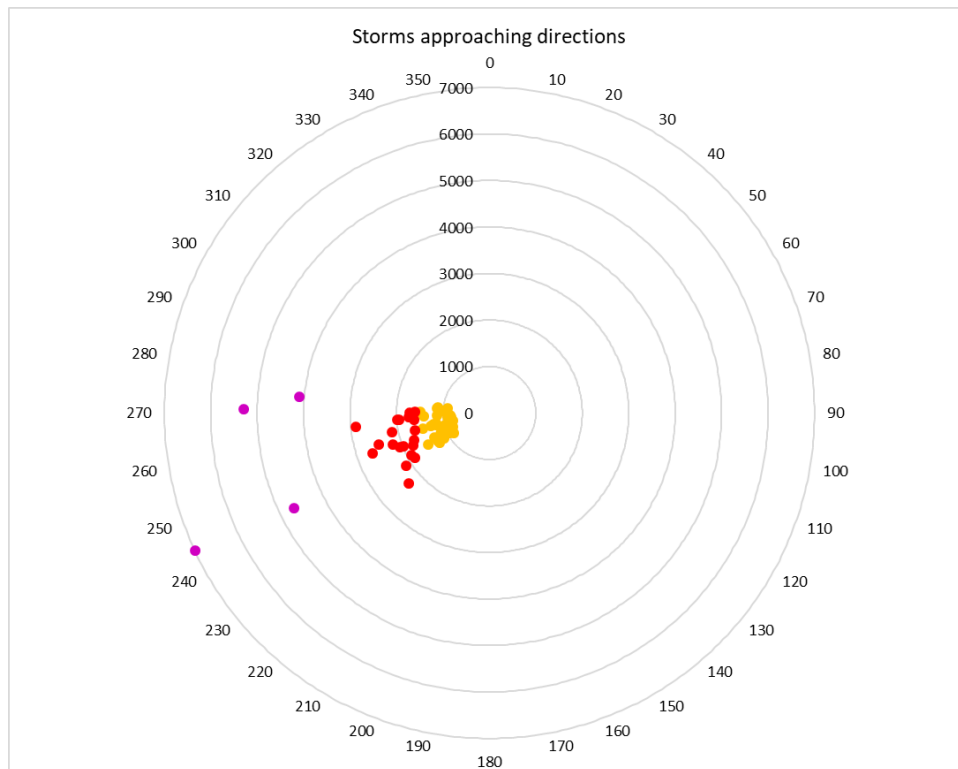


Fig. 3.8: Direzione degli eventi di tempesta di classe III, IV e V in Area Mingardo

### 3.3.3 Dinamica del clima meteo-marino in Area Sinni

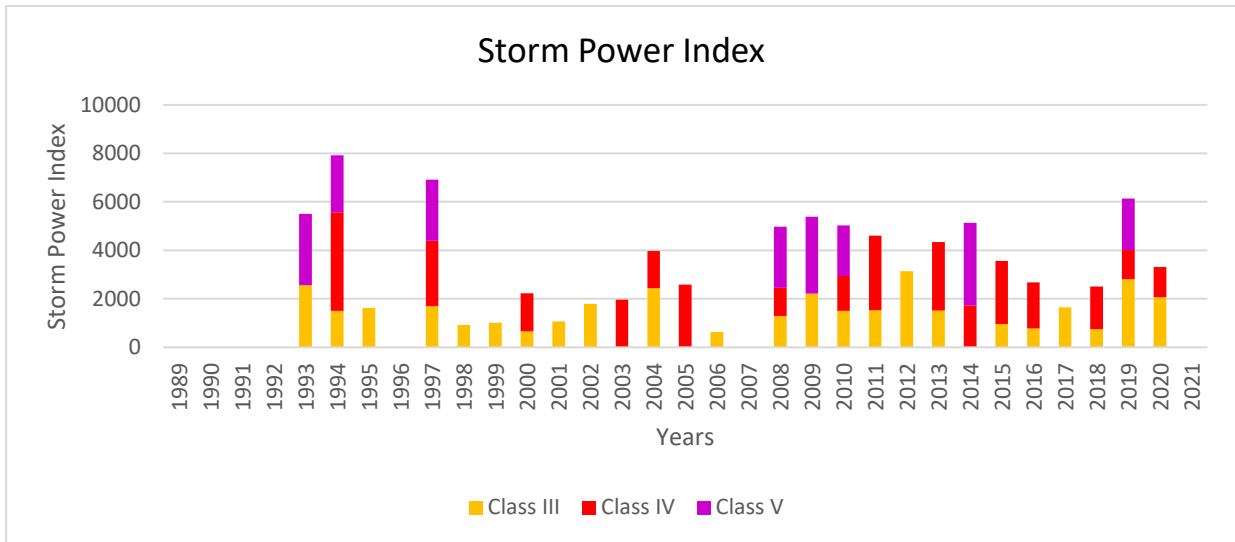
La zona costiera oggetto di studio si colloca all'interno del settore compreso tra i 310° e i 110°N.

Esaminando il dataset ottenuto per l'Area Sinni, per il periodo che va dal 1989 al 2021, sono stati individuati 409 eventi di mareggiata.

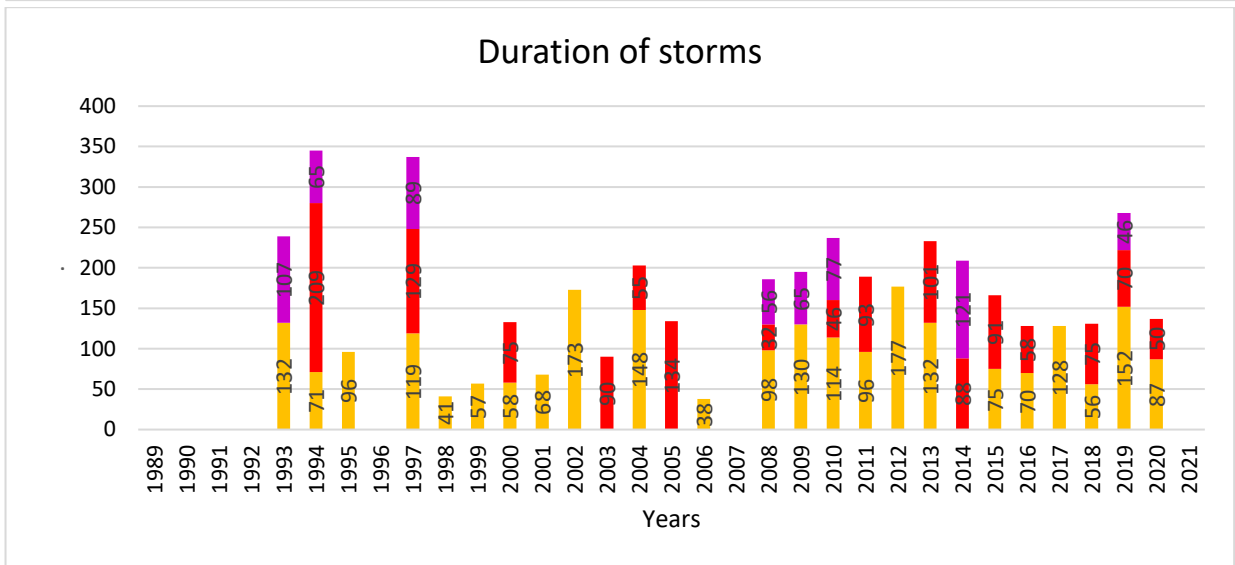
Attraverso l'equazione proposta da Dolan e Davis (1992) sono stati classificati, in base all'energia, tutti gli eventi di mareggiata individuati. Con il dataset ottenuto e la caratterizzazione del clima meteomarinario attraverso l'utilizzo dello "Storm Power Index" è stato possibile ottenere importanti informazioni riguardo il numero, la durata, la direzione e la potenza degli eventi di mareggiata.

In questo studio, gli anni caratterizzati da un numero elevato e/o una durata estesa annuale di tutte le classi di tempeste non sono stati inclusi come rappresentativi degli anni tempestosi.

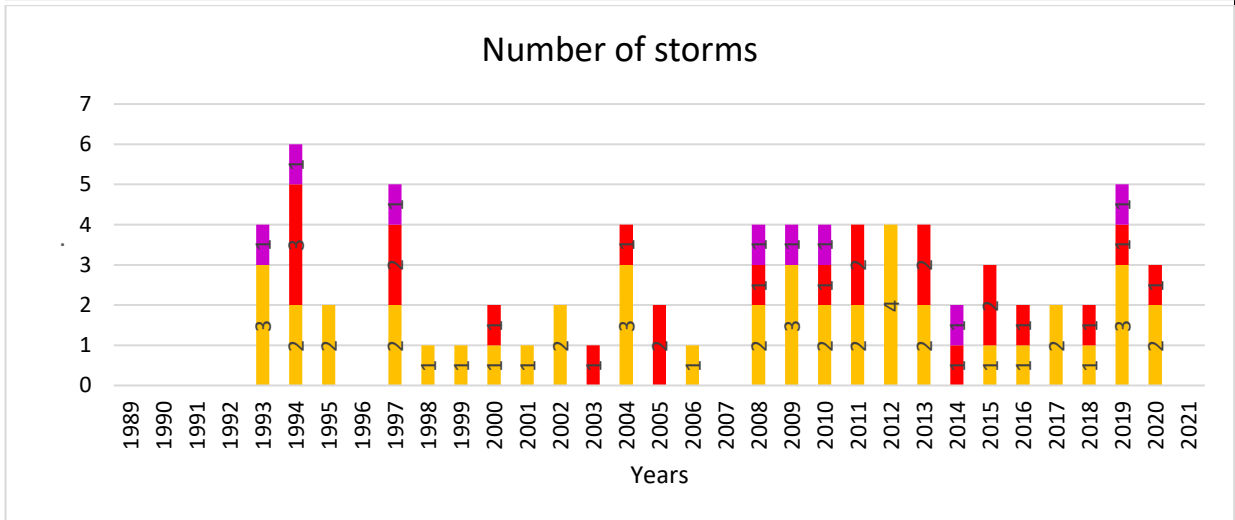
Per ottenere un quadro esplicativo degli eventi che maggiormente possono aver influito sulla morfologia del tratto di costa analizzato, sono stati presi in considerazione solo gli eventi di classi III, IV e V (Fig. 3.9).



A



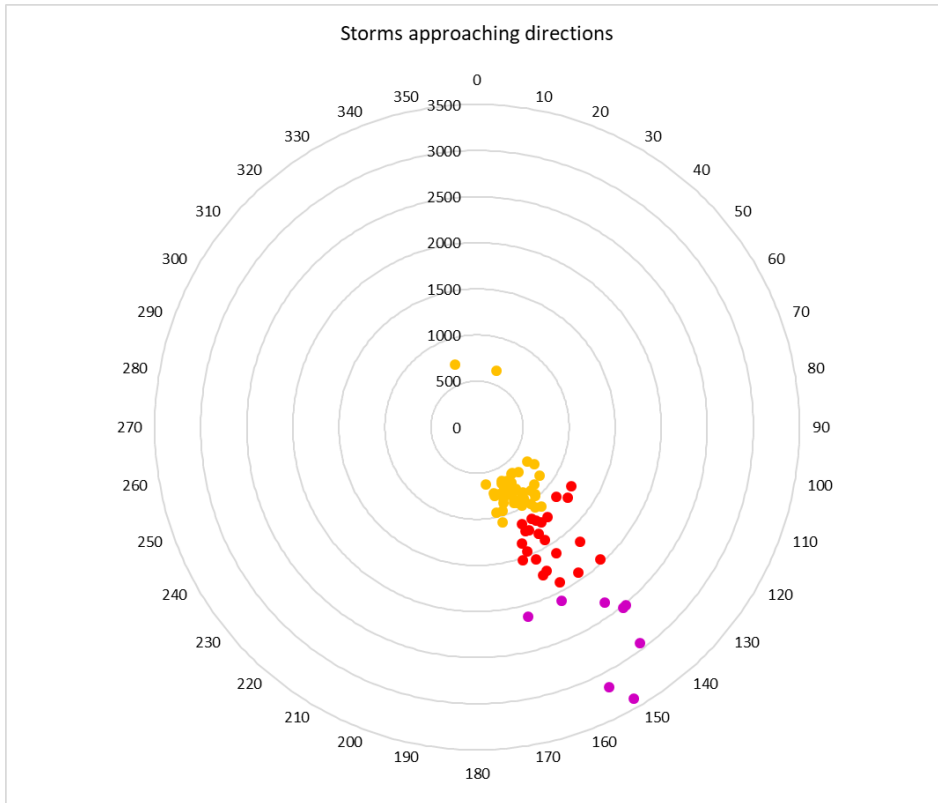
B



C

Figura 3.9: Grafici Storm Power Index. A – valori Storm Power Index; B – Durata in ore di ogni evento; C – Numero di eventi per anno

Si è ritenuto, inoltre, fondamentale indagare sulla direzione degli eventi di mareggiata con classe energetica elevata. La figura 3.11 mostra come la totalità degli eventi di tempesta siano stati registrati nel IV ottante (135-180°N).



*Fig. 3.11: Direzione degli eventi di tempesta di classe III, IV e V in Area Sinni*

### **3.4 Confronto delle caratteristiche meteo-marine ricostruite per le tre aree di studio**

Attraverso l'analisi dettagliata del clima meteo marino è stato possibile delineare con precisione le variazioni climatiche e le tendenze che caratterizzano le regioni costiere considerate.

In particolare, i risultati ottenuti per l'Area Biferno, mostrano pochi eventi di mareggiata concentrati principalmente tra 1992 e il 1999. Il fattore interessante osservato durante l'analisi sull'area molisana, riguarda la stagionalità degli eventi: molti, considerando anche gli eventi di classe I e II, sono stati registrati anche durante la stagione estiva, tra questi spicca un evento di classe V registrato nel luglio 2005.

L'analisi effettuata in Area Mingardo, mostra chiaramente un'area soggetta a eventi di mareggiata piuttosto importanti, caratterizzati da un'energia elevata dovuta ad altezze d'onda che raggiungono gli 8 metri circa. Gli eventi registrati in Area Mingardo, sono stati registrati principalmente durante la stagione invernale, in particolare, una maggiore concentrazione è stata registrata tra i mesi di novembre e marzo.

L'analisi condotta nell'Area Sinni, invece, ha rivelato la presenza di eventi di mareggiata caratterizzati da una classe energetica elevata, principalmente a causa della loro lunga durata. Questi eventi, che si verificano principalmente durante la stagione invernale, possono protrarsi per periodi prolungati fino a 120 ore consecutive.

Questo approccio analitico ha fornito una panoramica esaustiva delle condizioni ambientali a cui sono soggette le aree prese in esame offrendo una base solida per una caratterizzazione delle stesse e una più completa comprensione delle dinamiche che influiscono sulla loro morfologia costiera.

## Bibliografia citata

- ALMEIDA L., VOUSDOKAS M., FERREIRA Ó., RODRIGUES B., MATIAS A. (2012) – *Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in southern Portugal*. *Geomorphology*, **12**, 143–144, 3.
- ANFUSO G.; RANGEL-BUITRAGO N.; CORTÉS-USECHE C.; CASTILLO B.I.; GRACIA F. (2016) – *Characterization of storm events along the Gulf of Cadiz (eastern central Atlantic Ocean)*. *Int. J. Climatol*, **36**, 3690–3707.
- ANTONIOLI F., SILENZI A. (2007) – *Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane*. *Quaderni della Società Geologica Italiana*, 2, 1-29.
- AUCELLI P.P.C., DE PIPPO T., IANNANTUONO E. & ROSSKOPF C.M. (2007) – *Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Italia meridionale)*. *Studi Costieri*, **13**, 75-92.
- BOCCOTTI, P. (2000) – *Wave Mechanics for Ocean Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, Vol 64.
- BUCCINO M., DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., DEL GIUDICE G., ROSSKOPF C.M. (2020) – *A medium-term study of Molise coast evolution based on the one-line equation and “Equivalent Wave” concept*. *Water*, **12**, 2831.
- CONTINI P., DE GIROLAMO P., (1998) – *Impatto Morfologico di Opere a Mare: Casi di Studio (Morphological Impact of Structures at Sea: Case Studies)*. In: *Atti VIII Convegno AIOM, Associazione di Ingegneria Offshore e Marina /Proceedings of 8th Conference of the Offshore and Marine Engineering Association, Lerici, Italy*, pp. 85–95.
- DOLAN R., DAVIS R.E. (1992) – *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms*. *J. Coast. Res.* 1992, **8**, 840–853.
- DOLAN R., DAVIS R.E. (1994) – *Coastal storm hazards*. *Journal Coastal of Research SI* **12**, 103–114.
- HASSELMANN, K., BARNETT T.P., BOUWS E., CARLSON H., CARTWRIGHT D.E., ENKE K., EWING J.A., GIENNAP H., HASSELMAN D.E., KRUSEMAN P., MEERBURG A., MULLER P., OLBERS D.J., RICHTER K., SELL W., WALDEN H. (1973) – *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project*. *Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg*.
- JENKS, G.; CASPALL, F. (1971) – *Error on Choroplethic Maps: Definition, Measurement. Reduction*. *Ann. Assoc. Am. Geogr*, **61**, 217–244.
- MENDOZA E.T., JIMÉNEZ J.A. (2008) – *Clasificación de tormentas costeras para el litoral catalán (Mediterráneo NO)*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, **23**, 21–32.
- MENDOZA E., JIMENEZ J., MATEO J., SALAT J. (2011) – *A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean)*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, **11**, 2453–2462.
- MOLINA R., MANNO G., LO RE C., ANFUSO G., CIRAOLO G., (2019) – *Storm energy flux Characterization along the Mediterranean coast of Andalusia (Spain)*. *Water*, **11**, 509.

- PRANZINI E. (2004) – *La forma delle coste: geomorfologia costiera impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, Bologna, Italy.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G. (2011) – *Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts*. *Earth Surf. Processes Landf*, **36**, 1997–2010.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G. (2013) – *Winter wave climate, storms and regional cycles: The SW Spanish Atlantic coast*. *Int. J. Climatol.* **33**, 2142–2156.
- SAVILLE T. (1954) – *The effect of fetch width on wave generation*. US Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board. Technical Memorandum n. 70.

## Capitolo IV - Analisi delle caratteristiche morfo-sedimentarie del sistema spiaggia

### 4.1 Materiali e metodi

#### 4.1.1 I rilievi topografici

Lo strumento utilizzato per i rilievi topografici in questione è il DGPS (Differential Global Positioning System) GNSS R6 Trimble (fig. 4.1), uno strumento che utilizza la tecnologia avanzata per migliorare la precisione del posizionamento satellitare fornito dal Global Positioning System (GPS).



Fig. 4.1: DGPS GNSS R6 Trimble

Il GPS è ampiamente utilizzato per determinare la posizione geografica di un oggetto o di una persona utilizzando una rete di satelliti in orbita intorno alla Terra. (Rutigliano et al., 2003) Il DGPS è dotato di una stazione di riferimento con un'antenna fissa (master), dotata di un ricevitore GPS ad alta precisione, che calcola continuamente la sua posizione esatta utilizzando i segnali dai satelliti GPS, un ricevitore GPS mobile (rover) che riceve i segnali dai satelliti GPS e li corregge con i segnali provenienti dalla stazione di riferimento e un controller capace di comunicare con le antenne via Bluetooth o via cavo. Il ricevitore mobile utilizza le correzioni inviate dalla stazione di riferimento per correggere la posizione calcolata in base ai segnali GPS, questo consente al ricevitore mobile di determinare la sua posizione con una maggiore precisione rispetto ad un ricevitore GPS standard. Queste correzioni riducono significativamente gli errori di posizionamento, consentendo di ottenere precisioni di posizionamento dell'ordine di centimetri o addirittura millimetri, a seconda della qualità del sistema DGPS e della densità delle stazioni di riferimento.

#### 4.1.2. Metodologia di rilievo per le aree di studio

Per lo studio delle aree prese in esame, si è dapprima provveduto alla definizione del criterio di suddivisione delle singole aree.

Per l'Area Biferno, si è deciso di effettuare i rilievi per i profili di spiaggia e per la raccolta dei campioni sedimentari, utilizzando il criterio definito in Iannantuono (2007). Sono state dunque utilizzate, laddove possibile, le stesse ubicazioni dei profili effettuati nell'area durante studi precedenti (Fig. 4.2).



*Fig. 4.2: Collocazione dei profili topografici in Area Biferno*

Per lo studio in Area Mingardo, la scelta è stata quella di posizionare i transetti a distanza di 500 metri l'uno dall'altro, per un totale di 8 profili (Fig. 4.3).



Fig. 4.3: Collocazione dei profili topografici in Area Mingardo

Per l'Area Sinni, inizialmente, lo studio preliminare aveva stabilito la posizione dei transetti con un criterio di distanza di 1 chilometro l'uno dall'altro. Tuttavia, durante la fase di rilevamento in campo è emersa l'opportunità di spostare alcuni transetti poiché le variazioni morfologiche osservate risultavano essere più interessanti per l'analisi. In totale, sono stati definiti 9 transetti per lo studio dell'area (Fig. 4.4).



Fig. 4.4: Collocazione dei profili topografici in Area Sinni

### 4.1.3 L'analisi granulometrica

L'analisi granulometrica si avvale di procedure di indagine statistiche indispensabili per la classificazione dei sedimenti offrendo l'opportunità non solo di caratterizzare una spiaggia in base alla dimensione media dei sedimenti e in rapporto alla variazione spaziale delle dimensioni dei granuli, ma anche di valutare le variazioni della dimensione dei granuli di sabbia lungo la costa nel tempo, di rivelare cambiamenti nella

distribuzione delle dimensioni dei granuli durante eventi di erosione o deposizione contribuendo a comprendere le cause di tali processi, oltre a consentire un'accurata modellazione della dinamica costiera inserendo i dati granulometrici in modelli matematici che simulano la dinamica costiera. Le analisi granulometriche, dunque, forniscono dati fondamentali per comprendere la dinamica, la composizione e la morfologia delle coste, informazioni essenziali per la gestione, la prevenzione dell'erosione e la conservazione dell'ambiente marino.

In questa tesi, sono stati considerati diversi parametri significativi:

- i. **Media:** Questo valore rappresenta il centro di gravità della distribuzione granulometrica ed è influenzato dalla presenza di granuli con diametri maggiori. Indica il punto medio della distribuzione.
- ii. **Moda:** La moda indica la classe granulometrica che compare più frequentemente nel sedimento. Questo parametro offre un'indicazione sulla prevalenza delle dimensioni dei granuli.
- iii. **Media, Mediana e Moda come indicatori di tendenza centrale:** Questi tre parametri forniscono informazioni sulla centralità della distribuzione granulometrica. In una curva asimmetrica, i loro valori possono discostarsi. Solo in caso di perfetta simmetria, coincidono.
- iv. **Diametro medio:** Questo valore rappresenta una media delle dimensioni dei granuli nel campione. Il calcolo coinvolge tre percentili ( $\phi_{16}$ ,  $\phi_{50}$  e  $\phi_{84}$ ), utilizzati per avvicinarsi al valore reale del diametro medio. Questo approccio fornisce una rappresentazione più accurata delle dimensioni dei granuli.
- v. **Deviazione standard o classazione ( $\sigma$ ):** La deviazione standard indica quanto la distribuzione granulometrica si discosta dal valore del diametro medio. Riflette se il sedimento è composto da poche o molte classi granulometriche. Questo parametro esprime sia i processi selettivi operati dal mezzo di trasporto e sedimentazione che il grado di mescolamento di sedimenti di diverse origini.

- vi. **Coefficiente di cernita:** Questo coefficiente esprime la capacità selettiva del mezzo di trasporto, indicando la sua abilità nel prelevare e/o depositare granuli di dimensioni poco variabili. Un valore basso del coefficiente indica una maggiore capacità di cernita, ovvero il mezzo è in grado di separare granuli di diverse dimensioni in modo più efficace, lasciando indietro quelli più grossolani o portando avanti quelli più fini.
- vii. **Coefficiente di asimmetria o di Skewness (Sk):** Questo coefficiente evidenzia l'omogeneità della popolazione granulometrica, cioè se i valori sono distribuiti in modo equo da una parte e dall'altra rispetto alla posizione centrale. Indica la concentrazione di sedimenti verso classi granulometriche di dimensioni maggiori o minori, rappresentando asimmetria negativa o positiva. Valori positivi indicano la presenza di una coda di materiali fini, mentre valori negativi indicano la presenza di una coda di materiali grossolani. Una curva simmetrica ha un coefficiente di asimmetria uguale a zero. Valori molto elevati indicano una curva bimodale. Questo indice varia tra -1 e 1, rappresentando il livello di energia: valori negativi indicano un alto livello di energia e quindi una probabilità di erosione più elevata; valori positivi indicano un basso livello di energia e una probabilità più alta di accrescimento della spiaggia.
- viii. **Coefficiente di appuntinamento o Kurtosis (Kg):** Questo coefficiente è una misura dell'appuntinamento della distribuzione di frequenza e valuta il rapporto tra la dispersione nella parte centrale e quella nelle code. Si distingue una distribuzione leptocurtica e una platicurtica. La distribuzione leptocurtica ha una curva di frequenza più appuntita rispetto ad una normale, ciò indica che ci sono più dati concentrati nella parte centrale rispetto alle code, suggerendo una maggiore concentrazione di granuli attorno alla media. La distribuzione platicurtica presenta, invece, una curva di frequenza più piatta rispetto a una normale. In questo caso, la dispersione dei dati è uniforme su tutta la curva di frequenza, indicando una maggiore variabilità nelle dimensioni dei granuli. Un valore di 1 per il coefficiente di appuntinamento è indicativo di una distribuzione di frequenza normale. Valori superiori a 1 indicano una distribuzione leptocurtica, mentre valori inferiori a 1 indicano una distribuzione platicurtica. L'analisi del coefficiente di appuntinamento fornisce informazioni sulla forma della distribuzione granulometrica, contribuendo a comprendere la variabilità nelle dimensioni dei granuli e la natura dell'ambiente sedimentario.

L'utilizzo combinato di questi parametri fornisce una visione completa della distribuzione granulometrica, consentendo una classificazione accurata dei sedimenti e offrendo importanti *insights* sui processi geologici e idrologici che hanno influenzato la formazione del deposito sedimentario. La

diversità di questi indicatori contribuisce a una comprensione più approfondita delle caratteristiche dei sedimenti esaminati.

#### **4.1.3.1 Metodologia di analisi**

Ai fini della caratterizzazione granulometrica delle tre aree di studio, sono stati prelevati campioni di sedimento di almeno 500g. Per ogni transetto, sono stati raccolti 2 campioni, uno sulla spiaggia emersa e uno sul solco di battigia.

In laboratorio, una parte di almeno 200 g di ogni campione è stata pesata con precisione utilizzando un bilancino, fornendo così il peso umido del campionamento. Successivamente, i campioni sono stati posti in un forno a 70°C per 24 ore e successivamente riposti in appositi contenitori. I sedimenti pesati sono stati successivamente trattati con acqua ossigenata (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), aggiungendone una quantità specifica per ogni contenitore, al fine di eliminare il sale marino e i residui di materiale organico.

Dopo l'evaporazione dell'acqua ossigenata, i campioni sono stati lavati in un setaccio con una maglia di 63 µm, utilizzando acqua dolce per rimuovere le particelle di sedimenti più sottili che potrebbero causare grumi e interferire con l'elaborazione dei dati campionati. Successivamente, i campioni sono stati nuovamente asciugati in forno e pesati per ottenere il peso secco.

La fase successiva è consistita nella setacciatura effettiva. I setacci sono stati sovrapposti, partendo da quello con maglia più fine (63 µm) fino a quello con maglia di 4 mm, i setacci intermedi hanno maglie di diametro decrescente (2,8 mm, 2 mm, 1,4 mm, 0,710 mm, 500 µm, 355 µm, 250 µm, 180 µm, 125 µm, 90 µm). Il contenuto dei campioni è stato versato nei setacci e, questi, sono stati posti in un setacciatore che li ha sottoposti a vibrazioni orizzontali e verticali per circa 30 minuti, permettendo ai granuli di distribuirsi nei vari setacci in base alle loro dimensioni (Fig. 4.5).



Fig. 4.5: Fasi principali dell'analisi granulometrica: A Lavaggio - B Setacciatura – C Peso e suddivisione.

I campioni ottenuti da ogni setaccio sono stati pesati singolarmente con il bilancino di precisione e riposti in bustine appuntandone il peso, il numero del transetto e il diametro della maglia del setaccio di riferimento.

I dati ottenuti dall'analisi granulometrica sono stati poi elaborati utilizzando un software statistico utilizzato per la classificazione dei sedimenti. Questa elaborazione ha generato una curva cumulativa, un istogramma di frequenza e diversi parametri statistici come risultato.

Per la classificazione delle sabbie è stata utilizzata la scala granulometrica definita da Wentworth (1922) (Tab. 4.1).

<b>Intervallo dimensionale</b>	<b>Classi granulometriche</b>
> 256 <u>mm</u>	Massi (Boulder)
256 – 64 mm	Ciottoli (Cobble)
64 – 4 mm	Ghiaia (Pebble)
4 – 2 mm	Ghiaia molto fine (Granule)
2 – 1 mm	Sabbia molto grossolana (Very coarse sand)
1 - 1/2 mm	Sabbia grossolana (Coarse sand)
1/2 - 1/4 mm	Sabbia media (Medium sand)
1/4 - 1/8 mm	Sabbia fine (Fine sand grain)
1/8 – 1/16 mm	Sabbia molto fine (Very fine sand grain)
1/16 – 1/256 mm	Limo (Silt)
< 1/256 mm	Argilla (Clay particle)

Tab. 4.1: Scala granulometrica di Wentworth (1922)

#### 4.1.3.2 Risultati dell'analisi granulometrica in Area Biferno

Per l'analisi granulometrica dei sedimenti in Area Biferno, sono stati raccolti 2 campioni di sedimento, uno sulla spiaggia emersa e uno sul solco di battigia, su ogni transetto, per un totale di 10 campioni di sedimento per ogni campagna di rilievo.

I campioni sedimentologici prelevati hanno consentito di caratterizzare la granulometria delle spiagge prese in esame.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nella tabella 4.2 riportata di seguito:

n° campione	Granulo medio		Coefficiente di cernita		Coefficiente di asimmetria		Coefficiente di appuntimento	media	mediana	deviazione standard
	$M\phi$	$M\phi$	$\sigma\phi$	$\sigma\phi$	$Sk\phi$	$Sk\phi$	$kG$	mm	mm	
P1SP	0.580987641	sabbia grossolana	0.27	estremamente classato (cernito)	-0.194743353	simmetrica negativa - grossolana	1.507754843	0.61072	0.475	0.396014392
P1B	0.409938941	sabbia media	0.13	estremamente classato (cernito)	-0.067996102	simmetrica negativa - grossolana	1.067167266	0.414018	0.392	0.161909393
P2SP	0.665650339	sabbia grossolana	0.36	ben classato	-0.227217224	simmetrica negativa - grossolana	1.240229915	0.647794	0.502	0.423145938
P2B	0.364158246	sabbia media	0.11	estremamente classato (cernito)	-0.124010446	simmetrica negativa - grossolana	1.259268887	0.379233	0.337	0.164128321
P3SP	0.490555679	sabbia media	0.17	estremamente classato (cernito)	-0.121482947	simmetrica negativa - grossolana	1.727034308	0.547695	0.449	0.320126116
P3B	4.096193734	ciottolo	3.35	non classato	0.322643607	simmetrica positiva-fine	0.524303862	4.474508	6.255	3.396199496
P4SP	0.346942313	sabbia media	0.13	estremamente classato (cernito)	-0.109591331	simmetrica negativa - grossolana	1.02618942	0.360027	0.318	0.169412752
P4B	0.471494939	sabbia media	0.25	estremamente classato (cernito)	-0.124676317	simmetrica negativa - grossolana	1.232930272	0.528483	0.409	0.390568257
P5SP	0.272797937	sabbia media	0.07	estremamente classato (cernito)	-0.032105853	simmetrica negativa - grossolana	1.018171409	0.282882	0.268	0.093405792
P5B	0.254635604	sabbia media	0.06	estremamente classato (cernito)	-0.155576863	simmetrica negativa - grossolana	0.81324322	0.252451	0.236	0.064140419

Tab. 4.2: elenco e caratterizzazione sedimentologica dei campioni di spiaggia e battigia prelevati in Area Biferno

Dalla lettura della tabella 4.2 è possibile classificare le spiagge dell'Area Biferno tra quelle a prevalente componente sabbiosa con una componente tessiturale compresa tra le sabbie medie e grossolane (Fig. 4.6).

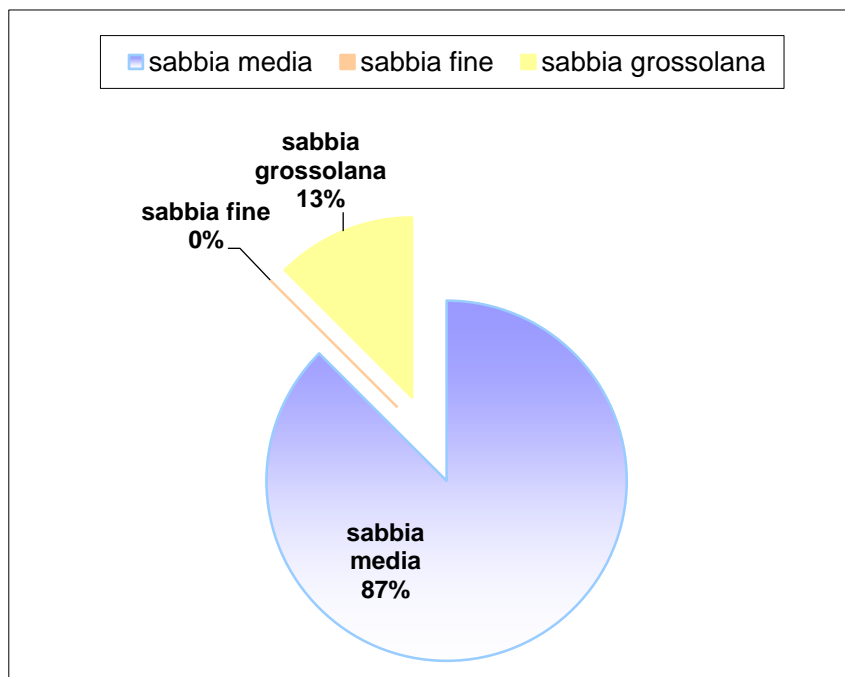


Fig. 4.6: Diagramma di sintesi dell'analisi granulometrica in Area Biferno relativa alla componente sabbiosa

#### 4.1.3.3 Risultati dell'analisi granulometrica in Area Mingardo

Per l'analisi granulometrica dei sedimenti in Area Biferno, sono stati raccolti 2 campioni di sedimento, uno sulla spiaggia emersa e uno sul solco di battigia, su ogni transetto, per un totale di 16 campioni di sedimento per ogni campagna di rilievo.

I campioni sedimentologici prelevati hanno consentito di caratterizzare la granulometria delle spiagge prese in esame.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nella tabella 4.3 riportata di seguito:

n° campione	Granulo medio		Coefficiente di cernita		Coefficiente di asimmetria		Coefficiente di appuntamento	media	mediana	deviazione standard
	$M\phi$	$M\phi$	$\sigma\phi$	$\sigma\phi$	$Sk\phi$	$Sk\phi$	$kG$	mm	mm	
P1SP	4.558424159	ciottolo	1.89	poco classato	0.180232791	simmetrica negativa - grossolana-	0.864040486	4.464184	3.877	2.068663154
P1B	4.482091088	ciottolo	1.86	poco classato	-0.20459491	simmetrica negativa - grossolana-	0.88650402	4.387079	3.722	2.046264658
P2SP	1.068527932	sabbia molto grossolana	0.71	discretamente classato	0.329729506	simmetrica negativa - grossolana-	0.849745368	1.085401	0.599	0.9166008
P2B	2.977883267	granulo	2.50	scarsissimamente classato	0.270878698	simmetrica negativa - grossolana-	0.987108533	2.757293	1.624	2.745668094
P3SP	3.221810805	granulo	2.81	non classato	-0.38214326	simmetrica negativa - grossolana-	2.029002334	2.521097	1.075	2.940448324
P3B	1.81987556	sabbia molto grossolana	1.10	mediocrementemente classato	0.080679572	simmetrica negativa - grossolana-	2.546806855	2.123088	1.642	1.974863468

<b>P4SP</b>	1.2476642	sabbia molto grossolana	0.75	discretamente classato	- 0.160653797	simmetrica negativa - grossolana-	2.418492987	1.882427	1.008	2.352112843
<b>P4B</b>	3.440792814	granulo	2.49	scarsissimamente classato	- 0.302046186	simmetrica negativa - grossolana-	0.95768939	3.16546	1.938	2.695609688
<b>P5SP</b>	0.686186889	sabbia grossolana	0.34	estremamente classato (cernito)	- 0.212788906	simmetrica negativa - grossolana-	1.473430516	0.669878	0.543	0.411588317
<b>P5B</b>	4.084739858	ciottolo	2.99	non classato	- 0.203750141	simmetrica negativa - grossolana-	0.573533353	3.909292	2.867	3.093031502
<b>P6SP</b>	3.178279212	granulo	2.72	non classato	- 0.404669589	simmetrica negativa - grossolana-	2.253522911	2.481832	0.974	2.902361371
<b>P6B</b>	4.164869616	ciottolo	2.38	scarsissimamente classato	- 0.193179586	simmetrica negativa - grossolana-	0.664128357	4.052741	3.244	2.506222551
<b>P7SP</b>	6.669401806	ciottolo	0.90	mediocrementemente classato	4.90811E-16	simmetrica positiva-fine	2.253621267	5.966307	6.669	2.514655028
<b>P7B</b>	5.998303154	ciottolo	1.40	mediocrementemente classato	0.040901968	simmetrica positiva-fine	0.757903487	6.011669	6.113	1.470261666
<b>P8SP</b>	4.026171892	ciottolo	3.43	non classato	0.331851757	simmetrica positiva-fine	0.504615834	4.405616	6.303	3.504096634
<b>P8B</b>	4.558420049	ciottolo	2.66	non classato	0.156116876	simmetrica positiva-fine	0.663949602	4.705888	5.388	2.723807979

Tab. 4.3: elenco e caratterizzazione sedimentologica dei campioni di spiaggia e battigia prelevati in Area Mingardo

Dalla lettura della tabella 4.3 è possibile classificare le spiagge dell'area compresa tra la foce del Fiume Mingardo e il promontorio di Cala del Cefalo tra quelle a prevalente componente ciottolosa (Fig. 4.7).

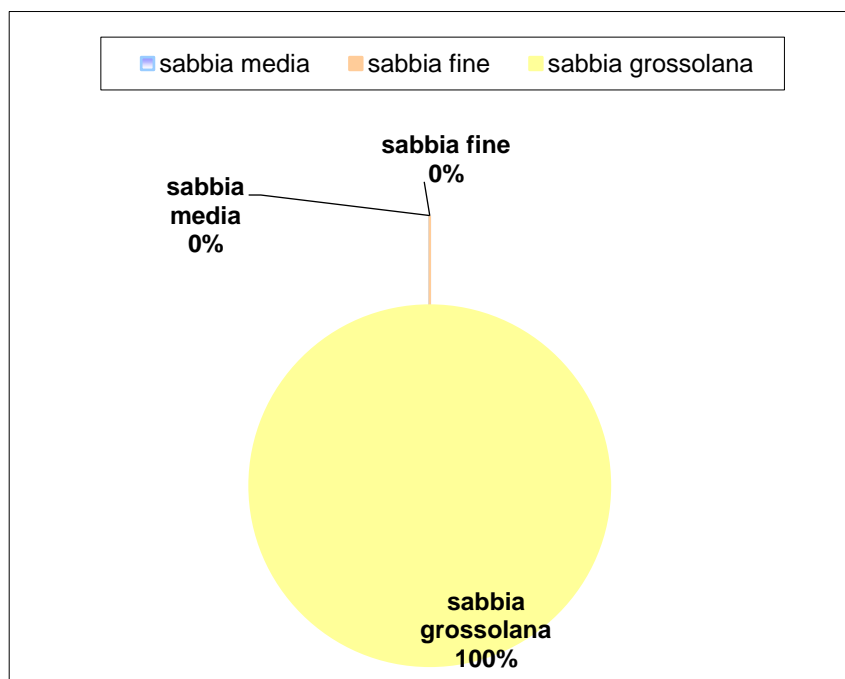


Fig.4.7: Diagramma di sintesi dell'analisi granulometrica in Area Mingardo relativa alla componente sabbiosa

#### 4.1.3.4 Risultati dell'analisi granulometrica in Area Sinni

Per l'analisi granulometrica dei sedimenti in Area Biferno, sono stati raccolti 2 campioni di sedimento, uno sulla spiaggia emersa e uno sul solco di battigia, su ogni transetto, per un totale di 10 campioni di sedimento per ogni campagna di rilievo.

I campioni sedimentologici prelevati hanno consentito di caratterizzare la granulometria delle spiagge prese in esame.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nella tabella 4.4 riportata di seguito:

n° campione	Granulo medio		Coefficiente di cernita		Coefficiente di asimmetria		Coefficiente di appuntimento	media	mediana	deviazione standard
	M $\phi$	M $\phi$	$\sigma\phi$	$\sigma\phi$	Sk $\phi$	Sk $\phi$	kG	mm	mm	
P1SP	3.520065893	granulo	3.11	non classato	-0.456174962	simmetrica negativa - grossolana-	0.55239019	3.133461	0.682	3.36316098
P1B	0.825243692	sabbia grossolana	0.57	discretamente classato	-0.418750053	simmetrica negativa - grossolana-	14.52753937	1.459131	0.347	2.589723486
P2SP	0.525516833	sabbia grossolana	0.17	estremamente classato (cernito)	-0.128786842	simmetrica negativa - grossolana-	9.181376684	1.214671	0.483	1.970432604
P2B	3.866560358	granulo	3.40	non classato	0.270753716	simmetrica positiva-fine	0.489421759	4.143759	5.708	3.493949472
P3SP	3.704837836	granulo	3.33	non classato	-0.466120595	simmetrica negativa - grossolana-	0.499802955	3.27233	0.600	3.575470942
P3B	3.315669692	granulo	2.84	non classato	-0.321038149	simmetrica negativa - grossolana-	0.754468083	2.990274	1.491	2.975491668
P4SP	3.92893456	granulo	3.40	non classato	0.291236468	simmetrica positiva-fine	0.484936772	4.22251	5.911	3.507833934
P4B	4.353308179	ciottolo	3.11	non classato	0.316769298	simmetrica positiva-fine	0.970889406	4.964473	6.324	3.018274697
P5SP	1.073729791	sabbia molto grossolana	0.79	discretamente classato	-0.40500055	simmetrica negativa - grossolana-	7.597164137	1.550261	0.437	2.478647788
P5B	0.407022241	sabbia media	0.14	estremamente classato (cernito)	-0.125876727	simmetrica negativa - grossolana-	2.535496828	0.498918	0.373	0.3781212
P6SP	6.83	ciottolo	0.80	discretamente classato	0	simmetrica	0.737704918	6.83	6.830	0.833469328
P6B	0.523086153	sabbia grossolana	0.21	estremamente classato (cernito)	-0.196351604	simmetrica negativa - grossolana-	11.6559927	1.409911	0.440	2.546686049
P7SP	0.844412597	sabbia grossolana	0.46	ben classato	-0.3010805	simmetrica negativa - grossolana-	5.321559364	1.504113	0.567	2.29044193
P7B	3.503439236	granulo	3.17	non classato	-0.478986237	simmetrica negativa - grossolana-	0.539059306	3.089853	0.462	3.442070096

<b>P8SP</b>	4.059754374	ciottolo	3.48	non classato	0.358426566	simmetrica positiva- fine	2.122999912	5.140993	6.552	3.261052499
<b>P8B</b>	3.173845563	granulo	2.87	non classato	-0.477096655	simmetrica negativa - grossolana-	10.07535247	2.200253	0.435	3.11193733
<b>P9SP</b>	4.461001709	ciottolo	3.09	non classato	0.346464622	simmetrica positiva- fine	2.19256867	5.283349	6.604	3.089359898
<b>P9B</b>	0.411720743	sabbia media	0.13	estremamente classato (cernito)	-0.052370716	simmetrica negativa - grossolana-	2.298653044	0.487684	0.399	0.310504336

Tab. 4.4: elenco e caratterizzazione sedimentologica dei campioni di spiaggia e battigia prelevati in Area Sinni

Dalla lettura della tabella 4.4 è possibile classificare le spiagge dell'area Sinni tra quelle a prevalente componente ciottolosa. (Fig. 4.8)



Fig.4.8: Diagramma di sintesi dell'analisi granulometrica in Area Sinni relativa alla componente sabbiosa

#### 4.2 Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Biferno

Per comprendere al meglio le caratteristiche morfo-sedimentarie dell'area di studio presa in esame, sono stati realizzati 5 transetti trasversali alla linea di costa (fig. 4.9). Per lo studio dell'area e per il successivo confronto con gli studi precedenti, sono stati utilizzati i profili di spiaggia delineati da Iannantuono (2007). Le campagne di rilievo sono state effettuate a marzo e luglio 2022, e gennaio e marzo 2023.



*Fig. 4.9: Collocazione dei profili topografici in Area Biferno*

Di seguito si propone la descrizione di dettaglio di ogni profilo:

### Profilo 1 Campomarino – Lido Lucio (PB1)

Il profilo B1 è collocato in corrispondenza dello stabilimento balneare “Lido Lucio”, quasi a ridosso del Porto Turistico “Santa Cristina” di Campomarino (Fig. 4.10).



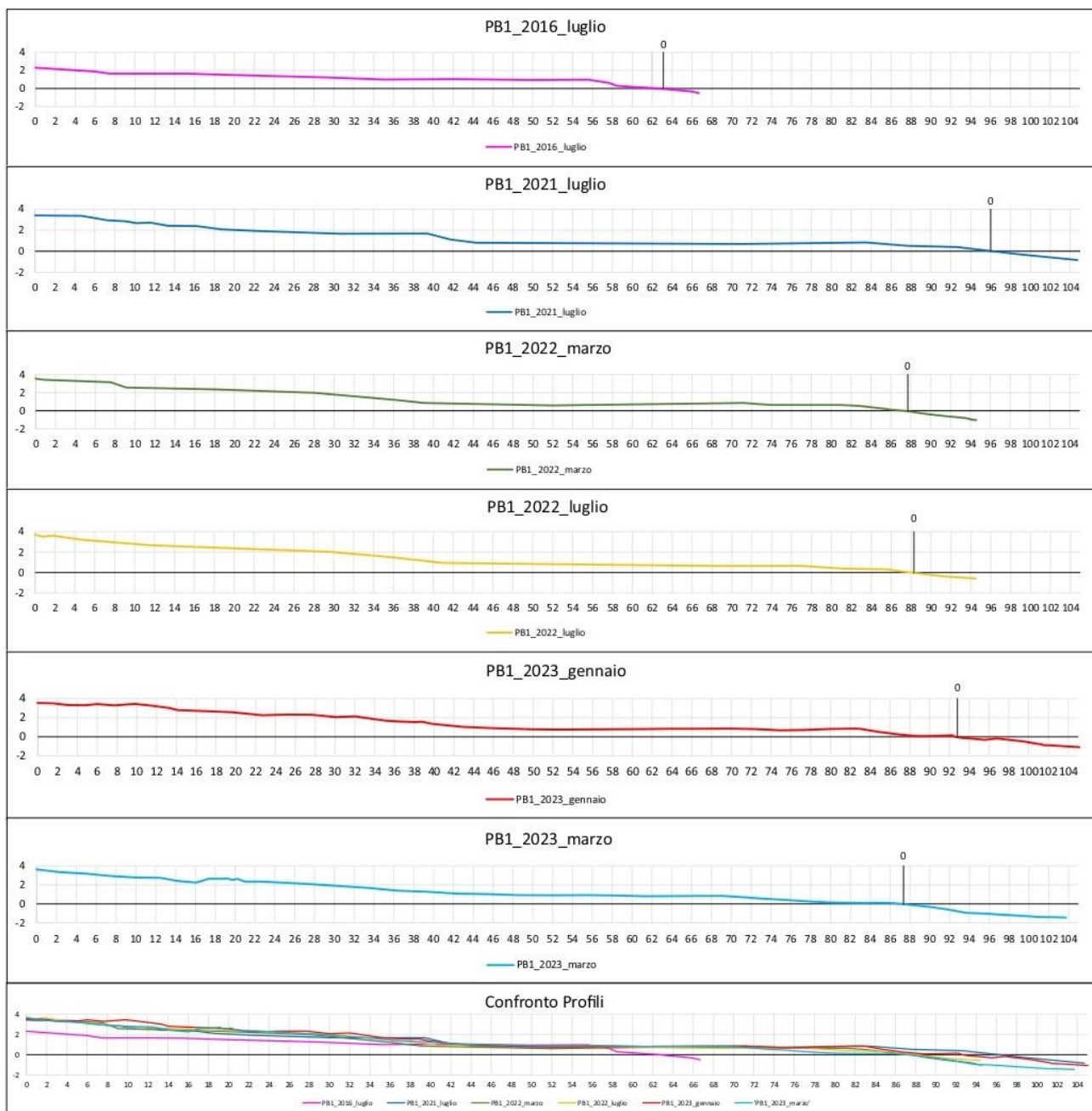
*Fig. 4.10: Collocazione del profilo PB1 - Campomarino - Lido Lucio*

Come si può osservare dalla figura 4.11, il profilo analizzato è caratterizzato da una piccola zona dunale, una spiaggia sabbiosa lunga circa 100 metri e da alcuni breakwaters molto vicini alla linea di riva. I sedimenti su questo tratto di costa sono grossolani sulla spiaggia, con un diametro medio di 0,61 mm e medi sulla battigia, con un diametro di 0,41 mm.



*Fig. 4.11: Area profilo 1 – Area Biferno*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PB1 (Tav. 4.1 e tab. 4.5).



Tav 4.1: Profili trasversali di spiaggia - PB1 (luglio2021-marzo 2023 al posto del confronto profili)

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
lug-16	0.79	9.63	29.4	0.95	3.23	37.61	1.74	4.63
lug-21	0.55	9.32	57.04	1.41	2.46	62.96	1.96	3.11
mar-22	1.14	13.24	46.88	0.74	1.57	55.5	1.88	3.38
lug-22	0.73	9.39	45.73	0.79	1.72	53.48	1.51	2.83
gen-23	1.29	6.51	51.13	1.2	2.34	70.92	2.49	3.51
mar-23	1.35	8.62	51.54	1.48	2.87	67.23	2.83	4.21

Tab. 4.5: Profili trasversali di spiaggia - PB1

L'analisi evidenzia un significativo incremento della larghezza della spiaggia dal 2016 ad oggi.

Tra il 2021 e il 2022 si può osservare una riduzione dell'ampiezza di spiaggia di circa 12 m che, in parte, risulterà recuperata nel 2023, come evidenziano le osservazioni e misure eseguite.

Il fenomeno di deriva sedimentaria, precedentemente osservato nelle ricerche condotte da Aucelli et al. (2017), Di Paola et al. (2020) e Buccino et al. (2020), indica uno spostamento dei sedimenti da nord-est verso sud-ovest. In questo contesto, l'accumulo di sedimenti nell'area risulta essere una diretta conseguenza della vicinanza al porto, il quale agisce come ostacolo al loro movimento.

## Profilo 2 Spiaggia di Campomarino (PB2)

Il profilo B2 è collocato in corrispondenza della Spiaggia di Campomarino (fig. 4.12).



*Fig. 4.12: Collocazione del profilo PB2 - Spiaggia di Campomarino*

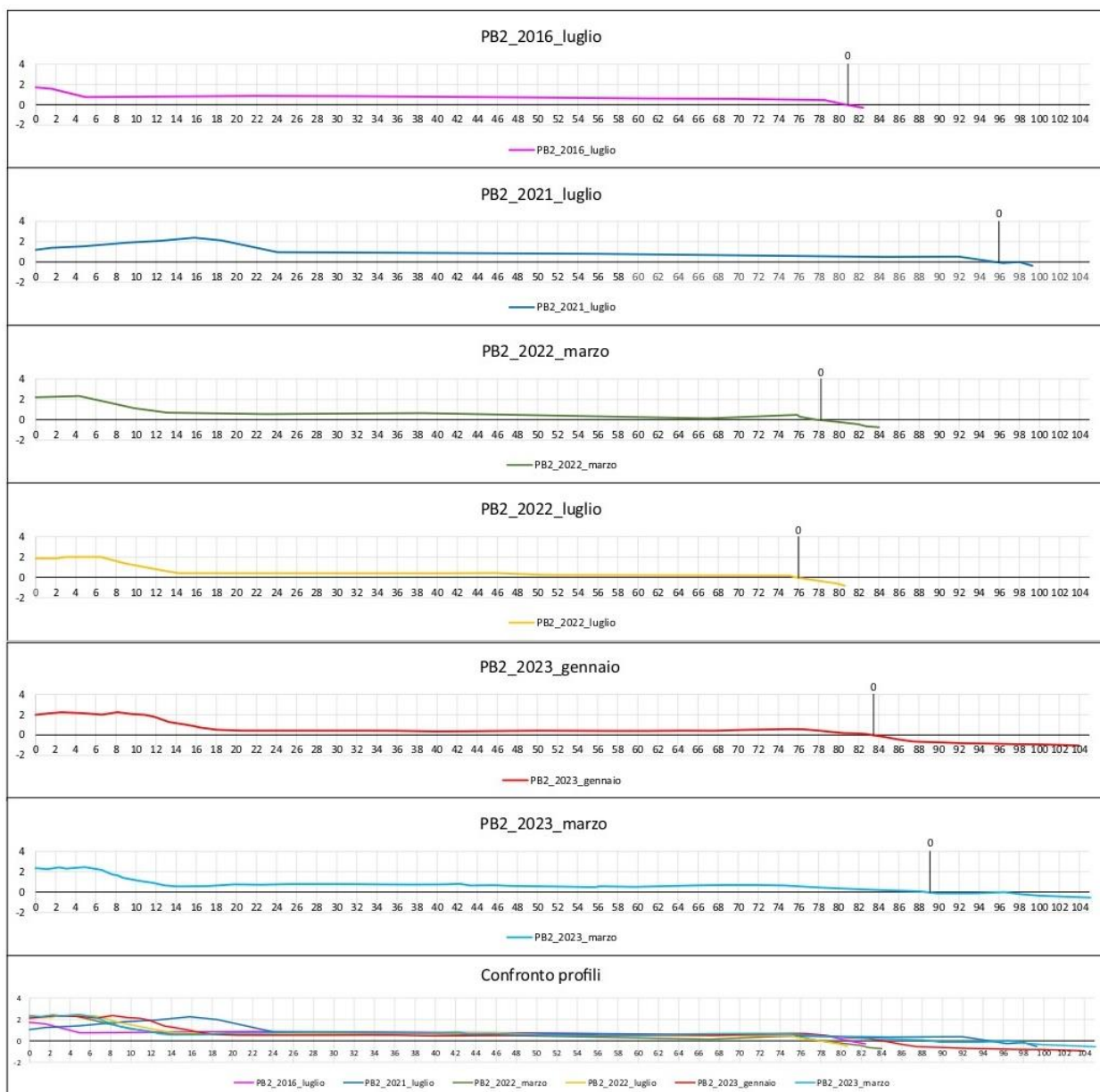
Come si può osservare dalla figura 4.13, il profilo analizzato è caratterizzato da una zona dunale molto ristretta, una spiaggia sabbiosa e da alcuni breakwaters a circa 100 metri dalla linea di riva.

I sedimenti su questo tratto di costa sono grossolani sulla spiaggia, con un diametro medio di 0,64 mm e medi sulla battigia, con un diametro di 0,37 mm.



*Fig. 4.13: Area profilo 2 – Area Biferno*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PB2 (Tav. 4.2 e tab. 4.6).



Tav 4.2: Profili trasversali di spiaggia – PB2

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
lug-16	0.3	16.85	75.7	0.74	0.98	77.45	1.04	1.34
lug-21	0.37	28.43	75.23	1.35	1.8	75.23	1.35	1.8
mar-22	0.74	11.99	64.71	0.82	1.27	70.91	1.43	2.02
lug-22	0.83	16.68	61.36	0.41	0.67	66.33	1.24	1.87
gen-23	1.04	5.03	65.19	0.51	0.79	85.92	1.56	1.81
mar-23	0.6	2.86	61.84	1.02	1.64	108.25	1.62	1.49

Tab. 4.6: Profili trasversali di spiaggia – PB2

L'analisi evidenzia una perdita di circa 15 m nella larghezza della spiaggia dal 2016 ad oggi. In particolare, l'arretramento della spiaggia è stato registrato tra il rilievo effettuato nel 2021 e il rilievo di marzo 2022. Un'ulteriore perdita (-3,35 m) viene registrata nel rilievo effettuato durante il periodo estivo dello stesso anno, che verrà confermato dal rilievo di marzo 2023 nonostante una temporanea ripresa della spiaggia evidenziata dal rilievo di gennaio 2023. In generale, quindi, il profilo PB2 mostra una tendenza all'arretramento.

### Profilo 3 Lido La Playa – Campomarino Lido (PB3)

Il profilo B3 è collocato in corrispondenza dello stabilimento balneare “Lido La Playa” in località Campomarino Lido (Fig. 4.14).



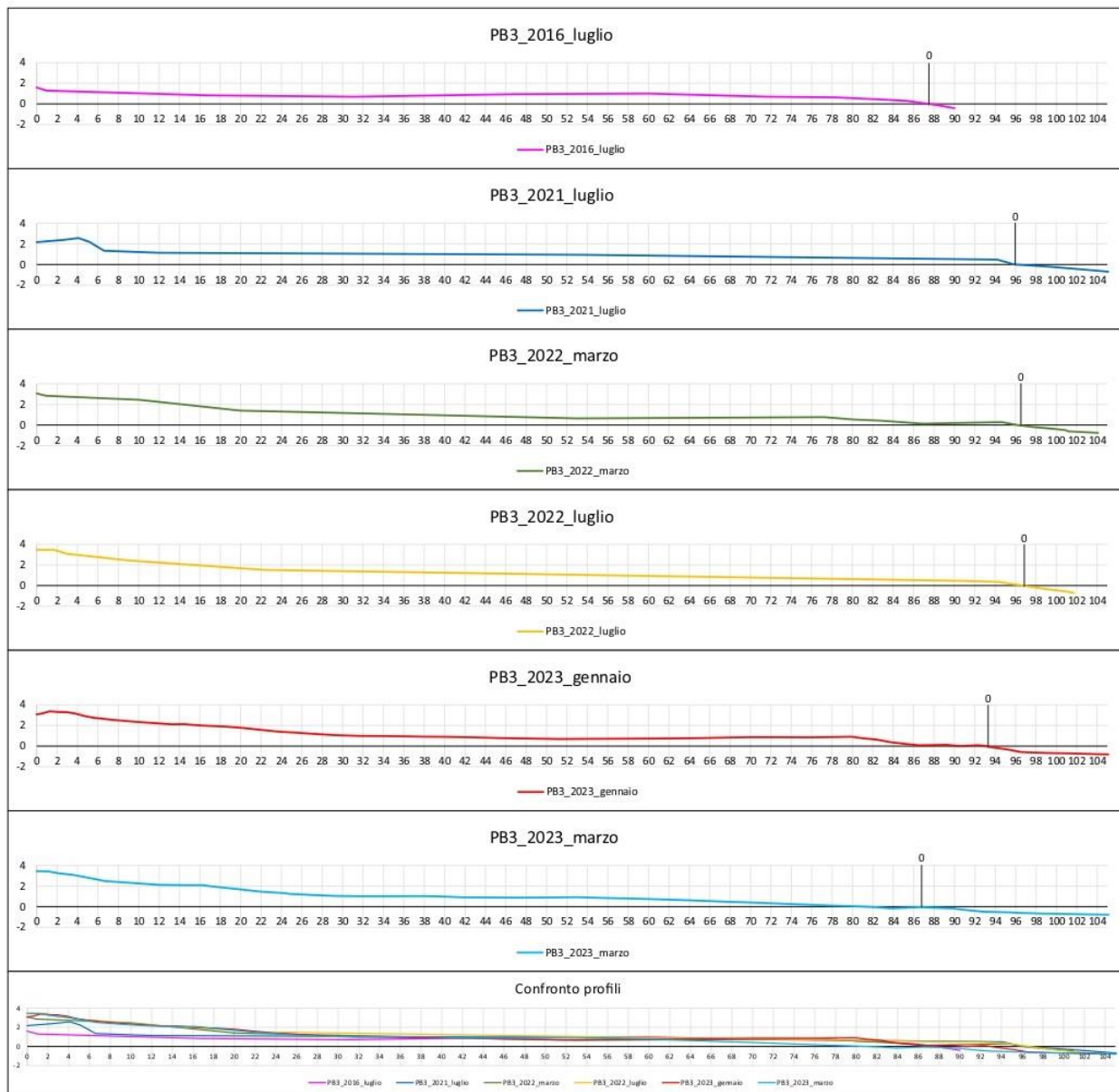
Fig. 4.14: Collocazione del profilo PB3 – Lido La Playa – Campomarino Lido

Come si può osservare dalla figura 4.15, il profilo analizzato è caratterizzato da una zona dunale molto ristretta, una spiaggia sabbiosa e da alcuni breakwaters a circa 100 metri dalla linea di riva. In questo tratto di costa, i sedimenti sono medi sulla spiaggia, con un diametro medio di 0,54 mm e grossolani sulla battigia, con un diametro di 4,47 mm.



Fig. 4.15: Area profilo 3 – Area Biferno

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PB3 (Tav 4.3 e Tab. 4.7).



Tav 4.3: Profili trasversali di spiaggia – PB3

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
lug-16	0.28	16.81	87.32	1.42	1.62	89.01	1.7	1.91
lug-21	0.82	7.77	94.51	1.13	1.19	94.51	1.95	2.06
mar-22	0.73	9.49	76.4	1.42	1.86	84.14	2.16	2.56
lug-22	1.07	14.6	85.43	2.09	2.45	92.77	3.16	3.41
gen-23	1.15	5.2	54.55	0.86	1.58	76.6	2	2.62
mar-23	0.55	1.89	65.97	1.54	2.32	95.01	2.08	2.19

Tab. 4.7: Profili trasversali di spiaggia – PB3

La tabella 4.7 contiene i dati di un profilo che mostra un andamento tendente all'arretramento: dal periodo totale confrontato si può osservare come dal 2016 al 2023 si siano persi circa 20 m di spiaggia. Tra il 2016 si registra un avanzamento di circa 5 m che verrà poi annullato analizzando il periodo successivo. In particolare, tra il 2021 e il 2023 si può osservare un andamento stagionale altalenante tra avanzamento e arretramento, ma dal confronto dei dati di marzo 2022 e marzo 2023 emerge una perdita di ampiezza della spiaggia di circa 11 m.

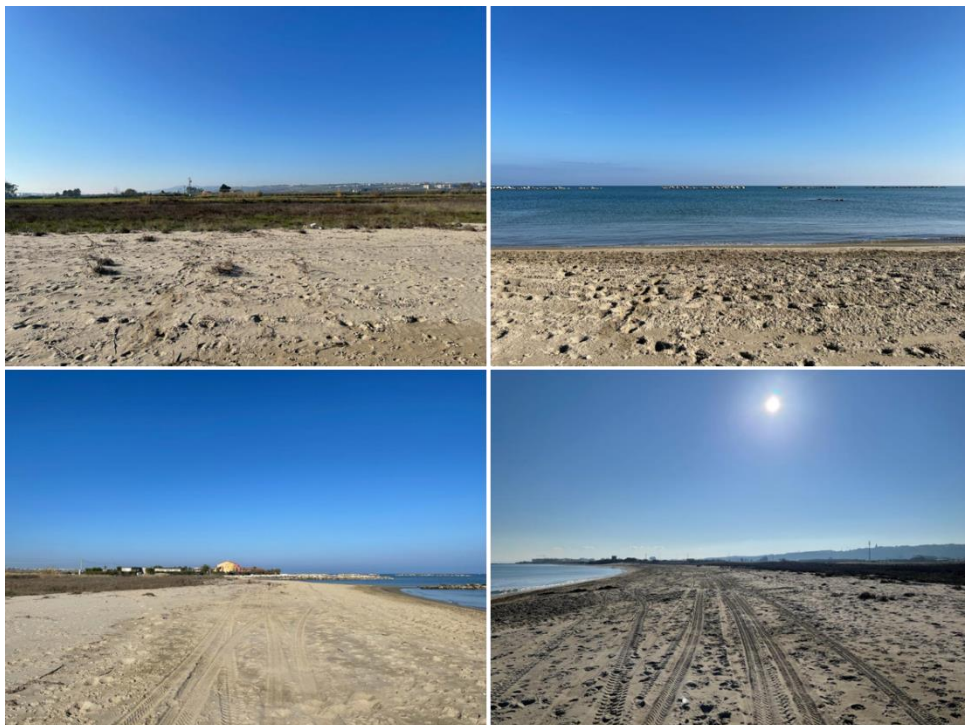
#### Profilo 4 Marinelle – Foce Biferno (PB4)

Il profilo B4 è collocato in zona Marinelle a 700 metri a sud della foce del Fiume Biferno (Fig.4.16).



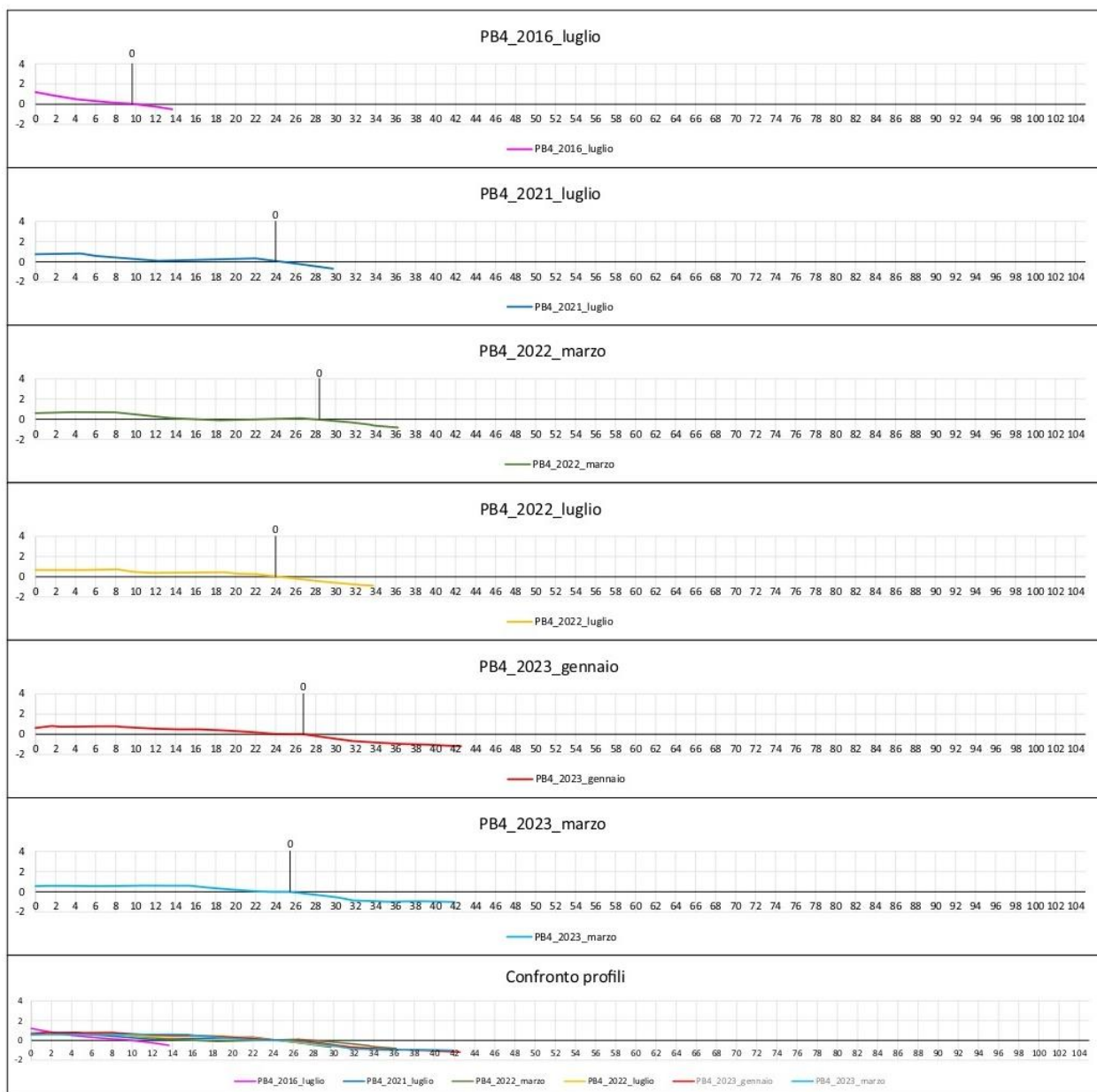
*Fig. 4.16: Collocazione del profilo PB4 – Foce Biferno*

Come si può osservare dalla figura 4.17, il profilo analizzato è caratterizzato da una zona dunale, una spiaggia sabbiosa lunga circa 10 metri e da alcuni breakwaters a circa 300 metri dalla linea di riva. I sedimenti su questo tratto di costa sono medi sulla spiaggia e sulla battigia, con un diametro medio di 0,36 mm e 0,52 mm.



*Fig. 4.17: Area profilo 4 – Area Biferno*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PB4 (Tav. 4.4 e Tab 4.8).



Tav 4.4: Profili trasversali di spiaggia – PB4

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
lug-16	0.25	15.77	10.44	1.14	10.89	12.03	1.39	11.53
lug-21	1.01	13.04	15.94	0.25	1.58	23.69	1.26	5.32
mar-22	0.73	10.12	15.52	0.21	1.37	22.77	0.95	4.15
lug-22	1.02	9.52	13.24	0.34	2.55	24	1.36	5.68
gen-23	0.28	3.81	9.69	0.27	2.81	17.13	0.56	3.24
mar-23	0.9	5.76	20.39	0.67	3.28	35.97	1.57	4.35

Tab. 4.8: Profili trasversali di spiaggia – PB4

L'analisi del profilo PB4 evidenzia un generale avanzamento della linea di costa. In particolare, escludendo il rilievo effettuato a gennaio 2023, la spiaggia del profilo PB4 ha subito un progressivo allargamento, passando da un'ampiezza di 10,44 m registrata nel luglio 2016 ad un'ampiezza di 20,39 m registrata nel marzo 2023.

### Profilo 5 Rio Vivo (PB5)

Il profilo B5 è collocato in zona Rio Vivo nel comune di Termoli (Fig. 4.18).



*Fig. 4.18: Collocazione del profilo PB5 - Spiaggia di Rio Vivo*

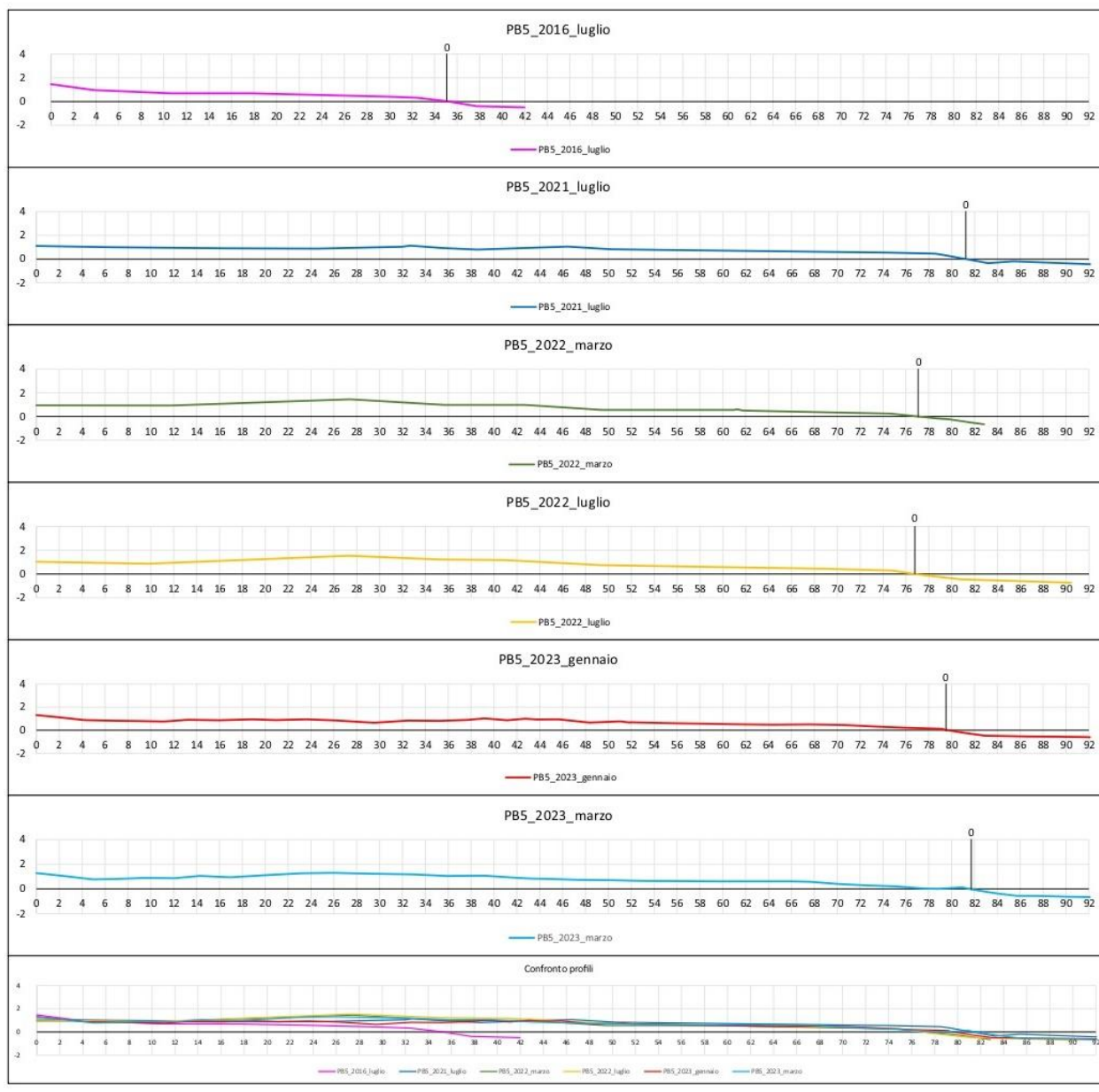
Come si può osservare dalla figura 4.19, il profilo analizzato è caratterizzato da una zona dunale molto ristretta, una spiaggia sabbiosa larga circa 30 metri e da alcuni breakwaters a circa 100 metri dalla linea di riva.

I sedimenti su questo tratto di costa sono medi sulla spiaggia e sulla battigia, con un diametro medio di rispettivamente 0,28 mm e 0,25 mm.



*Fig. 4.19: Area profilo 5 – Area Biferno*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PB5 (Tav. 4.5 e Tab. 4.9).



Tav 4.5: Profili trasversali di spiaggia – PB5

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
lug-16	0.52	7.57	31.3	0.95	3.02	38.13	1.46	3.83
lug-21	1.05	4.76	28.49	0.43	1.5	50.51	1.47	2.92
mar-22	0.78	11.15	26.38	0.42	1.59	33.41	1.2	3.61
lug-22	0.82	5.74	26.9	0.67	2.48	41.16	1.49	3.61
gen-23	0.72	2.11	31.09	0.62	2	65.43	1.29	1.97
mar-23	0.65	5.53	36.69	0.83	2.26	48.5	1.48	3.06

Tab. 4.9: Profili trasversali di spiaggia – PB5

L'analisi del profilo PB5 permette di suddividere il periodo totale indagato in due intervalli.

Il primo intervallo va da luglio 2016 a marzo 2022, e risulta caratterizzato da una tendenza all'arretramento della linea di costa e quindi una riduzione dell'ampiezza della spiaggia passando da 31,3 m a 26,38 m, il secondo va da luglio 2022 a marzo 2023 e mostra invece un'inversione di tendenza, quindi un incremento dell'ampiezza della spiaggia che arriva a 36,69 m, superando il valore di 31,3 registrato nel 2016.

#### 4.3 Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Mingardo

Per comprendere al meglio le caratteristiche morfo-sedimentarie dell'area di studio presa in esame, sono stati realizzati 8 transetti trasversali alla linea di costa. Le campagne di rilievo sono state effettuate a marzo e luglio 2022, e gennaio e marzo 2023.



Fig. 4.20: Collocazione dei profili topografici in Area Mingardo

Di seguito si propone la descrizione di dettaglio di ogni profilo:

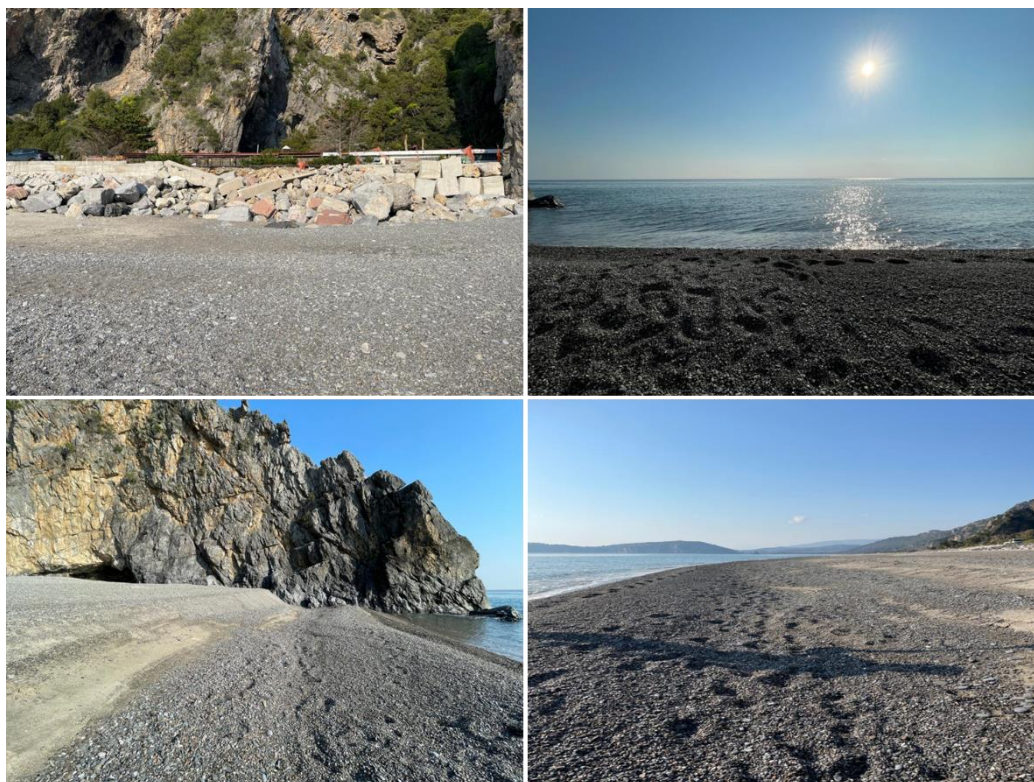
### Profilo 1 Promontorio (PM1)

Il profilo PM1 è collocato in corrispondenza del promontorio di Cala del Cefalo (Fig. 4.21).



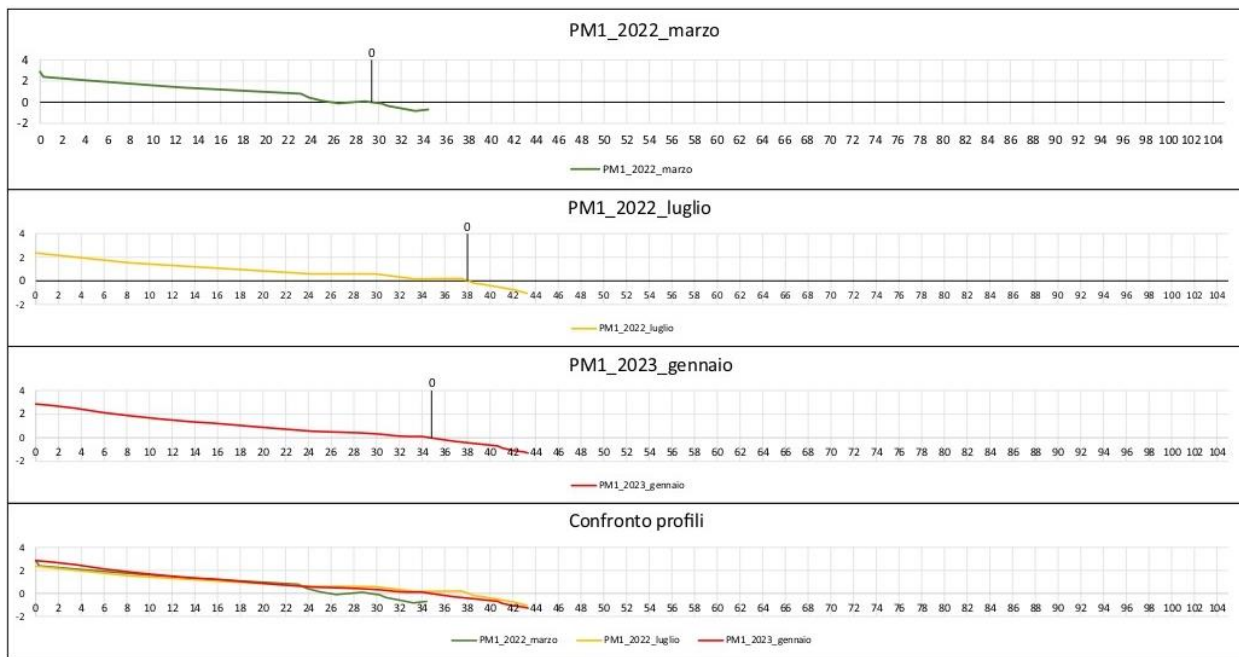
*Fig. 4.21: Collocazione del profilo PM1 – Promontorio di Cala del Cefalo*

Come si può osservare dalla figura 4.22, il profilo analizzato si trova a ridosso del promontorio di Cala del Cefalo. La spiaggia, larga circa 35 m, è composta da sedimenti grossolani nell'ordine dei 4,64 mm di media.



*Fig. 4.22: Area profilo 1 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM1. Per i rilievi effettuati a marzo 2023 non è stato possibile acquisire il profilo a causa di lavori di messa in sicurezza della spiaggia a seguito dei continui crolli di materiale dal promontorio (Tav. 4.6 e Tab. 4.10).



Tav 4.6: Profili trasversali di spiaggia – PM1

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.79	14.03	26.46	2.98	11.25	34.4	3.57	10.37
lug-22	0.85	18.43	38.63	2.57	6.65	43.24	3.42	7.91
gen-23	1.39	14.86	33.97	2.74	8.08	43.33	4.13	9.54

Tab. 4.10: Profili trasversali di spiaggia – PM1

L'analisi del profilo PM1 rivela uno spostamento stagionale della linea di costa. Inoltre, si evidenzia una redistribuzione diversificata dei sedimenti. Durante l'inverno, le forti mareggiate trasportano i sedimenti verso la parte più interna della spiaggia, aumentandone l'altezza e la pendenza, a scapito della larghezza che, invece, cresce durante l'estate, riducendo la pendenza sia della spiaggia emersa che della battigia.

### Profilo 2 Lido Il Mito degli Dei (PM2)

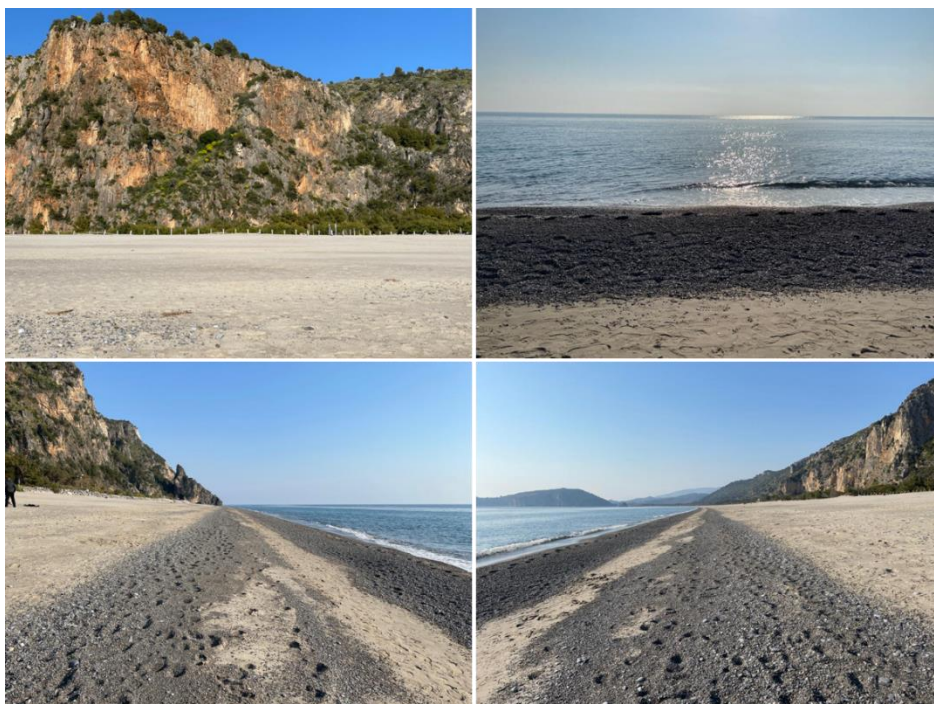
Il profilo PM2 è collocato in corrispondenza dello stabilimento balneare stagionale “Il Mito degli Dei” (Fig. 4.23).



*Fig. 4.23: Collocazione del profilo PM2 – Area Mingardo*

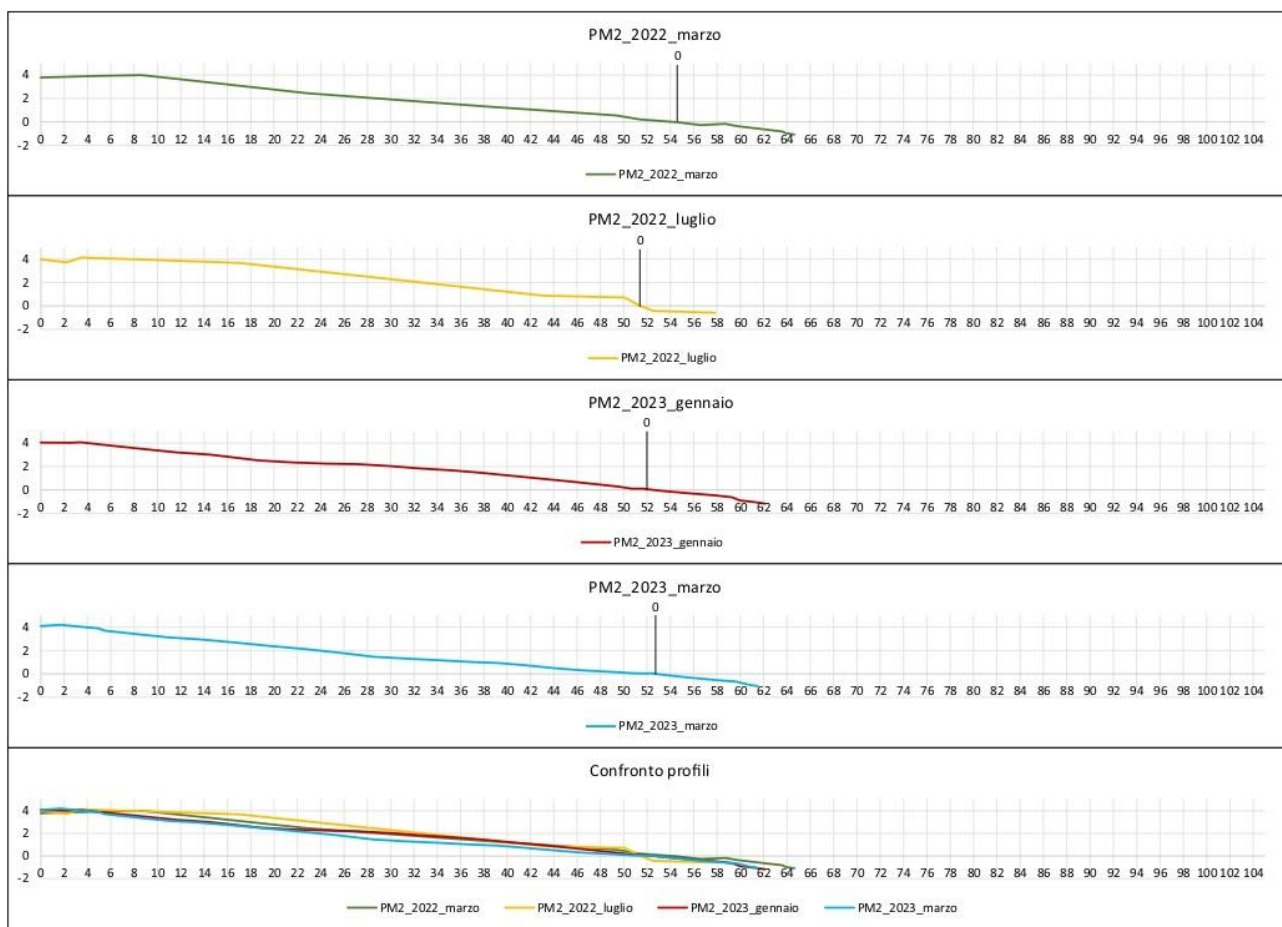
Come si può osservare dalla figura 4.24, il profilo interessa una zona che presenta dune embrionali delimitate da una protezione utilizzata per evitare il calpestio.

La spiaggia, larga circa 50 m, è composta da sedimenti sabbiosi grossolani nell'ordine dei 1,08 mm di media per la zona di spiaggia emersa e granuli di 2,75 mm di media per la zona della battigia.



*Fig. 4.24: Area profilo 2 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM2 (Tav. 4.7 e Tab. 4.11).



Tav 4.7: Profili trasversali di spiaggia – PM2

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.9	15.28	46.23	3.77	8.15	52.15	4.67	8.96
lug-22	0.77	11.29	49.1	4.55	9.27	55.93	4.32	7.73
gen-23	0.52	4.52	48.2	3.96	8.22	59.83	4.49	7.5
mar-23	1.1	11.91	50.45	4.14	8.2	59.69	5.24	8.78

Tab. 4.11: Profili trasversali di spiaggia – PM2

L'analisi del profilo PM2 mostra valori pressoché simili in termini di ampiezza e pendenza della spiaggia. Le lievi oscillazioni sono perlopiù stagionali e tendenti all'avanzamento della linea di riva.

### Profilo 3 Lido Blu (PM3)

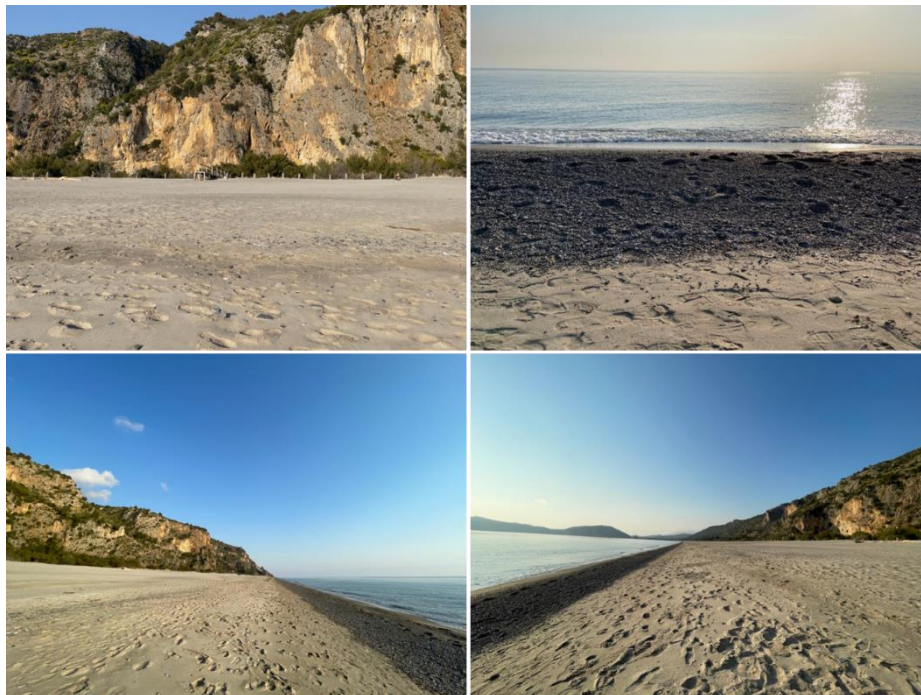
Il profilo PM1 è collocato in corrispondenza dello stabilimento balneare stagionale “Lido Blu” (Fig. 4.25).



*Fig. 4.25: Collocazione del profilo PM3 – Lido Blu*

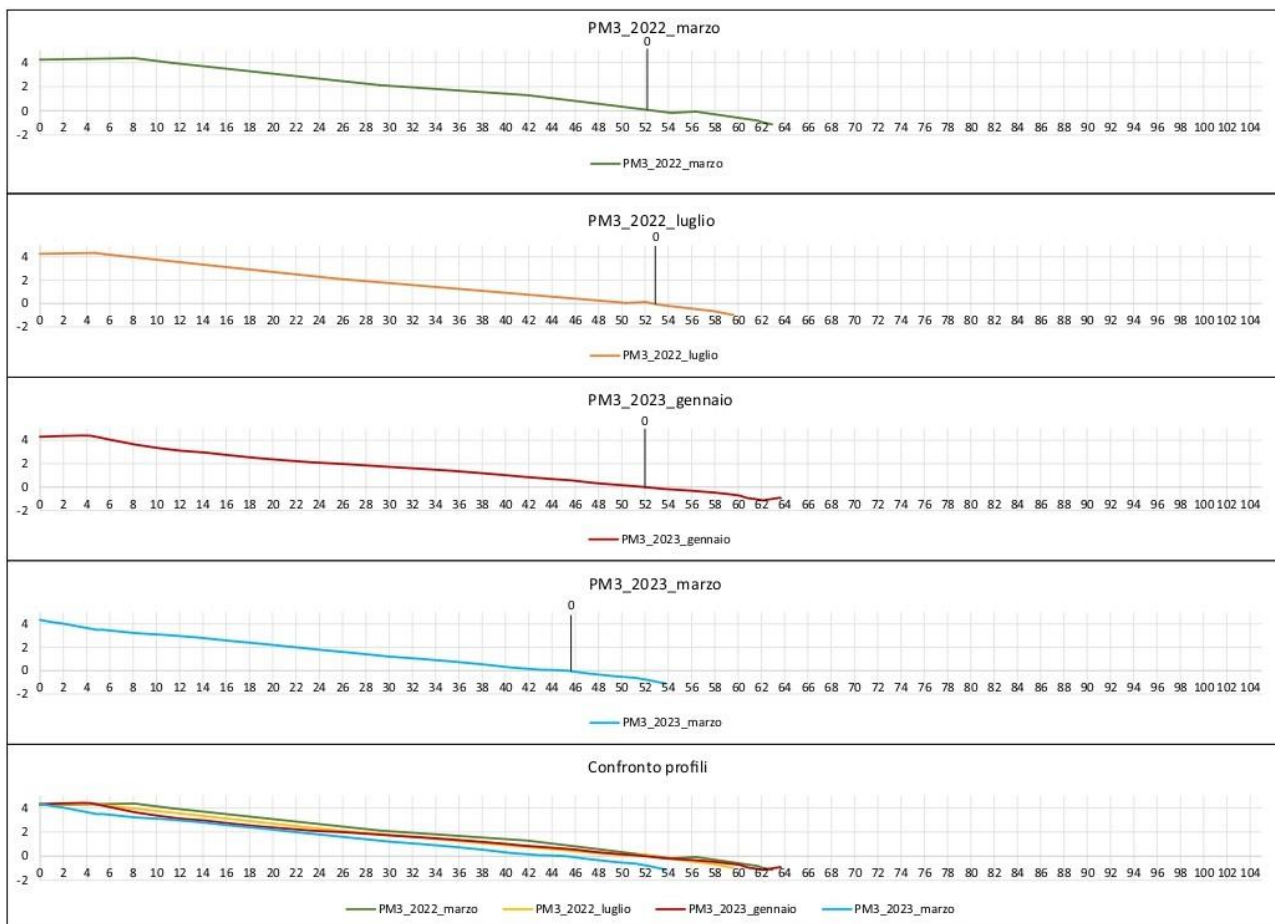
Come si può osservare dalla figura 4.26, il profilo è caratterizzato da una zona che presenta internamente una ristretta zona retrodunale e dune embrionali, delimitate da una protezione utilizzata per evitare il calpestio.

La spiaggia, larga circa 30 m, è composta da granuli nell'ordine dei 2,52 mm di media per la zona di spiaggia e 2,12 mm di media per la zona della battigia.



*Fig. 4.26: Area profilo 3 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM3 (Tav. 4.8 e Tab. 4.12).



Tav 4.8: Profili trasversali di spiaggia – PM3

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.05	16.9	27.13	2.19	8.08	33.71	3.25	9.64
lug-22	0.88	13.64	47.59	4.31	9.07	54.08	5.2	9.62
gen-23	1.05	8.07	44.81	3.97	8.86	57.78	5.02	8.69
mar-23	1.12	7.22	27.14	3.98	9.43	53.46	4.79	8.98

Tab. 4.12: Profili trasversali di spiaggia – PM3

L'analisi del profilo PM3 evidenzia una dinamica stagionale che mostra una spiaggia invernale ristretta, con valori che rimangono sui 27 m e una spiaggia estiva di circa 50 m che tende a perdere ampiezza durante la stagione invernale, come documentato col rilievo di gennaio 2023. Le cause di questa sostanziale differenza potrebbero attribuirsi alle mareggiate particolarmente energetiche che vengono registrate durante la stagione invernale (vedi capitolo 3) e all'impatto antropico legato alla costruzione degli stabilimenti balneari durante la stagione estiva.

### Profilo 4 Camping Odissea (PM4)

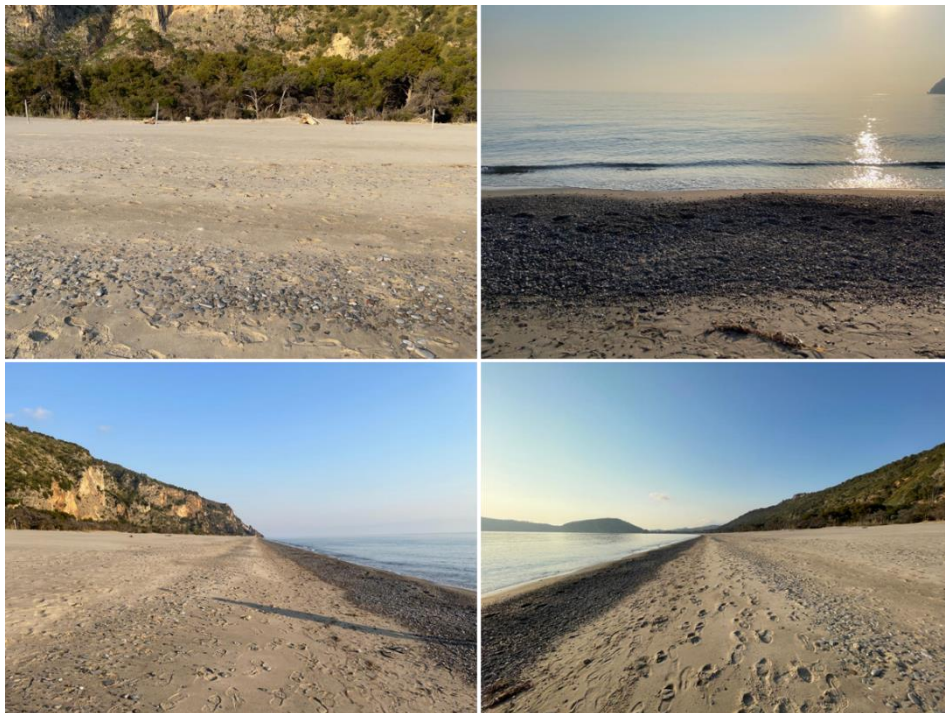
Il profilo PM4 è collocato in corrispondenza del Camping Odissea. (Fig.4.27)



*Fig. 4.27: Collocazione del profilo PM4 – Camping Odissea*

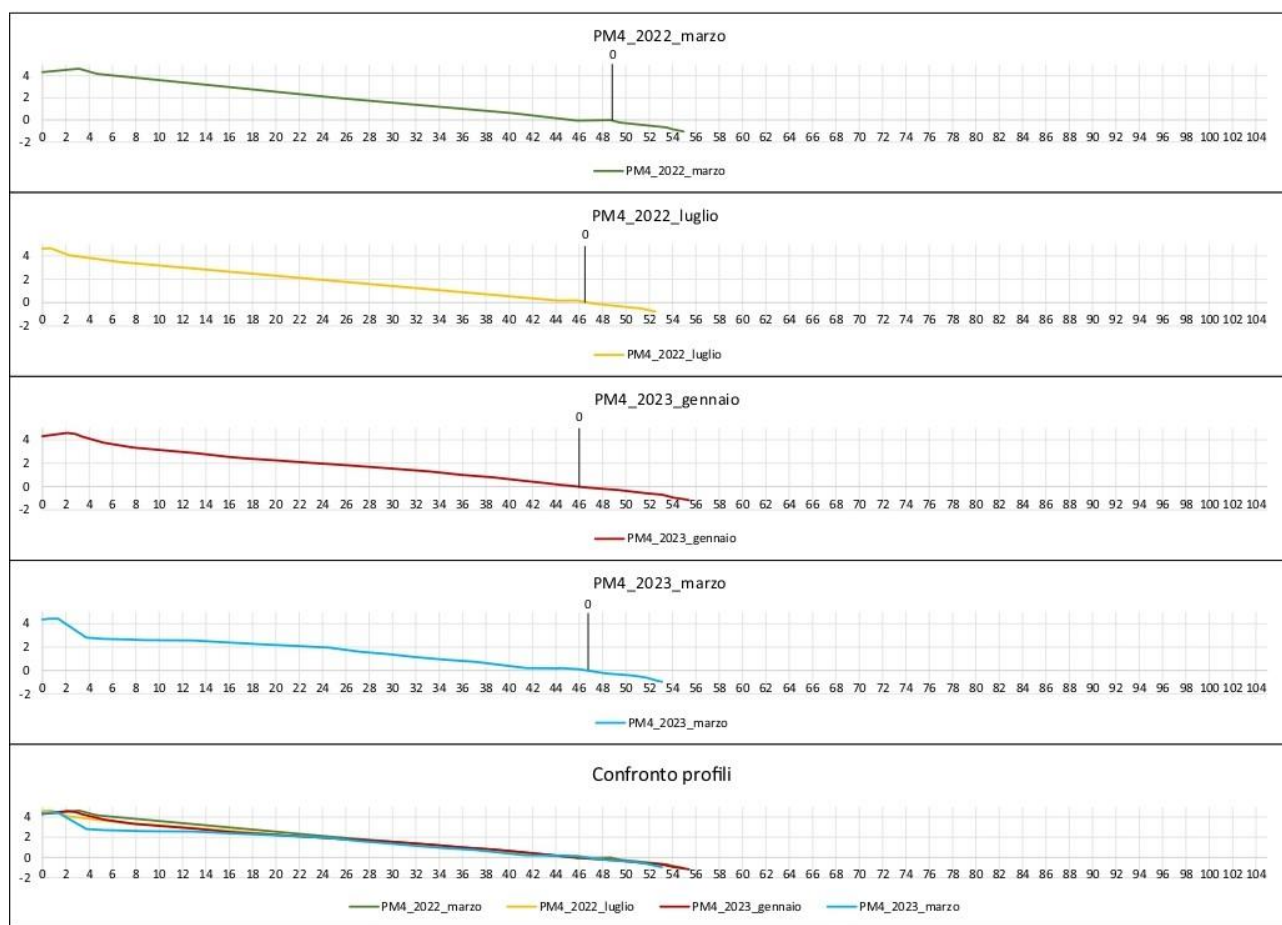
Come si può osservare dalla figura 4.28, il profilo presenta una zona caratterizzata da una pineta impiantata negli anni '90, sulla quale si sviluppa un camping frequentato durante la stagione estiva, dune embrionali e una spiaggia larga circa 40 m.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da sabbia molto grossolana sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 1,88 mm e granuli sulla battigia con una media di 3,16 mm.



*Fig. 4.28: Area profilo 4 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM4 (Tav. 4.9 e Tab. 4.13).



Tav 4.9: Profili trasversali di spiaggia – PM4

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.03	16.47	23.11	1.98	8.56	29.35	3.01	10.24
lug-22	0.71	12.88	44.69	4.09	9.17	50.24	4.81	9.58
gen-23	1.26	12.16	39.8	3.67	9.22	50.16	4.93	9.82
mar-23	1.17	13.34	40.53	2.59	6.4	49.33	3.76	7.64

Tab. 4.13: Profili trasversali di spiaggia – PM4

L'analisi effettuata sul profilo PM4 mostra una dinamica tendente all'arretramento della linea di costa e dell'ampiezza della spiaggia. Infatti i valori di ampiezza della spiaggia più alti nel marzo 2023 rispetto al marzo 2022 sono giustificati dall'arretramento del piede di duna registrato durante i rilievi in campo.

### Profilo 5 Camping La Pineta (PM5)

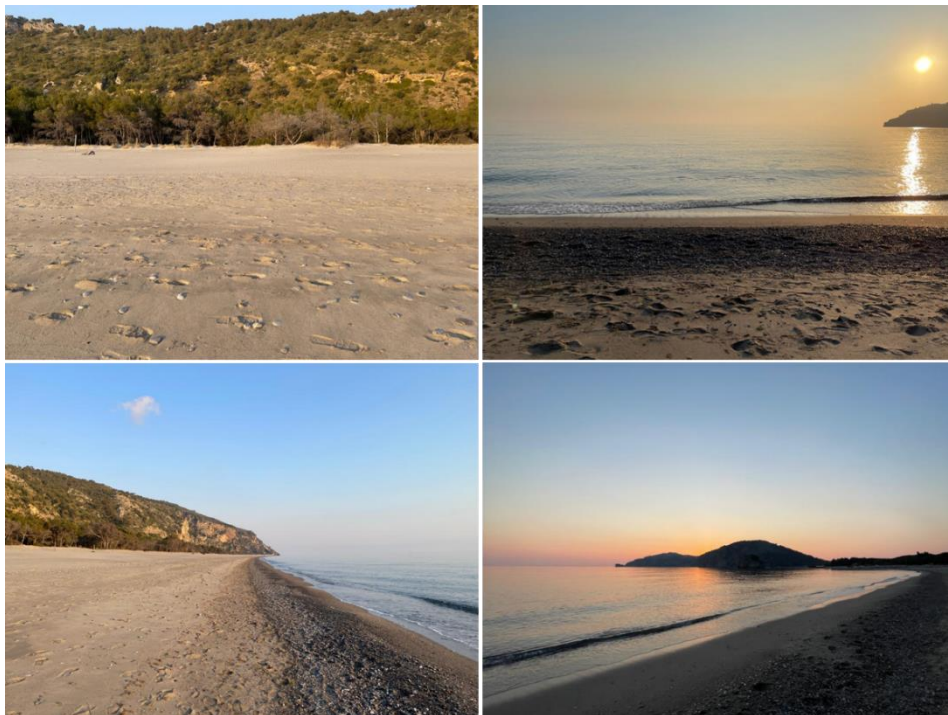
Il profilo PM5 è collocato in corrispondenza del Camping La Pineta (Fig. 4.29).



*Fig. 4.29: Collocazione del profilo PM5 – Camping La Pineta*

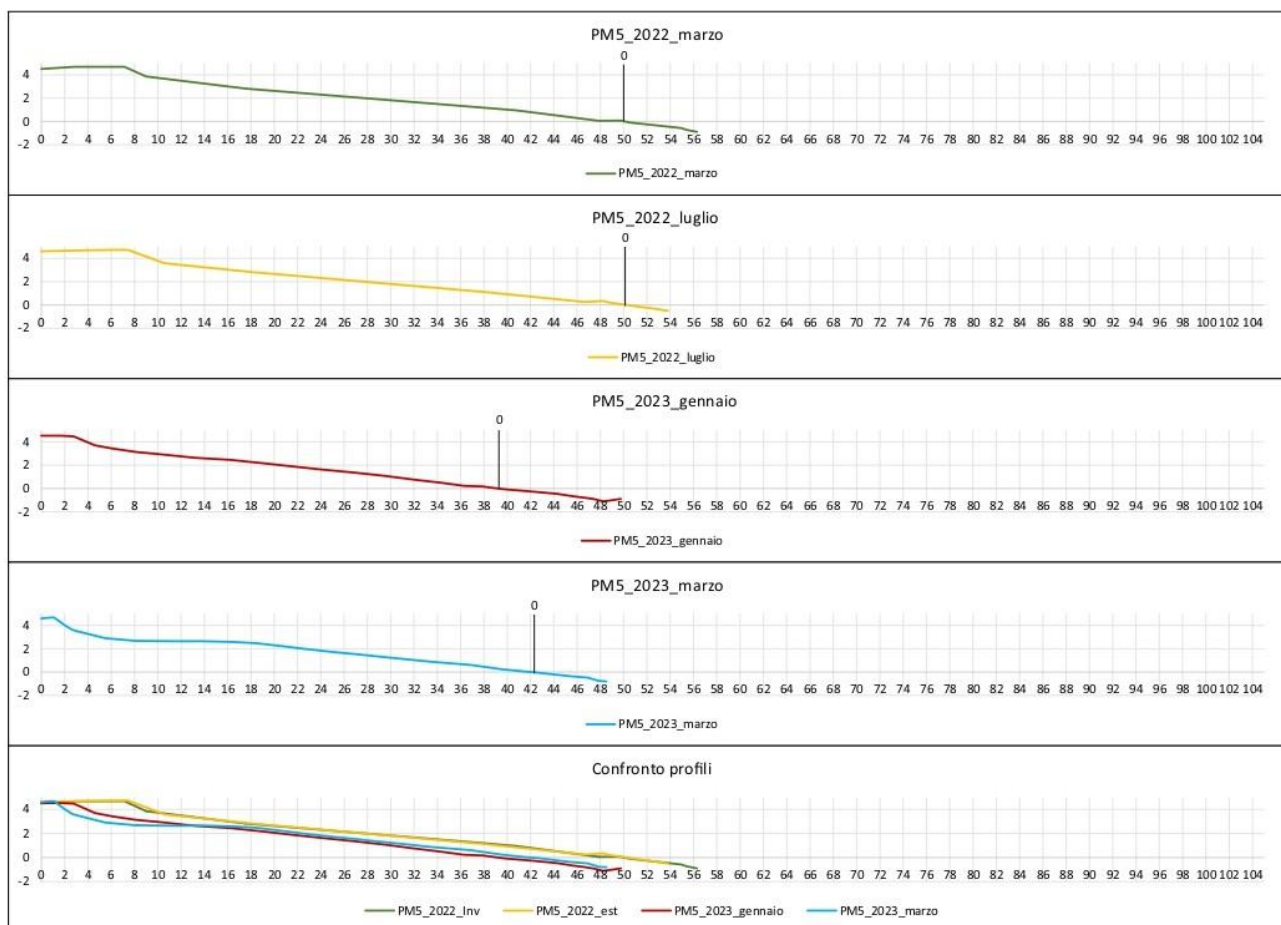
Come si può osservare dalla figura 4.30, il profilo presenta una zona caratterizzata da una pineta impiantata negli anni '90, sulla quale si sviluppa un camping frequentato durante la stagione estiva, dune embrionali e una spiaggia larga circa 36 metri.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da sabbia grossolana sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 0,66 mm e ciottoli sulla battigia con una media di 3,90 mm.



*Fig. 4.30: Area profilo 5 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM5 (Tav. 4.10 e Tab. 4.14).



Tav 4.10: Profili trasversali di spiaggia – PM5

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.96	14.64	32.12	2.75	8.56	38.72	13.72	9.59
lug-22	0.72	14.15	38.12	3.36	8.81	43.21	4.08	9.44
gen-23	1	8.86	33.8	3.59	10.63	45.15	4.6	10.18
mar-23	1.03	11.53	36.41	3.25	8.93	36.41	3.25	8.93

Tab. 4.14: Profili trasversali di spiaggia – PM5

L'analisi effettuata sul profilo PM5 mostra un chiaro e netto arretramento della linea di costa. Come osservato già nel profilo PM4, anche il profilo PM5 nonostante presenti valori di ampiezza di spiaggia pressoché simili, registra un forte arretramento del piede di duna (osservabile in tavola 4.10 – confronto profili).

### Profilo 6 Black Marlin Club (PM6)

Il profilo PM6 è collocato in corrispondenza del villaggio turistico Black Marlin (Fig. 4.31).



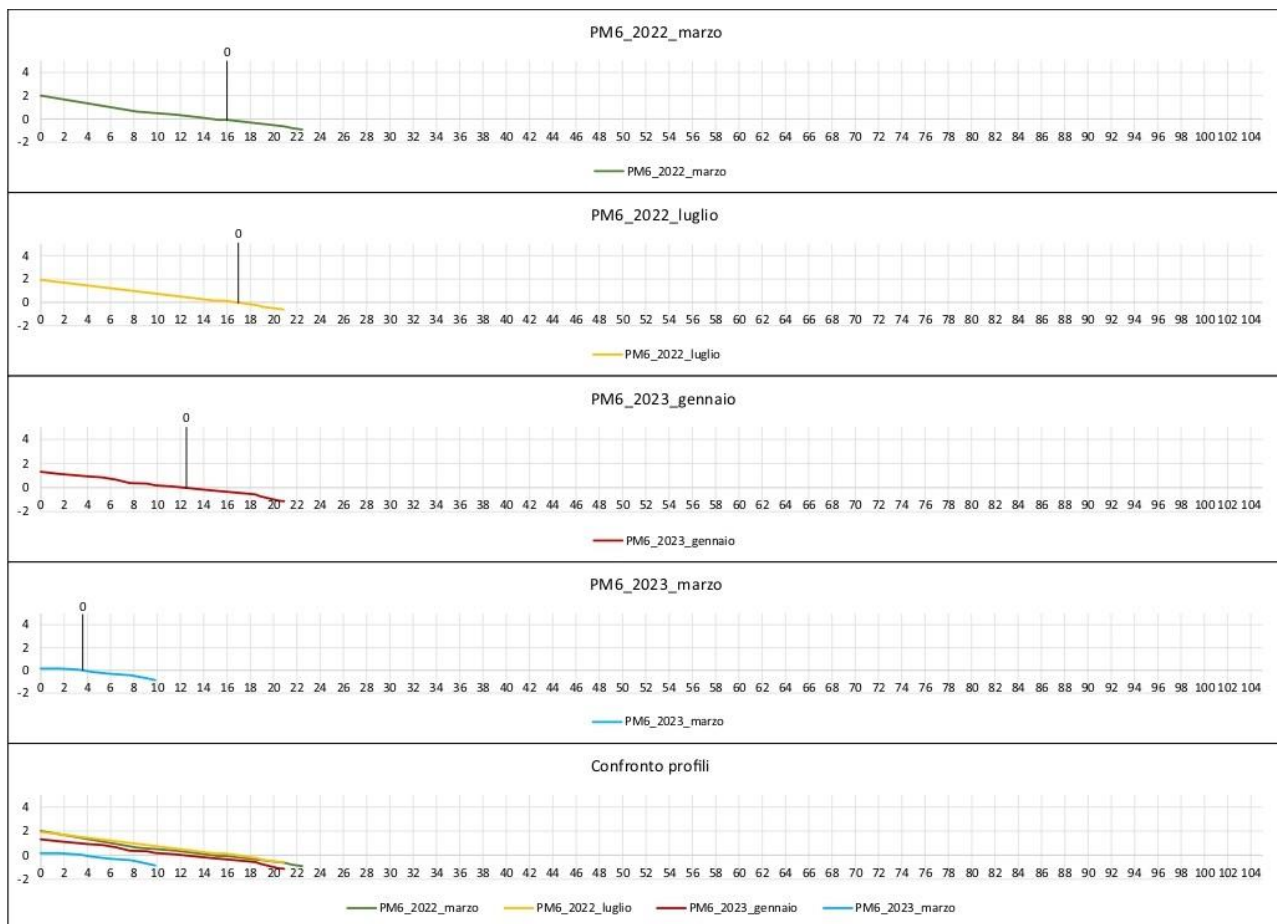
*Fig. 4.31: Collocazione del profilo PM6 – Black Marlin Club*

Come si può osservare dalla figura 4.32, il profilo è caratterizzato dall'assenza di dune ed è posizionato in corrispondenza del villaggio turistico Black Marlin. La spiaggia è larga circa 15 metri composta da ghiaia con diametro medio di 2,48 mm per la zona di spiaggia e circa 4 mm sulla battigia.



*Fig. 4.32: Area profilo 6 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM6 (Tav. 4.11 e Tab. 4.15).



Tav 4.11: Profili trasversali di spiaggia – PM6

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.82	11.39	15.24	2.08	13.7	22.45	2.91	12.96
lug-22	0.7	15.09	16.18	0.7	4.35	20.85	2.53	12.14
gen-23	1.07	13.38	12.94	1.38	10.67	20.9	2.45	11.7
mar-23	0.9	13.97	3.36	0.11	3.39	9.82	1.01	10.34

Tab. 4.15: Profili trasversali di spiaggia – PM6

I dati ottenuti per il profilo PM6 mostrano una chiara e netta tendenza all'arretramento della spiaggia, arrivando a registrare una differenza di 12 m tra il rilievo effettuato a marzo 2022 e il rilievo effettuato a marzo 2023.

Profilo 7 Scoglio del Mingardo (PM7)

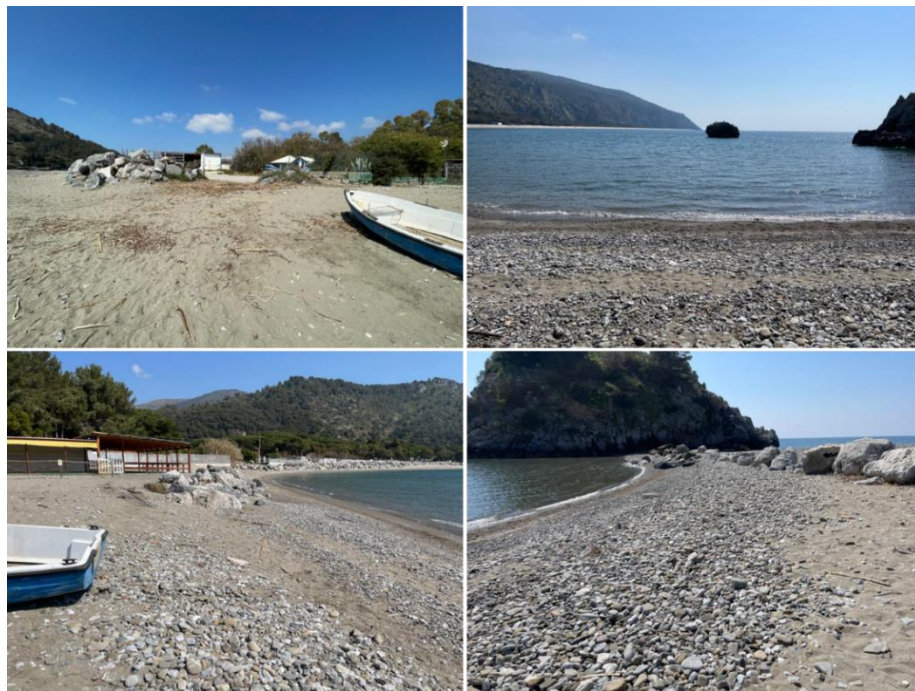
Il profilo PM7 è collocato in corrispondenza dello Scoglio del Mingardo (Fig. 4.33).



*Fig. 4.33: Collocazione del profilo PM7 – Scoglio del Mingardo*

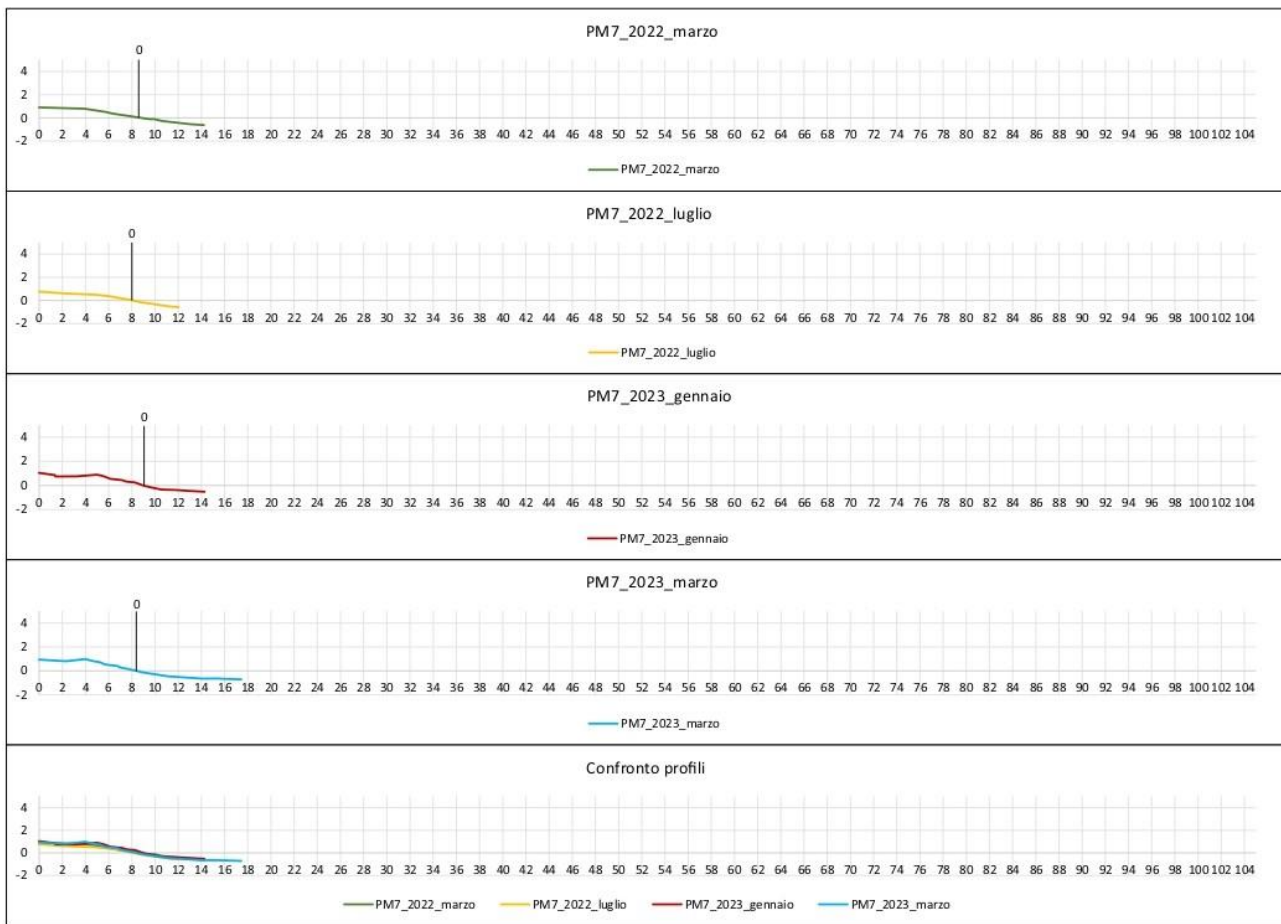
Come si può osservare dalla figura 4.34, il profilo è sprovvisto di dune ed è collocato sul lembo di terra che si collega allo Scoglio del Mingardo.

I sedimenti presenti su questo tratto di costa sono molto grossolani, ciottolosi, con diametro medio di 6 mm.



*Fig. 4.34: Area profilo 7 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM7 (Tav. 4.12 e Tab. 4.16).



Tav 4.12: Profili trasversali di spiaggia – PM7

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.52	12.11	9.96	1.01	10.15	14.21	1.53	10.74
lug-22	0.65	15	7.69	0.69	8.92	12.02	1.34	11.12
gen-23	0.49	9.45	9.03	1.07	11.81	14.27	1.56	10.95
mar-23	0.77	8.27	8.12	0.88	10.91	17.42	1.65	9.5

Tab. 4.16: Profili trasversali di spiaggia – PM7

Dall'analisi del profilo PM7, non si sono riscontrate differenze di tendenze evolutive nel tempo, se non dovute, in maniera specifica, alla stagionalità.

### Profilo 8 Foce del Mingardo (PM8)

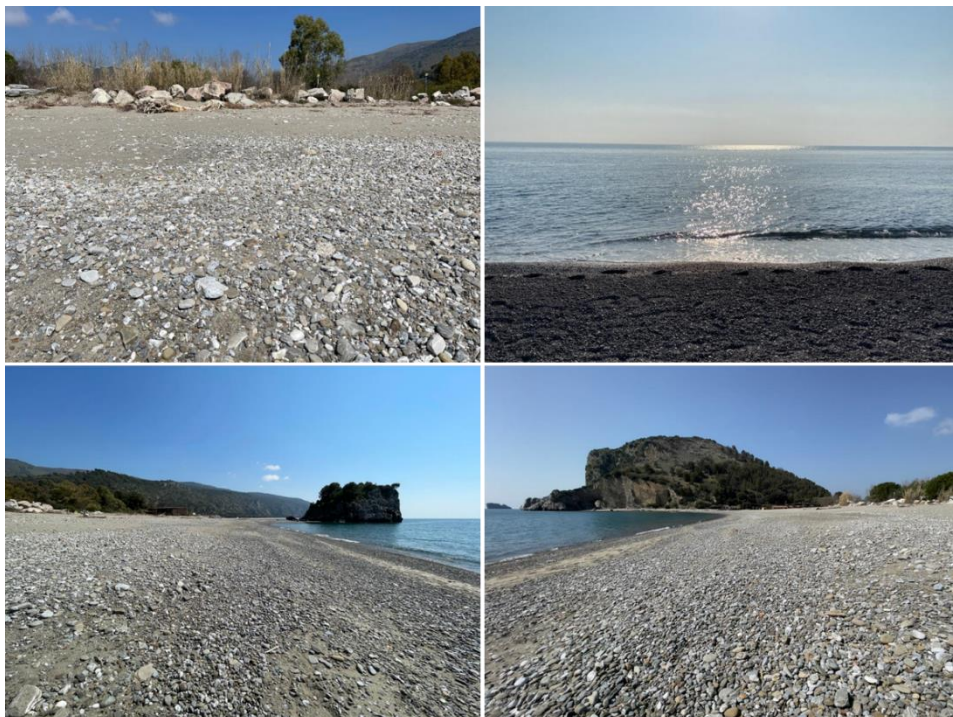
Il profilo PM8 è collocato tra la foce del Fiume Mingardo e il lembo di terra che si connette allo scoglio del Mingardo (Fig. 4.35).



*Fig. 4.35: Collocazione del profilo PM8 – Foce del Mingardo*

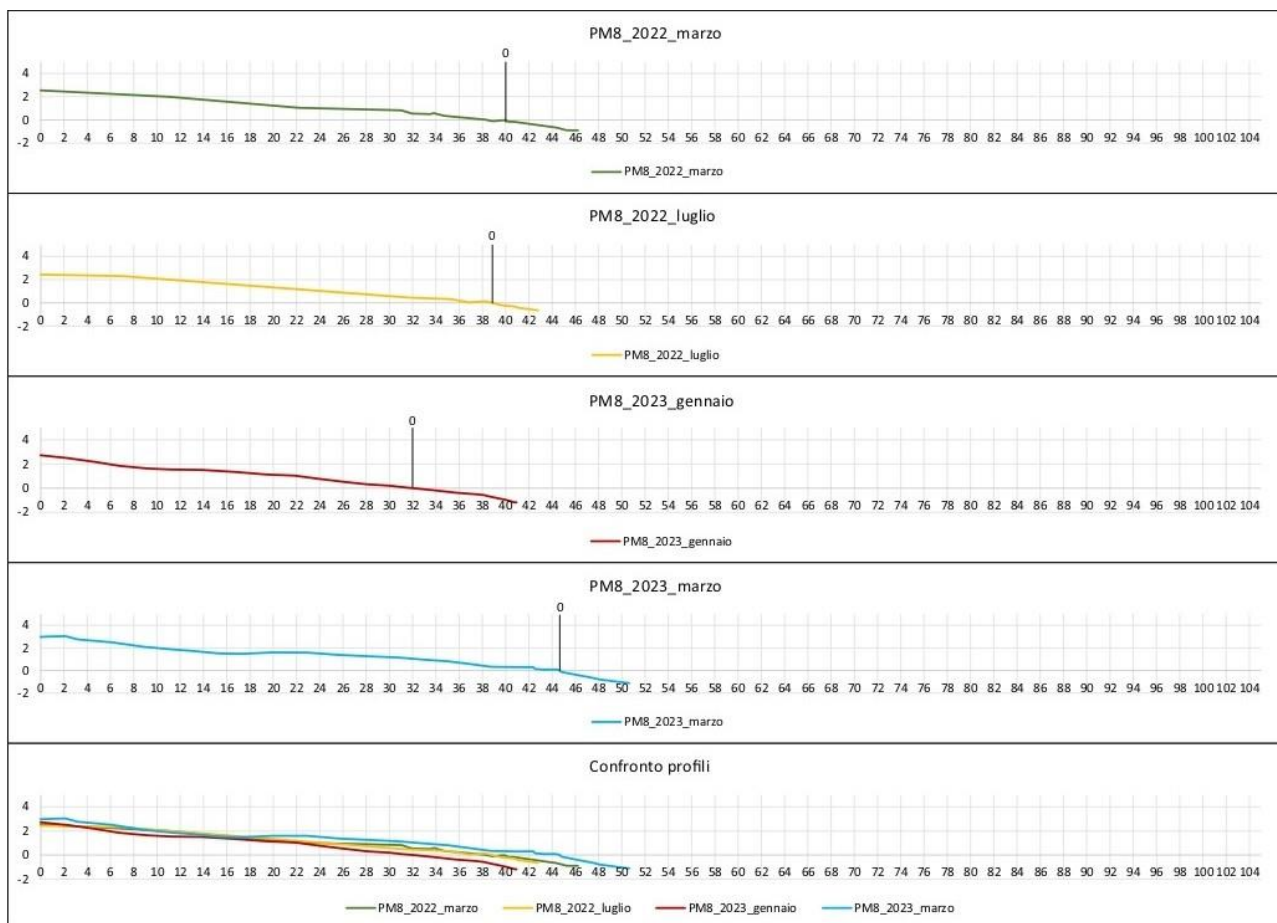
Come si può osservare dalla figura 4.36, il profilo non intercetta dune ed è posizionato in corrispondenza del villaggio turistico “Le Ninfe del Mare”.

La spiaggia è composta da ghiaia, con un diametro medio di 4,40 mm sulla spiaggia e 4,70 mm sulla zona di battigia.



*Fig. 4.36: Area profilo 8 – Area Mingardo*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PM8 (Tav. 4.13 e Tab. 4.17).



Tav 4.13: Profili trasversali di spiaggia – PM8

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.74	12.43	40.26	2.7	6.72	40.21	3.44	7.45
lug-22	0.77	17.04	38.27	2.31	6.04	42.78	3.08	7.2
gen-23	1.18	13.06	31.92	2.72	8.51	40.92	3.89	9.51
mar-23	1.14	18.94	44.6	2.95	6.61	50.62	4.09	8.08

Tab. 4.17: Profili trasversali di spiaggia – PM8

Il profilo PM8 mostra delle differenze, in termini di ampiezza della spiaggia, dovute principalmente alla stagionalità e leggermente tendenti all'avanzamento. La causa sarebbe da attribuirsi principalmente agli apporti sedimentari del Fiume Mingardo che, insieme al fattore legato alla circolarità del drift, essendo questa zona quasi indipendente rispetto al resto dell'area, permette una minore perdita di sedimenti.

#### 4.4 Caratteristiche morfo-sedimentarie dei profili di spiaggia in Area Sinni

Per comprendere al meglio le caratteristiche morfo-sedimentarie dell'area di studio presa in esame, sono stati realizzati 9 transetti trasversali alla linea di costa. Le campagne di rilievo sono state effettuate a marzo e luglio 2022, e gennaio e marzo 2023.



*Fig. 4.37: Collocazione dei profili topografici in Area Sinni*

Di seguito si propone la descrizione di dettaglio di ogni profilo:

### Profilo 1 Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro (PS1)

Il profilo PS1 è collocato in corrispondenza dell'Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro (Fig. 4.38).



*Fig. 4.38: Collocazione del profilo PS1 – Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro*

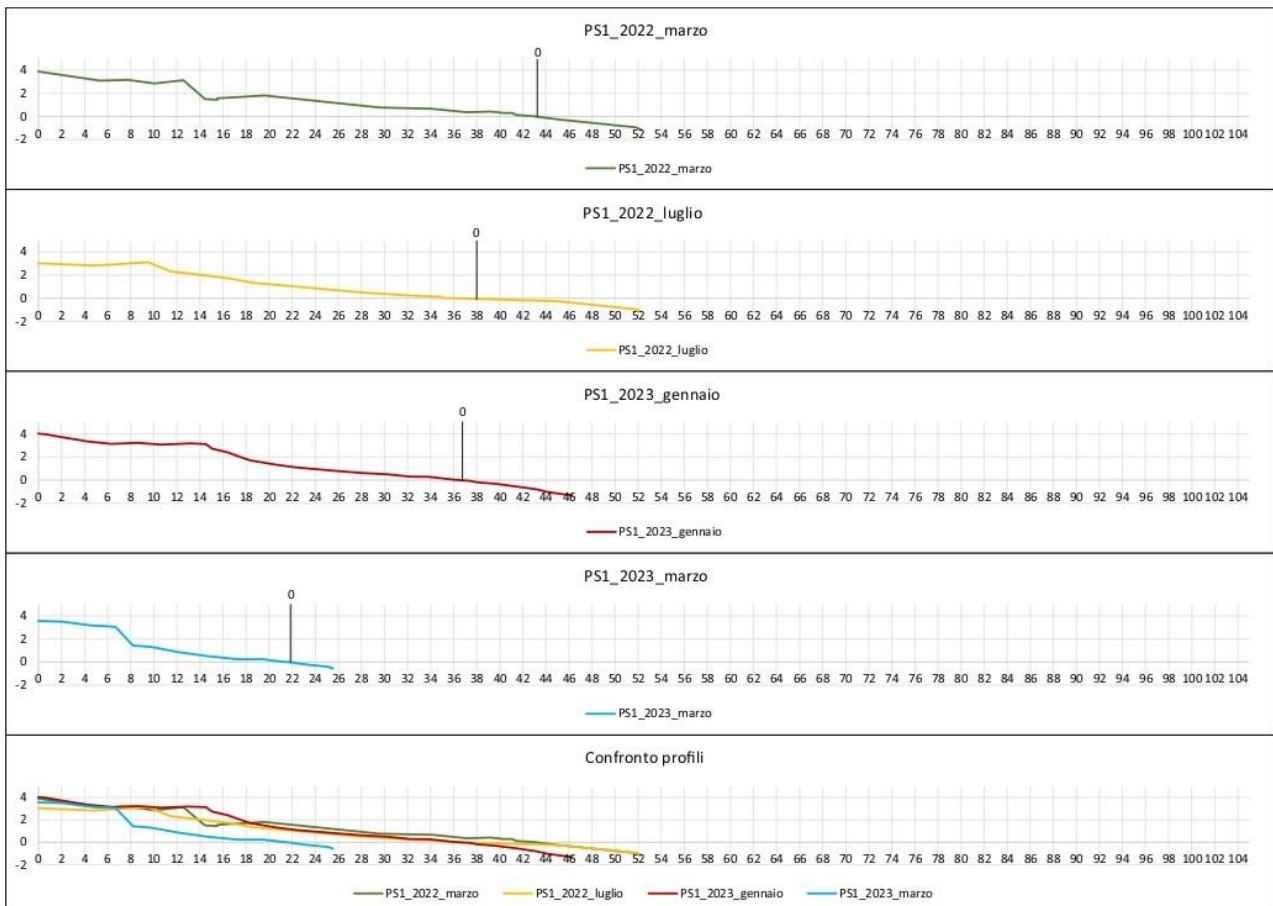
Come evidenziato nella figura 4.28, la zona presenta un'ampia estensione di dune, attentamente preservate per prevenire il calpestio. Per raggiungere la spiaggia, si segue un breve sentiero che attraversa l'area protetta gestita dal WWF. Cartelli ben visibili avvertono i visitatori di evitare di calpestare o danneggiare le dune.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da granuli sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 3,13 mm e da sabbia grossolana sulla battigia dalla dimensione media di 1,45 mm.



Fig. 4.39: Area profilo 1 – Area Sinni

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS1 (Tav. 4.14 e Tab. 4.18).



Tav 4.14: Profili trasversali di spiaggia – PS1

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.15	12.33	27.39	1.42	5.2	36.71	2.57	7.01
lug-22	1.15	6.71	23.55	2.29	9.74	40.72	3.44	8.46
gen-23	1.12	13.58	20.66	2.23	10.8	28.91	3.35	11.59
mar-23	0.69	13.25	12.12	1.29	10.67	17.33	1.98	11.45

Tab. 4.18: Profili trasversali di spiaggia – PS1

L'analisi del profilo PS1 restituisce valori di ampiezza di spiaggia che tendono all'arretramento. Il confronto tra marzo 2022 e marzo 2023 mostra un chiaro e forte arretramento della linea di costa, con una perdita dell'ampiezza di spiaggia di circa 15 m.

## Profilo 2 (PS2)

Il profilo PS2 è collocato a circa 500 m a nord della foce del Fiume Sinni (Fig. 4.40).



*Fig. 4.40: Collocazione del profilo PS2 – Area Sinni*

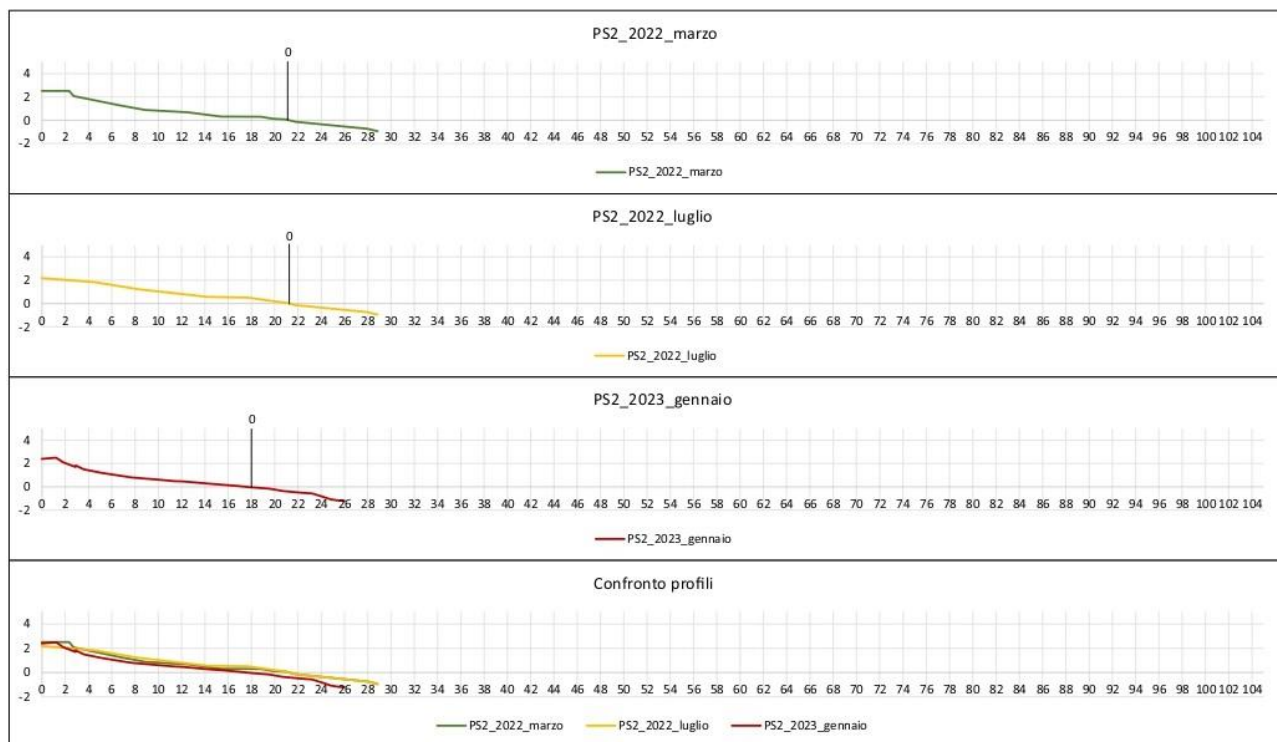
Come si può osservare dalla figura 4.41, la zona presenta un'ampia estensione di dune, che mostrano evidenti segni di erosione costiera e di ingressione marina, testimoniati dalla chiara esposizione delle radici della vegetazione dunale.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da sabbia grossolana sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 1,21 mm e ciottoli sulla battigia con una media di 4,14 mm.



*Fig. 4.41: Area profilo 2 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS2 (Tav. 4.15 e Tab. 4.19).



Tav 4.15: Profili trasversali di spiaggia – PS2

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.07	11.94	17.11	1.94	11.34	26.12	3.01	11.55
lug-22	1.02	12.95	12.69	1.15	9.1	20.56	2.17	10.57
gen-23	1.04	16.2	16.68	1.86	11.18	23.12	2.91	12.58

Tab. 4.19: Profili trasversali di spiaggia – PS2

L'analisi del profilo PS2 restituisce valori di ampiezza di spiaggia che tendono al restringimento. Il confronto tra marzo 2022 e marzo 2023 mostra una leggera tendenza all'arretramento, che risulta più evidente nella stagione estiva quando la spiaggia presenta un'ampiezza e una pendenza con valori più bassi rispetto a quelli registrati durante i rilievi invernali.

### Profilo 3 Foce Sinni Nord (PS3)

Il profilo PS3, inizialmente collocato a circa 100m a nord della foce del Fiume Sinni, è stato successivamente escluso dalle analisi a causa dello spostamento verso nord della foce del fiume (fig. 4.42) così da sovrapporsi al profilo. Di seguito, dunque, verranno mostrati solo i dati acquisiti in campo durante il rilievo effettuato a marzo 2022.



*Fig. 4.42: Collocazione del profilo PM8 – Foce del Fiume Sinni*

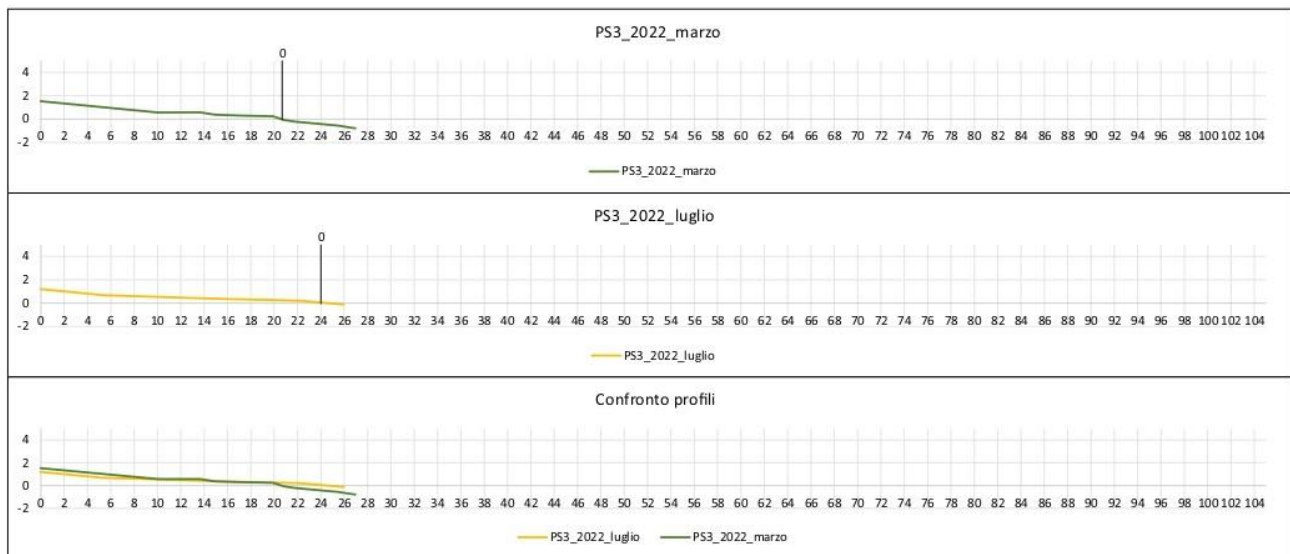
Come mostrato nella figura 4.43, la zona risulta essere allo stato naturale, caratterizzata da un'ampia area dunale e retrodunale. Tuttavia, la spiaggia presenta una breve estensione di pochi metri, evidenziando chiaramente segni di ingressione marina, come indicato dal materiale depositato sulla spiaggia e dalle radici esposte degli arbusti.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da ciottoli sia sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 3,27 mm, sia sulla battigia con una media di 2,99 mm.



Fig. 4.43: Area profilo 3 – Area Sinni

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS3 (Tav. 4.16 e Tab. 4.20).



Tav 4.16: Profili trasversali di spiaggia – PS3

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	0.57	11.05	21.79	1.75	8.02	26.95	2.32	8.6
lug-22	0.34	9.07	16.9	0.47	2.81	20.62	0.81	3.94

Tab. 4.20: Profili trasversali di spiaggia – PS3

A causa della mancanza dei dati per il 2023, non è stato possibile effettuare una valutazione dell'andamento stagionale ed annuale del profilo PS3.

#### Profilo 4 Foce Sinni Sud (PS4)

Il profilo PS4 è collocato 500m a sud della foce del Fiume Sinni (Fig. 4.44).



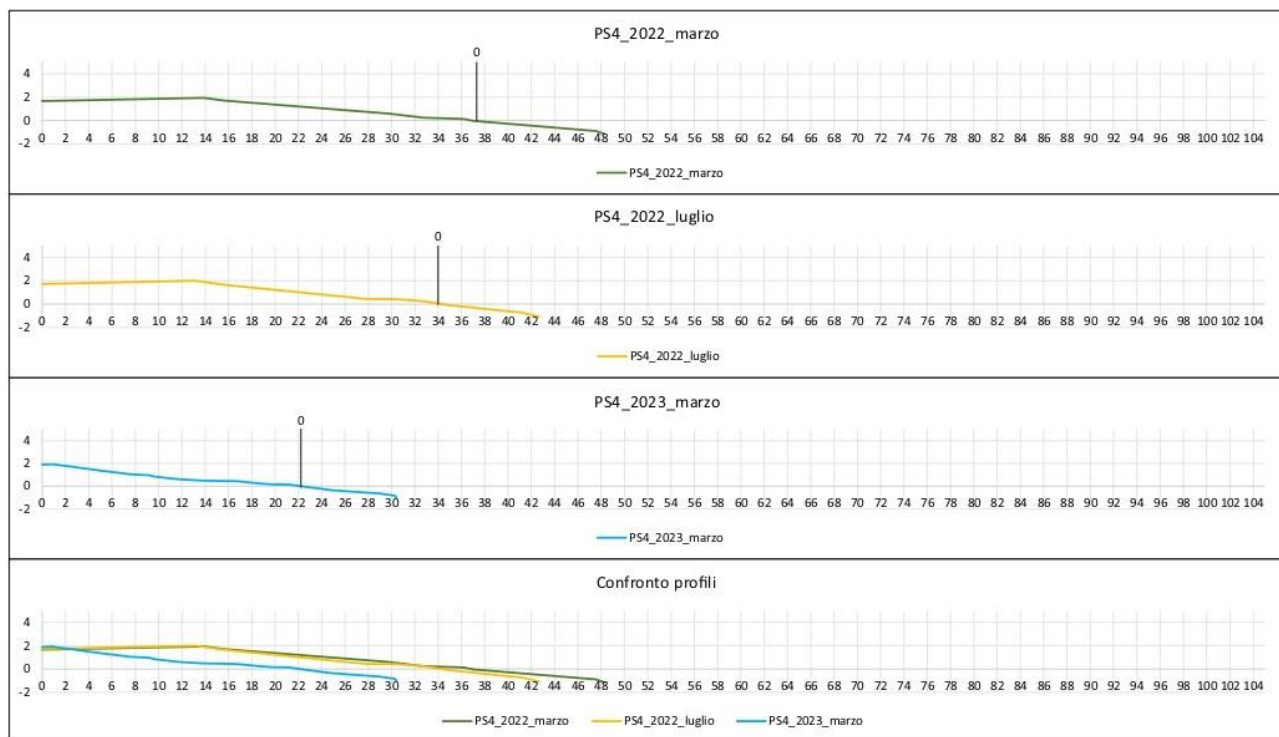
*Fig. 4.44: Collocazione del profilo PS4 – Foce Sinni Sud*

Come si può osservare dalla figura 4.45, la zona risulta essere allo stato naturale, caratterizzata da un'ampia area dunale e retrodunale. Tuttavia, la spiaggia presenta una breve estensione di pochi metri. I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da ciottoli, sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 4,22 mm e sulla battigia con una media di 4,96 mm.



*Fig. 4.45: Area profilo 4 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS4 (Tav. 4.17 e Tab. 4.21).



Tav 4.17: Profili trasversali di spiaggia – PS4

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.11	0.84	21.42	1.74	8.14	32.64	2.85	8.74
lug-22	1	12.72	19.29	1.74	9.02	27.14	2.74	10.09
mar-23	1.09	12	18.87	1.6	8.48	27.94	2.69	9.62

Tab. 4.21: Profili trasversali di spiaggia – PS4

L'analisi del profilo PS4, restituisce una situazione generale che indica una tendenza all'arretramento. Il confronto tra marzo 2022 e marzo 2023, pur mostrando una leggera tendenza all'arretramento con valori di ampiezza di spiaggia che passano da 21,42 m a 18,87 m, non testimonia il forte arretramento che però si riflette sull'arretramento del piede di duna.

### Profilo 5 Spiaggia selvaggia (PS5)

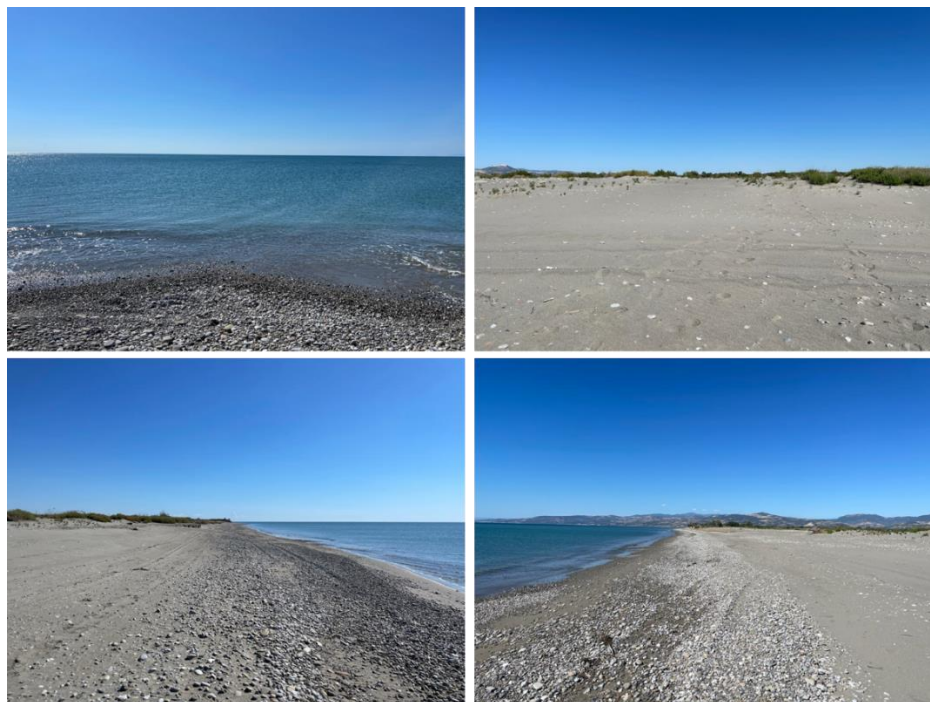
Il profilo PS5 è collocato in corrispondenza della spiaggia selvaggia verso Policoro a sud della foce del Fiume Sinni (Fig. 4.46).



*Fig. 4.46: Collocazione del profilo PS5 – Spiaggia selvaggia*

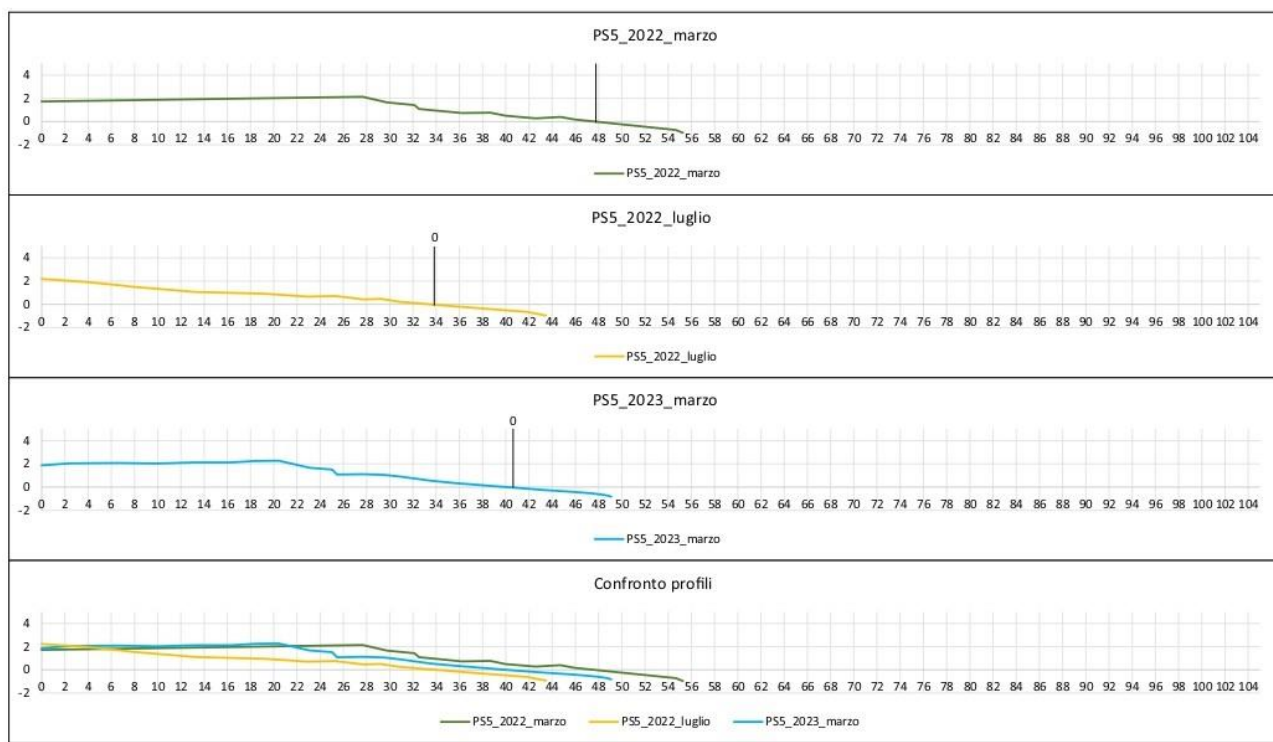
Come si può osservare dalla figura 4.47, il profilo è caratterizzato da una spiaggia larga circa 12 metri e una zona dunale delimitata internamente da campi coltivati.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da sabbia molto grossolana sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 1,55 mm e sabbia media sulla battigia con una media di 0,49 mm.



*Fig. 4.47: Area profilo 5 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS5 (Tav. 4.18 e Tab. 4.22).



Tav 4.18: Profili trasversali di spiaggia – PS5

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.38	12.61	13.38	0.91	6.84	22.73	2.05	9.03
lug-22	0.95	13.46	18.77	1.52	8.11	25.83	2.47	9.57
mar-23	0.81	9.04	14.68	1.09	7.41	23.62	1.9	8.03

Tab. 4.22: Profili trasversali di spiaggia – PS5

L'analisi effettuata sul profilo PS5, restituisce una situazione generale che tende all'arretramento. Il confronto tra marzo 2022 e marzo 2023 mostra una leggera tendenza all'allargamento della spiaggia con valori che passano da 13,38 m a 14,68 m, evidenziando che l'arretramento generale della linea di riva è collegato all'arretramento del piede di duna.

### Profilo 6 (PS6)

Il profilo PS6 è collocato a circa 1 km a nord della spiaggia di Rotondella (Fig. 4.48).



*Fig. 4.48: Collocazione del profilo PS6*

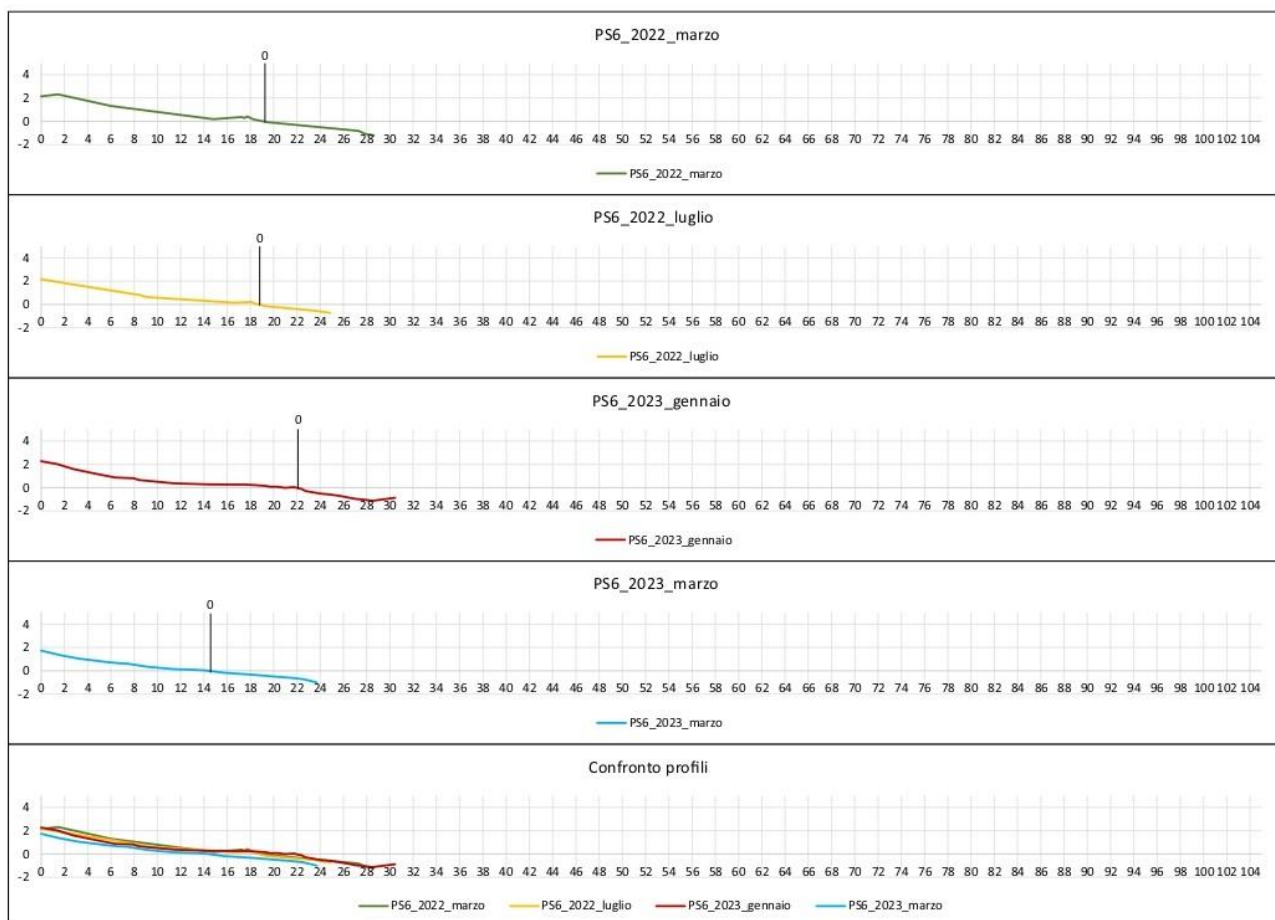
Come si può osservare dalla figura 4.49, il profilo è caratterizzato da una spiaggia larga circa 10 metri e una zona dunale delimitata internamente da campi coltivati.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da ciottoli sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 6,83 mm e sabbia grossolana sulla battigia con una media di 1,40 mm.



*Fig. 4.49: Area profilo 6 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS6 (Tav. 4.19 e Tab. 4.23).



Tav 4.19: Profili trasversali di spiaggia – PS6

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.13	12.36	8.67	0.77	8.9	17.83	1.9	10.68
lug-22	0.81	12.39	9.33	0.55	5.9	15.84	1.36	8.57
gen-23	0.83	9.93	14.19	0.87	6.12	22.53	1.7	7.53
mar-23	1.04	10.83	10.92	1.01	9.3	20.51	2.05	10.02

Tab. 4.23: Profili trasversali di spiaggia – PS6

### Profilo 7 Rotocamping (PS7)

Il profilo PS7 è collocato in corrispondenza del Rotocamping (Fig. 4.50).



*Fig. 4.50: Collocazione del profilo PS7 – Rotocamping*

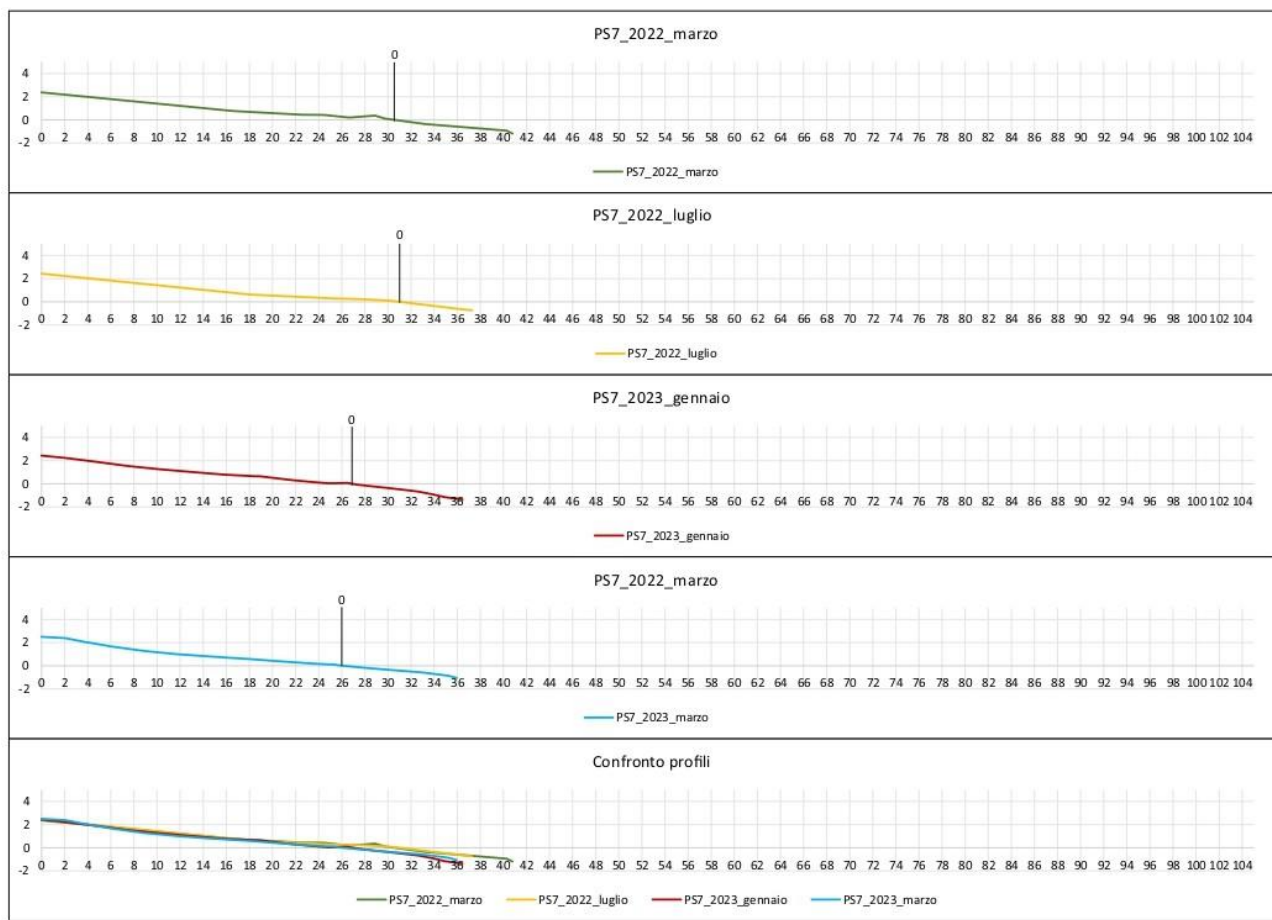
Come si può osservare dalla figura 4.51, il profilo è caratterizzato da una spiaggia larga circa 10 metri e delimitata internamente dal Rotocamping.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da sabbia grossolana nella zona della spiaggia con un diametro medio di 1,50 mm e da ciottoli in zona di battigia con una media di 3,08 mm.



*Fig. 4.51: Area profilo 7 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS7 (Tav. 4.20 e Tab. 4.24).



Tav 4.20: Profili trasversali di spiaggia – PS7

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.3	11.77	29.74	2.26	7.59	40.78	3.56	8.72
lug-22	0.84	11.75	30.14	2.33	7.74	37.26	3.17	8.5
gen-23	1.1	14.44	28.81	2.68	9.29	36.45	3.78	10.37
mar-23	1.09	10.67	25.72	2.47	9.59	35.95	3.56	9.9

Tab. 4.24: Profili trasversali di spiaggia – PS7

L'analisi effettuata sul profilo PS7, restituisce valori di ampiezza di spiaggia che tendono a diminuire nel tempo. Il confronto tra marzo 2022 e marzo 2023 mostra un restringimento della spiaggia di circa 5 m.

### Profilo 8 Lido Playa Caribe (PS8)

Il profilo PS8 è collocato a circa 50 metri dallo stabilimento balneare “Lido Playa Caribe” (Fig. 4.52).



*Fig. 4.52: Collocazione del profilo PS8 – Lido Playa Caribe*

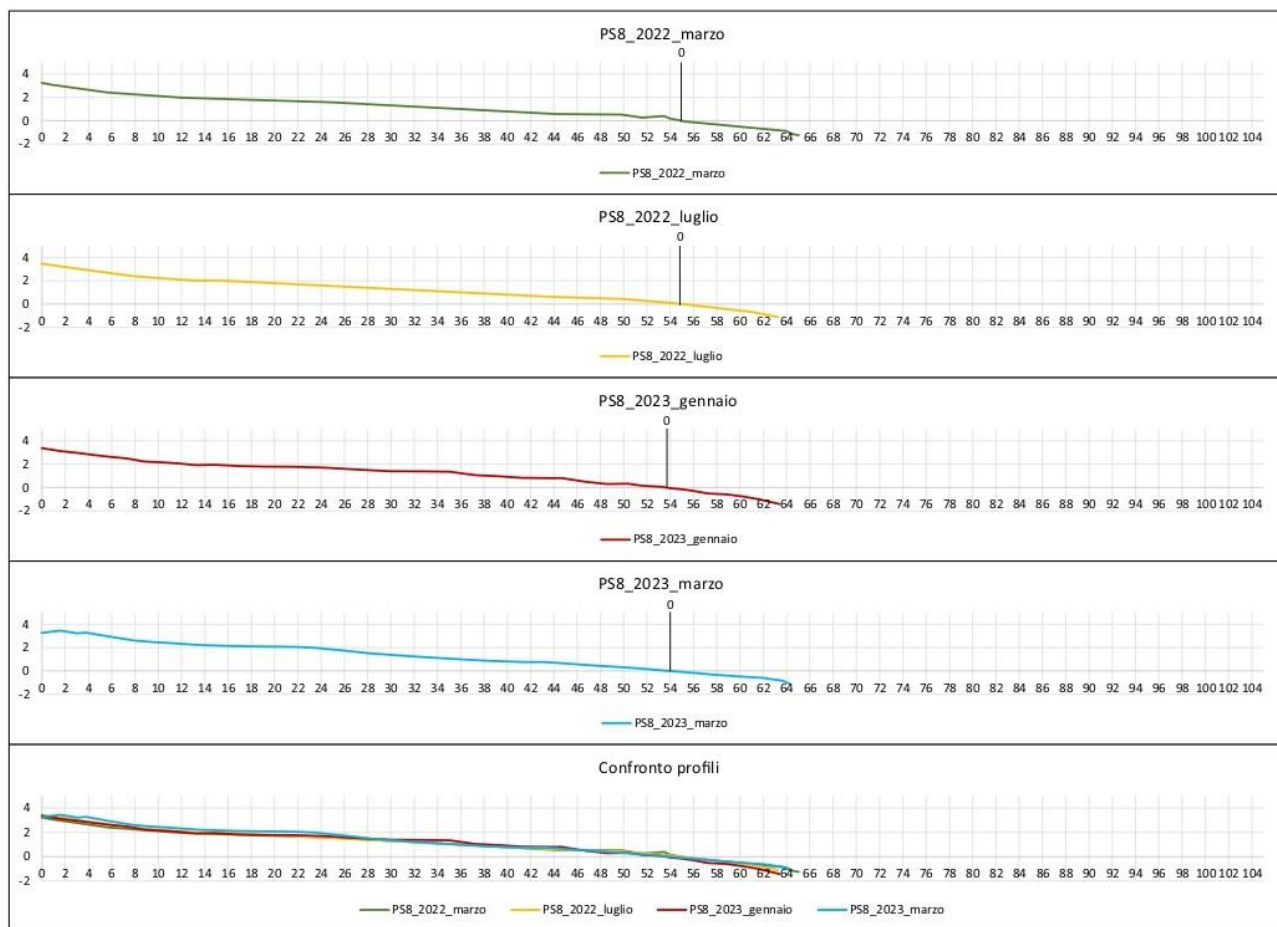
Come si può osservare dalla figura 4.53, il profilo PS8 è costituito da una spiaggia lunga circa 40 m e da una ristretta zona composta da dune embrionali. È delimitata internamente dalla passerella che collega i diversi stabilimenti balneari.

I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da ciottoli sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 5,14 mm e ciottoli sulla battigia con una media di 2,20 mm.



*Fig. 4.53: Area profilo 8 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS8 (Tav. 4.21 e Tab. 4.25).



Tav 4.21: Profili trasversali di spiaggia – PS8

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.18	12.1	43.3	2.03	4.7	53.04	3.21	6.06
lug-22	1.21	13.21	40.81	1.89	4.63	49.98	3.1	6.2
gen-23	1.27	15.15	43.28	2.21	5.11	51.7	3.49	6.74
mar-23	1.2	10.21	41.91	2.3	5.49	53.64	3.5	6.52

Tab. 4.25: Profili trasversali di spiaggia – PS8

L'analisi effettuata sul profilo PS8, restituisce valori pressoché simili di ampiezza e pendenza di spiaggia nei vari periodi. La situazione di stabilità si riflette anche nel confronto totale rappresentato nella tavola 4.21.

### Profilo 9 Confine regionale (PS9)

Il profilo PS1 è collocato a 150 metri a nord dal confine regionale tra la Basilicata e la Calabria (Fig. 4.54).



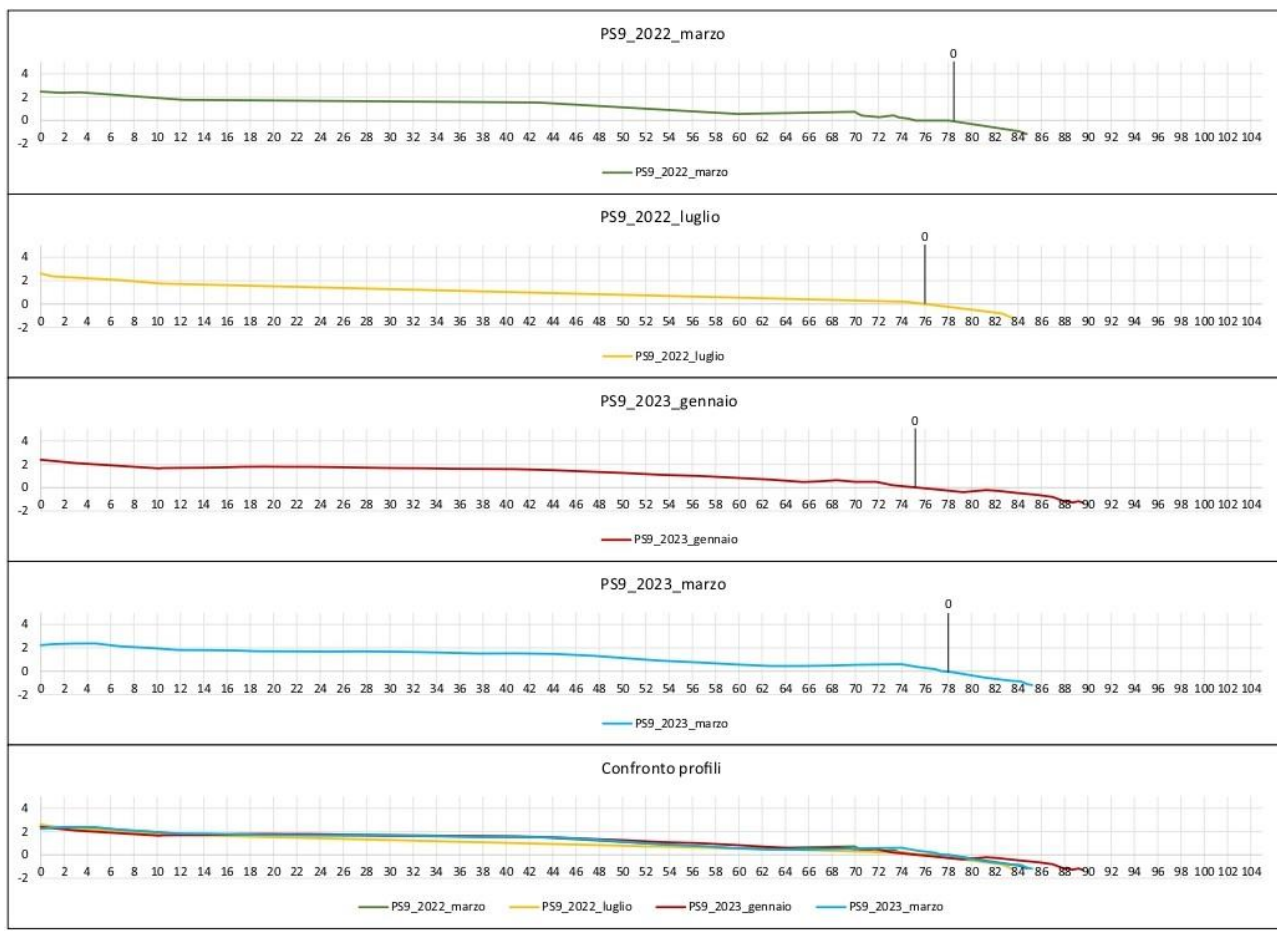
*Fig. 4.54: Collocazione del profilo PS9 – Confine regionale*

Come si può osservare dalla figura 4.55, il profilo PS9 è costituito da una spiaggia larga circa 60 m e da una ristretta zona composta da dune embrionali. È delimitata internamente dalla passerella che collega i diversi stabilimenti balneari. I sedimenti lungo questo tratto di costa sono costituiti da ciottoli sulla zona della spiaggia con un diametro medio di 5,28 mm e sabbia media sulla battigia con una media di 0,48 mm.



*Fig. 4.55: Area profilo 9 – Area Sinni*

Dai rilievi effettuati in campo, è stato possibile ottenere un quadro esplicativo della dinamica stagionale e annuale che caratterizza il profilo PS9 (Tav. 4.22 e Tab. 4.26).



Tav 4.22: Profili trasversali di spiaggia – PS9

Month	Foreshore Height (m)	Foreshore Slope (%)	Backshore Width (m)	Backshore Height (m)	Backshore Slope (%)	Backshore + Foreshore Width (m)	Backshore + Foreshore Height (m)	Backshore + Foreshore Slope (%)
mar-22	1.16	12.16	58.29	1.74	2.98	67.83	2.9	4.27
lug-22	1.36	15.01	64.04	1.56	2.43	73.15	2.92	4.06
gen-23	1.07	12.89	71.04	1.86	2.61	79.34	2.93	3.69
mar-23	1.2	15.39	58.85	1.69	2.87	66.68	2.89	4.34

Tab. 4.26: Profili trasversali di spiaggia – PS9

L'analisi del profilo PS9 restituisce valori pressoché simili di ampiezza e pendenza di spiaggia nel confronto tra marzo 2022 e marzo 2023. Le lievi differenze tra i valori ottenuti dai quattro rilievi effettuati, sarebbero attribuibili alla stagionalità.

#### 4.5 Risultati e considerazioni

Attraverso i dati ottenuti dai rilievi in campo, è stato possibile acquisire informazioni cruciali per la caratterizzazione morfo-sedimentaria e morfometrica dei tratti costieri esaminati.

L'Area Biferno è caratterizzata dalla presenza di spiagge di larghezza variabile e di numerose opere di difesa costituite sia da breakwaters che da *groins*.

I profili ottenuti forniscono un quadro esaustivo della morfologia delle spiagge oggetto di analisi.

In particolare, i valori bassi riscontrati relativi alla pendenza sia del *backshore* che del *foreshore*, uniti alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti, consentono di classificare tali spiagge secondo la distinzione effettuata da Wright e Short (1984) come spiagge dissipative.

Le dune presenti nell'Area Biferno sono principalmente embrionali e delimitate internamente da strade o passerelle; risultano molto frammentate e questo influisce direttamente sulla loro stabilità durante gli eventi di mareggiata particolarmente energetici.

Come evidenziato negli studi di Di Paola et al. (2020 e 2022), le numerose opere di difesa costiera presenti lungo tutto il tratto costiero, influiscono pesantemente sulla circolazione dei sedimenti in generale e il trasporto lungo costa in particolare, sull'andamento della linea di costa e sulla morfologia della spiaggia sommersa.

Per ciò che attiene l'Area Mingardo, le indagini effettuate permettono di classificare le spiagge di questo tratto di costa come spiagge riflettive. Ciò è ampiamente confermato dai valori che riguardano l'elevata pendenza e la granulometria grossolana dei sedimenti.

Le dune presenti nell'area si sviluppano per circa 2 km, ricoprendo, quindi circa il 57% dell'area totale. Tuttavia, la costruzione degli stabilimenti balneari stagionali e la continua ingressione marina durante gli eventi di mareggiata, compromettono la loro stabilità nel lungo termine.

L'Area Mingardo non presenta opere di difesa costiera.

Per quanto riguarda, infine, l'Area Sinni, i valori ottenuti per la pendenza del *backshore* e del *foreshore* e la granulometria dei sedimenti, permettono di classificare le spiagge del tratto costiero lucano come spiagge intermedie.

Le spiagge dell'Area Sinni presentano caratteristiche differenti in base alla loro ubicazione. In particolare le spiagge che più risentono della componente antropica sono quelle poste a sud della foce del Fiume Sinni, tra la zona di Rotondella e la zona di Nova Siri. Sono infatti caratterizzate dalla presenza di stabilimenti balneari che alterano la morfologia della spiaggia in occasione dell'apertura della stagione balneare. Tale interferenza impatta direttamente sul corretto sviluppo della vegetazione dunale e, di conseguenza, sulla stabilità complessiva delle dune. In alcune tratti, le dune risultano completamente assenti poiché sono state appianate per favorire la realizzazione di passerelle.

Il tratto di costa che va, invece, dall'Oasi WWF Bosco Pantano di Policoro fino a poco prima della spiaggia di Rotondella, risulta essere quasi completamente naturale, con dune che si sviluppano internamente, dove si può distinguere una sviluppata zona retrodunale.

Durante le attività di rilievo in campo, è emerso un fenomeno interessante relativo allo spostamento rapido verso nord della foce del Fiume Sinni. Questo fenomeno, probabile sintomo di una forte dinamica costiera e di un drift litoraneo da sud verso nord, ha reso impossibile condurre ulteriori rilievi sul profilo 3 a partire da gennaio 2023 fino alla presente data.

L'Area Sinni non presenta opere di difesa costiera.

## Bibliografia citata

- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all’erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90
- BUCCINO M., DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., DEL GIUDICE G., ROSSKOPF C.M. (2020) – *A medium-term study of Molise coast evolution based on the one-line equation and “Equivalent Wave” concept*. Water, **12**, 2831.
- DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., BUCCINO M., ROSSKOPF C.M. (2020) – *Influence of hard defence structures on shoreline erosion along Molise coast (southern Italy): a preliminary investigation*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., **51**, <https://doi.org/10.3301/ROL.2020.10>.
- DI PAOLA G., MINERVINO A. A., DILAURO G., RODRIGUEZ G., ROSSKOPF C.M. (2022) – *Shoreline evolution and erosion vulnerability assessment along the central Adriatic coast with the contribution of UAV beach monitoring*. Geosciences, **12**, 353.
- IANNANTUONO E. (2007) - *Morfodinamica e tendenze evolutive del tratto di costa compreso tra P.ta Penna e P.ta Pietre Nere*. Dottorato di Ricerca XIX ciclo in Scienze Ambientali, Università dell’Aquila.
- RUTIGLIANO P. (2003) – *Possibili applicazioni della tecnica GPS nelle attività professionali*. Geologia Territorio e Ambiente, **4**, 6-10.
- WENTWORTH C.K. (1922) – *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, **30** (5), 377-392.
- WRIGHT L.D., SHORT, A.D. (1984) – *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, **56**, 93-118.

## **Capitolo V - Evoluzione della linea di riva nei settori costieri studiati**

### **Introduzione**

La definizione della linea di costa, o linea di riva, si configura come il luogo dinamico in cui terra, mare e aria convergono (Pranzini, 2004). Nonostante la sua apparente semplicità, l'identificazione di questo elemento geografico si rivela tutt'altro che agevole, data la costante fluttuazione del livello marino e le possibili interruzioni provocate da foci fluviali, bocche lagunari e ghiacciai che si riversano direttamente in mare. Gli studiosi si avvalgono di approcci multidisciplinari, utilizzando dati geologici, oceanografici e topografici, per delineare con precisione questa frontiera dinamica e comprendere le intricate dinamiche che la modellano nel tempo. Le sfide legate all'identificazione accurata della linea di costa evidenziano la complessità intrinseca di questo elemento fondamentale per la geomorfologia costiera (Pranzini, 2004).

Questa linea di demarcazione tra terra e mare si estende per oltre 440.000 chilometri sulla superficie terrestre (Inman & Nordstrom, 1971), dando spazio a significativi e densamente popolati insediamenti urbani. Comprendere con dettaglio la posizione della linea di riva e la sua evoluzione nel tempo è, dunque, di fondamentale importanza per cogliere le dinamiche intrinseche che modellano il paesaggio marino e contribuire così a una gestione più consapevole e mirata delle risorse costiere.

L'analisi dell'evoluzione della linea di costa riveste un ruolo cruciale nell'ambito di questa ricerca di dottorato, poiché costituisce un elemento fondamentale per una comprensione approfondita dei processi di erosione in corso nelle aree di studio considerate. L'importanza di questo tipo di studio si manifesta nella sua capacità di fornire un quadro completo e dettagliato dei cambiamenti che interessano le coste, permettendo una valutazione accurata dei tassi di erosione.

Questo capitolo, dopo una breve illustrazione sulle metodologie e i materiali utilizzati, si propone di esplorare dettagliatamente l'andamento temporale della linea di costa nelle nostre aree di interesse, sottolineando l'implicazione diretta di tali indagini nella comprensione e mitigazione dei fenomeni erosivi che caratterizzano questi contesti costieri.

### **5.1 Materiali e metodi**

L'analisi della linea di costa è un processo complesso che coinvolge l'utilizzo di diversi strumenti e metodi per ottenere una comprensione approfondita delle dinamiche costiere nel corso del tempo. L'utilizzo della cartografia storica rappresenta un fondamentale punto di partenza, consentendo di esaminare le tendenze evolutive che hanno caratterizzato il sistema costiero in un'analisi sul breve termine. Questa metodologia fornisce un quadro temporale utile per valutare l'evoluzione della linea di costa e identificare i cambiamenti geografici nel corso degli anni. L'indagine cartografica mira ad

ottenere informazioni dettagliate sulle variazioni morfologiche e morfometriche intercorse nei secoli, ma un problema di non facile soluzione risiede nel fatto che spesso le cartografie possono presentare errori dovuti principalmente al diverso sistema di riferimento utilizzato in passato e convertito in tempi più recenti e alla diversa scala nel caso di confronto tra diverse cartografie storiche. Un ulteriore aspetto che può influire sulla precisione delle carte è la georeferenziazione delle carte stesse, la quale, molto spesso, può contenere imprecisioni dovute all'operatore coinvolto nel processo. A partire dal 1870 l'Istituto Geografico Militare Italiano dà inizio alla redazione della carta topografica fondamentale d'Italia utilizzando la Proiezione Naturale Policentrica di Samson-Flamsteed, che verrà successivamente sostituita dalla proiezione cilindrica inversa di Gauss-Boaga e dalla Universal Transverse Mercator Project (UTM).

Le immagini satellitari, in aggiunta, giocano un ruolo cruciale nell'analisi contemporanea della linea di costa. Questi strumenti forniscono una visione dettagliata e in tempo reale delle caratteristiche costiere, consentendo la rilevazione di cambiamenti più recenti.

L'utilizzo di sistemi informativi geografici (GIS), infine, amplifica ulteriormente la capacità di analisi, permettendo l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti. I GIS consentono la mappatura dettagliata, l'analisi spaziale e la modellazione delle variazioni costiere, facilitando una comprensione più completa delle dinamiche in atto.

La combinazione di cartografia storica, immagini satellitari e GIS offre un approccio sinergico e multidisciplinare per esplorare la complessità della linea di costa. Questi strumenti non solo permettono di identificare cambiamenti evidenti, ma anche di anticipare e gestire potenziali impatti futuri sulle aree costiere, sottolineando l'importanza di una valutazione accurata per la gestione sostenibile delle risorse marine e costiere.

Come anticipato, va sottolineato che il confronto tra carte e prodotti derivati da foto aeree può comportare errori significativi, che necessitano di una valutazione attenta. La precisione dei tassi di variazione della costa è condizionata da diverse fonti potenziali di errore, tra cui l'inadeguatezza dei materiali di origine, gli errori di posizionamento, la distorsione delle foto, l'imprecisione nella georeferenziazione, le variazioni stagionali del litorale e l'accuratezza nell'identificazione e digitalizzazione dell'interfaccia terra-acqua (Crowel et al., 1991; Thieler & Danforth, 1994; Moore, 2000; Hapke et al., 2006; Romagnoli, 2006).

Poiché la cartografia delle aree prese in esame non presenta errori rilevanti, l'errore relativo all'operazione di ortorettifica è stato controllato attraverso la radice dell'errore quadratico medio (RMSE) pari a  $\pm 3$ m.

Un errore altrettanto importante che incide sulla precisione e l'accuratezza delle misurazioni, riguarda l'identificazione precisa della linea di costa nelle foto aeree e nelle cartografie storiche.

La letteratura presenta diverse definizioni in proposito. Ad esempio, Camfield e Morang (1996) definiscono la linea di riva come l'intersezione della lama d'acqua data da un particolare livello del mare con la battigia corrispondente alla linea di quota zero. Langfelder et al. (1970) la descrivono come il luogo dei punti che individuano la linea di alta marea, poiché la sua posizione in riva rappresenta il limite interno massimo dell'influenza delle onde medie (e la sola individuabile in foto aerea).

Nel contesto di questo studio, la posizione della linea di riva è stata definita come la separazione tra la terra e il mare al momento dello scatto della foto, considerando l'ambiente microtidale (del Pozo & Anfuso, 2008). Poiché non è stato possibile ricostruire le condizioni di marea al momento dello scatto di ogni singolo fotogramma, si è considerato che la posizione della riva giornaliera presentasse un'incertezza massima di circa  $\pm 0,03$  m. Inoltre, poiché le foto aeree sono state acquisite in periodi diversi dell'anno, sono da considerare anche le fluttuazioni stagionali (Morton, 1978; Crowell et al., 1993), pari a 0,06 m per la nostra area, corrispondente alla massima variabilità del livello del mare durante la stagione invernale.

Le linee di riva individuate tramite rilievi topografici sono state ottenute interpolando i punti rilevati ad una risoluzione spaziale di 50m con il DGPS R6 della Trimble. Questa precisione ha permesso di ottenere una linea di costa con un RMSE molto basso.

L'analisi è stata condotta in ambiente GIS con l'ausilio del plug-in DSAS, un'estensione del software ArcGIS (ESRI, Redlands, California) (Thieler et al., 2005), che, dopo aver definito il criterio di misura impostando i transetti, perpendicolari alla linea di costa, regolarmente spazati, ha permesso di ottenere dati utili a definire i tassi di arretramento/avanzamento della linea di costa

La metodologia ha previsto la realizzazione di transetti a intervalli di 500 m/1 km, con il calcolo delle relative variazioni considerando due rive successive ad ogni transetto (Thieler et al., 1994; Addo et al., 2008; Houser et al., 2008; Leyland et al., 2008). I tassi di variazione storica, calcolati per ciascun transetto, sono stati ottenuti attraverso l'analisi sulla regressione lineare (Morton et al., 2004).

Per effettuare la valutazione sui tassi di arretramento/avanzamento della linea di riva, si è ritenuto opportuno utilizzare il criterio definito da Crowell et al. (1993) che suddivide i periodi di indagine in *Long-Term* (>60 anni), *Medium-Term* (10-60 anni) e *Short-Term* (<10 anni).

## **5.2 Variazione della linea di riva in Area Biferno tra il 1954 e il 2023**

L'analisi multitemporale sulle linee di riva in Area Biferno è stata condotta in ambiente GIS mediante l'utilizzo del materiale cartografico disponibile e dai rilievi GPS effettuati in campo (Tab. 5.1):

Data	Origine del dato
1954	Cartografia IGM
1989	Foto aerea Geoportale Nazionale
2000	Foto aerea Geoportale Nazionale
2012	Google Earth
2016	Google Earth
2022	Rilievo GPS di marzo
2022	Rilievo GPS di luglio
2023	Rilievo GPS di gennaio
2023	Rilievo GPS di marzo

Tab. 5.1: materiale utilizzato per le analisi multitemporali della linea di costa

Una volta tracciate le linee di costa si è proceduto con l'analisi tramite DSAS.

Per l'analisi delle varie variabili calcolate in rapporto ai cambiamenti spazio-temporali della linea di costa, l'area Biferno è stata suddivisa in tre settori, nominati B1, B2 e B3 (Fig 5.1) e corrispondenti ai settori S6, S7 e parte settentrionale del settore S8 distinti da Iannantuono (2007) e successivamente utilizzato negli studi di Aucelli et al. (2017), Roskopf et al (2017) al fine di permettere anche una comparazione dei dati di questo studio con i dati precedentemente acquisiti per la costa molisana.

I dati ottenuti hanno riguardato il *Net Shoreline Movement* (NSM) e il *Linear Regression Rate* (LRR) (Tab. 5.2):

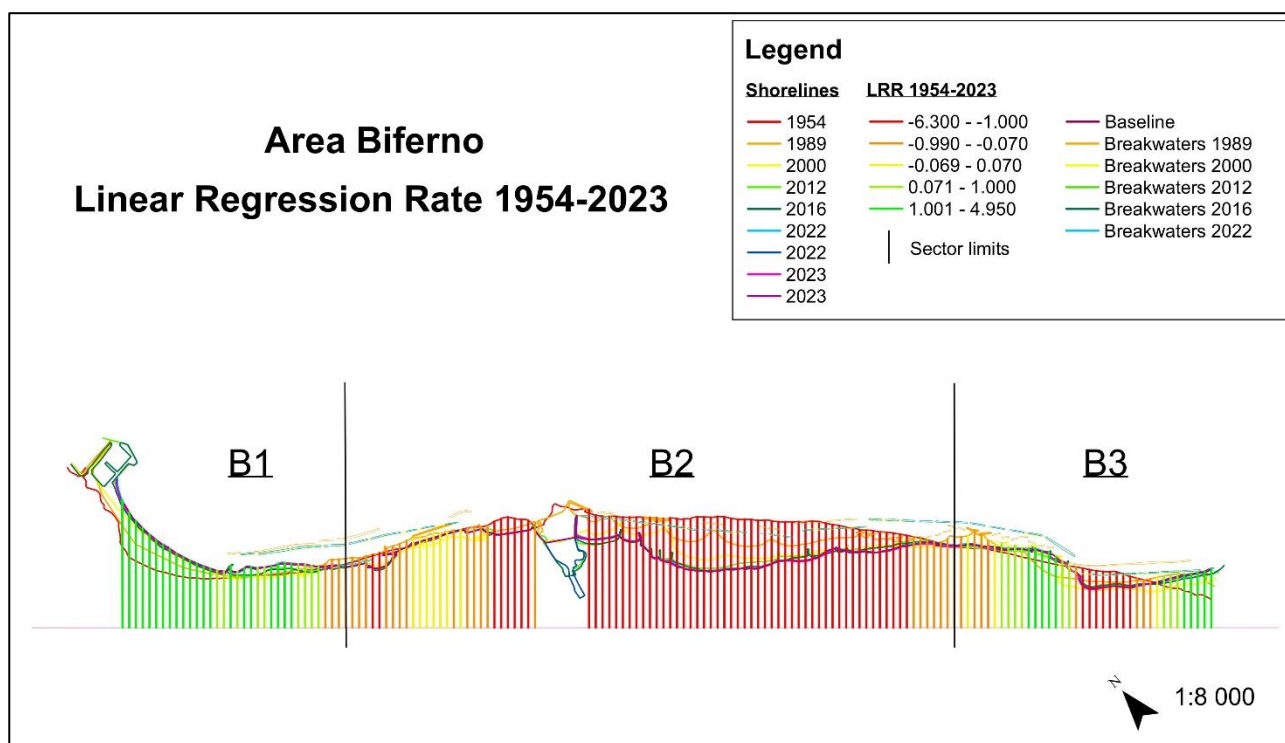


Fig. 5.1: Linear Regression Rate 1954-2023 – Area Biferno.

Linear Regression Rate - Totale - 9,5 km			
	1954 – 2023	1989-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	34%	33,77%	57,79%
Arretramento (%)	58%	62,34%	35,72%
Stabilità (%)	7%	3,89%	6,49%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	333,05	172,93	61,74
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-405,07	-316,98	-36,58
Media dei valori (m)	-59,94	-42,22	5,95
Media dei valori (m/a)	-0,96	-0,99	0,69
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	4,95	5,00	9,24
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-6,30	-9,88	-6,10

Tab. 5.2: Valori di Linear Regression Rate in Area Biferno

Osservando i risultati ottenuti per l'intera Area Biferno (Tab. 5.2), si evince principalmente che: l'area Biferno mostra una notevole tendenza all'arretramento nel lungo termine (58% nel periodo 1954-2023), pari ad una media globale annua di -0.96 m/a) e valori medi di arretramento di ca. 60 m (-59.94 m).

Durante il trentennio 1989-2023, l'area Biferno si caratterizza per un'evoluzione sostanzialmente identica a quella del periodo complessivo, come documentano le percentuali in arretramento e in progradazione, ma mostra anche un leggero peggioramento delle proprie condizioni. Questo peggioramento si riflette principalmente nei valori di massimo arretramento annuo (-9.88 m/y rispetto ai -6.3 m/a del periodo complessivo) e nei valori di massimo arretramento di -316,98 m rispetto ai -405,07 m del periodo complessivo. Al contrario, il periodo più recente, testimone dei trend evolutivi più recenti, è caratterizzato da un miglioramento netto delle condizioni di stabilità e una predominanza del trend di progradazione rispetto all'arretramento (57,79% rispetto ai 34%, del periodo totale, e 35,72% rispetto ai 58%, Tab. 5.2).

Guardando i singoli settori costieri (Tab. 5.3) in cui è stata suddivisa l'Area Biferno (B1-B3, Fig. 5.1), si può notare un suo comportamento estremamente eterogeneo: come mostrano i vari valori riportati nella tabella 5.3, nel periodo 1954-2023, i tratti B1 e B3 sono nettamente in progradazione, il tratto B2 che include la foce del fiume Biferno è, invece, in arretramento.

Tuttavia, considerando con maggiore dettaglio il tratto B1 emerge un peggioramento delle condizioni nel corso dell'ultimo trentennio e un sostanziale equilibrio considerando il più recente periodo 2016-2023; Il tratto B3, invece, si comporta in modo omogeneo nel lungo, nel medio e nel breve termine. Infine, il tratto B2 mostra una forte tendenza all'arretramento sia nel medio che nel lungo termine, con elevati valori di arretramento annuo soprattutto per il secondo triennio (vedi tab.5.3, -9,88 m/a), ma anche un sostanziale recupero nel periodo più recente (percentuali tra avanzamento e stabilità che superano il 56%);

Linear Regression Rate - <b>B1</b> - 2,5 km			
	1954 - 2023	1989-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	60,53%	39,47%	47,37%
Arretramento (%)	31,58%	50%	47,37%
Stabilità (%)	7,89%	10,53%	5,26%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	177,95	159,64	31,45
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-137,05	-96,56	-18,58
Media dei valori (m)	12,10	-2,10	4,10
Media dei valori (m/a)	0,13	0,22	0,18
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,28	3,58	4,25
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-1,92	-2,18	-3,38
Linear Regression Rate - <b>B2</b> - 4,8 km			
	1954 - 2023	1989-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	8,43%	46,99%
Arretramento (%)	90,36%	89,16%	43,37%
Stabilità (%)	9,64%	2,41%	9,64%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	15,08	10,21	34,87
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-405,07	-316,98	-33,13
Media dei valori (m)	-161,31	-101,98	-1,49
Media dei valori (m/a)	-2,49	-2,67	-0,35
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	0,06	0,45	5,56
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-6,30	-9,88	-5,37
Linear Regression Rate - <b>B3</b> - 2,2 km			
	1954 - 2023	1989-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	90,91%	90,91%	96,97%
Arretramento (%)	9,01%	9,09%	3,03%
Stabilità (%)	0%	0%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	333,05	172,93	61,74
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-2,59	-44,82	-36,58
Media dei valori (m)	112,05	61,60	26,78
Media dei valori (m/a)	1,62	1,83	3,91
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	4,95	5,00	9,24
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-0,36	-1,01	-6,10

Tab.5.3: Valori di Linear Regression Rate in Area Biferno

### 5.3 Variazione della linea di riva in Area Mingardo tra il 1956 e il 2023

L'analisi multitemporale sulle linee di riva in Area Mingardo è stata condotta in ambiente GIS mediante l'utilizzo del materiale cartografico disponibile e dai rilievi GPS effettuati in campo (Tab. 5.4):

Data	Origine del dato
1956	Cartografia IGM
1992	Foto aerea Geoportale Nazionale
1998	Foto aerea Geoportale Nazionale
2011	Google Earth
2016	Google Earth
2022	Rilievo GPS di marzo
2022	Rilievo GPS di luglio
2023	Rilievo GPS di gennaio
2023	Rilievo GPS di marzo

Tab. 5.4.: materiale utilizzato per le analisi multitemporali della linea di costa

Una volta tracciate le linee di costa si è proceduto con l'analisi tramite DSAS.

Per l'analisi delle varie variabili calcolate in rapporto ai cambiamenti spazio-temporali della linea di costa, l'area Mingardo è stata suddivisa in tre settori, M1-M3 (Fig 5.2).

I dati ottenuti hanno riguardato il *Net Shoreline Movement* (NSM) e il *Linear Regression Rate* (LRR) (Tab. 5.5):

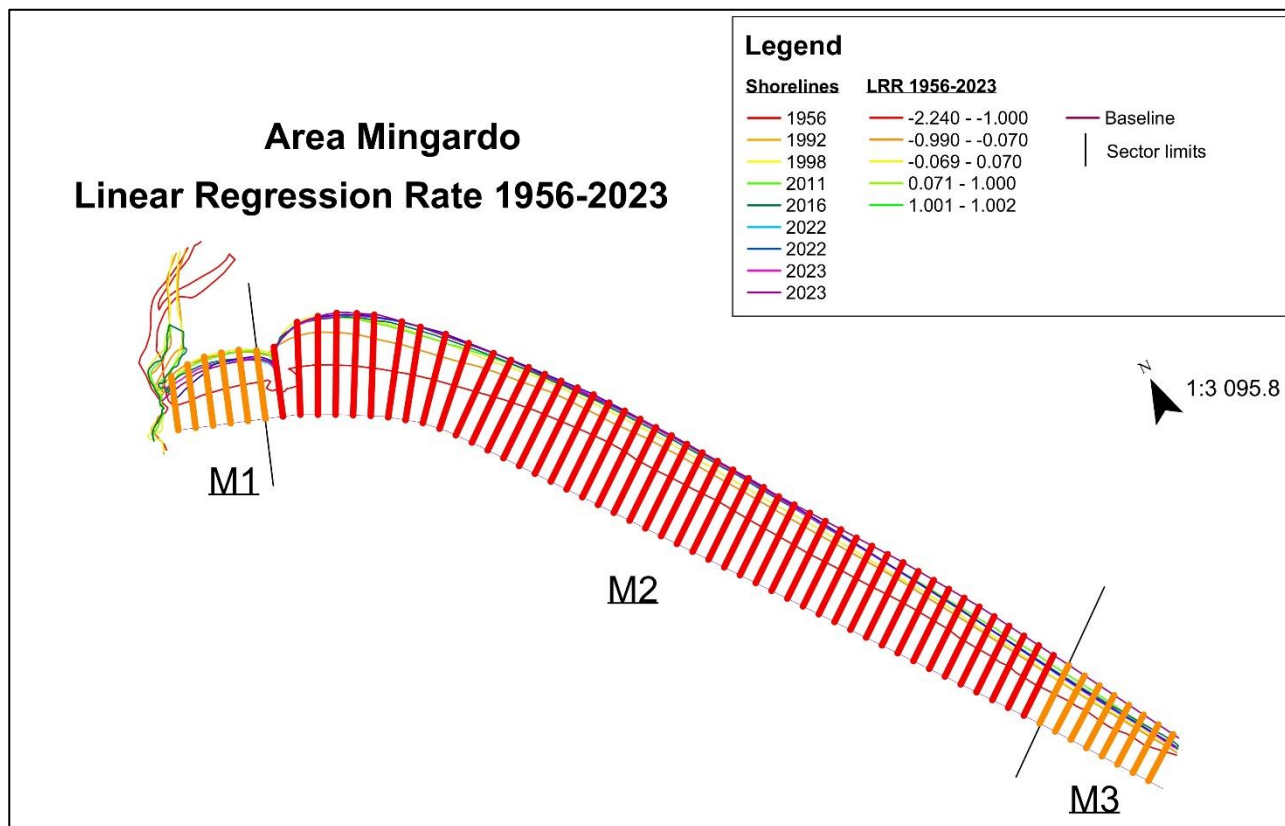


Fig. 5.2: Linear Regression Rate 1956-2023 – Area Mingardo.

Linear Regression Rate - Totale - 3,22 km			
	1956 – 2023	1992-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	10%	8%
Arretramento (%)	100%	90%	90%
Stabilità (%)	0%	0%	2%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-38,50	43,02	24,73
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-165,30	-67,18	-37,09
Media dei valori (m)	-100,91	-39,33	-14,26
Media dei valori (m/a)	-1,32	-0,83	-0,91
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,42	1,44	4,03
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,24	-1,67	-1,89

Tab. 5.5: Valori di Linear Regression Rate in Area Mingardo

Osservando i risultati ottenuti per l'intera Area Mingardo (Tab. 5.5), si evince che essa mostra una notevole e costante tendenza all'arretramento (100% nel periodo 1954-2023), con una media globale annua di -1,32 m/a e valori medi di arretramento di ca. 100 m (-100,91 m). Nei periodi successivi, tali valori scendono leggermente, raggiungendo un 90% di arretramento e valori medi di arretramento di -0,83 e -0,91 m/a (Tab. 5.5).

Come mostrano i dati ottenuti per i singoli settori distinti per il periodo 1992-2023 (Tab 5.6), la diminuzione al 90% di arretramento dell'intera area è da attribuire esclusivamente alla totale inversione di tendenza del settore M1, prospiciente l'area di foce del fiume Mingardo, che da 100% di arretramento passa al 100% di progradazione con una media di valori di 31,54 m ed una media annua di 1,08 m/a. Per ciò che riguarda gli altri due settori, nel trentennio indagato, si continua ad osservare un costante arretramento che, però, vede i valori medi di arretramento e di arretramento annuo diminuire rispetto al periodo totale indagato.

Tra il 2016 e il 2023, il tratto M1 registra sempre un'alta percentuale di avanzamento (83%, tab. 5.6), con una media di 1,61 m/a e con variazioni della linea di riva che oscillano tra +24,73 m e -4,69 m. I settori M2 e M3 continuano a registrare valori negativi, ma con medie più basse rispetto al periodo totale indagato. In particolare, il settore M3 mostra una percentuale di stabilità del 12,5% e un valore di massimo arretramento che da -53,64 m del periodo 1992-2023 si abbassa a -34,82 m nel periodo 2016-2023.

Linear Regression Rate - <b>M1</b> - 0,32 km			
	1956 - 2023	1992-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	100%	83,33%
Arretramento (%)	100%	0%	16,67%
Stabilità (%)	0%	0%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-38,50	43,02	24,73
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-68,05	17,64	-4,69
Media dei valori (m)	-60,83	31,54	12,51
Media dei valori (m/a)	-0,71	1,08	1,61
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,42	1,44	4,03
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-0,84	0,75	-0,98
Linear Regression Rate - <b>M2</b> - 2,53 km			
	1956 - 2023	1992-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	0%	0%
Arretramento (%)	100%	100%	100%
Stabilità (%)	0%	0%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-96,42	-31,84	-1,70
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-165,30	-67,18	-37,09
Media dei valori (m)	-110,32	-47,22	-15,53
Media dei valori (m/a)	-1,49	-1,09	-1,27
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-1,01	-0,54	-0,22
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,24	-1,67	-1,89
Linear Regression Rate - <b>M3</b> - 0,37 km			
	1956 - 2023	1992-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	0%	0%
Arretramento (%)	100%	100%	87,50%
Stabilità (%)	0%	0%	12,50%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-54,74	-39,21	-17,08
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-91,41	-53,64	-34,82
Media dei valori (m)	-76,89	-47,13	-27,04
Media dei valori (m/a)	-0,79	-0,73	-0,71
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,56	-0,62	0,05
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-0,94	-0,84	-1,36

Tab. 5.6: Valori di Linear Regression Rate in Area Biferno

#### 5.4 Variazione della linea di riva in Area Sinni tra il 1949 e il 2023

L'analisi multitemporale sulle linee di costa in Area Sinni è stata condotta in ambiente GIS mediante l'utilizzo del materiale cartografico disponibile e dai rilievi GPS effettuati in campo (Tab. 5.7):

Data	Origine del dato
<b>1949</b>	Cartografia IGM
<b>1988</b>	Foto aerea Geoportale Nazionale
<b>1997</b>	Foto aerea Geoportale Nazionale
<b>2013</b>	Google Earth
<b>2015</b>	Google Earth
<b>2022</b>	Rilievo GPS di marzo
<b>2022</b>	Rilievo GPS di luglio
<b>2023</b>	Rilievo GPS di gennaio
<b>2023</b>	Rilievo GPS di marzo

Tab. 5.7.: materiale utilizzato per le analisi multitemporali della linea di costa

Una volta tracciate le linee di costa si è proceduto con l'analisi tramite DSAS.

Per l'analisi delle varie variabili calcolate in rapporto ai cambiamenti spazio-temporali della linea di costa, l'area Sinni è stata suddivisa in tre settori, S1-S3 (Fig 5.3).

I dati ottenuti hanno riguardato il *Net Shoreline Movement* (NSM) e il *Linear Regression Rate* (LRR) (Tab. 5.8)

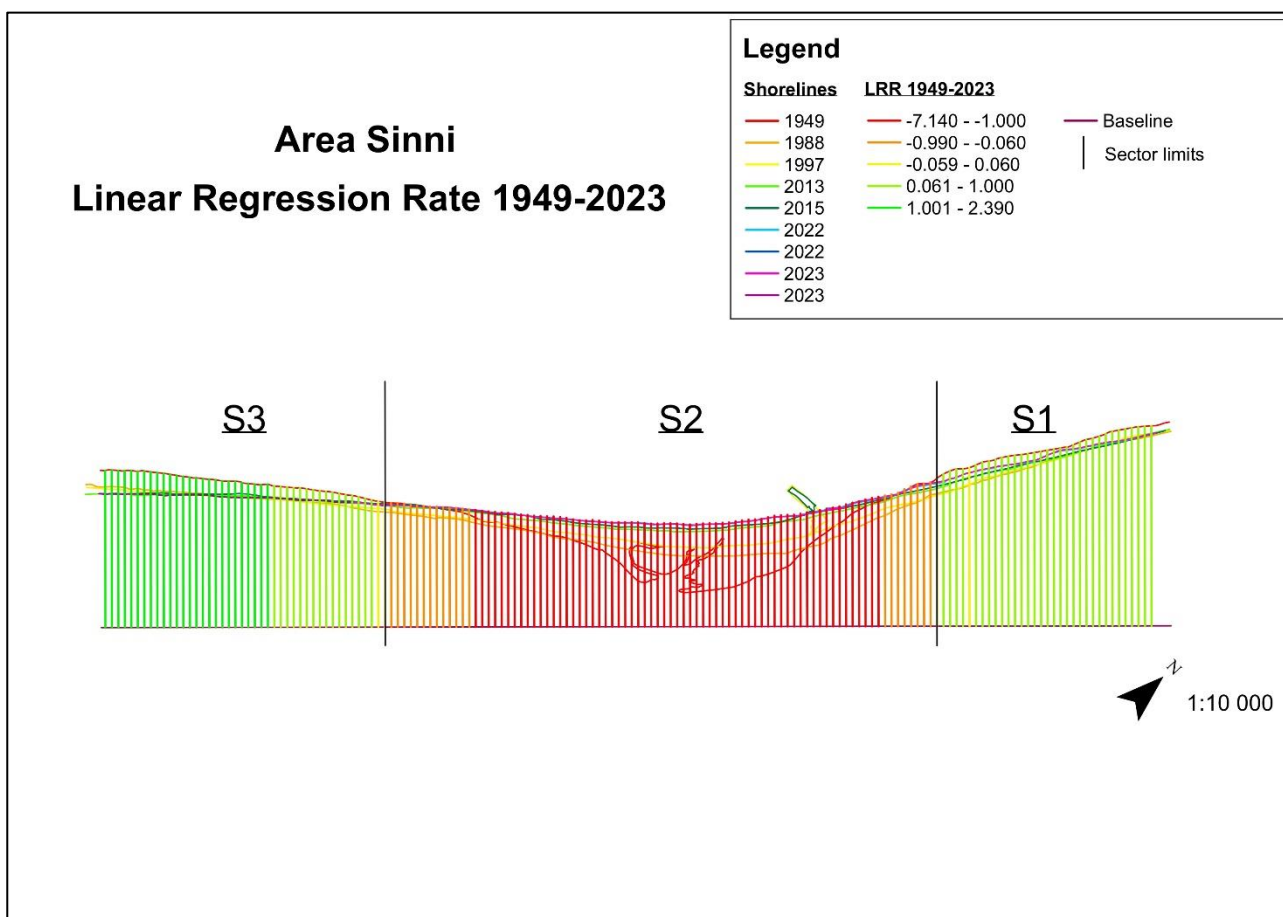


Fig. 5.3: Linear Regression Rate 1956-2023 – Area Sinni.

Linear Regression Rate - Totale - 7,98 km			
	1949 – 2023	1988-2023	2015-2023
Avanzamento (%)	46%	25%	27%
Arretramento (%)	52%	73%	73%
Stabilità (%)	2%	2%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	182,22	55,30	21,86
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-527,45	-295,51	-54,55
Media dei valori (m)	-70,81	-107,59	-19,70
Media dei valori (m/a)	-1,19	-2,99	-1,94
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,39	1,57	3,62
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-7,14	-8,11	-6,40

Tab. 5.8: Valori di Linear Regression Rate in Area Sinni

Come mostra la tabella 5.8, l'area Sinni si caratterizza per una sostanziale stabilità nel lungo termine (46% in avanzamento, 52% in arretramento). Tuttavia, guardando gli ultimi 35 anni (trentennio 1988-2023) si nota un netto peggioramento delle condizioni di stabilità (25% di avanzamento rispetto a 73% di arretramento) documentato anche dal valore massimo di arretramento di -8,11 m/a, nettamente più alto rispetto a quelli degli altri periodi (-7,14 e -6,4 m/a, Tab. 5.8). La tendenza evolutiva recente, relativo al periodo 2015-2023, è conforme alla evoluzione dell'ultimo trentennio.

Guardando in dettaglio i diversi settori distinti, si nota che il settore centrale S2, quello che include la foce del fiume Sinni, risulta essere il più compromesso e instabile, come evidenziano anche le tendenze evolutive più recenti, quindi i dati relativi al periodo 2015-2023. Questo settore è caratterizzato dai massimi valori negativi ottenuti e riguarda sia l'arretramento massimo nel lungo termine (= -527,45 m) sia i massimi annui di arretramento (appunto -8.11 m/a). Da notare che entrambi i settori S1 e S3, ma soprattutto S1, mostrano un peggioramento significativo delle proprie condizioni nel trentennio 1988-2023.

Per quanto riguarda le tendenze evolutive più recenti, i settori S2 e S3 mostrano una tendenza al recupero, così da contribuire, soprattutto il settore S3, al miglioramento delle condizioni globali dell'Area Sinni nel periodo più recente, mentre il tratto S1 conferma un ulteriore se pur minimo peggioramento delle proprie condizioni, passando a percentuali di arretramento di ca. 97% del periodo 1988-2023 al 100% nel periodo 2015-2023.

Linear Regression Rate - S1 - 1,65 km			
	1949 - 2023	1988-2023	2015-2023
Avanzamento (%)	94,11%	0%	0%
Arretramento (%)	0%	97,06%	100%
Stabilità (%)	5,88%	2,94%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	71,91	-18,73	-11,67
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	7,89	-108,78	-54,55
Media dei valori (m)	45,29	-60,39	-35,12
Media dei valori (m/a)	0,46	-1,58	-3,74
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	0,95	-0,04	-1,05
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	0	-3,15	-6,09
Linear Regression Rate - S2 - 4,13 km			
	1949 - 2023	1988-2023	2015-2023
Avanzamento (%)	0%	0%	10,59%
Arretramento (%)	98,82%	100%	89,41%
Stabilità (%)	1,18%	0%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	15,48	-59,56	9,97
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-527,45	-292,51	-53,85
Media dei valori (m)	-207,48	-178,67	-24,28
Media dei valori (m/a)	-3,12	-5,03	-2,62
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,03	-1,53	1,66
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-7,14	-8,11	-6,4
Linear Regression Rate - S3 - 2,20 km			
	1949 - 2023	1988-2023	2015-2023
Avanzamento (%)	97,67%	51,16%	81,40%
Arretramento (%)	0%	44,19%	18,60%
Stabilità (%)	2,33%	4,65%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	182,22	55,30	21,86
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	19,90	-59,58	-12,80
Media dei valori (m)	107,57	-4,40	1,56
Media dei valori (m/a)	1,29	-0,07	0,84
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,39	1,57	3,62
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	0,02	-1,51	-0,74

Tab. 5.9: Valori di Linear Regression Rate in Area Sinni

## 5.5 Risultati e considerazioni

Dall'analisi multitemporale della linea di riva delle tre aree di studio, emerge un quadro dinamico e complesso delle variazioni della stessa sia nel tempo che nello spazio.

Le differenze rilevate tra le diverse aree sottolineano l'importanza di considerare le specifiche caratteristiche locali e i processi ambientali che influenzano l'evoluzione delle coste. L'analisi sui tassi di avanzamento e arretramento della linea di riva nelle tre aree fornisce un quadro chiaro della situazione attuale delle spiagge esaminate e della consistente erosione da esse subite nel lungo termine, se pur specifica zona per zona, e con tassi di arretramento significativamente elevati osservati nel periodo totale preso in esame (Tab. 5.10). Così, mentre l'Area Mingardo registra

un'erosione estesa sull'intero litorale e medie dei valori di arretramento più elevate (-100,91 m e -1,32 m/a), le aree Sinni e Biferno mostrano valori molto più alti per quanto riguarda gli arretramenti massimi (rispettivamente -527,45 e -405,07 m) e le complessive oscillazioni tra variazioni positive e negative della linea di riva pari a ca. 710 e 738 m rispettivamente, evidenziando una grande disomogeneità all'interno delle stesse.

Linear Regression Rate – Long term			
	Area Biferno	Area Mingardo	Area Sinni
Avanzamento (%)	34%	0%	46%
Arretramento (%)	58%	100%	52%
Stabilità (%)	7%	0%	2%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	333,05	-38,50	182,22
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-405,07	-165,30	-527,45
Media dei valori (m)	-59,94	-100,91	-70,81
Media dei valori (m/a)	-0,96	-1,32	-1,19
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	4,95	-0,42	2,39
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-6,30	-2,24	-7,14

Tab. 5.10: Valori di Linear Regression Rate in Area Sinni

Osservando le tendenze evolutive più recenti, si evidenzia che l'Area Biferno e l'Area Mingardo mostrano una propensione variabile al recupero ma comunque non sufficiente ad invertire la tendenza, mentre la spiaggia dell'Area Sinni continua ad arretrare con il 73% dell'area totale in erosione (Tab 5.11).

Linear Regression Rate – Short term			
	Area Biferno	Area Mingardo	Area Sinni
Avanzamento (%)	57,79%	8%	27%
Arretramento (%)	35,72%	90%	73%
Stabilità (%)	6,49%	2%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	61,74	24,73	21,86
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-36,58	-37,09	-54,55
Media dei valori (m)	5,95	-14,26	-19,70
Media dei valori (m/a)	0,69	-0,91	-1,94
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	9,24	4,03	3,62
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-6,10	-1,89	-6,40

Tab. 5.11: Valori di Linear Regression Rate in Area Sinni

Questi risultati sottolineano l'importanza dell'impatto dell'erosione costiera su tutte e tre le aree di studio.

In conclusione, l'analisi multitemporale sulla linea di riva nelle tre aree di studio è stata utile non solo a definire i tassi di avanzamento e di arretramento dei settori individuati all'interno di ogni area, quindi di ottenere una più completa visione delle dinamiche che agiscono sulle tre aree, ma anche ad

evidenziare la necessità di attuare interventi mirati a mitigare gli effetti negativi dell'erosione costiera e salvaguardare gli ambienti di elevato pregio ambientale.

## Bibliografia citata

- ADDO K.A., WALKDEN M., MILLS L.P. (2008) – *Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. **63**, 543–558.
- CAMFIELD F.E., MORANG A. (1996) – *Defining and interpreting shoreline change*. Ocean & Coastal Management. **3**, 129–151.
- CROWELL, M., LETHERMAN, S.P. & BUCKLEY, M.K. (1991) – *Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy*. Journal of Coastal Research. **7**(3), 839–852.
- CROWELL M., LEATHERMAN S.P., BUCKLEY M.K. (1993) – *Erosion rate analysis: Long term versus short term data*. Shore and Beach, **61** (1), 13–20.
- DEL POZO J.A.M., ANFUSO G. (2008) – *Spatial approach to medium-term coastal evolution in south Sicily (Italy): implications for coastal erosion management*. Journal of Coastal Research. **24**(1), 33–42.
- HAPKE, C.J., REID, D., RICHMOND, B.M., RUGGIERO, P. & LIST, J. (2006) – *National assessment of shoreline change part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California coast*. US Geological Survey Open File Report 2006-1219.
- HOUSER C., HAPKE C., HAMILTON S. (2008) – *Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms*. Geomorphology, **100**, 223–240.
- INMAN D.L., NORDSTROM C.E. (1971) – *On the tectonic and morphologic classification of coasts*. The Journal of Geology. **79** (1), 1-21.
- LANGFELDER L.J., STAFFORD D.B., AMEIN M. (1970) *Coastal erosion in North Carolina*. Journal of Waterways and Harbors Division. **962**, 531–545.
- LEYLAND J., DARBYA S.E. (2008) – *An empirical–conceptual gully evolution model for channeled sea cliffs*. Geomorphology, **102** (3-4), 419–434.
- MOORE L. (2000) – *Shoreline mapping techniques*. Journal Coastal Research. **16**(1), 111–124.
- MORTON R.A. (1978) – *Analysis of sequential shoreline changes*. W.F. Tanner (Eds.), Standards for measuring shoreline changes. Tallahassee, Coastal Research and Department of Geology, Florida State University, Florida, pp. 43–48.
- MORTON R.A., MILLER T.L., MOORE, L.J. (2004) – *National assessment of shoreline change part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico*. US Geological Survey Open File Report 2004-1043, 2004, p. 44.
- PRANZINI E. (2004) – *La forma delle coste: geomorfologia costiera impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, Bologna, Italy.
- ROMAGNOLI C., MANCINI F., BRUNELLI R. (2006) – *Historical shoreline changes at an active island Volcano: Stromboli, Italy*. Journal of Coastal Research. **22** (4), 739–749.

THIELER E.R. & DANFORTH W.W. (1994) – *Historical shoreline mapping (II): application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico*. *Journal of Coastal Research*, 10, 600–620

THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., MILLER T.L. (2005) – *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.0: an ArcGIS© extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1404, 2005.

## Capitolo VI

### Discussione dei risultati e previsioni future

#### 6.1 Discussione dei risultati

Nel contesto dell'analisi geomorfologica condotta in questa ricerca, si è posta particolare attenzione all'indagine dettagliata dei seguenti aspetti chiave: le caratteristiche morfo-sedimentarie della spiaggia, l'arretramento della linea di riva, il clima meteomarinico e l'antropizzazione. Questi aspetti sono stati esaminati in modo integrato al fine di comprendere appieno le dinamiche che determinano la configurazione e l'evoluzione di un'area costiera specifica. Attraverso un approccio multidisciplinare, il nostro studio si è posto l'obiettivo di fornire una visione completa delle interazioni complesse che influenzano la morfologia costiera, con l'obiettivo di supportare strategie di gestione e pianificazione del territorio orientate alla sostenibilità ambientale.

##### 6.1.1 Area Biferno

Con le analisi effettuate in Area Biferno è stato possibile ottenere un quadro complessivo delle dinamiche che interagiscono sull'area presa in esame.

Lo studio sul clima meteo marino, sui profili trasversali di spiaggia e sui tassi di avanzamento e arretramento della linea di costa per il *long*, *medium* e *short term* (tab. 6.1), hanno dimostrato come l'Area Biferno sia soggetta ad una complessa dinamica costiera.

Linear Regression Rate - Totale - 9,5 km			
	1954 – 2023	1989-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	34%	33,77%	57,79%
Arretramento (%)	58%	62,34%	35,72%
Stabilità (%)	7%	3,89%	6,49%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	333,05	172,93	61,74
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-405,07	-316,98	-36,58
Media dei valori (m)	-59,94	-42,22	5,95
Media dei valori (m/a)	-0,96	-0,99	0,69
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	4,95	5,00	9,24
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-6,30	-9,88	-6,10

Tab. 6.1: Valori di Linear Regression Rate in Area Biferno

L'analisi del clima meteo marino ha evidenziato che esso può aver esercitato una certa influenza sulle tendenze evolutive dell'Area Biferno anche se le evidenze si limitano, in effetti, solo agli ultimi trent'anni. La figura 6.1 mostra, infatti, un numero di eventi di mareggiata che si concentra principalmente tra il 1992 e il 1999, e solo 7 eventi, di classi energetiche elevate, tra il 2015 e il 2020.

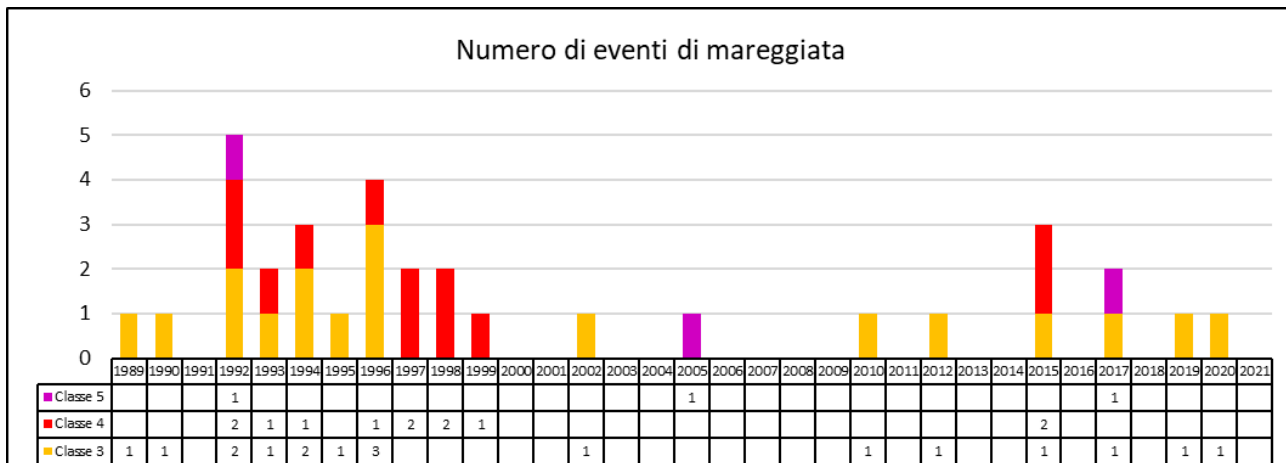


Fig. 6.1: Grafico di Storm Power Index con il numero di eventi di mareggiata registrati in Area Biferno tra il 1989 e il 2021.

In via ipotetica, la maggiore frequenza ed energia degli eventi di mareggiata nel periodo 1992-1999 potrebbe aver influito sulla dinamica costiera dell'ultimo trentennio, periodo, quest'ultimo, caratterizzato da una maggiore tendenza all'arretramento rispetto al periodo totale, promuovendo quindi l'erosione e conseguenti variazioni negative della linea di riva. Invece, la rada presenza di eventi di mareggiata a partire dal 2000 in poi, potrebbe essere alla base di un miglioramento delle condizioni di stabilità costiera, ed aver contribuito all'inversione di tendenza da predominante arretramento a predominante avanzamento che caratterizza chiaramente il periodo più recente analizzato (2016-2023, Tab.6.1). Una ulteriore divisione in periodi parziali dell'ultimo trentennio, nell'analisi delle variazioni della linea di costa, potrebbe eventualmente dare maggiore valore a tale ipotesi.

L'altro aspetto di cui tener conto nell'analisi delle cause, è costituito dall'impatto antropico sul sistema costiero nel corso degli ultimi decenni.

In particolare, a causa del progredire dell'erosione costiera, dagli anni '80 in poi sono state costruite numerose opere di difesa lungo la costa, tra cui *breakwaters* emersi e sommersi, *groins* e *rip rap revetment* (Roszkopf et al., 2017).

Alcuni studi effettuati sulla costa molisana (Buccino et al., 2020; Di Paola et al., 2020) hanno dimostrato, infatti, che le strutture di difesa costiera hanno perso efficacia nel tempo e, anzi, ad oggi, sembrano aver influenzato negativamente sul trasporto sedimentario lungo costa e sulla posizione delle aree di maggiore erosione (*erosion hot spots*).

Un fattore importante dell'impatto antropico sulla dinamica costiera dell'Area Biferno, riguarda il mancato apporto sedimentario da parte dei corsi d'acqua, in particolare del Fiume Biferno. Scorpio et al., (2015) hanno individuato ed analizzato gli interventi antropici che hanno profondamente influenzato gli apporti sedimentari alla foce del Biferno nel corso degli ultimi 100 anni circa: tra questi, in particolare, la forte deforestazione avvenuta in Molise agli inizi del 1900 (Di Martino, 1996), favorendo gli apporti fluviali alla foce e un bilancio sedimentario positivo, e gli interventi

idraulici operati in particolare dagli anni '50 agli anni '80 sull'alveo del fiume Biferno e sull'intero bacino idrografico (la costruzione della Diga di Ponteliscione, le sistemazioni idrauliche, i prelievi in alveo) che hanno invece portato ad una notevole diminuzione degli apporti alle foci, favorendo l'erosione costiera e l'arretramento della linea di riva.

Un contributo significativo all'erosione è da attribuirsi, inoltre, alla frammentazione delle dune, che riduce o, addirittura, interrompe i loro meccanismi naturali di stabilizzazione e di crescita, oltre a facilitare l'ingressione del mare e quindi l'erosione collegata. L'alterazione dei sistemi dunali, spesso attribuibile all'intervento umano per vari scopi, porta alla perdita di barriere naturali contro l'erosione e aumenta la vulnerabilità delle aree costiere all'azione delle onde e alle maree. Inoltre, la proliferazione di stabilimenti balneari lungo questo tratto di costa ha perpetuato il degrado costiero. Questi stabilimenti, alla ricerca di massimizzare lo spazio per servizi come lettini e ombrelloni, spesso ricorrono allo spianamento delle dune o alla rimozione della vegetazione. Questa pratica compromette non solo l'integrità ecologica degli ecosistemi dunali, ma riduce anche la loro capacità di mitigare gli effetti dell'erosione, diminuendo la loro resilienza naturale e le funzioni protettive.

In sostanza, sia la frammentazione delle dune che l'espansione dei centri balneari contribuiscono significativamente all'erosione accelerata del tratto di costa analizzato.

### 6.1.2 Area Mingardo

A seguito delle analisi effettuate in Area Mingardo è stato possibile ottenere un quadro complessivo delle dinamiche che interagiscono sull'area presa in esame.

Lo studio dei tassi di avanzamento e arretramento della linea di costa nel lungo, medio e breve termine (vedi *long, medium e short term* in tab. 6.2), hanno dimostrato come l'area oggetto di studio sia stata soggetta ad una prevalente e forte erosione costiera e conseguente arretramento della linea di riva.

Linear Regression Rate - Totale - 3,22 km			
	1956 – 2023	1992-2023	2016-2023
Avanzamento (%)	0%	10%	8%
Arretramento (%)	100%	90%	90%
Stabilità (%)	0%	0%	2%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-38,50	43,02	24,73
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-165,30	-67,18	-37,09
Media dei valori (m)	-100,91	-39,33	-14,26
Media dei valori (m/a)	-1,32	-0,83	-0,91
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,42	1,44	4,03
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,24	-1,67	-1,89

Tab. 6.2: Valori di Linear Regression Rate in Area Mingardo

Dall'analisi sul clima meteo marino è emerso un fattore fondamentale per la comprensione della dinamica costiera in Area Mingardo: le mareggiate individuate e classificate tra le più energetiche

sono caratterizzate da un'altezza d'onda significativa che raggiunge altezze elevate, fino a 8 m (Fig. 6.2).

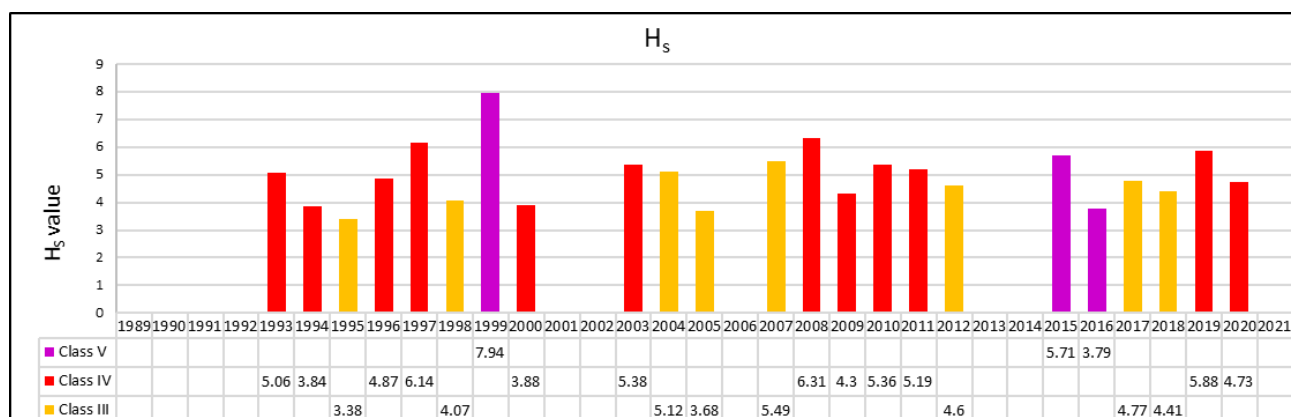


Fig. 6.2.: Valori di altezza d'onda significativa più alta registrata annualmente per gli eventi classi III, IV e V in Area Mingardo.

I dati ottenuti in merito ai valori di *Storm Power Index* relativi all'Area Mingardo permettono di classificare l'area come particolarmente energetica. A ciò si aggiunge una classificazione della spiaggia, ottenuta attraverso i valori di pendenza e di granulometria dei sedimenti, che la annoverano come spiaggia riflettiva. Anche se gli eventi di maggiore energia (classe V) sono limitati a pochi anni (1999, 2015, 2016), l'elevata frequenza ed energia degli eventi di mareggiata che interessano l'area del Mingardo abbastanza diffusamente nell'intero periodo indagato, può aver significativamente favorito l'erosione costiera, in particolare se si considera la totale assenza di opere di protezione costiera.

Tra le cause di erosione in Area Mingardo, anche la pressione antropica gioca un ruolo importante. L'area, già particolarmente interessata da un clima meteo marino di elevata energia, subisce costanti alterazioni per adattare la spiaggia agli stabilimenti balneari che vengono costruiti stagionalmente. Questi stabilimenti, ogni anno, trovando una spiaggia sempre più ristretta, tendono a spostarsi sempre di più internamente, compromettendo la formazione delle dune fisse e impedendo il corretto insediamento della vegetazione dunale.

L'impatto degli eventi di mareggiata particolarmente energetici, unito all'impatto antropico fornisce una chiara spiegazione ai tassi di arretramento illustrati nella tabella 6.2 e ai profili trasversali di spiaggia discussi nel capitolo 4.

### 6.1.3 Area Sinni

A seguito delle analisi effettuate in Area Sinni è stato possibile ottenere un quadro complessivo delle dinamiche che interagiscono sul tratto di costa analizzato ed evidenziare gli aspetti ambientali critici dell'area. Tra questi merita particolare attenzione l'arretramento significativo del litorale negli ultimi

decenni (Tab. 6.3), con valori di arretramento medio e massimo annuo che superano quelli calcolati per il periodo intero (1949-2023), dimostrando un ulteriore peggioramento delle condizioni del litorale indagato. L'evoluzione complessiva è sostanzialmente confermata, con qualche attenuazione, anche dalle tendenze evolutive più recenti calcolate con riferimento al periodo 2015-2023 durante il quale l'Area Sinni continua ad essere interessata da significativi valori di arretramento che la interessano per i  $\frac{3}{4}$  della sua lunghezza. Come evidenziano tali risultati, l'area Sinni si figura tra le tre aree indagate come quella più colpita dall'erosione

Linear Regression Rate - Totale - 7,98 km			
	1949 – 2023	1988-2023	2015-2023
Avanzamento (%)	46%	25%	27%
Arretramento (%)	52%	73%	73%
Stabilità (%)	2%	2%	0%
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	182,22	55,30	21,86
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-527,45	-295,51	-54,55
Media dei valori (m)	-70,81	-107,59	-19,70
Media dei valori (m/a)	-1,19	-2,99	-1,94
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,39	1,57	3,62
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-7,14	-8,11	-6,40

Tab. 6.3: Valori di Linear Regression Rate in Area Sinni

Tra i possibili fattori che influiscono sulla morfodinamica costiera dell'Area Sinni va considerato con particolare attenzione il clima meteo marino: i dati emersi dallo studio sulle mareggiate mostrano una serie di eventi che, secondo la classificazione di Dolan e Davis (1992), rientrano nelle classi III, IV e V, e che si sono verificati principalmente durante i mesi invernali. Gli eventi di maggiore impatto, come mostrato nella figura 6.3 si sono verificati a partire dal 1993 con eccezione degli anni 1996 e 2007, durante i quali non si sono verificati eventi di classi III, IV e V. Valori importanti si registrano in particolare negli anni 1993, 1994 e 1997 e, con maggiore continuità, a partire dal 2008 fino al 2020, periodo durante il quale sono stati registrati 43 eventi (dei complessivi 74 registrati di classi III, IV e V) particolarmente energetici, tra cui 5 di classe energetica di livello massimo.

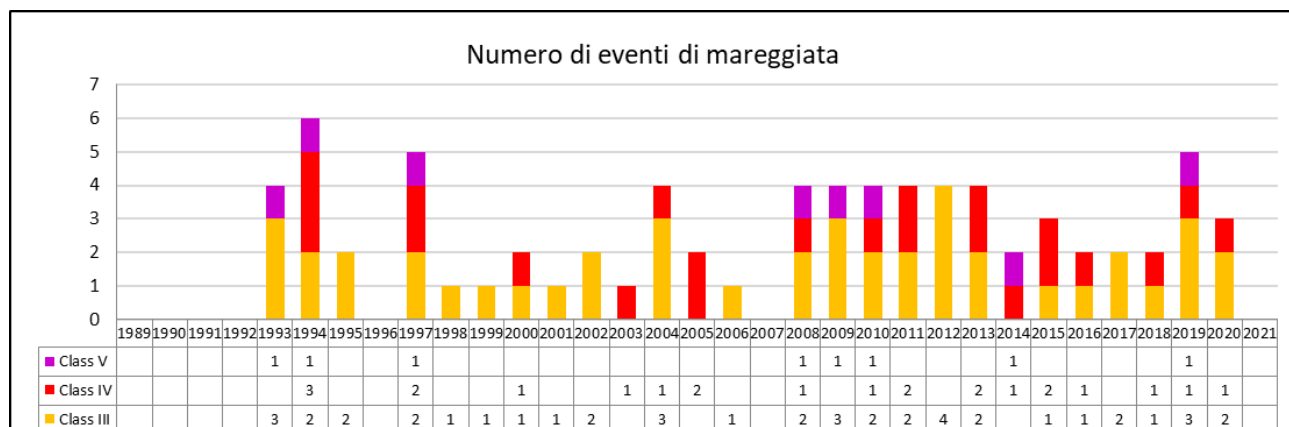


Fig. 6.3: Grafico di Storm Power Index con il numero di eventi di mareggiata registrati in Area Sinni tra il 1989 e il 2021

A tale dinamica marina elevata, che sicuramente ha inciso sull'evoluzione negativa della linea di riva nel corso degli ultimi decenni, va aggiunto il probabile effetto del recente innalzamento del livello del mare lungo le coste del Mediterraneo nel favorire l'ingressione marina e la connessa erosione.

Per quanto riguarda, invece, i fattori antropici, che hanno influenzato e influenzano la morfodinamica dell'Area Sinni, particolare peso assume la forte diminuzione degli apporti sedimentari del Fiume Sinni a seguito della costruzione, tra gli anni 1970 e gli anni 1980, della grande diga di Monte Cotugno (Sabato et al., 2012), che può aver giocato un ruolo importante nell'evoluzione del litorale soprattutto durante gli ultimi 35 anni, periodo durante il quale si è registrato un forte e ulteriore arretramento come descritto in precedenza.

Infine, nonostante la forte pressione antropica legata alla presenza dei villaggi turistici, alle attività ricreative e sportive e alla forte presenza turistica durante la stagione estiva, ci sono molti elementi costieri, tra cui le avandune e la vegetazione retrodunale, che mantengono ancora il loro aspetto naturale.

## **6.2 Imminent Collapse Zone e previsioni sulla posizione futura della linea di riva**

Le recenti ricerche interdisciplinari hanno messo in luce come i processi erosivi e le inondazioni rappresentano i principali pericoli che minacciano le zone costiere del mondo intero globali (Pranzini e Williams, 2013; Rizzo et al., 2017; Williams et al., 2018; Anfuso et al., 2021). Le comunità costiere, spesso densamente abitate e caratterizzate da una significativa presenza di infrastrutture, sono particolarmente sensibili agli effetti di questi fenomeni che, exacerbati dai cambiamenti climatici in atto, possono causare gravi danni economici, ambientali e copiose perdite di vite umane. Questa situazione minaccia la stabilità socio-economica delle popolazioni coinvolte e mette a rischio l'equilibrio ambientale delle regioni costiere.

È cruciale analizzare attentamente la sensibilità di queste aree al fine di sviluppare strategie efficaci di adattamento e mitigazione, in grado di proteggere gli interessi economici e il benessere degli ecosistemi costieri. L'impatto potenziale di tali rischi è in aumento a livello globale a causa della crescita demografica e dello sviluppo socio-economico, e ci si aspetta che gli eventi di erosione e inondazione persistano e si intensifichino in risposta ai cambiamenti climatici e all'innalzamento del livello del mare (IPCC, 2021).

Al fine di mitigare le perdite ecologiche, economiche e umane associate a tali rischi, è fondamentale che i gestori considerino diversi aspetti chiave, come la sensibilità dei settori costieri considerati alle periodiche e cicliche variazioni della linea di costa, all'aumento della frequenza ed intensità delle mareggiate ed all'innalzamento del livello del mare.

Numerosi indici di valutazione sono stati sviluppati e utilizzati in tutto il mondo per stimare la

vulnerabilità e il rischio costiero derivante dall'innalzamento del livello del mare e dalle mareggiate (Gornitz, 1991; Gornitz et al, 1994; McLaughlin e Cooper 2010; Benassai et al., 2015; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2015). Tuttavia, c'è stata una carenza di attenzione nella valutazione della suscettibilità costiera in termini di condizioni fisiche ed ecologiche che contribuiscono all'erosione permanente e alle inondazioni.

Di conseguenza, si è ritenuto opportuno utilizzare i risultati ottenuti per prevedere possibili scenari futuri di pericolosità al fine di fornire dati utili per quantificare le possibili perdite ecologiche, economiche e umane, legate a processi di erosione/inondazione delle aree più sensibili individuate.

### **6.2.1 Metodologia**

La suscettibilità costiera ai processi di erosione e inondazione è stata valutata calcolando dapprima la Zona di Collasso Imminente (Imminent Collapse Zone, ICZ) definita da Crowell et al. (1999) e successivamente ipotizzando una previsione sulla possibile posizione della linea di riva tra 10 anni rispetto all'ultima linea di riva presa in considerazione per lo studio delle tre aree considerate in questa tesi dottorale.

La ICZ è l'area soggetta a imminente erosione, adiacente alla linea di costa attuale, e entro una distanza di 10 piedi (circa 3 metri), moltiplicata per cinque volte la media annuale del tasso di erosione del sito:

$$ICZ = LRR * 5 + 3 \text{ m} \quad (1)$$

dove LRR è il valore corrispondente alla media annuale dei valori ottenuti mediante la Linear Regression Rate calcolati con l'analisi DSAS.

I valori ottenuti della Zona di Collasso Imminente sono stati poi suddivisi in cinque categorie che consentono di classificare il rischio e suddividere le aree nelle seguenti categorie: nullo (> 5), basso (4), medio (3), alto (2), molto alto ( $\leq 1$ ) (Rangel e Anfuso, 2015; Aucelli et al., 2017; Molina et al., 2020).

Per la previsione della posizione futura della linea di costa è stato utilizzato il DSAS che consente di calcolare la posizione futura della linea di riva tra 10 e 20 anni sulla base dei dati dell'evoluzione storica del settore considerato. Il calcolo della previsione della linea di riva si basa sull'uso del filtro di Kalman (Kalman, 1960), sviluppato da Long e Plant (2012). Il filtro di Kalman, inizializzato con il LRR calcolato da DSAS, stima la posizione della linea di riva e il tasso di variazione per ogni decimo di anno e fornisce una stima dell'incertezza posizionale a ogni passo temporale. Il filtro, inoltre permette di ottenere un buffer di incertezza che va da un minimo di 1 metro ad un massimo di

3 metri.

La metodologia considera che una regressione lineare, attraverso le posizioni della linea di riva del passato, permetta una buona approssimazione delle posizioni future della stessa. Questa ipotesi sembra essere valida per le coste come quelle studiate, considerando che ogni posizione valutata della linea di riva nel passato è il risultato di numerosi fattori, tra cui l'apporto di sedimenti dai fiumi circostanti, la presenza di strutture umane, i cambiamenti nell'azione delle onde e l'aumento del livello del mare registrato negli ultimi decenni. Chiaramente, ciò consente una modellazione in un arco temporale relativamente ristretto, che non può superare i vent'anni.

### 6.2.2 Imminent Collapse Zone e Shoreline forecasting in Area Biferno

La ICZ ottenuta per l'Area Biferno è stata calcolata utilizzando i valori di Linear Regression Rate di ogni transetto, ottenuti dall'analisi DSAS per il periodo 1954 – 2023 (Fig. 6.4).

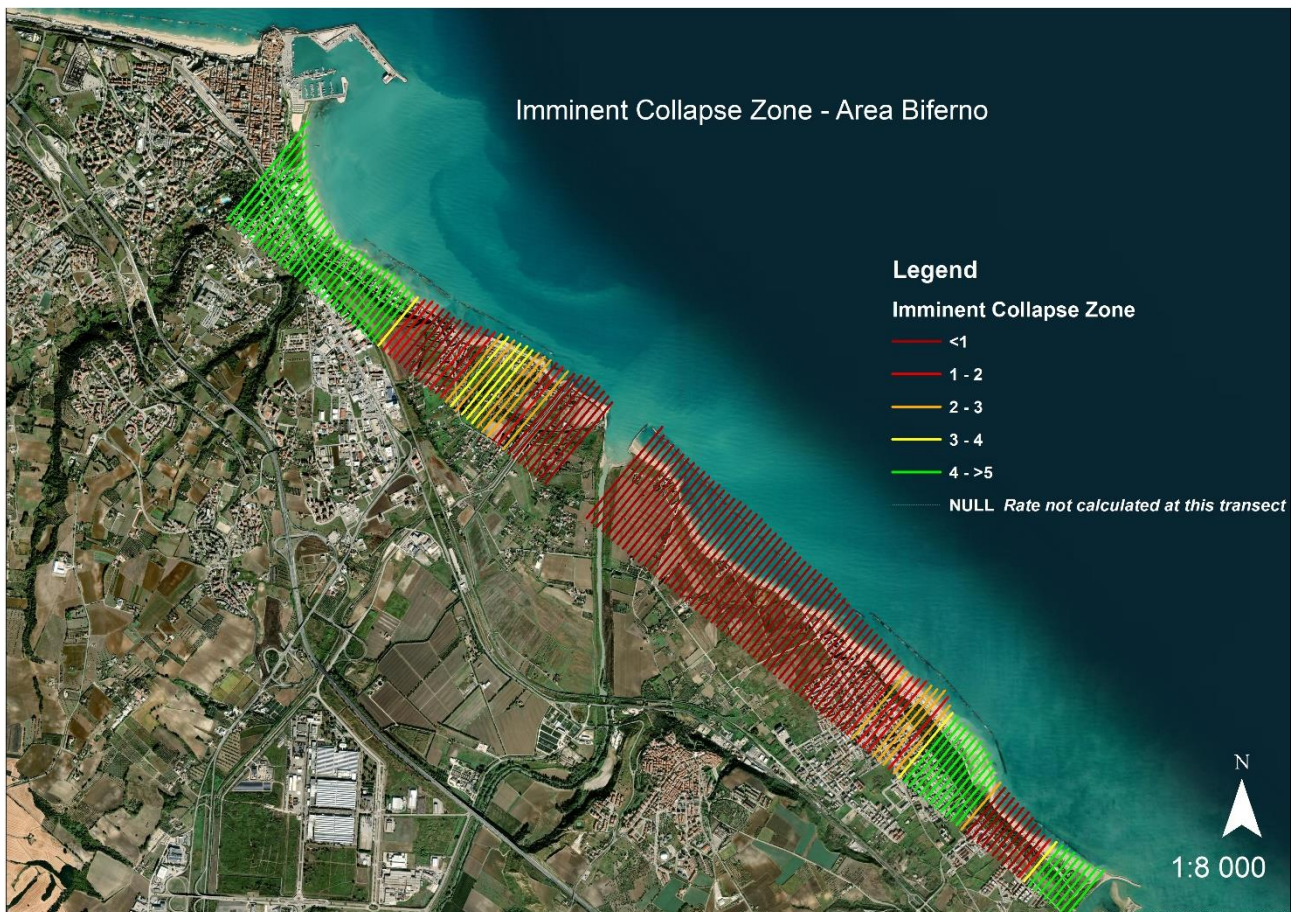


Fig. 6.4: Imminent Collapse Zone calcolata per l'Area Biferno.

La posizione futura della linea di riva è stata ottenuta, invece, attraverso l'utilizzo del filtro di Kalman per ottenere una previsione a 10 e a 20 anni considerando le posizioni della linea di riva negli anni precedenti (Figg. 6.5 e 6.6).



Fig. 6.5: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per l'Area Biferno.

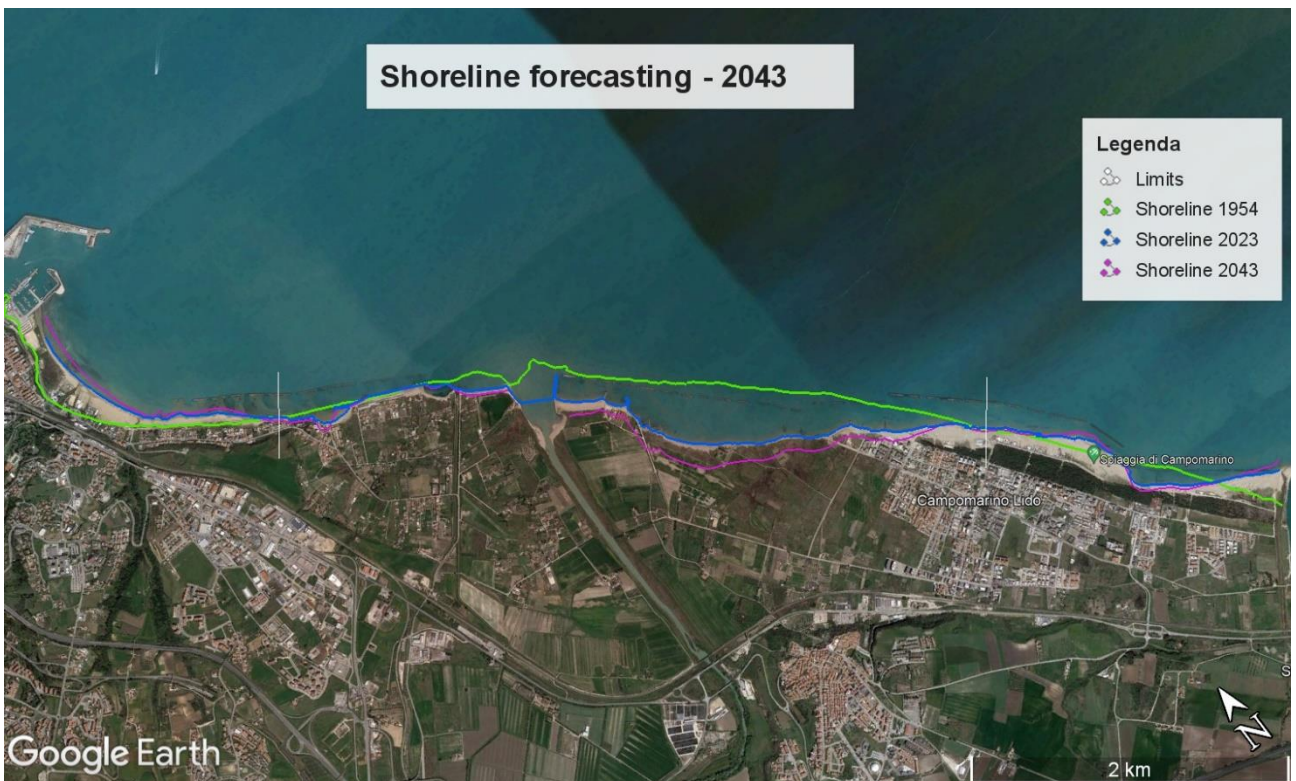


Fig. 6.6: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per l'Area Biferno.

Linear Regression Rate - Totale - 9,5 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	56,78	102,37
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-92,10	-157,58
Media dei valori (m)	-16,75	-26,35
Media dei valori (m/a)	-1,67	-1,32
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	5,68	5,12
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-9,21	-7,88

Tab. 6.4: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per l'Area Biferno

Nella tabella 6.4 vengono riportati i valori ottenuti attraverso l'analisi DSAS confrontando la posizione della linea di costa del 2023 con le linee di riva derivate dalla previsione a 10 e 20 anni nel futuro.

I dati mostrano una prevalenza di aree in arretramento, con valori massimi che raggiungono -92,10 m nel 2033 e -157,58 m nel 2043.

Al fine di ottenere un maggiore dettaglio dell'andamento previsto della linea di riva, si è ritenuto opportuno suddividere l'Area Biferno in settori definiti con il criterio della suddivisione utilizzato nei capitoli precedenti:

## Shoreline forecasting B1



Fig. 6.7: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore B1 dell'Area Biferno.



Figura 6.8: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore B1 dell'Area Biferno.

Linear Regression Rate – B1 – 2,5 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	22,13	41,8
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-25,29	-40,78
Media dei valori (m)	-3,15	-1,54
Media dei valori (m/a)	-0,31	-0,07
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,21	2,09
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,53	-2,04

Tab. 6.5: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore B1 dell'Area Biferno

## Shoreline forecasting B2



Fig. 6.9: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore B2 dell'Area Biferno.



Figura 6.10: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore B2 dell'Area Biferno.

Linear Regression Rate – B2 – 4,8 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	2,28	2,13
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-92,10	-157,58
Media dei valori (m)	-34,59	-59,17
Media dei valori (m/a)	-3,45	-2,95
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	0,23	0,11
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-9,21	-7,88

Tab. 6.6: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore B2 dell'Area Biferno

### Shoreline forecasting B3



Fig. 6.11: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore B3 dell'Area Biferno.



Fig. 6.12: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore B3 dell'Area Biferno

Linear Regression Rate – B3 – 2,2 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	56,78	102,37
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-18,32	-27,17
Media dei valori (m)	13,39	29,32
Media dei valori (m/a)	1,34	1,46
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	5,68	5,12
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-1,83	-1,16

Tab. 6.7: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore B3 dell'Area Biferno

### 6.2.2 Imminent Collapse Zone e Shoreline Forecasting in Area Mingardo

La ICZ ottenuta per l'Area Mingardo è stata calcolata utilizzando i valori di Linear Regression Rate di ogni transetto, ottenuti dall'analisi DSAS per il periodo 1956 – 2023 (Fig. 6.13).



*Fig. 6.13: Imminent Collapse Zone calcolata per l'Area Mingardo.*

La posizione futura della linea di riva è stata ottenuta, invece, attraverso l'utilizzo del filtro di Kalman per ottenere una previsione a 10 e a 20 anni considerando ogni posizione della linea di riva negli anni precedenti (Figg. 6.14 e 6.15).



Fig.6.14: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per l'Area Mingardo.

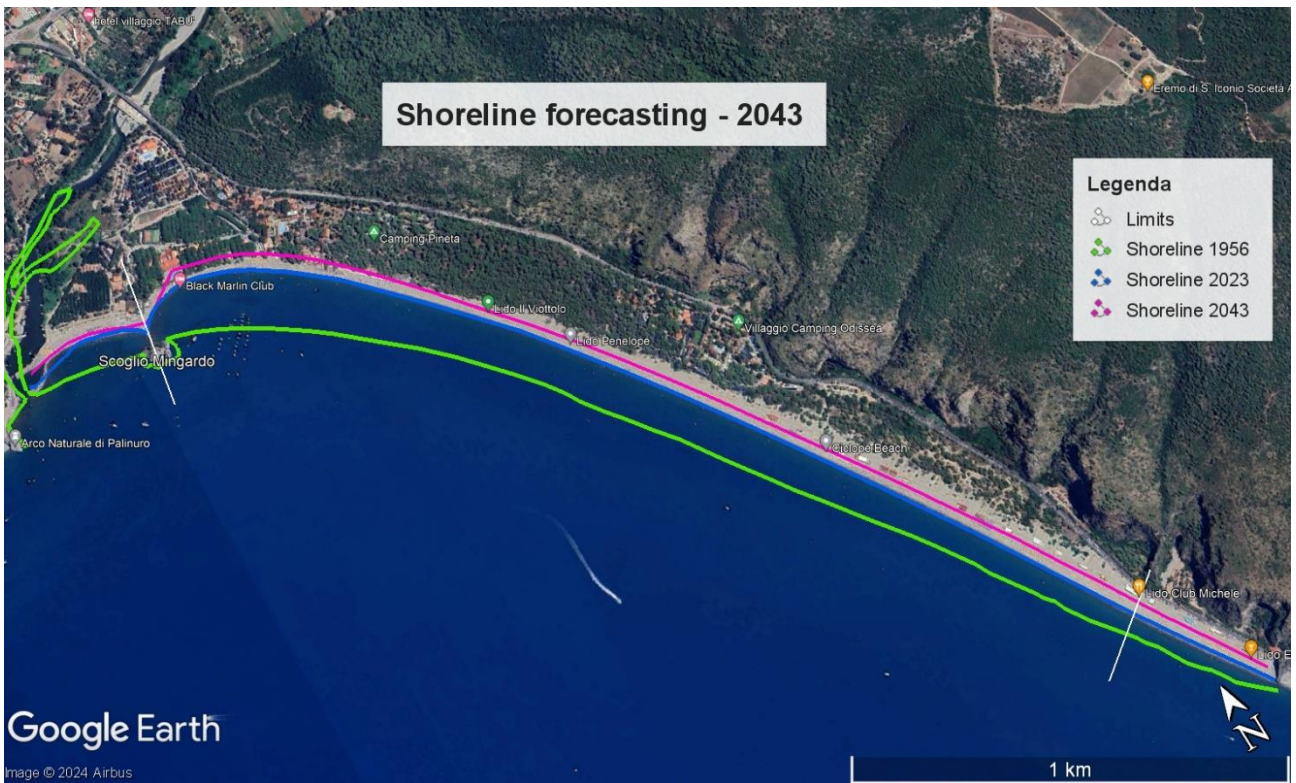


Fig. 6.15: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per l'Area Mingardo.

Linear Regression Rate - Totale – 3,22 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-4,13	-5,97
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-32,56	-46,21
Media dei valori (m)	-17,81	-28,14
Media dei valori (m/a)	-1,75	-1,37
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,41	-0,29
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-3,20	-2,25

Tab. 6.8: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per l'Area Mingardo.

Nella tabella 6.8 vengono riportati i valori ottenuti dall'analisi DSAS effettuata confrontando la posizione della linea di costa del 2023 con le linee di riva derivate dalla previsione per il 2033 e 2043.

I dati mostrano una prevalenza di aree in arretramento, con valori massimi che raggiungono -32,56 m nel 2033 e -46,21 m nel 2043.

Al fine di ottenere un maggiore dettaglio dell'andamento della linea di riva, si è ritenuto opportuno suddividere l'Area Mingardo in settori, definiti secondo il criterio di suddivisione utilizzato nei capitoli precedenti:

## Shoreline forecasting M1

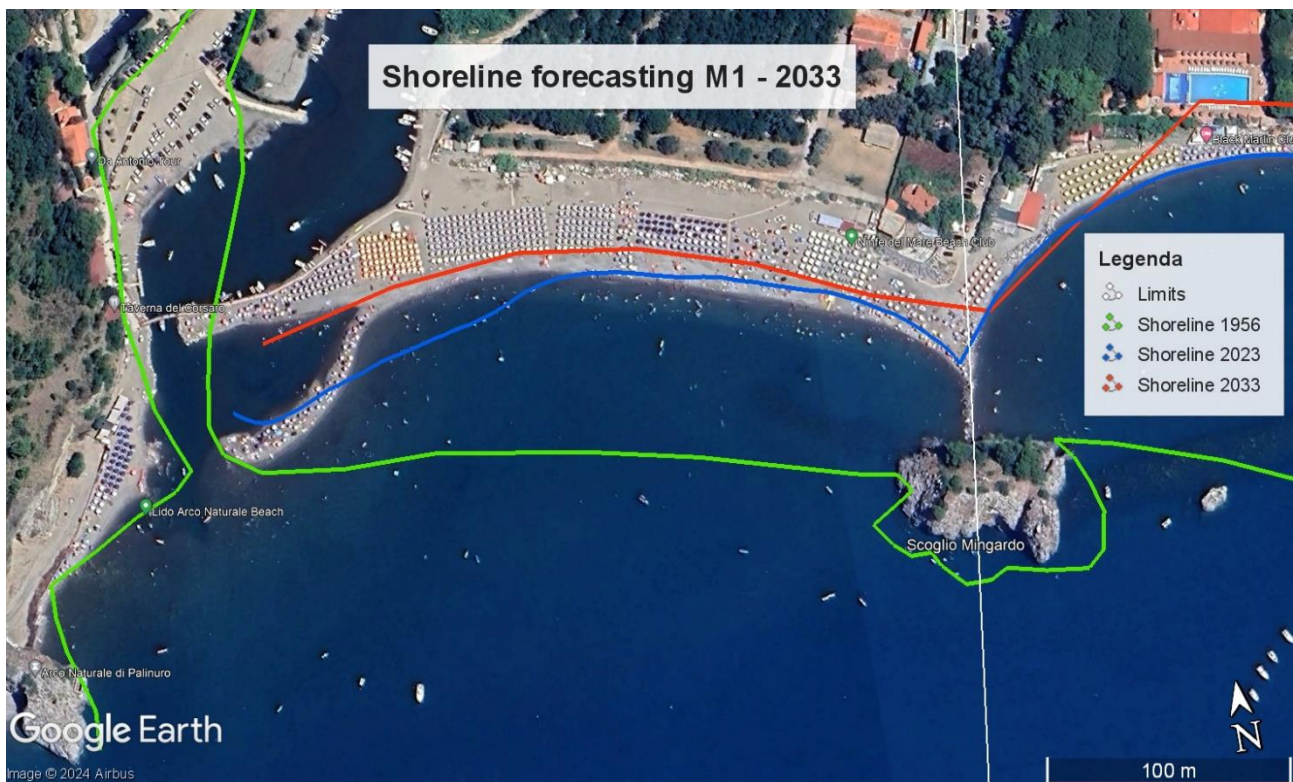


Fig. 6.16: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore M1 dell'Area Mingardo.

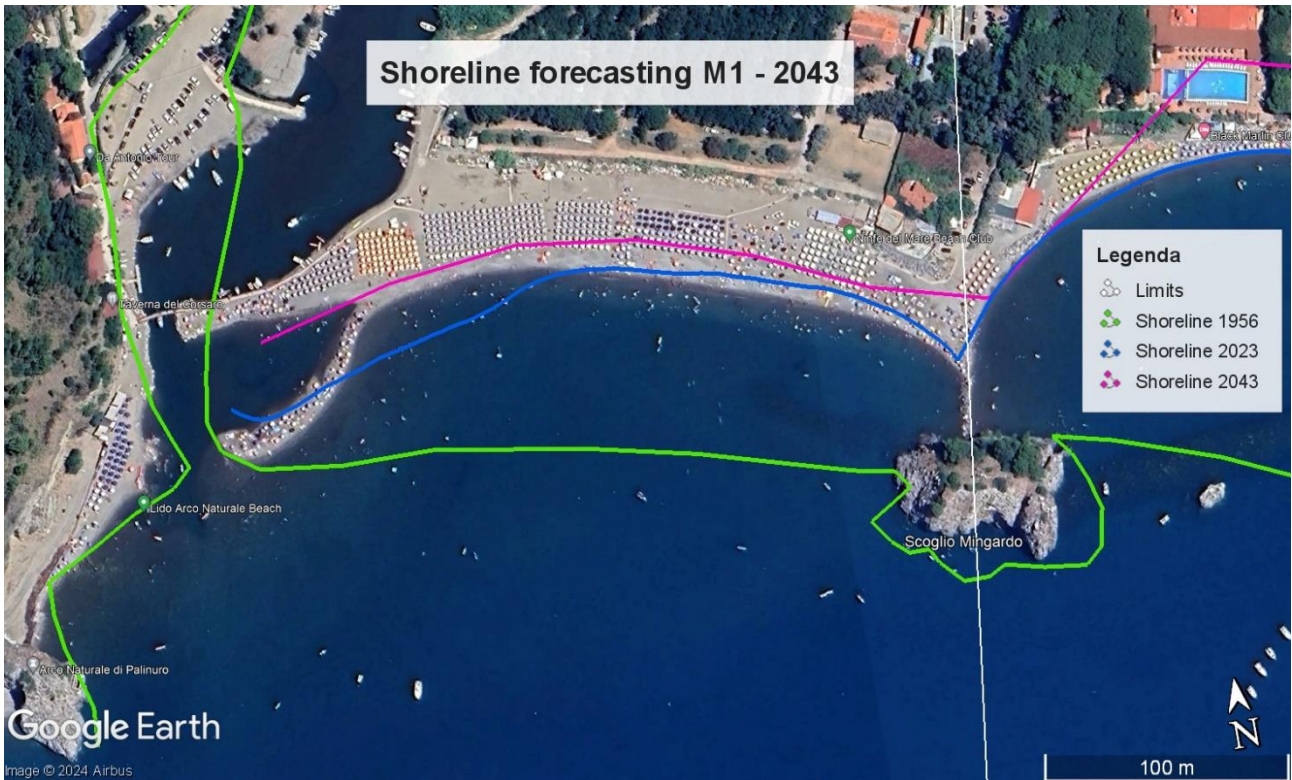


Fig. 6.17: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore M1 dell'Area Mingardo.

Linear Regression Rate – M1 – 0,32 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-4,13	-5,97
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-32,56	-31,92
Media dei valori (m)	-17,96	-19,09
Media dei valori (m/a)	-1,76	-0,93
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-0,41	-0,29
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-3,20	-1,56

Tab. 6.9: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore M1 dell'Area Mingardo.

## Shoreline forecasting M2

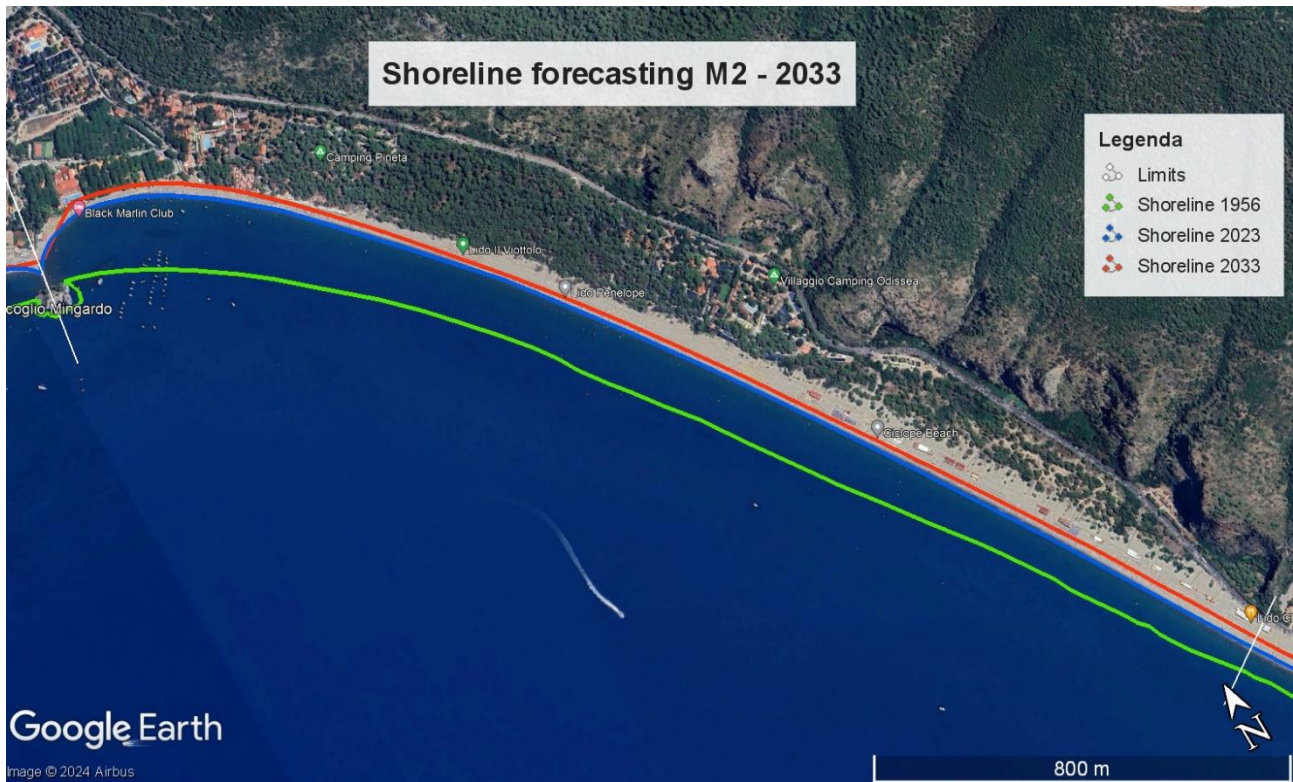


Fig. 6.18: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore M2 dell'Area Mingardo.



Fig. 6.19: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore M2 dell'Area Mingardo.

Linear Regression Rate – M2 – 2,53 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-10,45	--22,12
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-29,68	-46,21
Media dei valori (m)	-17,83	-29,88
Media dei valori (m/a)	-1,75	-1,45
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-1,03	-1,08
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,92	-2,25

Tab. 6.10: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore M2 dell'Area Mingardo.

### Shoreline forecasting M3

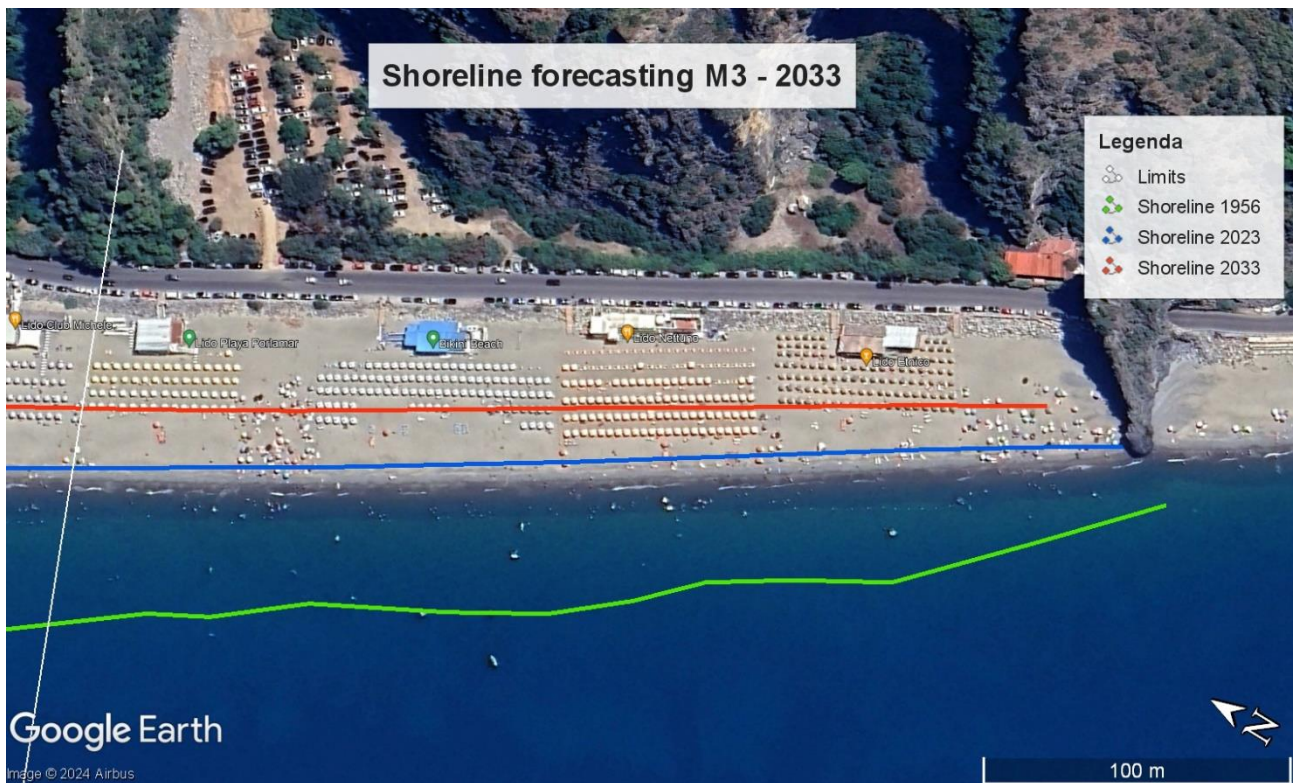


Fig. 6.20: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore M3 dell'Area Mingardo.

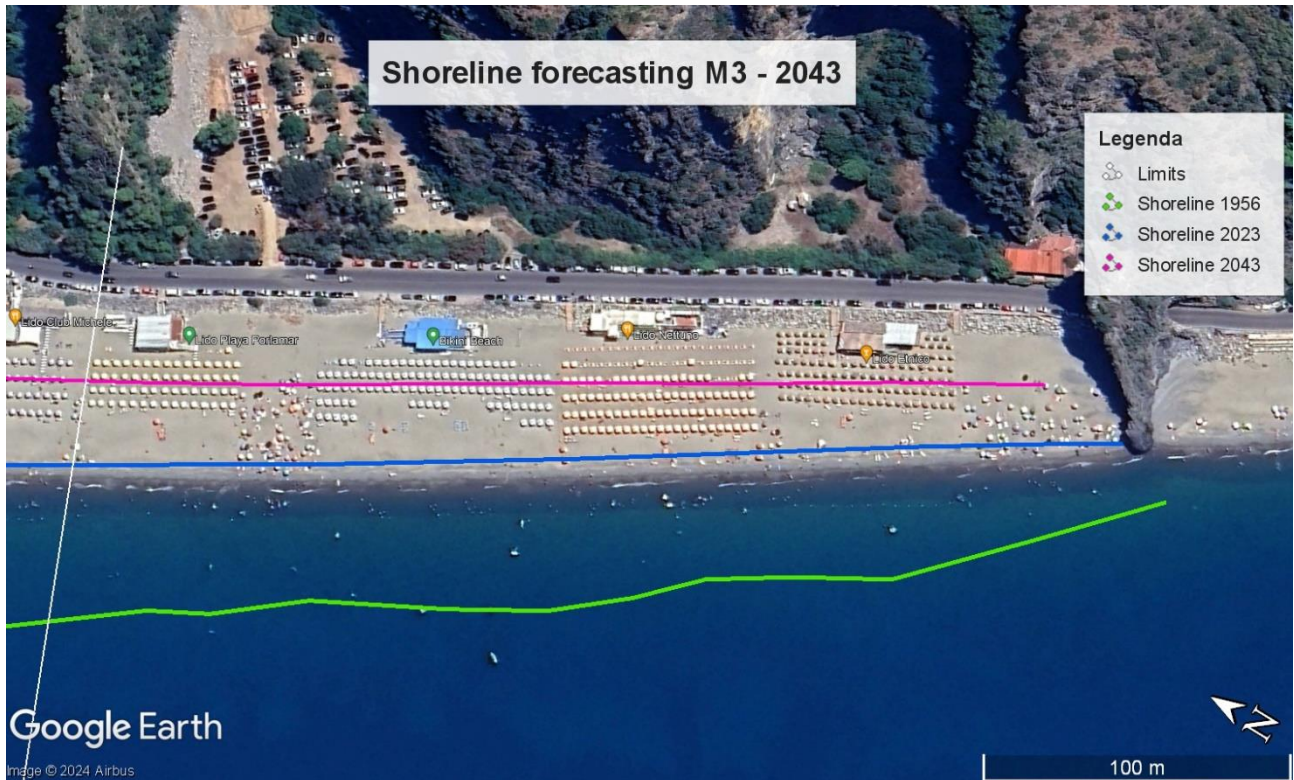


Fig. 6.21: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore M3 dell'Area Mingardo.

Linear Regression Rate – M3 – 0,37 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	-13,84	-19,72
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-20,87	-29,56
Media dei valori (m)	-17,56	-24,92
Media dei valori (m/a)	-1,72	-1,21
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	-1,36	-0,96
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-2,05	-1,44

Tab. 6.11: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore M3 dell'Area Mingardo.

## 6.2.4 Imminent Collapse Zone e Shoreline Forecasting in Area Sinni

La ICZ ottenuta per l'Area Sinni è stata calcolata utilizzando i valori di Linear Regression Rate di ogni transetto, ottenuti dall'analisi DSAS per il periodo 1949 – 2023 (Fig. 6.22).

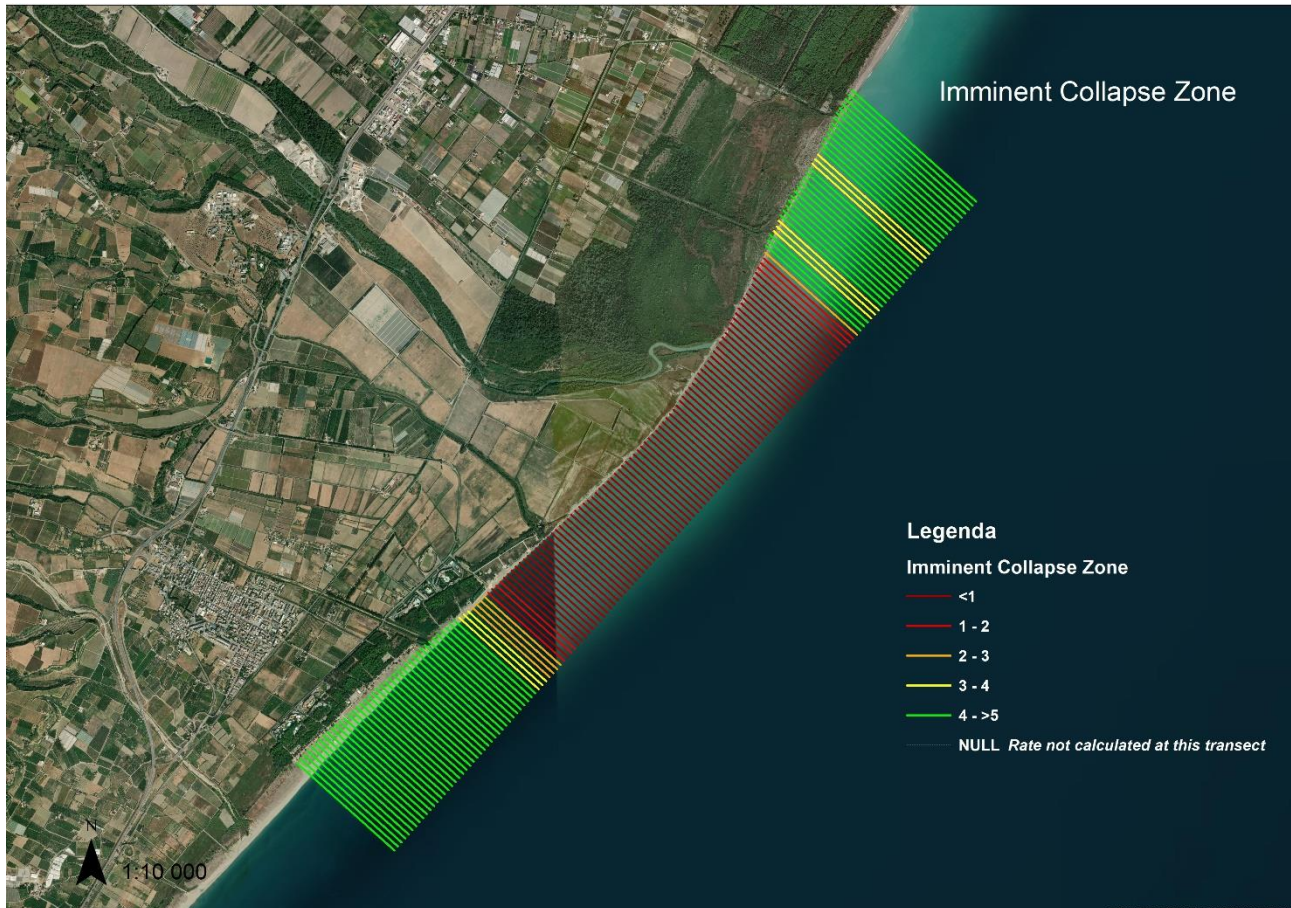


Fig. 6.22: Imminent Collapsing Zone calcolata per l'Area Sinni.

La posizione futura della linea di riva è stata ottenuta, invece, attraverso l'utilizzo del filtro di Kalman per ottenere una previsione a 10 e a 20 anni considerando ogni posizione della linea di riva negli anni precedenti (Figg. 6.23 e 6.24).



Fig. 6.23: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per l'Area Sinni.



Fig. 6.24: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per l'Area Sinni.

Linear Regression Rate - Totale – 7,98 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	31,35	49,82
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-84,40	-154,51
Media dei valori (m)	-7,17	-24,70
Media dei valori (m/a)	-0,72	-1,24
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	3,14	2,49
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-8,44	-7,73

Tab. 6.12: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per l'Area Mingardo.

Nella tabella 6.12 vengono riportati i valori ottenuti dall'analisi DSAS effettuata confrontando la posizione della linea di costa del 2023 con le linee di riva derivate dalla previsione per il 2033 e 2043. I dati mostrano una prevalenza di aree in arretramento, con valori massimi che raggiungono -84,40 m nel 2033 e -154,51 m nel 2043.

Al fine di ottenere un maggiore dettaglio dell'andamento della linea di costa, si è ritenuto opportuno suddividere l'Area Sinni in settori, definiti secondo il criterio di suddivisione utilizzato nei capitoli precedenti:

## Shoreline forecasting S1



Fig. 6.25: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore S1 dell'Area Sinni.



Fig. 6.26: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore S1 dell'Area Sinni.

Linear Regression Rate – S1– 1,65km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	28,97	28,81
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	11,6	10,2
Media dei valori (m)	21,49	19,70
Media dei valori (m/a)	2,14	0,98
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,90	1,44
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	1,16	0,51

Tab. 6.13: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore S1 dell'Area Sinni.

## Shoreline forecasting S2



Fig. 6.27: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore S2 dell'Area Senni.



Fig. 6.28: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore S2 dell'Area Senni.

Linear Regression Rate – S2 – 4,13 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	20,08	9,18
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	-84,40	-154,51
Media dei valori (m)	-32,05	-68,48
Media dei valori (m/a)	-3,20	-3,42
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	2,01	0,46
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	-8,44	-7,73

Tab. 6.14: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore S2 dell'Area Sinni.

### Shoreline forecasting S3



Fig. 6.29: Previsione della posizione della linea di riva al 2033 per il settore S3 dell'Area Sinni.



Fig. 6.30: Previsione della posizione della linea di riva al 2043 per il settore S3 dell'Area Sinni.

Linear Regression Rate – S3 – 2,20 km		
	2023 – 2033	2023 – 2043
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m)	31,35	49,82
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m)	0,91	-3,77
Media dei valori (m)	19,35	26,72
Media dei valori (m/a)	1,93	1,33
Massimo avanzamento o minimo arretramento (m/a)	3,14	2,49
Minimo avanzamento o massimo arretramento (m/a)	0,09	-0,19

Tab. 6.15: Valori di Linear Regression Rate sulla previsione della posizione della linea di riva al 2033 e al 2043 per il settore S3 dell'Area Sinni.

### 6.2.5 Discussione dei risultati sull'ICZ e sulle posizioni future della linea di riva

I dati ottenuti per le tre aree di studio mostrano una chiara prevalenza del fenomeno erosivo della linea di riva per i prossimi 10 e 20 anni.

In Area Biferno, i tre settori, seppur con zone in avanzamento, registrano alti valori di aree in arretramento. Tra queste, l'area più soggetta ad erosione risulta essere quella a sud della foce del Fiume Biferno, con valori che vanno fino ad un massimo di -92,10 m, secondo i dati della previsione al 2033, e un massimo di -157,58 m secondo i dati della previsione al 2043. Le aree in avanzamento, seppur presenti, sembrano non compensare le aree in arretramento, infatti il massimo avanzamento previsto raggiunge i 56,78 m per la previsione al 2033 e i 102,37 m per la previsione al 2043.

In Area Mingardo, i dati relativi alla previsione della futura linea di riva, mostrano un chiaro e costante arretramento. Nonostante i diversi fattori che possono influenzare l'andamento della linea di riva,

come, ad esempio, la presenza di seawalls in corrispondenza del villaggio turistico Black Marlin Club, poco più a sud rispetto allo scoglio del Mingardo, le perdite di spiaggia e di parte delle dune attualmente presenti, risulterebbero ingenti in termini ecologici ed economici.

Come testimoniato dalle figure e dalle tabelle ottenute con la previsione della futura posizione della linea di riva, tutti e tre i settori risultano essere in erosione, con valori che restano pressoché simili nelle previsioni per il 2033 e il 2043.

In Area Sinni, la previsione effettuata per il 2033 e il 2043 mostra settori in lieve avanzamento ed altri in forte arretramento. In particolare, entrambe le previsioni mostrano un lieve avanzamento, che raggiunge un massimo di 31,35 m per il 2033 e 49,82 m per il 2043, nei settori 1 e 3, un arretramento che raggiunge -84,40 m nel 2033 e -154,51 m nel 2043.

In conclusione, l'analisi permette di ipotizzare possibili scenari futuri di pericolosità e di rischio, legati a processi di erosione/inondazione delle aree più sensibili individuate e che comportano ingenti perdite ecologiche, economiche e umane.

Pertanto, al fine di migliorare la resilienza costiera ai processi di erosione e inondazione, le azioni potrebbero essere concentrate principalmente sul monitoraggio in continuo delle zone più fragili e sull'attuazione di interventi periodici di alimentazione delle spiagge e ripristino delle dune.

## Bibliografia citata

- ANFUSO G., POSTACCHINI M., DI LUCCIO D., BENASSAI G. (2021) – *Coastal Sensitivity/Vulnerability Characterization and Adaptation Strategies: A Review*. Journal of Marine Science and Engineering, **9**, 72.
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all’erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90.
- BUCCINO M., DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., DEL GIUDICE G., ROSSKOPF C.M. (2020) – *A Medium-Term Study of Molise Coast Evolution Based on the One-Line Equation and “Equivalent Wave” Concept*. Water, **12**, 2831.
- BENASSAI G., DI PAOLA G., PUGLIANO G., ROSSKOPF C.M. (2015) – *UAV Calibration of the shoreline evolution for coastal protection of Kaulonia Archeological Site*. Heritage and Technology, Mind Knowledge Experience. XIII International Forum, Le Vie dei Mercanti, Aversa, Capri 11-12-13 June 2015.
- CROWELL M., LEIKIN H., BUCKLEY M.K. (1999) – *Evaluation of coastal erosion hazards study: An overview*. J. COAST. RES., **28**, 2–9.
- DI MARTINO P. (1996) – *Storia del paesaggio forestale del Molise*. IRESMO, 171 pp.
- DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., BUCCINO M., ROSSKOPF C.M. (2020) – *Influence of hard defence structures on shoreline erosion along Molise coast (southern Italy): a preliminary investigation*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., **51**, <https://doi.org/10.3301/ROL.2020.10>.
- DOLAN R., DAVIS R.E. (1992) – *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms*. J. Coast. Res. 1992, **8**, 840–853.
- GORNITZ V.M., DANIELS R.C., WHITE T.W, BIRDWELL K.R. (1994) – *The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast*. Journal of Coastal Research, Special Issue **12**, 327-338.
- GORNITZ V.M., WHITE T.W. & CUSHMAN, R.M. (1991) *Vulnerability of the US to future sea level rise*. Coastal Zone, **91**, Proceedings of the 7th Symposium on Coastal and Ocean Management. American Society of Civil Engineers, 1345-1359.
- IPCC (2021) – *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- KALMAN R. E. (1960) – *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Journal of Basic Engineering, **82**, 35-45.
- LONG J.W., PLANT N.G. (2012) – *Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution: Geophysical Research Letters*, v. 39, **13**, 1-6.

- MCLAUGHLIN, S., COOPER, J.A.G. (2010) – *A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?* Environ. Hazards, **9**, 233–248.
- MOLINA R., MANNO G., LO RE C., ANFUSO G., CIRAOLO G. (2020) – *A Methodological Approach to Determine Sound Response Modalities to Coastal Erosion Processes in Mediterranean Andalusia (Spain)*. Journal of Marine Science and Engineering, **8**, 154.
- PRANZINI E., WILLIAMS A.T. (2013) – *Coastal Erosion and Protection in Europe*. Routledge/Earthscan, London.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G., WILLIAMS A.T., (2015) – *Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management*. Ocean. Coast. Manag. **114**, 129-144.
- RIZZO, A., AUCELLI, P., GRACIA, F., ANFUSO, G. (2018) – *A novelty coastal susceptibility assessment method: Application to Valdelagrana area (SW Spain)*. J. Coast. Conserv., **22**, 973-987.
- ROSSKOPF C.M., DI PAOLA G., ATKINSON D.E. RODRIGUEZ G., WALKER I.J. (2017) – *Recent shoreline evolution and beach erosion along the central Adriatic coast of Italy: the case of Molise region*. Journal of Coastal Conservation, Planning and Management.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2012) – *Sedimentological and morpho-evolution maps of the ‘Bosco Pantano di Policoro’ coastal system (Gulf of Taranto, southern Italy)*. Journal of Maps, disponibile online: <http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>, 1-8.
- SCORPIO V., AUCELLI P.P.C., GIANO S.I., PISANO L., ROBUSTELLI G., ROSSKOPF C.M., SCHIATTARELA M. (2015) – *River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery*. Geomorphology, **251**, 77-90.
- WILLIAMS A.T., RANGEL-BUITRAGO N., PRANZINI E., ANFUSO G. (2018) – *The management of coastal erosion*. Ocean & Coastal Management, **156**, 4-20.

## Conclusioni

Lo scopo principale di questo progetto di ricerca è stato quello di analizzare e comparare, dal punto di vista geomorfologico, diverse aree di costa bassa al fine di fornire una conoscenza quanto più approfondita ed aggiornata in relazione alle problematiche legate all'erosione costiera onde contribuire a valorizzare e salvaguardare gli ambienti costieri particolarmente vulnerabili e/o di pregio ambientale. Le aree oggetto di studio sono state tre segmenti di costa bassa ricadenti sui litorali del Molise, della Campania e della Basilicata, aree particolarmente vulnerabili ed esigenti di maggior tutela poiché Siti di Interesse Comunitario (SIC) e di aree protette.

I tratti costieri prescelti sono stati indagati seguendo uno schema ben preciso che ha riguardato:

1. Inquadramento geologico-ambientale dell'area
2. Caratterizzazione del clima meteo-marino
3. Caratterizzazione morfologico-topografica e sedimentologica
4. Ricostruzione dell'evoluzione spazio-temporale del sistema spiaggia e analisi dell'impatto antropico
5. Costruzione di un geodatabase in ambiente GIS

L'inquadramento geologico-ambientale delle tre aree, effettuato principalmente attraverso lo studio della bibliografia, ha permesso di avere un quadro chiaro sulle peculiarità e sulla storia delle singole aree e di comprendere appieno le dinamiche ambientali, le risorse naturali e i processi evolutivi che le hanno interessate.

La caratterizzazione del clima meteo marino, attraverso l'individuazione e la classificazione delle mareggiate in base alla loro energia, ha permesso di ottenere una stima dell'influenza che svolge il clima meteo marino nei processi morfologici costieri. In particolare, i dati ottenuti attraverso la classificazione delle mareggiate proposta da Dolan e Davis (1992), hanno fatto emergere, in Area Biferno, una situazione in cui il maggior numero di eventi di mareggiata con classe energetica elevata siano stati registrati tra il 1992 e il 1999 e come quasi la totalità degli eventi di tempesta siano stati registrati nel I ottante (1-45°N) a conferma di quanto analizzato negli studi precedenti sulla costa molisana (Aucelli et al., 2007; Buccino et al., 2020). L'analisi sul clima meteomarinico in Area Mingardo, invece ha mostrato una situazione in cui gli eventi di Classe III, IV e V sono maggiormente distribuiti nel tempo, principalmente tra il 1993 e il 2000, tra il 2003 e il 2013 ad esclusione del 2006 e tra il 2015 e il 2021 e come questi siano stati caratterizzati da un'altezza d'onda significativa molto alta, con valori che arrivano a raggiungere circa 8 m. L'analisi sul clima meteo-marino condotta per

l'Area Sinni, invece, ha rivelato la presenza di eventi di mareggiata caratterizzati da una classe energetica elevata, principalmente dovuta della loro lunga durata.

La caratterizzazione morfologico-topografica e sedimentologica ha previsto una serie di rilievi di campo finalizzati ad ottenere i profili longitudinali di spiaggia per un confronto stagionale ed annuale della morfologia di spiaggia. Le campagne di rilievo sulle tre aree sono state effettuate a marzo 2022, a luglio 2022, a gennaio 2023 e a marzo 2023. Per l'Area Biferno, grazie ai dati precedenti, è stato possibile effettuare un confronto anche con i dati di luglio 2016 e luglio 2021. Il criterio di posizionamento dei transetti per i profili di spiaggia è stato definito da studi precedenti per l'Area Biferno, mentre per le altre due aree è stato definito in base alla lunghezza totale del settore. Per l'analisi granulometrica delle tre aree di studio, sono stati prelevati campioni di sedimento di almeno 500g. Per ogni transetto, sono stati raccolti n.2 campioni, uno sulla spiaggia emersa e uno sul solco di battigia. Attraverso i dati ottenuti dai rilievi sul campo, è stato possibile acquisire informazioni cruciali per la caratterizzazione morfo-sedimentaria e morfometrica dei tratti costieri esaminati.

L'Area Biferno è caratterizzata dalla presenza di spiagge di larghezza variabile e dalla presenza di numerose opere di difesa costituite sia da *breakwaters* che da *groins*.

I profili ottenuti forniscono un quadro esaustivo della morfologia delle spiagge oggetto di analisi.

In particolare, i valori bassi riscontrati relativi alla pendenza sia del *backshore* che del *foreshore*, uniti alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti, consentono di classificare tali spiagge secondo la distinzione effettuata da Wright e Short (1984) e di includerle nella categoria delle spiagge dissipative. Per ciò che attiene l'Area Mingardo, le indagini effettuate permettono di classificare le spiagge di questo tratto di costa come spiagge riflettive. Ciò è ampiamente confermato dai valori che riguardano l'elevata pendenza e la granulometria grossolana dei sedimenti. Per quanto riguarda l'analisi effettuata sull'Area Sinni, in merito alla caratterizzazione morfo-sedimentaria, i valori relativi alla pendenza del *backshore* e del *foreshore* e la granulometria dei sedimenti, permettono di classificare le spiagge del tratto costiero lucano come intermedie.

Lo studio sulla ricostruzione dell'evoluzione spazio-temporale della linea di riva e l'analisi dell'impatto antropico è stata cruciale nell'ambito di questa ricerca, poiché ha costituito un elemento fondamentale per una comprensione approfondita dei processi di erosione in corso nelle aree di studio considerate.

L'analisi sui tassi di avanzamento e arretramento della linea di costa nelle tre aree ha mostrato la situazione attuale delle spiagge esaminate mettendo in luce la consistente erosione da esse subita nel lungo termine, se pur specifica zona per zona, e con tassi di arretramento significativamente elevati osservati nel periodo totale preso in esame (1954-2023). L'Area Mingardo, ad esempio, nel periodo

totale analizzato ha mostrato un'erosione estesa sull'intero litorale, mentre le aree Sinni e Biferno hanno evidenziato alti valori di arretramento ma una grande disomogeneità all'interno delle stesse. Infine, l'intero dataset ottenuto grazie alle diverse analisi effettuate in ambiente GIS, ha permesso di ottenere un geodatabase utile non solo per un monitoraggio in continuo delle aree di studio, ma costituisce una valida base conoscitiva per la progettazione di mirati interventi di ripristino, tutela e valorizzazione di aree costiere di elevato pregio ambientale. In quest'ottica, la previsione effettuata sulla posizione della linea di costa tra 10 e 20 anni, mostra una chiara e predominante tendenza all'arretramento, con conseguente perdita di risorse non solo ecologiche ma anche economiche.

A tal proposito, oltre alle caratteristiche geomorfologiche di base, il contesto socioeconomico assume una rilevanza importante in qualsiasi valutazione della vulnerabilità, poiché i cambiamenti dei sistemi costieri dovuti alle variabili sociali, economiche e ambientali avvengono ancora più rapidamente dei processi fisici. Ad esempio, Narra et al. (2019), hanno proposto una metodologia di valutazione del rischio che tiene in considerazione indicatori quali la densità di popolazione, le infrastrutture, le opere di difesa costiera e i valori di erosione della linea di costa dovuta ad eventi estremi. A causa delle difficoltà nell'ottenere e classificare i dati, l'aspetto socio-economico spesso non viene considerato nella valutazione della vulnerabilità, pertanto sarebbe utile sviluppare un approccio che tenga conto di questi aspetti, che li quantifichi e li associ ad un'analisi geomorfologica completa. In questo contesto, ad esempio, Jankowski (2009) ha proposto il GIS partecipativo (PGIS), uno strumento che utilizza il concetto di *crowdsourcing*, in cui la comunità locale supporta i processi di raccolta dati in diversi contesti di pianificazione/decisione, svolgendo un ruolo importante nella definizione di un indice di vulnerabilità costiera che sia quanto più completo ed esaustivo possibile.

La sinergia tra la comunità locale e la ricerca scientifica, infatti, rivestirebbe un ruolo fondamentale nel perseguire obiettivi condivisi volti alla tutela e alla valorizzazione delle aree costiere di notevole pregio ambientale. La partecipazione attiva della comunità locale, intesa come il coinvolgimento dei residenti, delle associazioni, delle istituzioni locali e degli *stakeholder*, costituisce un pilastro imprescindibile nella gestione sostenibile di tali territori.

Innanzitutto, la conoscenza detenuta dalla comunità locale sulle dinamiche territoriali, sulle tradizioni culturali e sull'utilizzo delle risorse naturali rappresenta un prezioso patrimonio per comprendere e preservare l'ecosistema costiero. Attraverso il coinvolgimento attivo dei residenti e delle organizzazioni locali nei processi decisionali e nella pianificazione del territorio, si favorisce un approccio partecipativo e inclusivo che tiene conto delle esigenze e delle prospettive delle diverse realtà presenti sul territorio.

D'altro canto, la ricerca scientifica fornisce un supporto fondamentale per comprendere in profondità le dinamiche ecologiche, la biodiversità e i fattori di stress che influenzano le aree costiere. Attraverso

studi approfonditi, è possibile acquisire dati accurati e sviluppare modelli predittivi utili alla gestione e alla conservazione di tali ecosistemi.

La collaborazione sinergica tra la comunità locale e la ricerca scientifica consente di integrare conoscenze tradizionali e scientifiche, creando un approccio olistico alla gestione delle aree costiere. Questa sinergia potrebbe tradursi in iniziative di monitoraggio ambientale partecipativo, programmi educativi sul territorio, progetti di riqualificazione ecologica e azioni di sensibilizzazione ambientale rivolte alla comunità.

Inoltre, la ricerca scientifica può svolgere un ruolo chiave nel fornire soluzioni innovative e sostenibili per affrontare le sfide ambientali e socio-economiche che caratterizzano le aree costiere. Attraverso lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie avanzate, pratiche di gestione integrate e strategie di adattamento ai cambiamenti climatici, si può favorire la resilienza degli ecosistemi costieri e il benessere delle comunità locali.

In conclusione, la collaborazione tra la comunità locale e la ricerca scientifica rappresenterebbe un modello efficace per promuovere la tutela e la valorizzazione delle aree costiere di elevato pregio ambientale come quelle analizzate in questa tesi dottorale. Attraverso un approccio inclusivo, basato sulla condivisione di conoscenze e obiettivi comuni, si potrebbero realizzare interventi concreti volti a garantire la conservazione di questi preziosi ecosistemi per le generazioni future.

## Bibliografia

- AA.VV. (2004) – *Living with Coastal erosion in Europe: Sand and Space dot Sustainability. Guidance document for quick hazard assessment of coastal erosion and associated flooding*, EuroSION, Service Contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3 “Coastal erosion - Evaluation of the need for Action”, Directorate General Environment European Commission, 1-30.
- AA.VV. (2005) – *GPS. Guida all'uso del GPS per il rilevamento del territorio e l'aggiornamento cartografico*. Assogeo-Trimble, Maggioli
- ACCADIA C., ARENA G., BARBANO A., BENCIVENGA N., CASAIOLI M., COLAGROSSI A., CORSINI S., INGHILESI R., MARIANI S., MONACELLI G., NARDONE G., RIZZO A. (2003) – *Il Sistema Idro-Meteo-Mare e le reti di monitoraggio marino dell' APAT*. Atti della Settima Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali, Milano, 24-26, Novembre 2003
- ADDO K.A., WALKDEN M., MILLS L.P. (2008) – *Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. **63**, 543–558.
- ALMEIDA L., VOUSDOKAS M., FERREIRA Ó., RODRIGUES B., MATIAS A. (2012) – *Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in southern Portugal*. Geomorphology, **12**, 143–144, 3.
- AMOROSI A., BRACONE V., CAMPO B., D'AMICO C., ROSSI V., ROSSKOPF C.M. (2016) – *A late Quaternary multiple paleovalley system from the Adriatic coastal plain (Biferno river, Southern Italy)*. Geomorphology, **254**, 146-159.
- ANDERS F.J., BYRNES M.R. (1991) – Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. Shore and Beach, **59**(1), 17–26.
- ANDRADE F., FERREIRA M.A. (2006) – A simple method of measuring beach profiles. Journal of Coastal Research, **22**(4), 995–999.
- ANFUSO G.; RANGEL-BUITRAGO N.; CORTÉS-USECHE C.; CASTILLO B.I.; GRACIA F. (2016) – *Characterization of storm events along the Gulf of Cadiz (eastern central Atlantic Ocean)*. Int. J. Climatol, **36**, 3690–3707.
- ANFUSO G., POSTACCHINI M., DI LUCCIO D., BENASSAI G. (2021) – *Coastal Sensitivity/Vulnerability Characterization and Adaptation Strategies: A Review*. Journal of Marine Science and Engineering, **9**, 72.
- ANTONIOLI F., SILENTI A. (2007) – *Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane*. Quaderni della Società Geologica Italiana, 2, 1-29.
- ASCIONE A., ROMANO P. (1999) – Vertical movements on the eastern margin of the Tyrrhenian extensional basin. New data from Mt. Bulgheria (Southern Appennines, Italy). Tectonophysics, **315**, 337-356.

- AUCELLI P.P.C., AMINTI P.L., AMORE C., ARTOM C., BELLOTTI P., BOZZANO A., CAPUTO C., CASTELLINI G., CIPRIANI L.E., COCCO E., CORRADI N., D'ALESSANDRO L., DAMIANI L., DAVOLI L., DE PIPPO T., DEVOTI S., DI GREGORIO F., EVANGELISTA S., FERRARI M., FERRI S., FIERRO G., FONTOLAN G., GINESU S., GIUFFRIDA E., IANNANTUONO E., IULIANO S., LA MONICA G.B., LANDINI B., MASCIOLI F., NESCI O., PALMENTOLA G., PRANZINI E., PUGLIESE F., RANDAZZO G., RAFFI R., ROSSKOPF C.M., SALVATORE M.C., SILENZI S., SIMEONI U. & VELTRI P. (2006) *Lo stato dei litorali italiani*. GNRAC. Studi Costieri, **10**, 5-112.
- AUCELLI P.P.C., IANNANTUONO E. & ROSSKOPF C.M. (2003) - *Evolutionary trends and present morphodynamics along the Molise coast and their relationship to shore protection structures (Southern Italy)*. Atti del Convegno: 4th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems. Bologna, Giugno 2003, pp. 157-159.
- AUCELLI P.P.C., FALLACE P.I., PELLEGRINO P. ROSSKOPF C.M., SCAPILLATI N. (2004) – *L'evoluzione recente della costa molisana (Italia Meridionale)*. AIQUA, Italian Journal of Quaternary sciences, **17**(1), 21-31.
- AUCELLI P.P.C., DE PIPPO T., IANNANTUONO E. & ROSSKOPF C.M. (2007) – *Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Italia meridionale)*. Studi Costieri, **13**, 75-92.
- AUCELLI P.P.C., IANNANTUONO E., ROSSKOPF C.M. (2009) – *Evoluzione recente e rischio di erosione della costa molisana*. Boll. Soc. Geol. It., **128**, n.3, 759-771.
- AUCELLI P.P.C., RIZZO A., DI LEO P., GIOIA D., SCHIATTARELLA M. (2016) – *Coastal erosion and inundation assessment along the Ionian coast of Basilicata, southern Italy*. Rend. Online Soc. Geol. IT., n.1 vol. 40.
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2017) – *Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri, **26**, 75-90
- AUCELLI P.P.C., DI PAOLA G., RIZZO A., ROSSKOPF C.M. (2018) – *Present day and future scenarios of coastal erosion and flooding processes along the Italian Adriatic coast: the case of Molise region*. Environmental Earth Sciences, **77**, 371.
- BARTOLINI C., PECCERILLO A. (2002) – *I fattori geologici delle forme del rilievo*. Pitagora Editrice Bologna, Bologna, 216 pp.
- BASCOM W.N. (1951) – *The relationship between sand size and beach face slope*. Trans. Am. Geophys Un, **32**, 866-874.
- BARTOLE R., SAVELLI D., TRAMONTANA M., WEZEL F.C. (1984) – *Structural and sedimentary features in the Tyrrhenian margin off Campania, Southern Italy*. Marine Geology, **55**, 163-180
- BATTJES J.A. (1974) – *Surf Similarity*. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE, 466 - 480.
- BENASSAI G., DI PAOLA G., PUGLIANO G., ROSSKOPF C.M. (2015) – *UAV Calibration of the shoreline evolution for coastal protection of Kaulonia Archeological Site*. Heritage and Technology, Mind Knowledge Experience. XIII International Forum, Le Vie dei Mercanti, Aversa, Capri 11-12-13 June 2015.

- BENASSAI G., CHIRICO F., CORSINI S. (2009) – *Una metodologia per la definizione del rischio da inondazione costiera*. Studi Costieri, **16**, 51 – 72.
- BERGER A.R. & IAMS, W.J. (1996) *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth system*. Rotterdam: A.A. Balkema
- BIRD, E.C.F. (1984) – *Coasts: an introduction to coastal geomorphology*. Basil Blackwell, 320 pp.
- BIRD E.C.F. (2008) – *Coastal Geomorphology, An Introduction*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 405 pp.
- BOCCOTTI, P. (2000) – *Wave Mechanics for Ocean Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, Vol 64.
- BOAK E.H., TURNER I.L. (2005) – *Shoreline definition and detection: A review*. Journal of Coastal Research. **21**(4), 688–703.
- BORUFF B.J., EMRICH C., CUTTER S.L. (2005) – *Erosion hazard vulnerability of US coastal counties*. Journal of Coastal Research, **21**(5), 932-942.
- BOWEN A.J., INMAN D.L. & SIMMONS V.P. (1968) – *Wave 'set-down' and 'set-up'*. Journal of Geophysical Research, **73**(8), 2569–2577.
- BRACONE V., AMOROSI A., AUCELLI P.P.C., ROSSKOPF C.M., SCARCIGLIA F., DI DONATO V., ESPOSITO P. (2012) – *The Pleistocene tectono-sedimentary evolution of the Apenninic foreland basin between Trigno and Fortore rivers (Southern Italy) through a sequence stratigraphic perspective*. Basin research, **24**, 213-233.
- BRACONE V., COZZOLINO M., DE BENEDITTIS G., MAURIELLO P., ROSSKOPF C.M., VALENTE E. (2016) – *Un approccio geo-archeologico integrato per lo studio dell'evoluzione geomorfologica ed antropica recente della piana costiera del fiume Biferno*. Atti del convegno: Realtà Medioadiatiche a confronto, contatti e scambi tra le due sponde. (Termoli, 22-23 Luglio 2016)
- BRANCACCIO L., CINQUE A., ROMANO P., ROSSKOPF C.M., RUSSO F., SANTANGELO N. (1995) – *L'evoluzione delle pianure costiere della Campania: geomorfologia e neotettonica*. Memorie della Società Geografica Italiana, **53**, 313-336.
- BREWSTER L.F.S. (2002) – *The development of a comprehensive littoral vulnerability assessment approach for a small island developing state: a case study for Barbados*. Littoral 2002, The Changing Coast. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, 189-198.
- BRUUN P. (1962) *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. Journal Waterways and Harbours Division, **88**(1-3), 117-130.
- BUCCINO M., DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., DEL GIUDICE G., ROSSKOPF C.M. (2020) – *A medium-term study of Molise coast evolution based on the one-line equation and "Equivalent Wave" concept*. Water, **12**, 2831.
- BUSH D.M., NEAL W.J., YOUNGH R.S., PILKEY O.H. (1999) – *Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation*. Ocean & Coastal Management, **42**, 647-670.

- CAMFIELD F.E. & MORANG A. (1996) – *Defining and interpreting shoreline change*. *Ocean & Coastal Management*, **3**, 129–151.
- CALDARA M., PENNETTA L. (1989) – *La laguna olocenica in località La Salina presso Castellaneta, Taranto: prime considerazioni stratigrafiche e ambientali*.
- CARTER R.W.G. (1988): *Coastal environments*. Academic Press, 617 pp.
- CASNEDI R. (1988) – *La fossa Bradanica: origine, sedimentazione e migrazione*. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **41**, 439-448.
- CASTELLE B., MASSELINK G. (2023) – *Morphodynamics of wave-dominated beaches*. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, **1**, 1-13.
- CEES (2006) – *Beach management project: Best practices guidelines for 50 beaches along the coastline of Barbados*. Draft report submitted to the Government of Barbados, St. Michel, Barbados, Coastal & Environmental Engineering Solutions Inc.
- CERC - Coastal Engineering Research Center (1995) – *Irregular wave runup on beaches*. Coastal engineering technical note I-60, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- CERC - Coastal Engineering Research Centre (1984) – *Shore protection manual. V. I e II*. US Army Corps of Engineers.
- CHIOCCI F.L., LA MONICA G.B. (2008) – *Il problema dell'erosione dei litorali e le strategie per contrastarla, con considerazioni sull'assetto delle coste ioniche della Basilicata*. In: *L'arretramento della costa ionica della Basilicata: complessità, studi, azioni: atti del convegno a cura di Spilotro G., Metaponto, 71-75*.
- CHELLI A., ARINGOLI D., AUCELLI P.P.C., BALDASSARRE M.A., BELLOTTI P., BINI M., BIOLCHI S., BONTEMPI S., BRANDOLINI P., DAVOLI L., DEIANA G., DE MURO S., DEVOTO S., DI PAOLA G., DONADIO C., FAGO P., FERRARI M., FURLANI S., IBBA A., LUPIA PALMIERI E., MARSICO A., MASTRONUZZI G., MELIS R.T., MILELLA M., MUCERINO L., NESCI O., ORRÙ P.E., PANIZZA V., PENNETTA M., PIACENTINI D., PISCITELLI A., PUSCEDDU N., RAFFI R., ROSSKOPF C.M., SANSÒ P., STANISLAO C., TARRAGONI C., VALENTE A. (2018) - *Morphodynamics of coastal areas represented in the new geomorphologic map of Italy: draw the landforms of the past to outline the future*. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, **31**, 17-21, consultabile online <http://amq.aiqua.it> ISSN: 2279-7335.
- CHELLI A., ARINGOLI D., AUCELLI P.P.C., BALDASSARRE M.A., BELLOTTI P., BINI M., BIOLCHI S., BONTEMPI S., BRANDOLINI P., DAVOLI L., DE MURO S., DEVOTO S., DI PAOLA G., DONADIO C., FERRARI M., FURLANI S., IBBA A., MARSICO A., MASTRONUZZI G., MELIS R.T., MILELLA M., MUCERINO L., NESCI O., LUPIA PALMIERI E., PENNETTA M., PISCITELLI A., ORRÙ P.E., PANIZZA V., PIACENTINI D., PUSCEDDU N., RAFFI R., ROSSKOPF C.M., SANSÒ P., STANISLAO C., TARRAGONI C., VALENTE A. (2018) - *Coastal Morphodynamics AIGeo-WG: new geomorphological legend of the Italian coast*. *Rend. Online Soc. Geol. It., Suppl. N.1*, **40**.
- CHURCH J.A., WHITE N.J., COLEMAN R., LAMBECK K. & MITROVICA J.X. (2004) – *Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period*. *Journal of Climate*, **17**, 2609–2625.

- COCCO E., (1975) – *Forme costiere ritmiche “Sand Waves” lung oil litorale alto ionico (Golfo di Taranto)*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 861-869.
- COCCO E., CRAVERO E., DI GERONIMO S., MEZZADRI G., PAREA G.C., PESCATORE T., VALLONI R., VINCI A. (1975) – *Lineamenti geomorfologici e sedimentologici del litorale alto ionico (Golfo di Taranto)*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 993-1051.
- COCCO E., DE PIPPO T. (1988) – *Tendenze evolutive e dinamica delle spiagge della Campania e della Lucania*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 195-204
- COCCO E., DE PIPPO T., DE LAURO M., MONDA C. (1988) – *Focus erosive sul litorale metapontino (Golfo di Taranto)*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 703-709
- COCCO E., DE PIPPO T., PENNETTA M. (1976) – *L’uso della fotografia aerea e del calcolatore elettronico nello studio degli spostamenti delle linee di costa: l’evoluzione del litorale alto ionico (Golfo di Taranto) negli ultimi 30 anni*. Boll. Soc. Geol. It., **95**, 275-312.
- CONFERENZA DELLE PARTI ‘COP 3’ DELLA CONVENZIONE QUADRO DELLE NAZIONI UNITE SUI CAMBIAMENTI CLIMATICI (UNFCCC) (1997) – *Protocollo di Kyoto*. Kyoto, Giappone.
- CONTINI P., DE GIROLAMO P., (1998) – *Impatto Morfologico di Opere a Mare: Casi di Studio (Morphological Impact of Structures at Sea: Case Studies)*. In: Atti VIII Convegno AIOM, Associazione di Ingegneria Offshore e Marina /Proceedings of 8th Conference of the Offshore and Marine Engineering Association, Lerici, Italy, pp. 85–95.
- COOPER J., PILKEY O. (2004) – *Sea level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule*. Global and Planetary Change, **43**, 157-171.
- CROWELL M., LEATHERMAN S.P., BUCKLEY M.K. (1993) – *Erosion rate analysis: Long term versus short term data*. Shore and Beach, **61** (1), 13–20.
- CROWELL M., LEIKIN H., BUCKLEY M.K. (1999) – *Evaluation of coastal erosion hazards study: An overview*. J. COAST. RES., **28**, 2–9.
- CROWELL, M., LETHERMAN, S.P. & BUCKLEY, M.K. (1991) – *Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy*. Journal of Coastal Research. **7**(3), 839–852.
- CUTTER S. L. (1996) – *Vulnerability to environmental hazards*. Progress in Human. Geography, **20**(4), 529-539.
- DAL CIN R., SIMEONI U. (1987) – *Processi erosive e trasporto dei sedimenti nelle spiagge pugliesi fra S. Maria di Leuca e Taranto (Mare Ionio). Possibili strategie di intervento*. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 767-783.
- DAL CIN R., SIMEONI, U. (1994) – *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. Journal Coastal Research, **10** (1), 18-29.

- DANESE M., CASSIDORO G., GUICHÓN F., GOÑI R., MASINI N., LASAPONARA R., NOLÈ G. (2016) – *Spatial analysis for the study of enviromental settlement patterns: the archeological sites of the Santa Cruz province*. In Gervasi O., Murgante B., Misra S., Rocha A.M.A.C., Torre C.M., Taniar D., Apduhan B.O., Stankova E., Wang S. (Eds.): ICCSA 2016, Part III, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlino. 9789 (part IV), 191-203.
- DAVIDSON-ARNOTT R.G.D. (2005) – *A conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts*. Journal of Coastal Research, **21**(6), 1166–1172.
- DELL'ANNA L., DE MARCO A. (1977) – *Ulteriori dati sulla composizione mineralogical e granulometrica delle sabbie del litorale ionico tra Metaponto e Taranto*. Boll. Soc. Geol. It., **96**, 569-585.
- DEL POZO J.A.M., ANFUSO G. (2008) – *Spatial approach to medium-term coastal evolution in south Sicily (Italy): implications for coastal erosion management*. Journal of Coastal Research. **24**(1), 33–42.
- DEL VECCHIO (2005) – *Grotte costiere di Marina di Camerota*. Sentiero degli Dei, L'appennino meridionale, periodico di cultura e informazione della Sezione di Napoli del Club Alpino Italiano. Anno II. Fascicolo I. pp. 45-58
- DI LUCCIO D., BENASSAI G., DI PAOLA G., MUCERINO L., BUONO A., ROSSKOPF C.M., NUNZIATA F., MIGLIACCIO M., URCIUOLI A., MONTELLA R. (2019) – *Shoreline Rotation Analysis of Embayed Beaches by Means of In situ and Remote Surveys*. MDPI, Sustainability, **11**, 00725.
- DI LUCCIO D., BENASSAI G., DI PAOLA G., ROSSKOPF C.M., MUCERINO L., MONTELLA R., CONTESTABILE P. (2019) – *Monitoring and Modelling Coastal Vulnerability and Mitigation Proposal for an Archeological Site (Kaulonia, Southern Italy)*. MDPI, Sustainability, **10**, 02017.
- DI MARTINO P. (1996) – *Storia del paesaggio forestale del Molise*. IRESMO, 171 pp.
- DI PAOLA G., CICCAGLIONE M.C., BUCCINO M., ROSSKOPF C.M. (2020) – *Influence of hard defence structures on shoreline erosion along Molise coast (southern Italy): a preliminary investigation*. Rend. Online Soc. Geol. Ital., **51**, <https://doi.org/10.3301/ROL.2020.10>.
- DI PAOLA G., MINERVINO A. A., DILAURO G., RODRIGUEZ G., ROSSKOPF C.M. (2022) – *Shoreline evolution and erosion vulnerability assessment along the central Adriatic coast with the contribution of UAV beach monitoring*. Geosciences, **12**, 353.
- DOLAN R., DAVIS R.E. (1992) – *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms*. J. Coast. Res. 1992, **8**, 840–853.
- DOLAN R., DAVIS R.E. (1994) – *Coastal storm hazards*. Journal Coastal of Research SI **12**, 103–114.
- DOLAN R., HAYDEN B. (1981) – *Storms and shoreline configuration*. J. Sediment. Petrol., **51**, 737–744.

- DOLAN R., FESTER M.S., HOLME S.J. (1991) – *Temporal analysis of shoreline recession and accretion*. Journal of Coastal Research, **7**(3), 723-744.
- DOLAN R., HAYDEN B., MAY P., SUZETTE R. (1980) – *The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs*. Shore and Beach, **48**, 22-29.
- D'OREFICE M., GRACIOTTI R. (2015) – *Rilevamento geomorfologico e cartografia*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 359 pp.
- DOUKAKIS E. (2005) – *Coastal Vulnerability and Risk Parameters*. European Water, 11/12, 3-7.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004) – *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological incidents in Europe*. Environmental issue report, 35
- ERGIN A., KARAESMEN E., MICALLEF A., WILLIAMS A.T., (2004) – *A new methodology for evaluating coastal scenery: Fuzzy logic systems*. Area, **26** (4), 367-386.
- ESPOSITO C., FILOCAMO F., MARCIANO R., ROMANO P., SANTANGELO N., SCARCIGLIA F., TUCCIMEI P. (2003) – *Late Quaternary Shorelines in Southern Cilento (Mt. Bulgheria) Morphostratigraphy and Chronology*. Il Quaternario. Italian Journal of Quaternary Sciences, **16** (1), 3-14.
- EUROPEAN COMMISSION (1999a) – *Lessons from the European Commission's Demonstration Programme on Integrated Coastal Zone Management (ICZM)*. Luxemburg.
- EUROPEAN COMMISSION (1999b) – *Towards a European Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Strategy: General Principles and Policy Options*. Luxemburg.
- EUROPEAN COMMISSION (2006) – *Proposal for a Directive on the assessment and management of floods*. Brussels.
- EUROSION (2004) – *EuroSION - living with coastal erosion in Europe*. European Commission, Luxembourg.
- FERRANTI L., MONACO C., ANTONIOLI F., MASCHIO L., KERSHAW S., VERRUBBI V. (2007) – *The contribution of regional uplift and coseismic slip to the vertical crustal motion in the Messina Straits, southern Italy: Evidence from raised Late Holocene shorelines*. Journal of Geophysical Research, 112, B06401, doi:10.1029/2006JB004473
- FINKL C.W. (2004) – *Coastal Classification: Systematic Approaches to Consider in the Development of a Comprehensive Scheme*. In: Journal of Coastal Research, West Palm Beach, Florida, 166-213.
- FITTON J.M., HANSOM J.D., RENNIE A.F. (2016) – *A national coastal erosion susceptibility model for Scotland*. Ocean & Coastal Management, **32**, 80–89.
- FREDSOE J., DEIGAARD R. (1992) – *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced series on Ocean Engineering, vol.3, World Scientific, 366 p.
- GALVIN, C. J. (1968): *Breaker type classification on three laboratory beaches*. Jour. Geophys. Res., **73**, 3651-3659.

- GARAVELLI C., MORESI M., NUOVO G. (1979) – *Sedimenti attuali del Golfo di Taranto fra Trebisacce e Metaponto Lido: ricerche mineralogiche e chimiche*. Boll. Soc. Geol. It., 98, 513-548.
- GIRARDI A., COLTELLACCI M., PAREA G.C., ZUNICA M. (1985a) – Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 155 - San Severo (scala 1:100.000). C.N.R. - P.F. «Conservazione del Suolo», Sottoprogetto «Dinamica dei litorali», S.EL.CA., Firenze.
- GIRARDI A., PAREA G.C., ZUNICA M. (1985b) – Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 147 - Lanciano, Foglio 148 - Vasto (scala 1:100.000). C.N.R. - P.F. «Conservazione del Suolo», Sottoprogetto «Dinamica dei litorali», S.EL.CA., Firenze.
- GNRAC (2006) – Lo stato dei litorali italiani. Studi costieri, **10**, 5-7.
- GORNITZ V., WHITE T. W. (1992) – *A coastal hazards database for the U.S. East Coast*. ORNL/CDIAC-45, NDP-043A. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- GORNITZ V.M., DANIELS R.C., WHITE T.W, BIRDWELL K.R. (1994) – *The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast*. Journal of Coastal Research, Special Issue **12**, 327-338.
- GORNITZ V.M., BEATY T.W., DANIELS R.C. (1997) – *A coastal hazards data base for the U.S. West Coast*. ORNL/CDIAC-81, NDP-043C, Oak ridge national laboratory, Oak ridge, Tennessee, USA.
- GORNITZ V.M., WHITE T.W. & CUSHMAN, R.M. (1991) *Vulnerability of the US to future sea level rise*. Coastal Zone, **91**, Proceedings of the 7th Symposium on Coastal and Ocean Management. American Society of Civil Engineers, 1345-1359
- GUIDA D., VALENTE A. (2019) – Terrestrial and Marine Landforms along the Cilento Coastland (Southern Italy). Water, **11**, 2618.
- GUILLÉN J., DÍAZ J. I. (1990) – *Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro*. Sci. Mar. **54** (4), 359-373.
- GUZA R.T., INMAN D.L. (1975) – *Edge waves and beach cusps*. Jour. Geophys. Res., **80** (21): 2997-3012.
- GUZA R.T. & THORNTON E.B (1982) – *Swash oscillations on a natural beach*. J. of Geophys. Res., **87**, 483-491.
- HALLERMAIER R.J. (1977) – *Use for a calculated limit depth to beach erosion*. XVI Coastal Engineering Conf., 1493-1512.
- HAPKE, C.J., REID, D., RICHMOND, B.M., RUGGIERO, P. & LIST, J. (2006) – *National assessment of shoreline change part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California coast*. US Geological Survey Open File Report 2006-1219.
- HARBOR J. (1988) – *Earth's Changing Surface: An introduction to geomorphology*. Quaternary research, **29** (1), 85-86.

- HASSELMANN, K., BARNETT T.P., BOUWS E., CARLSON H., CARTWRIGHT D.E., ENKE K., EWING J.A., GIENNAP H., HASSELMAN D.E., KRUSEMAN P., MEERBURG A., MULLER P., OLBERS D.J., RICHTER K., SELL W., WALDEN H. (1973) – *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project*. Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- HOUSER C., HAPKE C., HAMILTON S. (2008) – *Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms*. *Geomorphology*, **100**, 223–240.
- IANNANTUONO E. (2007) - *Morfodinamica e tendenze evolutive del tratto di costa compreso tra P.ta Penna e P.ta Pietre Nere*. Dottorato di Ricerca XIX ciclo in Scienze Ambientali, Università dell'Aquila.
- IANNANTUONO E., ROSSKOPF C.M., STANISCI A., ACOSTA A., AUCELLI PPC. (2004) – *Effetti della dinamica costiera sull'evoluzione dei sistemi dunali presenti lungo la costa molisana (Italia meridionale)*. *Atti dei Convegni Lincei*, 205, 321-332.
- INMAN D.L., NORDSTROM C.E. (1971) – *On the tectonic and morphologic classification of coasts*. *The Journal of Geology*. **79** (1), 1-21.
- IPCC (2001) – *Third Assessment Report – Climate Change 2001*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2007) – *Fourth Assessment Report – Climate Change 2007*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK
- IPCC (2014) – *Fifth Assessment Report (AR5)*. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3>.
- IPCC (2021) – *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IRIBARREN C.R., NOGALES C. (1949) – *Protection des ports*. Section II. Comm. 4, XVII Int. Nav. Congress. Lisbona. 31-80.
- JANKOWSKI P. (2009) – *Towards participatory geographic information systems for community-based environmental decision making*. *J. Environ. Manag.*, **90**, 1966–1971.
- JENKS, G.; CASPALL, F. (1971) – *Error on Choroplethic Maps: Definition, Measurement. Reduction*. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, **61**, 217–244.
- JOHNSON, D.W. (1919) – *Shore processes and shoreline development*. Stanhope Press, 584 pp.
- KALMAN R. E. (1960) – *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. *Journal of Basic Engineering*, **82**, 35-45.
- KING C.A.M. (1972) – *Beaches and Coasts*. Edward Arnold. 570 pp.

- KOMAR, P.D. (1998) – *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall. 544 pp
- KOMAR P.D., INMAN D.L. (1970) – *Longshore Sand Transport on Beaches*. Journal of Geophysical Research, **70**, n.30.
- LAMBECK, K., ANTONIOLI, F., PURCELL, A. & SILENZI, S. (2004a) – *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. Quaternary Science Reviews, **23**, 1567-1598.
- LAMBECK, K., ANZIDEI, M., ANTONIOLI, F., BENINI, A. & ESPOSITO, A. (2004b) – *Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise*. Earth and Planetary Science Letter, **224**, 563-575.
- LANGFELDER L.J., STAFFORD D.B., AMEIN M. (1970) *Coastal erosion in North Carolina*. Journal of Waterways and Harbors Division. **962**, 531–545.
- LAZZARI M., PALMENTOLA G. (2008) – *Il processo di antropizzazione del litorale jonico lucano in relazione allo stato di conservazione della morfologia costiera*. Atti del Secondo Simposio Internazionale sul Monitoraggio Costiero, Napoli.
- LEATHERMAN S.P., DAVISON A. T., NICHOLLS R.J. (1994) – *Coastal geomorphology*. In: Environmental Science in the Coastal Zone: Issues for Further Research, 44-48.
- LEYLAND J., DARBYA S.E. (2008) – *An empirical–conceptual gully evolution model for channeled sea cliffs*. Geomorphology, **102** (3-4), 419–434.
- LUINO F., PALIAGA G., ROCCATI A., SACCHINI A., TURCONI L., FACCINI F. (2019) – *Anthropogenic changes in the alluvial plains of the Tyrrhenian Ligurian basins*. Rend. Online Soc. Geol. It., **48**, 10-16.
- MASTRONUZZI G., SANSÒ P. (2002) – *Pleistocene sea-level changes, sapping processes and development of valley networks in the Apulia region (southern Italy)*. Geomorphology, **46**, 19-34.
- MCLAUGHLIN, S., COOPER, J.A.G. (2010) – *A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?* Environ. Hazards, **9**, 233–248.
- MENDOZA E.T., JIMÉNEZ J.A. (2008) – *Clasificación de tormentas costeras para el litoral catalán (Mediterráneo NO)*. Tecnología y Ciencias del Agua, **23**, 21–32.
- MENDOZA E., JIMENEZ J., MATEO J., SALAT J. (2011) – *A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean)*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011, **11**, 2453–2462.
- MICCADEI E., MASCIOLI F., PIACENTINI T., RICCI F. (2011) – *Geomorphological Features of Coastal Dunes along the Central Adriatic Coast (Abruzzo, Italy)*. In: Journal of Coastal Research, West Palm Beach, Florida, 1122-1136.
- MOLINA R., MANNO G., LO RE C., ANFUSO G., CIRAULO G., (2019) – *Storm energy flux Characterization along the Mediterranean coast of Andalusia (Spain)*. Water, **11**, 509.
- MOLINA R., MANNO G., LO RE C., ANFUSO G., CIRAULO G. (2020) – *A Methodological Approach to Determine Sound Response Modalities to Coastal Erosion Processes in Mediterranean Andalusia (Spain)*. Journal of Marine Science and Engineering, **8**, 154.

- MOLINO B. (2008) – *L'interrimento degli invasi ed eventuale utilizzo dei sedimenti per il ripascimento costiero*. In: *L'arretramento della costa ionica della Basilicata: complessità, studi, azioni: atti del convegno a cura di Spilotro G., Metaponto, 77-86*
- MOORE L. (2000) – *Shoreline mapping techniques*. *Journal Coastal Research*. **16**(1), 111–124.
- MOOSER A., ANFUSO G., WILLIAMS A. T., MOLINA R., AUCELLI P.P.C. (2020) – *An innovative approach to determine Coastal Scenic Beauty and Sensitivity in a scenario of increasing human pressure and natural impacts due to Climate Change*. *Water*, **13** (1), 49.
- MORTON R.A. (1978) – *Analysis of sequential shoreline changes*. W.F. Tanner (Eds.), *Standards for measuring shoreline changes*. Tallahassee, Coastal Research and Department of Geology, Florida State University, Florida, pp. 43–48.
- MORTON R.A., MILLER T.L., MOORE, L.J. (2004) – *National assessment of shoreline change part I: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico*. US Geological Survey Open File Report 2004-1043, 2004, p. 44.
- MUSCIO G., SELLO U (2007) – *Carsismo del Basso Cilento*. Atti del Convegno Regionale di Speleologia “Campania Speleologica”. 1-3 giugno 2007. Oliveto Citra (SA).
- NARRA P., COELHO, C., SANCHO F. (2019) – *Multicriteria GIS-based estimation of coastal erosion risk: Implementation to Aveiro sandy coast, Portugal*. *Ocean Coast. Manag.*, **178**, 104845.
- NICHOLLS R.J., WONG P.P., BURKETT V.R., CODIGNOTTO J.O., HAY J.E., MCLEAN R.F., RAGOONADEN S., WOODROFFE C.D. (2007) – *Coastal systems and low lying areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden and CE Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356
- NORDSTROM K.F., JACKSON N.L. (1992) – *Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries*. *Zeit. für Geomorph.*, **36** (4): 465 – 478
- OVERPECK J.T., OTTO-BLIESNER B.L., MILLER G.H., MUHS D.R., ALLEY R.B., KIEHL J.T. (2006) – *Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise*. *Science*, **311**, 1747-1750.
- PANIZZA M. (2014) – *Geomorfologia*. Pitagora Editrice Bologna, Bologna, 386 pp.
- PAREA G. C. (1978) – *Trasporto dei sedimenti ed erosione costiera lungo il litorale fra il Tronto ed il Fortore (Adriatico Centrale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **19**: 361-367.
- PATACCA E., SARTORI R., SCANDONE P. (1990) – *Tyrrhenian basin and appenninic arcs: kinematic relations since late tortonian times*. *Mem. Soc. Geol. It.* **45**, 425-451.
- PELLICANI R., ARGENTIERO I., FIDELIBUS M.D., MOTTA ZANIN G., PARISI A., SPILOTRO G. (2020) – *Dynamics of the Basilicata Ionian coast: human and natural drivers*. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, **31**, 353–364

- PELLÓN E., DE ALMEIDA L.R., GONZÁLEZ M., MEDINA R. (2020) – *Relationship between foredune profile morphology and eolian and marine dynamics: A conceptual model*. *Geomorphology*, **351**, 106984
- PICCAZZO M., BRANDOLINI P., PELFINI M. (2007) – *Clima e rischio geomorfologico in aree turistiche*. Studi regionali e monografici, Pàtron Editore Bologna, 39.
- PRANZINI E. (2004) – *La forma delle coste: geomorfologia costiera impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, Bologna, Italy.
- PRANZINI E., WILLIAMS A.T. (2013) – *Coastal Erosion and Protection in Europe*. Routledge/Earthscan, London.
- PRANZINI E., WETZEL L., WILLIAMS A.T. (2015) – *Aspects of coastal erosion and protection in Europe*. *Journal of Coastal Conservation*, **19**, 445-459.
- PUIG M., DEL RÍO L., PLOMARITIS T.A., BENAVENTE J. (2016) – *Contribution of storms to shoreline changes in mesotidal dissipative beaches: case study in the Gulf of Cádiz (SW Spain)*. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, **16(12)**, 2543–2557.
- RAHMSTORF S. (2007) – *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise*. *Science*, **315**, 368-370.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G. (2011) – *Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts*. *Earth Surf. Processes Landf*, **36**, 1997–2010.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G. (2013) – *Winter wave climate, storms and regional cycles: The SW Spanish Atlantic coast*. *Int. J. Climatol.* **33**, 2142–2156.
- RANGEL-BUITRAGO N., ANFUSO G., WILLIAMS A.T., (2015) – *Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management*. *Ocean. Coast. Manag.* **114**, 129-144.
- REGIONE BASILICATA, DIPARTIMENTO AMBIENTE E TERRITORIO. (2005) – *Monitoraggio dell'erosione costiera e caratterizzazione quali-quantitativa dei sedimenti a mare*. Relazione generale. 160pp.
- RIZZO, A., AUCELLI, P., GRACIA, F., ANFUSO, G. (2018) – *A novelty coastal susceptibility assessment method: Application to Valdelagrana area (SW Spain)*. *J. Coast. Conserv.*, **22**, 973-987.
- ROMAGNOLI C., MANCINI F., BRUNELLI R. (2006) – *Historical shoreline changes at an active island Volcano: Stromboli, Italy*. *Journal of Coastal Research*. **22** (4), 739–749.
- ROSSI S., GABBIANELLI G. (1978) – *Geomorfologia del Golfo di Taranto*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **97**, 423-437.
- ROSSKOPF C.M., DI PAOLA G., ATKINSON D.E. RODRIGUEZ G., WALKER I.J. (2017) – *Recent shoreline evolution and beach erosion along the central Adriatic coast of Italy: the case of Molise region*. *Journal of Coastal Conservation, Planning and Management*.

- ROSSKOPF C.M., CANTALUPO P. (1997) – *Tracce geoarcheologiche di variazioni ambientali storiche sulla costa di Agropoli (Cilento, Sud Italia)*. AIQUA, Italian Journal of Quaternary sciences, **10**(1), 121-130.
- RUTIGLIANO P. (2003) – *Possibili applicazioni della tecnica GPS nelle attività professionali*. Geologia Territorio e Ambiente, **4**, 6-10.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2011) – *Studio sedimentologico e dinamica marino-costiera del sistema litorale di Bosco Pantano di Policoro (Basilicata, Italia meridionale)*. Rend. Online Soc. Geol.It., **17**, 161-168.
- SABATO L., LONGHITANO S. G., GIOIA D., CILUMBRIELLO A., SPALLUTO L. (2012) – *Sedimentological and morpho-evolution maps of the 'Bosco Pantano di Policoro' coastal system (Gulf of Taranto, southern Italy)*. Journal of Maps, disponibile online: <http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>, 1-8.
- SANTANGELO N., ROMANO P., ASCIONE A., ERMOLLI RUSSO E. (2017) – *Quaternary evolution of the Southern Apennines coastal plains: a review*. Geologica Carpathica, **68**, 43-56.
- SAVILLE T. (1954) – *The effect of fetch width on wave generation*. US Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board. Technical Memorandum n. 70
- SAVINI A., BRACCHI V.A., CAMMAROSANO A., PENNETTA M., RUSSO F. (2021) – *Terraced Landforms Onshore and Offshore the Cilento Promontory (South-Eastern Tyrrhenian Margin) and Their Significance as Quaternary Records of Sea Level Changes*. Water, **13**, 566.
- SCHIATTARELLA M., GIANO S.I., LONGHITANO S., BENEDEUCE P. (2011a) – *Il Mar Ionio*. In: La Costa d'Italia (tavole generali), a cura di S. Ginesu, 49-60. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- SCHIATTARELLA M., GIANO S.I., LONGHITANO S., BENEDEUCE P. (2011b) – *La costa della Basilicata*. In: La Costa d'Italia (tavole regionali), a cura di S. Ginesu, 249-268. Carlo Delfino Editore, Sassari.
- SCORPIO V., AUCELLI P.P.C., GIANO S.I., PISANO L., ROBUSTELLI G., ROSSKOPF C.M., SCHIATTARELLA M. (2015) – *River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery*. Geomorphology, **251**, 77-90.
- SENATORE M. R. (1986) – *The Gulf of Taranto: sedimentation and structural framework*. Rend. Soc. Geol. It., **9**, 229-234
- SENATORE M. R., NORMARK W. R., PESCATORE T., ROSSI S. (1988) – *Structural framework of the Gulf of Taranto (Ionian Sea)*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 633-539.
- SHORT, A.D. (1991) – *Macro-meso tidal beach morphodynamics. An overview*. Jour. Coastal Res., **7**, 417 - 436.
- SIMEONI U., DEL GRANDE C., GABIANELLI G. (2003) – *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi Costieri, **7**, 81-93.
- SMITH K. (2013) – *Environmental Hazards: Assessing Risk Disaster*. Routledge Ed., New York and Reducing. 504 pp.

- SPILOTRO G., ARGENTIERO I., PELLICANI R., FIDELIBUS M.D., MOTTA ZANIN G., PARISI A. (2019) – *Basilicata Ionian Coast: human and natural drivers of coastal dynamics*. Atti del convegno: Gestione e difesa delle coste. XIX Giornata mondiale dell'acqua (21 marzo 2019). Accademia dei Lincei.
- SPILOTRO G., ARGENTIERO I., PELLICANI R., FIDELIBUS M.D., PARISI A. (2018) – *Rivers damming for water storage: cascading effects on coastal instability. The case of the ionic coast of the Basilicata region*
- SPILOTRO G., PIZZO V., LEANDRO G. (2008) – *Evoluzione della costa ionica della Basilicata e gestione della complessità*. In: L'arretramento della costa ionica della Basilicata: complessità, studi, azioni: atti del convegno a cura di Spilotro G., Metaponto, 19-40.
- SPILOTRO G., DI BRATTO M., CECILIA G., LEANDRO G.F. (1998) – *Evoluzione recente del litorale alto Ionico compreso tra foce Sinni e foce Bradano*.
- SPILOTRO G., CANORA F., CICALA A. (2010) – *Attività antropica e variazione del bilancio sedimentario relativo alla costa ionica della Basilicata*. Atti di Dipartimento. 1 anno 2010. Università degli Studi della Basilicata.
- SPILOTRO G. GRIMALDI S., SOLE A. (1999) – *Carta geolitologica dei principali bacini lucani (1:250.000)* Univ. Basilicata, DIFA, Valutazione delle piene in Basilicata.
- SPILOTRO G., MONACO L. (2003) – *Metodologia di misura delle variazioni recenti delle linee di costa basse, mediante analisi di foto aeree*. Atti DISGG, UNIBAS, pubbl. 2/2003
- SPILOTRO G. (2003) – *Variazioni relative del livello mare e variazioni della linea di costa: tendenze naturali e fattori antropici*. Atti Convegno SIGEA: Cambiamenti climatici e desertificazione in area mediterranea, SIGEA, Univ. Bari, 16.3.2002. In: Geologia dell'Ambiente, periodico SIGEA, anno XI, n. 2/2003, 27-34.
- SPILOTRO G., CAPORALE F., CANORA F., LEANDRO G. (2004) – *Interventi nei bacini e dinamica delle coste*. Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata, Collana editoriale di studi e ricerche, n. 4 "Il processo di interrimento degli invasi: Genesi, effetti ed interventi per la tutela dell'ambiente". Molino B. & Vita M. Edts.
- SPILOTRO G., PIZZO V. (2007) – *Basin modifications and coastal dynamics: the case of the ionic waterfront in the Basilicata Region*. Proc. 2nd Workshop on coastal processes and port engineering, Cosenza, June 2006; Povia Ed
- STATE OF NSW AND OFFICE OF ENVIRONMENT AND HERITAGE (2018) – *Coastal Management Glossary*
- SUMMERFIELD M.A. (1991) – *Global geomorphology*. Longman Scientific y Technical, 537 pp.
- TARRAGONI C., BELLOTTI P., DAVOLI L., RAFFI R., LUPA PALMIERI E. (2014) – *Assessment coastal vulnerability to erosion: the case of Tiber River Delta (Tyrrhenian Sea, Central Italy)*. In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2, 5-16.

- TARRAGONI C., DAVOLI L., LUPIA PALMIERI E. (2015) – *Coastal Vulnerability Analysis Along the Coast of Pescara (Adriatic Sea, Central Italy)*. In: Coastal and Beach Erosion – Processes, Adaption Strategies and Environmental Impacts, “Coastal and Oceanic Landforms, Development and Management”, Nova Publishers, New York, 29-47.
- THIELER E.R. & DANFORTH W.W. (1994) – *Historical shoreline mapping (II): application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico*. Journal of Coastal Research, 10, 600–620
- THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., MILLER T.L. (2005) – *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.0: an ArcGIS© extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1404, 2005.
- TROPEANO M., CILUMBRIELLO A., SABATO L., ANDRIANI G.F., GALLICCHIO S., GRIPPA A., ROSSI C.A., SPILOTRO G., WALSH N. (2011) – *Stratigrafia e Idrostratigrafia preliminare del sottosuolo della piana costiera metapontina (Basilicata – Italia meridionale)*. In: Le modificazioni climatiche e i rischi naturali. A cura di: M. Polemio, CNR IRPI, Bari, 149-152.
- VEZZANI L. (1967) – *I depositi plio-pleistocenici del litorale ionico della Lucania*. Atti Acc. Gioenia Sc. Nat. in Catania s. VI, 18, 159-180.
- VIGANONI L. (1997) – *Lo sviluppo possibile, la Basilicata oltre il sud*. Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, 400 pp.
- WENTWORTH C.K. (1922) – *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, **30** (5), 377-392.
- WILLIAMS A.T., RANGEL-BUITRAGO N., PRANZINI E., ANFUSO G. (2018) – *The management of coastal erosion*. Ocean & Coastal Management, **156**, 4-20.
- WRIGHT L.D., SHORT, A.D. (1984) – *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, **56**, 93-118.
- ZUNICA M. (1987) – *Lo spazio costiero italiano*. Valerio Levi Editore, 212 pp.