

# Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 8  
2004



# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

**Enzo Pranzini**

Dipartimento di Scienze della Terra  
Borgo Albizi 28 - 50122 Firenze  
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2479741  
E-mail enzo.pranzini@unifi.it

## Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria civile  
Via S. Marta 3 - 50139 Firenze  
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333  
E-mail aminti@dicea.unifi.it

**Carlo Bartolini** - Firenze  
**Edoardo Benassai** - Napoli  
**Antonio Brambati** - Trieste  
**Leandro D'Alessandro** - Chieti  
**Giuliano Fierro** - Genova  
**Leopoldo Franco** - Roma  
**Giovanni Battista La Monica** - Roma  
**Alberto Lamberti** - Bologna  
**Gianfranco Liberatore** - Udine  
**Elvidio Lupia Palmieri** - Roma

**Giuseppe Matteotti** - Padova  
**Alberto Noli** - Roma  
**Arturo Ragone** - Napoli  
**Giulio Scarsi** - Genova  
**Umberto Simeoni** - Ferrara  
**Sandro Stura** - Genova  
**Ugo Tomasicchio** - Bari  
**Adalberto Vallega** - Genova  
**Marcello Zunica** - Padova

Stampato presso  
**Nuova Grafica Fiorentina**  
Via Traversari, 76  
50126 Firenze

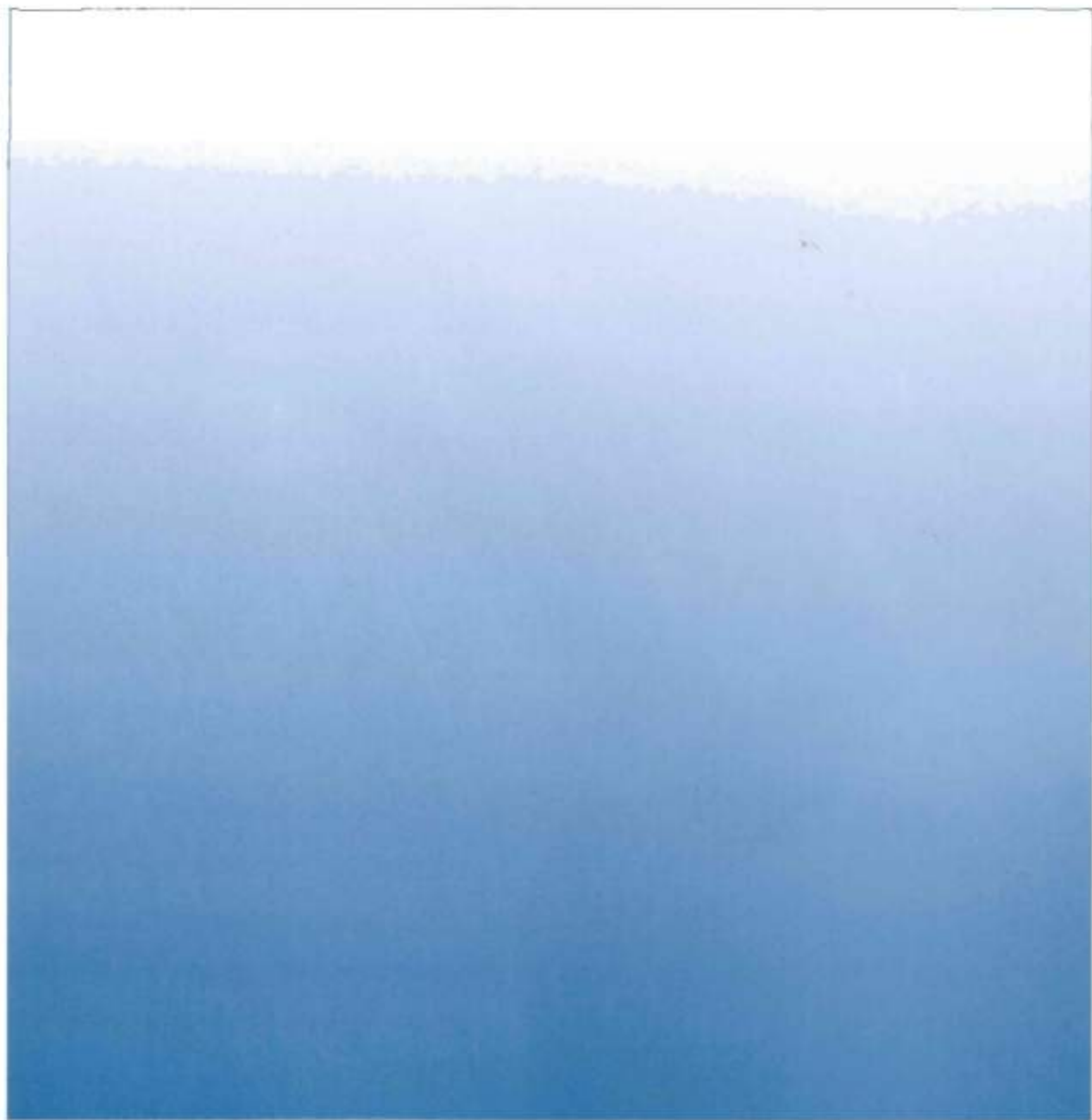
# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 8

## Indice

<b>Monitoraggio del ripascimento protetto con barriera sommersa nella spiaggia di Ostia Centro</b> Leopoldo Franco, Marcello Di Risio, Ciro Riccardi, Piergiorgio Scaloni e Matteo Conti	pag.	3-16
<b>Caratteri sedimentologici e dinamica delle spiagge e della piattaforma interna tra Capo Testa e Punta di li Francesi (Sardegna settentrionale)</b> Sandro DeMuro, Concetta Ferrara, Roberto Follesa e Angelo Ibba	pag.	17-36
<b>Evoluzione morfologica del settore costiero di Porto Cesàreo (Penisola Salentina, Puglia)</b> Tommaso De Pippo, Carlo Donadio, Miela Pennetta, Francesco Terlizzi e Carlo Vecchione	pag.	37-48
<b>Arretramento ed indice d'erosione lungo il litorale di Alghero</b> Sergio Ginesu e Stefania Sias	pag.	49-58
<b>Dinamica morfologica e sedimentaria del litorale di Castellammare di Stabia (Golfo di Napoli)</b> Chiara Cammelli, Pierluigi Iannotta, Valentina Matucci e Enzo Pranzini	pag.	59-88
<b>Ipotesi di rinaturalizzazione della spiaggia di Gabicce Mare</b> Elena Primavera e Barbara Zanuttigh	pag.	89-109
<b>Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di fotoaeree e immagini MIVIS e Quickbird.</b> Alessandra Grignetti, Ruggero Casacchia e Rosamaria Salvatori	pag.	111-120
<b>Minerali di origine industriale nei sedimenti del litorale di Taranto</b> Antonio De Marco, Luca Antonio Di Muccio, Giuseppe Mastronuzzi, Michelina Mazzarella e Amalia Sergio	pag.	121-133
<b>Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)</b> Enzo Pranzini	pag.	135-149
<b>Tesi di Laurea</b>	pag.	151-156
<b>Norme per gli Autori</b>	pag.	157-158



ISSN 1129-8588

## Monitoraggio del ripascimento protetto con barriera sommersa nella spiaggia di Ostia Centro

Leopoldo Franco <sup>1</sup>, Marcello Di Risio <sup>1</sup>, Ciro Riccardi <sup>2</sup>,  
Piergiorgio Scaloni <sup>2</sup>, Matteo Conti <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università degli Studi "Roma Tre"  
Via V. Volterra, 62 - 00146 Roma. Email: leofranc@uniroma3.it.

<sup>2</sup> Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio dei Litorali Laziali.  
Via F. del Dragoncello, 172 - 00124 Roma. Email: cent.monit@libero.it

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"  
Piazzale A. Moro, 5 - 00185 Roma. Email: m.conti@icram.org

### Riassunto

La memoria descrive il progetto sperimentale del ripascimento sabbio-ghiaioso protetto da una lunga (circa 2,5 km) continua barriera sommersa profonda (-1,5 m s.l.m.m in cresta) senza pennelli realizzato sulla spiaggia di Ostia Centro (1990) e successivamente monitorato con rara continuità e durata (13 anni) per gli aspetti morfologici. Data la cospicua varia e disomogenea mole di dati raccolti ed analizzati si riportano qui solo alcuni risultati ed osservazioni preliminari, rinviando ad una nota successiva ulteriori analisi morfodinamiche, anche con l'impiego di modelli matematici.

**Parole chiave:** ripascimento sabbio-ghiaioso, barriera sommersa, spiaggia sospesa, monitoraggio litorali.

### Abstract

*The paper describes the new perched beach project built at Ostia "central beach" in 1990, which has been duly monitored for 13 years. The sand-gravel fill is protected by a "deep" (-1,5 m MSL) submerged longitudinal barrier without groynes over a beach length of about 2,5 km. Due to the large variable amount of data collected, only preliminary analysis and observations are here reported, while further morphodynamic analysis, including the application of numerical models, will be described in a following paper.*

**Key-words:** sand gravel fill, submerged longitudinal barrier, perched beach, littoral monitoring.

### Introduzione

Le spiagge sabbiose del Lido di Ostia si estendono dall'estremità meridionale della foce del fiume Tevere, a circa 25 km dalla città di Roma sul mar Tirreno, e rappresentano da tempo una risorsa turistica della comunità. L'esposizione alle forzanti meteomarine è particolarmente significativa nel settore direzionale compreso tra Ovest e Sud (Fig. 1): la risultante del flusso di energia del moto ondoso è diretta secondo l'azimut 225°N, mentre l'allineamento medio della costa è orientato normalmente alla direzione 210°N, con conseguente trasporto longitudinale verso SE. L'escursione locale di marea è molto ridotta (< 0,5 m) e la profondità di chiusura dei profili di spiaggia è di circa 7 m, calcolata con la formula di Hallermeier, essendo l'altezza d'onda significativa annuale al largo di circa 4 m.

La cuspidè delizia è il risultato del trasporto fluviale del fiume Tevere che ha prodotto un progressivo avanzamento della linea di riva pari a circa 4 km tra l'età romana ed il secolo scorso. Negli ultimi 50 anni si è verificata un'inversione di tendenza ed ha avuto luogo un marcato processo d'erosione, pari a circa 1,7 m/anno. Le cause di tale arretramento sono imputabili alla forte riduzione di trasporto solido del fiume (dovuto principalmente alla costruzione d'opere di sbarramento lungo l'asta fluviale ed all'estrazione di materiale inerte dall'alveo) con un conseguente deficit nel bilancio dei sedimenti della zona costiera ed una tendenza della foce ad arretrare a causa del gradiente di trasporto longitudinale verso Sud.

La posa in opera di strutture di difesa costiera distaccate emergenti (anni '70-'80) in corrispondenza della foce ha spostato l'erosione verso le spiagge limitrofe colpendo particolarmente la costa compresa tra il Pontile della Vittoria ed il Canale dei Pescatori, con conseguenti danni agli stabilimenti balneari ed eccezionalmente, durante gli eventi estremi, alla strada litoranea.

### Il progetto della spiaggia sospesa

Nel 1988 fu avviata la progettazione di un innovativo intervento di ripascimento protetto, iniziato poi nel 1990 (Ferrante et al., 1992). Lo scopo delle Autorità, il Genio Civile per le Opere Marittime di Roma, del Ministero dei Lavori Pubblici era quello di ricreare un'ampia fascia di spiaggia che avesse la capacità di difendere la costa, rappresentando così un'opera di difesa con adeguate caratteristiche economiche, di gestione, politiche ed ambientali.

Infatti, la comunità locale aveva già rifiutato l'eventualità di adottare le più diffuse strutture emergenti al fine di favorire l'attrazione turistica, l'estetica del panorama marino e l'ecologia del sito. Il progetto ha rappresentato all'epoca un nuovo approccio dell'Amministrazione Pubblica votato ad una visione complessiva della difesa costiera, prendendo in considerazione non soltanto aspetti squisitamente tecnico-economici, ma altresì ponendo attenzione alle problematiche ambientali. La scelta ricadde sull'allora pionieristico schema di spiaggia sospesa, con versamento di materiale di ripascimento protetto da una barriera longitudinale sommersa fissa, che avrebbe dovuto riprodurre il meccanismo di protezione delle barre naturali. Una problematica non trascurabile è stata anche quella della scarsità di sabbia marina per il ripascimento. La sabbia scura nativa tipica del posto ha un diametro caratteristico piccolo ( $D_{50} = 0,15-0,30$  mm). A circa 20 km dalla foce del fiume Tevere fu trovata una cava terrestre di sabbia gialla e breccia dalla forma ben arrotondata.

Lo schema del sistema di protezione costiera copriva una lunghezza di quasi 2,5 km ed era costituito da due elementi principali (Fig. 2):

- Una barriera sommersa parallela alla linea di riva posta ad una distanza di circa 150 m, imbasata su un fondale di circa -4,0 m s.l.m.m., con una larghezza di cresta di progetto di 15 m alla quota -1,5 m, con pendenza della scarpata lato mare pari a 1:5. La scogliera era costituita da pietrame assortito con peso massimo di 1 t ( $D_{50}$  stimato di 0,5 m), posata in opera su materiale geotessile, con una trincea di protezione al piede larga 5 m e profonda 1 m. Il materiale impiegato è stato di circa 300.000 m<sup>3</sup> di roccia (basalto e calcare provenienti da differenti cave).



Figura 1 - Posizione del Lido di Ostia e distribuzione direzionale del moto ondoso (dati rilevati dalla boa CONDRA COS su fondale di -12 m dal 01.01.1990 al 31.12.1992).

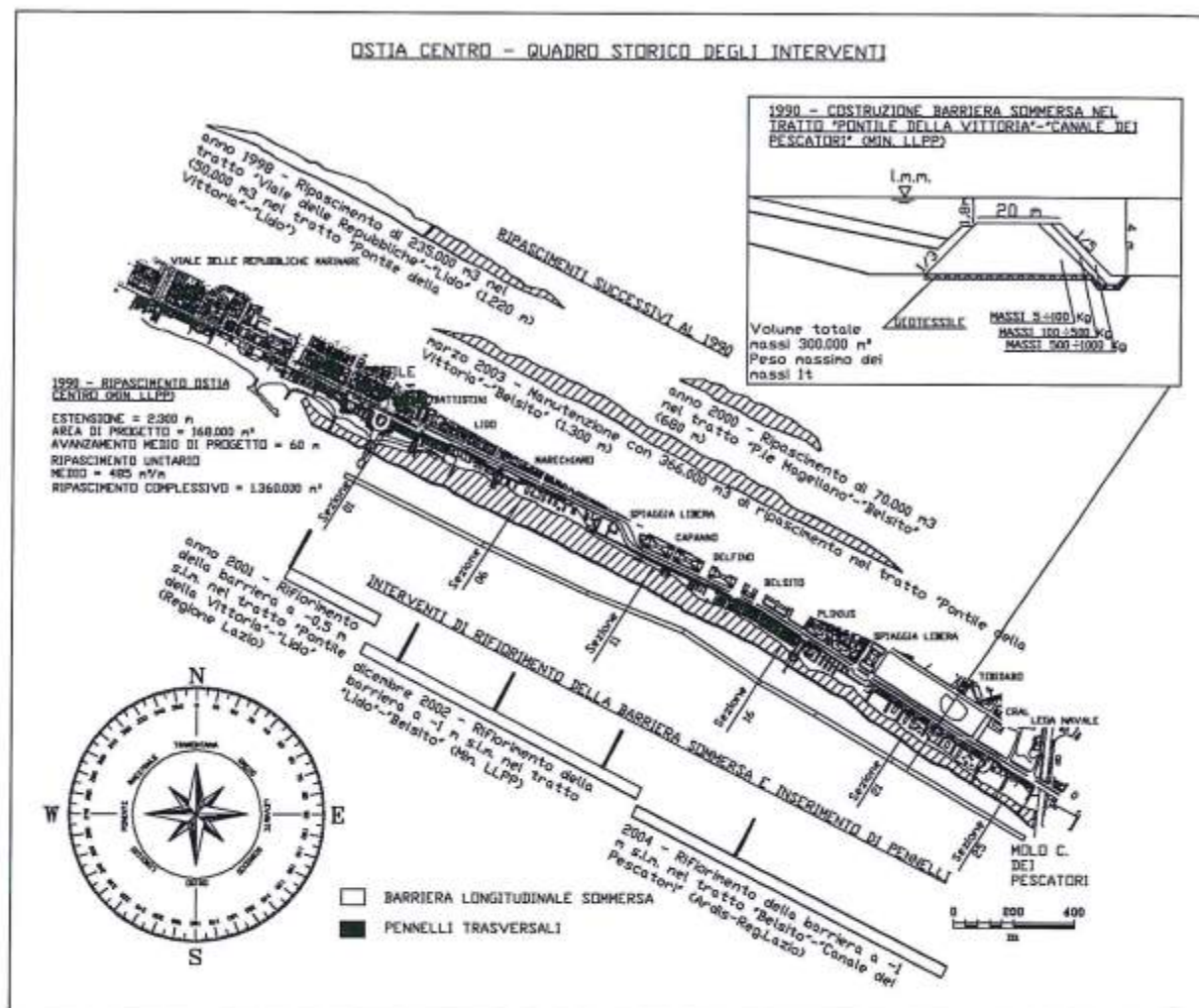


Figura 2 - Planimetria con indicazione degli interventi e delle sezioni di riferimento. Nel riquadro è illustrato lo schema della sezione della struttura sommersa.

La cresta della barriera è stata effettivamente costruita con una larghezza di 20 m ad una quota di -1,8 m e ha scontato rapidamente i cedimenti sprofondando ad una quota media di -2,0 m (1992) fino a -2,3 m (2003) s.l.m.m. - Un ripascimento di spiaggia con doppio strato di materiale di cava terrestre. Lo strato inferiore era costituito da sabbia mista a ghiaia con granulometria molto assortita compresa tra 0,08 e 120 mm. Lo strato superiore, di spessore pari a 1 m, era costituito da sedimento di granulometria compresa tra 0,3 e 1,3 mm ( $D_{50}=0,5$  mm). A ridosso della scogliera lo strato inferiore era risvoltato per uno spessore di 5 m con lo scopo di filtro tra il materiale fine superiore e la scogliera; la pendenza di equilibrio della spiaggia era pari al 2,5% e la sommità della berma era posta ad una quota pari a +1,0 m. L'avanzamento medio di progetto della linea di riva era di circa 60 m. La quantità complessiva di materiale messo in opera è stato di circa 1.360.000 m<sup>3</sup> di sabbia e materiale ghiaioso selezionato.

Il progetto innovativo fu verificato dal laboratorio di Delft Hydraulics con prove su modello fisico bidimensionale per l'analisi dell'evoluzione del profilo trasversale e con un modello ad una linea per lo studio dell'evoluzione a lungo termine della linea di riva (Ferrante et al., 1992).

L'intervento fu realizzato nell'arco di un anno (1990-91) dal consorzio di imprese CONDRACOS, utilizzando prevalentemente mezzi terrestri.

Come descritto in Figura 2 e sintetizzato in Tab. 1, sono stati in seguito effettuati vari interventi di manutenzione e ampliamento. Nel 1998 sono stati versati 235.000 m<sup>3</sup> di sabbia ( $D_{50} = 0,2$  mm) proveniente da

cava terrestre tra Viale delle Repubbliche Marinare e Lido per un'estensione totale di 1.220 m, coinvolgendo un tratto del lido di Ostia Centro e realizzando un pennello lato N-W al Pontile della Vittoria; nel 2000 un nuovo ripascimento di 70.000 m<sup>3</sup> provenienti dal dragaggio della foce del Canale dei Pescatori è stato effettuato tra Piazza Magellano e Belsito (680 m); nel 2003 un'ulteriore versamento di 366.000 m<sup>3</sup> di provenienza sottomarina ( $D_{50} = 0,2$  mm) è stato eseguito tra il Pontile della Vittoria e Belsito. Inoltre, i lavori di manutenzione hanno riguardato anche la struttura sommersa che è stata ricaricata lungo l'intero tratto con successivi interventi (2001-2004), con massi naturali di peso compreso tra 1 e 3 t facendo raggiungere alla cresta una quota variabile tra -0,5 m s.l.m.m. nel tratto di NW e -1,0 m s.l.m.m. nel tratto centrale e a SE. Infine, la realizzazione di n° 5 pennelli, a scogliera e del tipo semisommersi, ha modificato lo schema di difesa originario nella tipologia a "celle".

Inoltre, si deve segnalare che dal 1999 sono state avviate dai tecnici regionali opere di difesa anche lungo la spiaggia sottoflutto alla zona di Ostia Centro: tale litorale denominato "Ostia Levante" è stato oggetto negli ultimi anni di interventi di ripascimento puro e di tecniche sperimentali tipo BMS.

ANNO	INTERVENTI	RILIEVI BATIMETRICI	LINEE DI RIVA AEROFOTO CARTOGRAFIE	DATI GRANULOMETRICI
1944			Maggio Foto RAF	
1955			Foto IGM	
1967			Aprile foto SARA	
1979			Cartografia 1:5.000 Studio Volta	
1990	Barriera sommersa a -1,5 m s.l.m.m. e ripascimento di 1.300.000 m <sup>3</sup> nel tratto "Pontile della Vittoria"- "Canale dei Pescatori" (2.300 m) Min.LL.PP.		Cartografia 1:10.000 CTR	Dati di Progetto
1992		Maggio - fino alla batimetrica 4 m	Foto RILTER	
1994		Luglio - fino alla batimetrica 4 m	Volo Italia	28 sez (ogni 100 m). Campioni +1; 0; -1; quota variabile entro e fuori barriera. Tot. 28x4.
1995		Settembre. - fino alla batimetrica 7 m		
1996		Febbraio - fino alla batimetrica 8 m	AIMA	
1997				2 sez. campioni +1;-1; Tot. 2x2.
1998	Ripascimento di 235.000 m <sup>3</sup> nel tratto "Via delle Repubbliche Marinare"- "Lido" (1.220 m)		CGR	
1999			Settembre foto SIDRA	
2000	Ripascimento di 70.000 m <sup>3</sup> nel tratto "P.le Magellano"- "Belsito" (680 m)	Ottobre fino alla batimetrica -10	Maggio Foto Aerea	
2001	Rifiorimento della barriera a -0,5 m s.l.m.m. nel tratto "Pontile della Vittoria"- "Lido" (340 m) Reg. Lazio		Luglio foto Sales	Maggio. 7sez. campioni S=0 m; P=2/3 e 7,5 m; L=5 m. Tot 28.
2002	Rifiorimento della barriera a -1 m s.l.m.m. nel tratto "Lido"- "Belsito" (1.000 m) Min.LLPP	Maggio fino alla batimetrica 10 m Dicembre fino alla batimetrica 10 m	Maggio foto AGEA	Giugno+Ottobre 7 sez (ogni 400 m). Campioni a 0; -2; -5; -7,5. Tot 28 +1 a -15 m (sez 12)
2003	Manutenzione con 366.000 m <sup>3</sup> di ripascimento nel tratto "Pontile della Vittoria"- "Belsito" (1.300 m) Min. LL.PP.	Febbraio I Pianta (-10 m) Maggio II Pianta (-10 m)	Agosto Foto da SATELLITE	
2004	Rifiorimento della barriera a -1 m s.l.m.m. nel tratto "Belsito"- "Canale dei Pescatori" (1.150 m) Ardis-Reg.Lazio	Giugno fino alla batimetrica 10 m		

Tabella 1 - Sintesi degli interventi e delle attività di monitoraggio alla spiaggia di Ostia Centro.



### Programma di monitoraggio

Il carattere particolarmente innovativo di questa soluzione tecnica insieme alla lunghezza inconsueta del ripascimento non protetto da pennelli trasversali ha spinto il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ad attribuire un carattere sperimentale al sistema di difesa, imponendo un'intensa attività di monitoraggio a partire dalla data d'inizio lavori (1990). Recentemente tale attività è svolta dal Centro di Monitoraggio dell'Osservatorio dei Litorali della Regione Lazio, istituito con L.R. 53 del 1998, ora responsabile delle opere di difesa costiera. Le osservazioni pluriennali ottenute nell'ambito di tale attività riguardano: fotografie aeree, rilievi topobatimetrici e conseguenti profili trasversali di spiaggia, analisi di campioni granulometrici e, solo per i primi tre anni, misure di moto ondoso direzionale (v. sintesi informativa in Tab. 1).

Tale esteso archivio è stato oggetto di validazione ed analisi al fine di trarre delle conclusioni riguardanti l'effetto a lungo termine del sistema di difesa, nonostante i confronti siano resi difficili dalla disomogeneità dei rilievi non standardizzati e dalla sovrapposizione ed incertezza geometrica degli interventi eseguiti a più riprese.

A partire dal mese di settembre 2004, inoltre, sono stati avviati con cadenza trimestrale una serie di rilevamenti della linea di riva mediante GPS palmare (Trimble Geo XT).

L'Osservatorio, infatti, oltre all'impiego di strumentazione d'indagine avanzata (es. RTK e multibeam) ha definito opportuni standard metodologici per assicurare nel tempo la ripetibilità e confrontabilità dei rilievi. Ulteriori informazioni sulle attività svolte dall'Osservatorio e sulle nuove tecnologie di rilevamento sono state illustrate nell'ambito del progetto europeo BEACHMED i cui dati sono disponibili on-line sul sito [www.beachmed.it](http://www.beachmed.it).

### Analisi preliminari ed osservazioni sulla morfologia della spiaggia e della barriera

#### Linee di riva

Le numerose linee di riva storiche sono state georiferite su base Carta Tecnica Regionale inquadrata nel sistema UTM 33 ED50. È stata quindi utilizzata l'analisi diacronica per ricavare la variazione areale della spiaggia emersa.

Una prima analisi è stata effettuata sull'evoluzione pre-intervento. La Figura 3 mostra la foto aerea del 1944. La trasparenza dell'acqua evidenzia la presenza di un doppio sistema di barre longitudinali, indice di buona alimentazione sedimentaria: la prima, festonata e più piccola è ubicata ad una distanza di circa 70 m da riva, la seconda, rettilinea, a circa 300 m da riva. Si noti che la barriera artificiale è stata realizzata poco al largo della prima barra.

L'analisi delle linee di riva ricavate da aerofoto permette di dare una valutazione delle variazioni delle aree di spiaggia emersa dal 1944 ad oggi. Si notano arretramenti della linea di riva già negli anni cinquanta: la costruzione di opere di sbarramento nel Bacino del fiume Tevere, aveva ridotto la naturale alimentazione del litorale romano.

Nel 1967 l'arretramento della battigia risultava ancora in atto (circa  $-22 \text{ m}^3/\text{m}$  di spiaggia emersa dal 1944 al 1967), anche se la fotointerpretazione dell'immagine aerea mostra ancora il doppio sistema di barre. L'intervento di ripascimento protetto del 1990 ha riportato la linea di riva ad una posizione più avanzata rispetto a quella del 1944 (quasi  $10 \text{ m}^3/\text{m}$ ). Negli anni successivi all'intervento si sono registrati ulteriori arretramenti concentrati nella zona Nord: più di  $16 \text{ m}^3/\text{m}$  di spiaggia in otto anni. Il rifiorimento della barriera davanti alla spiaggia del

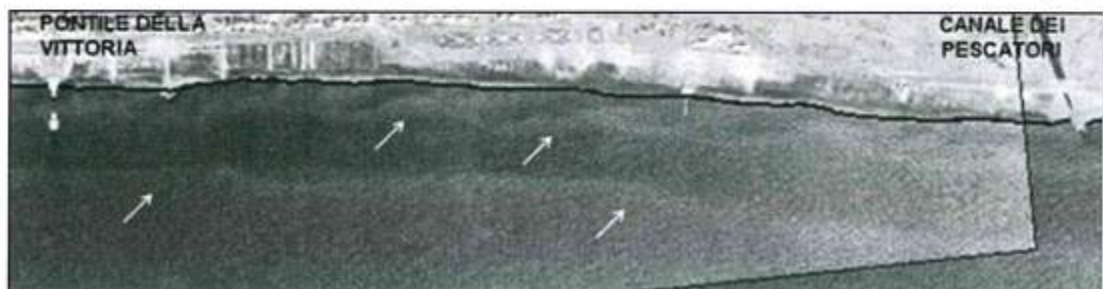


Figura 3 - Foto aerea del 1944 con doppio sistema di barre evidenziato dalle frecce e linea di costa del 1944.

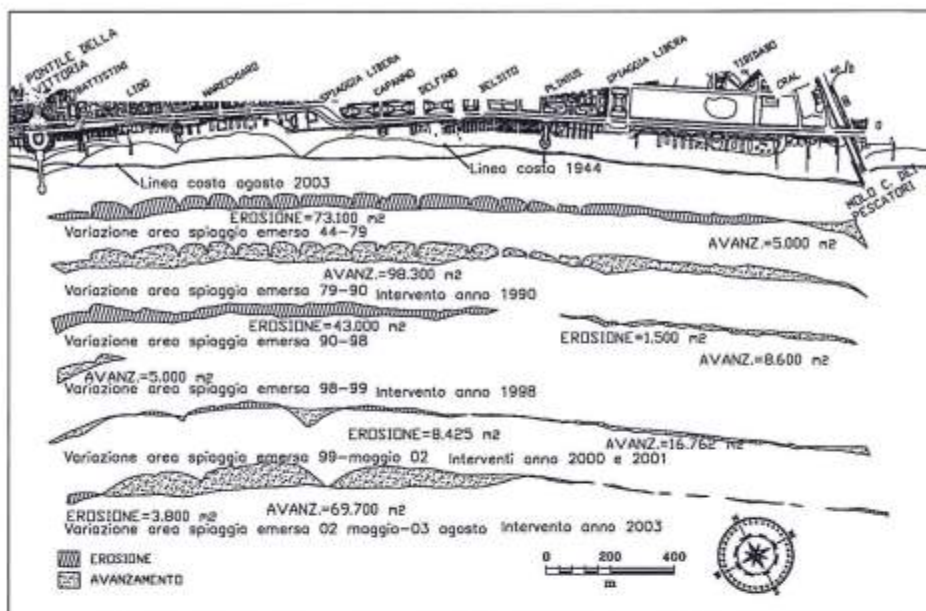


Figura 4 - Variazione temporale dell'area di spiaggia emersa tra il Pontile della Vittoria ed il Canale dei Pescatori.

“Battistini” avvenuto nel 2001, ma anche ulteriori ricariche di sabbia depositata nel tratto iniziale dell'area di studio (1998 e 2000, vedi Fig.2), ha permesso un mantenimento della posizione della linea di riva nel tratto “Pontile della Vittoria” - “Lido”. La sovrapposizione tra le linee del 1999 e 2002 evidenzia una rotazione della linea di riva intorno ad un punto centrale del litorale. Nel 2003 infine, a seguito dell'ultimo intervento di ripascimento, risulta un'area di spiaggia emersa maggiore rispetto a quella presente nel 1944 (Figg. 4 e 5).

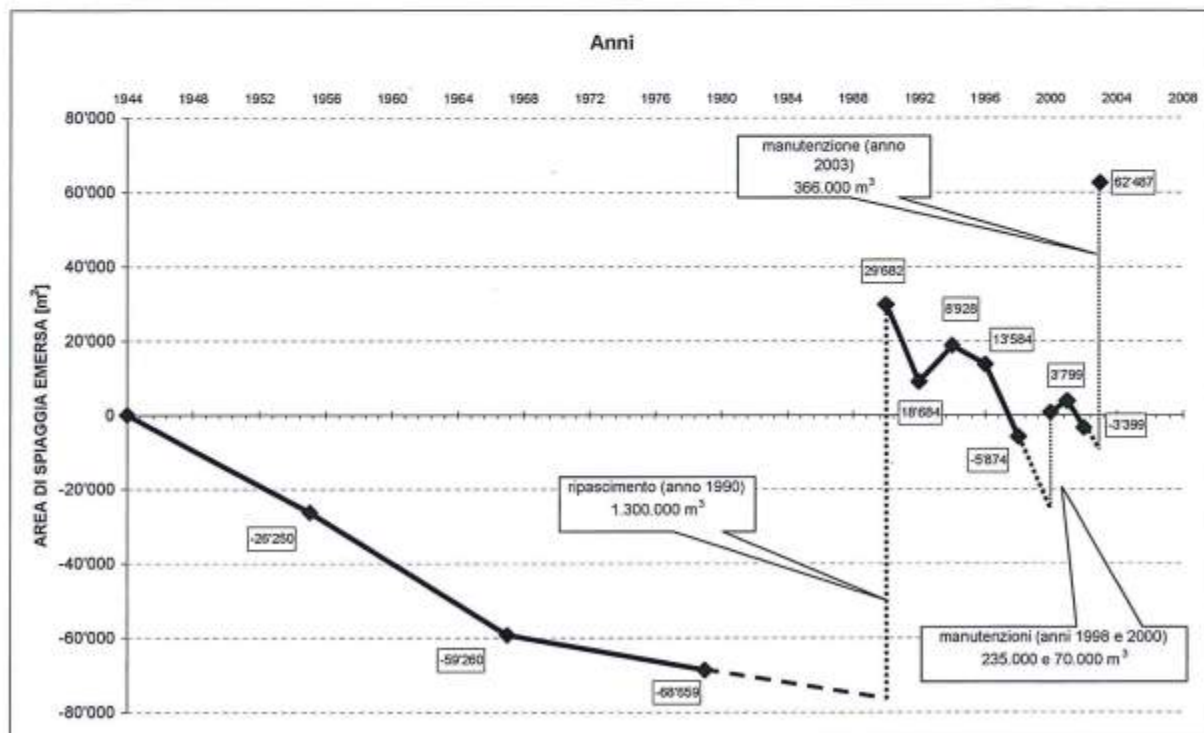


Figura 5 - Variazioni dell'area totale di spiaggia emersa rispetto alla situazione del 1944.

Per una migliore comprensione della variazione temporale, i dati stimati dall'analisi oggettiva delle foto aeree sono stati restituiti in via grafica assumendo come valore di partenza la spiaggia del 1944.

Questo genere di curve, che presso l'Osservatorio sono utilizzate per le analisi di diversi tratti del litorale laziale, sono significative per la valutazione dell'efficacia dell'opera di difesa o per la valutazione delle tendenze evolutive ante e post-ripascimento.

La Figura 5 mostra che il rateo erosivo areale della sola spiaggia emersa, sull'intero tratto in esame, nei decenni precedenti l'intervento, era inferiore a quello osservato nel periodo 1990-98 successivo all'intervento. Tale circostanza ha portato i tecnici regionali a modificare la geometria e la struttura dell'opera di difesa, come descritto in precedenza.

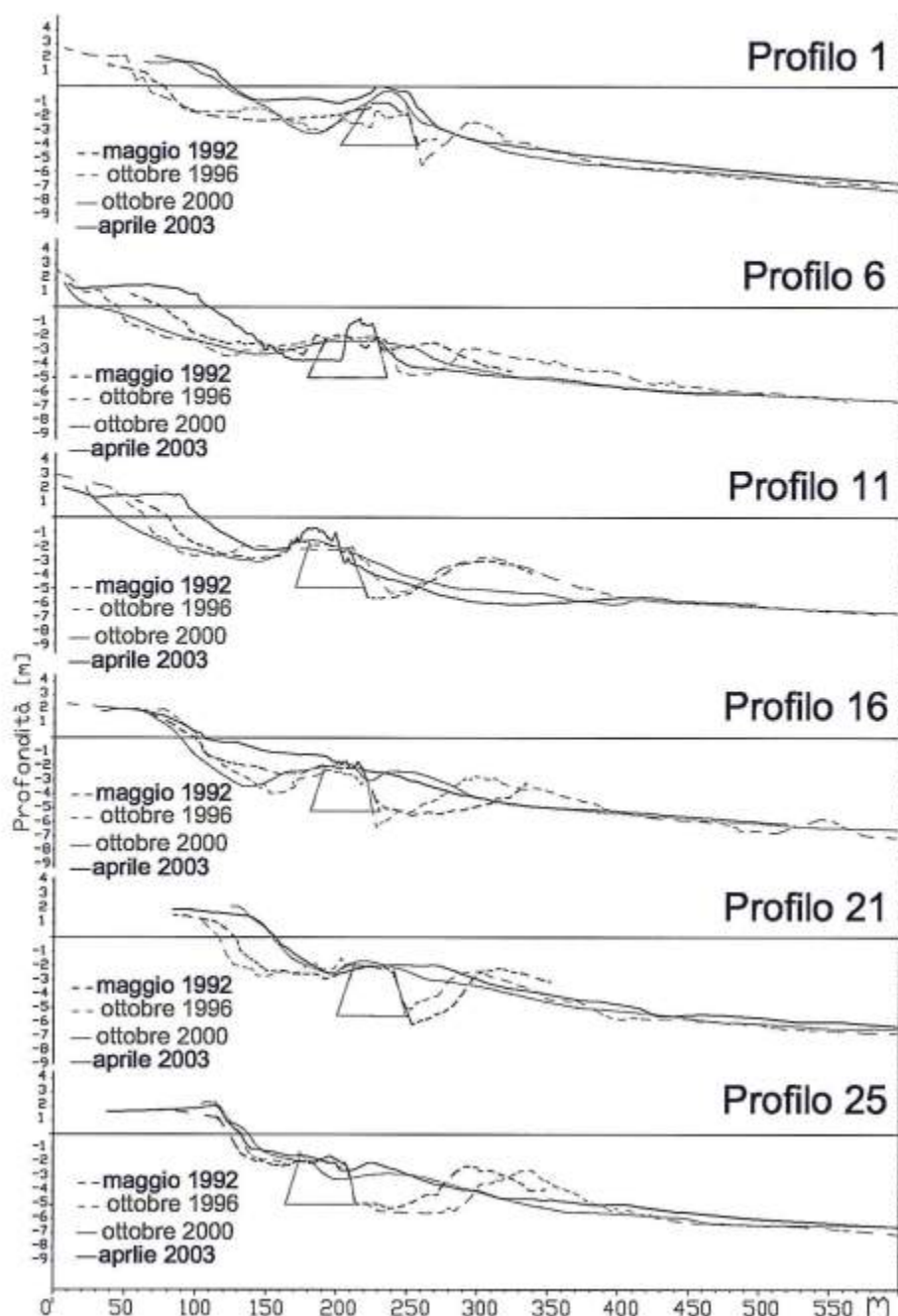


Figura 6 - Evoluzione del profilo trasversale della "spiaggia sospesa" di Ostia Centro (v. posizione dei profili in Fig. 2).

In definitiva, le analisi dei rilievi topobatimetrici eseguiti dopo l'intervento indicano una marcata rotazione della linea di riva con un avanzamento nell'estremo SE ed un arretramento nell'estremo NW, dovuta principalmente al gradiente del trasporto solido netto in direzione SE. Infatti, la foce armata del Canale dei Pescatori intercetta e trattiene parte del trasporto solido longitudinale verso la spiaggia di levante, la quale ha manifestato anch'essa preoccupanti fenomeni erosivi, che hanno poi richiesto nuovi interventi di ripascimento.

### Profili trasversali

La sovrapposizione dei profili di spiaggia rilevati su 30 sezioni spaziate di 100 m permette di fornire informazioni sulle variazioni morfologiche del litorale avvenute in 13 anni di monitoraggio. Subito dopo l'intervento sono stati eseguiti rilievi batimetrici con decorrenza quasi annuale. L'interruzione dell'attività di monitoraggio avvenuta tra il 1996 e il 2000, ha causato, oltre che assenza di dati, anche una disomogeneità per le diverse modalità esecutive. Solo una accurata ricerca delle posizioni iniziali di riferimento delle sezioni ha permesso un soddisfacente allineamento orizzontale dei profili di spiaggia. Per la rappresentazione della morfologia trasversale dell'intero tratto di litorale, si sono scelte sei sezioni rappresentative, equidistanti circa 500 m l'una dall'altra. Per semplicità di rappresentazione, si riportano in Figura 6 le sei sezioni scelte con quattro successivi profili di spiaggia sovrapposti ed indicazione della posizione della barriera.

L'elevazione della berma di spiaggia emersa è aumentata dopo l'intervento sino a +1,5/2,0 m, mentre il profilo della spiaggia sommersa è, in generale, divenuto più ripido, ma abbastanza gradualmente variabile, senza un marcato scalino verticale ghiaioso sulla battigia.

Si nota anche la progressiva migrazione della barra naturale esterna che, alcuni anni dopo la costruzione della barriera fissa, tende ad addossarsi a questa, riunificando così l'originale doppio sistema di barre: la struttura sommersa pare aver agito come attrattore di sedimenti.

In sintesi, dal confronto basato sulle foto d'archivio e recenti e dai rilievi batimetrici realizzati sia nella zona di Ostia Centro che Levante, ciò che si osserva circa la struttura dell'apparato di barre preesistenti al tratto di litorale in esame, è il seguente:

- la barriera artificiale è stata collocata tra le due barre naturali, poco al largo rispetto alla barra più prossima alla costa;
- il volume stoccato nelle barre naturali non è più rintracciabile nei profili post-intervento;
- la scomparsa delle barre naturali si estende per circa 1,5 km a levante del Canale dei Pescatori dove, dai rilievi

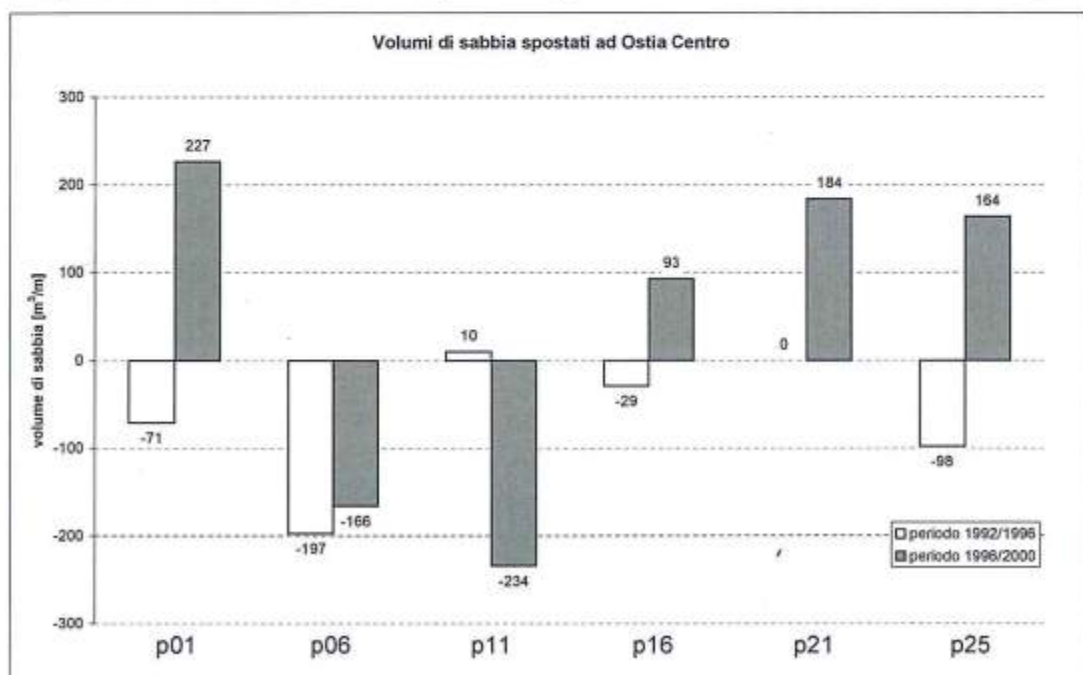


Figura 7 - Variazioni volumetriche unitarie di sabbia in sei sezioni

effettuati, si osserva la presenza discontinua di una sola barra. Solo dopo 2-2,5 km dall'estremità sottoflutto della barriera artificiale realizzata ad Ostia Centro si ritrovano entrambe le barre appaiate parallelamente alla costa. Inoltre da un primo esame della batimetria al largo della barra esterna, che nel tempo ha modificato la sua struttura geomorfologica, si nota un approfondimento dei fondali.

L'esame dei profili conferma la migrazione longitudinale dei sedimenti da Nord verso Sud.

Dai computi volumetrici eseguiti con BMAP (software di gestione dei profili trasversali della spiaggia - C.E.R.C. 1994) si evidenziano diminuzioni dei volumi di spiaggia in quasi tutte le sezioni studiate nel periodo 1992/1996, con picchi di 197 m<sup>3</sup>/m nella sezione p6 (Fig. 7). Tra il 1996 e il 2000, si registrano aumenti dovuti agli interventi di ricarica di sabbia del 1998 e del 2000, più marcatamente nella sezione 1 e per un'area piuttosto limitata, a causa verosimilmente della ricarica della scogliera sino a quota -0,5 m.

### Granulometria

Le campagne di prelievo dei sedimenti prese in considerazione per effettuare una analisi di carattere granulometrico sono quelle del 1994 (Granata, 1995) e quelle delle campagne di monitoraggio 2002.

Il monitoraggio granulometrico del 1994 (28 sezioni, una ogni 100 m circa, con prelievo di 5 campioni di sedimento per ogni sezione; tre campioni a quote fisse +1, 0, -1 m s.l.m.m., due a quote variabili sia entro che fuori la barriera, per un totale di 140 campioni) rispecchia la situazione venutasi a creare dopo la realizzazione del ripascimento protetto sopraccitato, mediante il versamento di sabbia con  $D_{50}$  pari a 0,5 mm a formare uno strato dello spessore di un metro sostenuto da un sottostante strato di ghiaia.

L'elaborazione di detti dati ha riguardato i campioni composti per i soli 7 transetti relativi alle sezioni più prossime a quelle campionate nelle campagne di monitoraggio 2002, al fine di poter effettuare un confronto indicativo, stante la disomogeneità dei punti di prelievo.

I risultati ottenuti dall'analisi dei campioni del 1994 evidenziano come il materiale superiore di ripascimento si sposti dalle sezioni più a nord (Pontile della Vittoria) a quelle più a sud (verso il Canale dei Pescatori): è qui infatti che si individua la maggior concentrazione di sabbia (fino al 95%) (Fig. 8).

Tale sabbia presenta granulometria simile a quella del materiale di ripascimento, mentre, verso il Pontile della Vittoria, si incontra una sabbia via via più fine ( $D_{50}$  pari a 0,3 mm), più simile al sedimento originario del sito e notevoli percentuali di ghiaia (fino al 30%), indice di un affioramento dello strato sottostante dovuto all'asportazione pressoché completa del materiale superiore di ripascimento; le percentuali di limo si mantengono invece costanti lungo il litorale con valori del 6-7%. Ad ulteriore conferma di tale tendenza si osserva come il valore della deviazione standard del sedimento aumenti procedendo da nord a sud; ciò vuol dire che esiste una maggior variabilità granulometrica laddove i sedimenti tendono ad accumularsi (lato SE) e un miglior classamento lì dove sono più esposti all'azione del moto ondoso (lato NW) (Fig. 9).

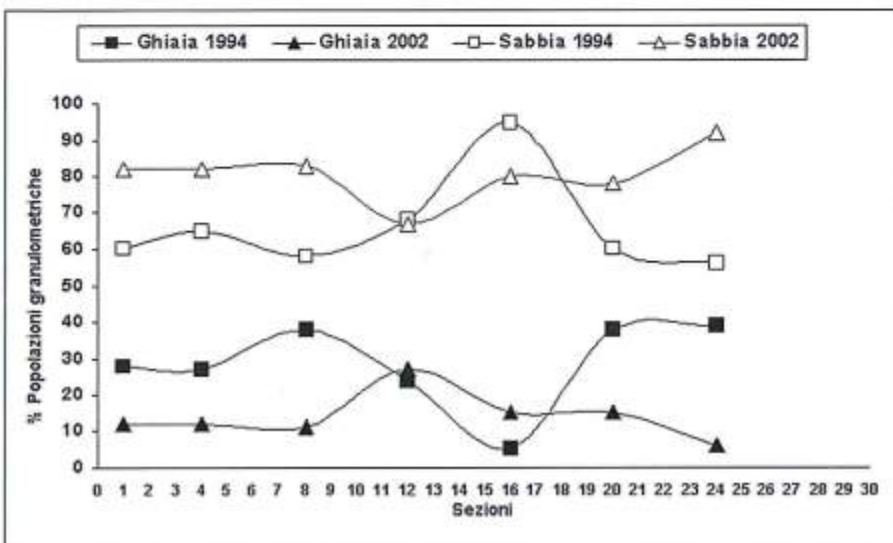


Figura 8 - Variazione delle percentuali di sabbia/ghiaia lungo la spiaggia di Ostia. Non sono riportate le curve relative alle percentuali di limo. Numerazione delle sezioni secondo lo schema 2002 (v. Fig. 2).

I dati di monitoraggio 2002, comprendenti le campagne di giugno e di ottobre (7 sezioni, una ogni 400 metri, campionate con regolarità a 0, -2, -5, -7,5 m, per un totale di 28 campioni) possono invece offrire un quadro della situazione dopo due ulteriori interventi di ripascimento (1998 e 2000) effettuati con sedimenti assai diversi dal punto di vista tessiturale e anche dopo diversi interventi di rifiorimento della barriera sommersa. Anche in questo secondo caso sono stati elaborati campioni composti per ciascun transetto. Nuovamente si osserva come le sabbie si concentrino nelle sezioni più prossime al Canale dei Pescatori (fino al 90%) a scapito del settore centrale del sito (Fig. 8). In particolare risulta dai dati parziali che è nel secondo semestre del 2002 che si registrano notevoli modificazioni nella composizione granulometrica del sedimento con perdite del 10 - 15% di sabbia in favore di una maggiore incidenza della ghiaia, peraltro essa stessa asportata a conferma di un'erosione arealmente concentrata e, dunque, molto forte. Anche in questo caso le percentuali di limo si mantengono costanti (6%), con scarsa incisività sulla composizione complessiva del sedimento. La deviazione standard, come in precedenza, conferma che il sedimento di tale tratto di litorale è il più classato, probabilmente perchè il più esposto alle forze idrodinamiche erosive (Fig. 9).

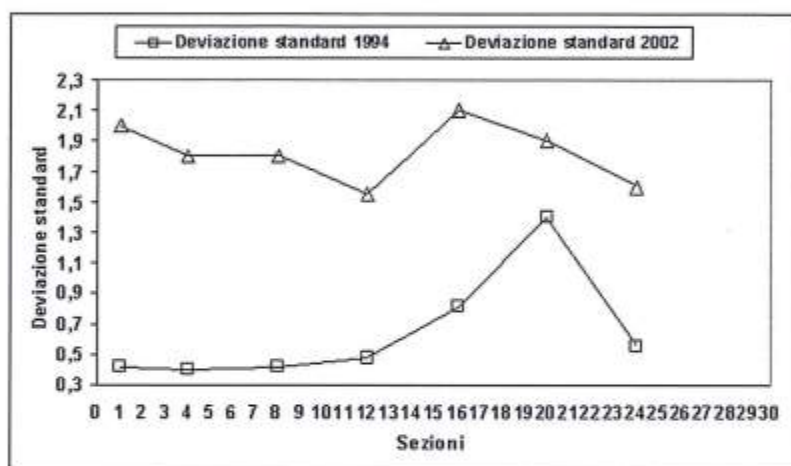


Figura 9 - Variabilità della deviazione standard lungo la spiaggia di Ostia Centro. Numerazione delle sezioni secondo lo schema 2002 (v. Fig. 2).

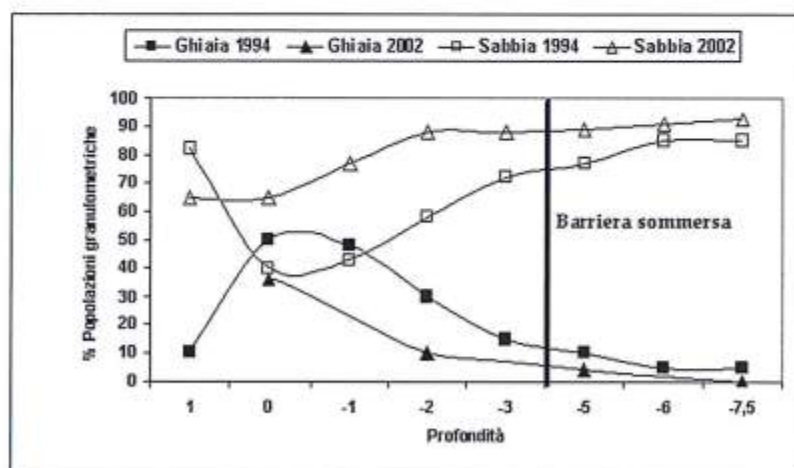


Figura 10 - Variazione delle percentuali sabbia/ghiaia al variare della profondità. La linea nera rappresenta la barriera sommersa.

Si deduce che la circolazione complessiva dei sedimenti parallelamente alla costa non è mutata: la corrente litoranea tende a spostare il materiale verso SE, dove si rinvencono le massime concentrazioni di sabbia ed una maggior variabilità granulometrica (deviazioni standard più elevate). A differenza di quanto osservato alla fine del monitoraggio '94, nel 2002 l'erosione più intensa non è localizzata presso il Pontile della Vittoria, ma nella zona centrale del tratto di spiaggia, si presume per effetto dei concomitanti interventi di rialzo parziale della barriera nel tratto sopraflutto.

Un'ulteriore valutazione sulla circolazione dei sedimenti, in questo caso trasversalmente alla spiaggia (Fig. 10), si può ottenere elaborando campioni medi per ciascuna fascia batimetrica precedentemente campionata. Tanto per la situazione del '94 (in tal caso ciascun dato è la media di 28 valori) quanto per la situazione 2002 (ciascun dato è la media di 7 valori) si nota che la percentuale della sabbia tende ad aumentare con la profondità. In particolare la fascia compresa fra la battigia e -2 m presenta le minori quantità di sabbia. In conclusione, attraverso l'analisi di dati granulometrici che, vale la pena ricordare, derivano da campioni della spiaggia prelevati da sezioni non esattamente coincidenti nel tempo e nello spazio e successivamente a versamenti artificiali con sedimenti prima assai grossolani (ciottolame) e poi più sottili (sabbie di provenienza diversa), si evince che la dinamica sedimentaria del litorale non è mutata nel tempo. Oltre a un massiccio spostamento dei sedimenti in direzione Sud, il sedimento degli interventi più recenti di ripascimento viene allontanato verso le maggiori profondità. Solo successivamente agli interventi di rifiorimento della scogliera l'efficacia della barriera sommersa è percepibile nel tratto direttamente protetto, favorendo una maggiore persistenza dei materiali impiegati per la ricostruzione del litorale, ma producendo effetti erosivi subito a valle della discontinuità geometrica (dislivello della cresta della barriera fra la zona più a Nord e più a Sud).

### **La barriera sommersa**

La barriera sommersa è sottoposta all'azione turbolenta del moto ondoso frangente. I due principali fenomeni che ne modellano la geometria nel tempo sono: a) il dislocamento dei massi esterni durante le mareggiate più intense; b) lo sprofondamento della base della scogliera nel sedime sabbioso.

La barriera ha subito in un decennio un abbassamento medio di circa 0,5 m ed un allargamento di alcuni metri. Per valutare il danno subito dalla scogliera sono state computate le differenze negative tra le aree delle sezioni trasversali rilevate in tempi successivi:

$$\text{danno \%} = \text{Area erosa} / \text{Area iniziale (1992)}$$

Nel grafico di Figura 11 sono riportati per ciascun anno rilevato, il valore medio dei danni registrati su ognuna delle sei sezioni analizzate. Si nota che a distanza di 8 anni dal primo rilievo, la sezione trasversale della barriera ha subito un danneggiamento medio del 12,5% localizzato sulla cresta e sul paramento lato mare. Peraltro la derivata della curva è decrescente a dimostrazione di una tendenza attesa verso condizioni di stabilità, legate anche allo sprofondamento della struttura con cresta meno soggetta all'azione idrodinamica. La sezione p1 (a ridosso del "Pontile della Vittoria") risulta la più danneggiata, infatti nel 1996 si registra una riduzione del volume della scogliera del 25%. In alcune sezioni la barriera ha resistito molto bene all'azione del moto ondoso: in corrispondenza delle sezioni p6 e p11 si osserva un danno inferiore al 4%.

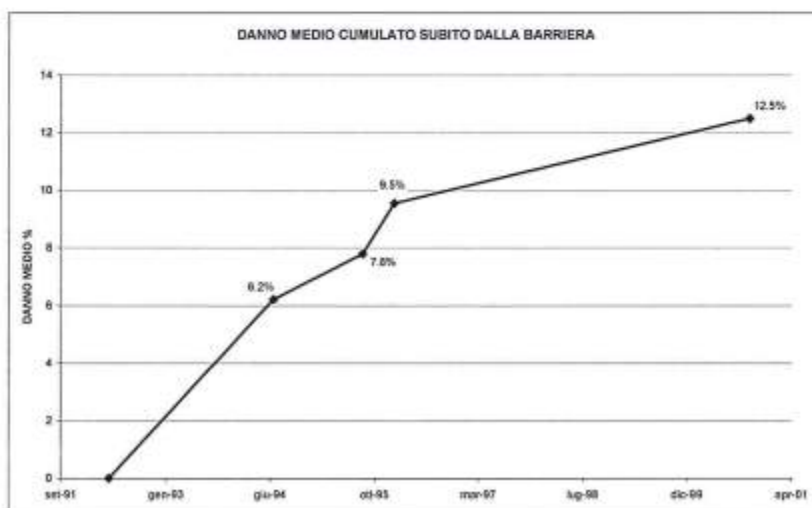


Figura 11 - Evoluzione temporale del danno medio della barriera sommersa.

Peraltro tale danneggiamento era prevedibile data la pezzatura modesta ed assortita dei massi lapidei impiegati, ancorché all'epoca non fossero disponibili moderne formule di stabilità idraulica. Assumendo un diametro mediano dei massi  $D_{50} = 0,5$  m ed applicando la formula di Van der Meer (1993) in condizioni di massima onda frangente al piede dell'opera, periodo di picco di 11 s, sovrarzo marino di 0,5 m e porosità nominale di 0,6 si ottiene la stabilità con cresta della scogliera a -2,5 m s.l.m.m., mentre per quote sommitali superiori (come negli interventi recenti di rifiorimento) è necessario impiegare un rivestimento in doppio strato di scogli di peso pari ad almeno 1-3 t. L'insabbiamento progressivo della scogliera profonda, associato alla migrazione bidirezionale dei sedimenti naturali e di apporto, comporta anche variazioni dell'efficienza idraulica con riduzione della porosità ed efficacia dissipativa ed aumento della riflessione ondosa.

### **Analisi socio-economica**

Con lo scopo di fornire un'analisi statistica di campo sulla stima del valore economico del lido di Ostia, similmente a quanto fatto per il Lido di Dante e Pellestrina (Marzetti e Franco, 2003), è stato predisposto un dettagliato questionario costituito da circa 40 domande corredate da fotografie e figure. Inoltre sono state aggiunte alcune domande tecniche riguardanti le diverse tipologie di difesa costiera e di sedimento al fine di comprendere i gusti ed i bisogni degli utenti.

Nell'estate del 2002 sono state intervistate circa 100 persone di varia età e censo che hanno mostrato buona sensibilità al problema. Il campione è di fatto troppo piccolo per ricavare statistiche affidabili ed inoltre l'estate 2002 è stata meteorologicamente anomala, ma l'analisi delle risposte ai questionari ha fornito interessanti indicazioni, brevemente riassunte nel seguito.

Ostia è una spiaggia molto frequentata a soli 25 km da Roma (3 milioni di abitanti) da dove proviene la maggior parte dei bagnanti (il 67% degli intervistati). In generale, i residenti hanno mostrato sensibilità alla difesa della costa, mentre i turisti romani hanno denotato una maggior attenzione all'impatto visuale del sistema di difesa.

Per ciò che riguarda la tipologia di sistemi di difesa costiera, circa il 50% è risultato favorevole alla presenza di una qualche struttura rigida (il 14% strutture distaccate emerse, il 22% strutture distaccate sommerse, il 6% pennelli, il 5% una sistema misto a celle) poiché sinonimo di durabilità e maggior efficacia per la difesa costiera. Comunque il restante 50% preferisce un'opera morbida pura (ripascimento non protetto) soprattutto per ragioni legate alla bellezza ambientale ed alle attività ricreative.

Per quanto concerne la tipologia del sedimento circa l'80% del campione di utenti preferisce sabbia fine e chiara e soltanto il 14% sabbia scura, simile a quella presente originariamente sulle spiagge del Lido di Ostia. Circa il 10% gradisce il sedimento grossolano (sabbia grossa), ma nessuno ha espresso preferenze per una spiaggia ghiaiosa.

Infine, per quanto riguarda la domanda cardine del questionario, cioè quanto gli utenti sono disposti a pagare per un giorno trascorso su una spiaggia ricostruita, il valore è di circa 23 euro per le zone attrezzate e di poco più di 6 euro per le zone libere, ma tale valore decade inesorabilmente a 1-2 euro per una spiaggia totalmente erosa (senza intervento). Tale analisi può dare un'idea per stimare la perdita imputabile ai problemi di erosione e, conseguentemente, può essere utilizzata per quantificare i benefici ottenuti dagli interventi di protezione e ripascimento delle spiagge.

### **Aspetti ecologici**

Per il sito in esame sono state recentemente avviate dall'ICRAM, in convenzione con la Regione Lazio, analisi biologiche ed ecologiche specifiche, i cui risultati sono in corso di pubblicazione. Sono peraltro disponibili le osservazioni dedotte da alcune ispezioni subacquee ed un filmato (Novembre 2003) girato nell'ambito delle attività del progetto DELOS ad uso dei biologi partecipanti al progetto europeo. Tali osservazioni hanno evidenziato che la scogliera è in buona parte ricoperta ed intasata dalla sabbia (anche a causa delle attività di manutenzione con ulteriori versamenti) ed appare quindi molto ben naturalizzata, come un fondale naturale roccioso senza porosità apparente e con un ricco habitat marino (pesci, seppie, vegetazione, cozze, ecc.), anche se relativo ad un substrato duro non preesistente nel sito. In generale la qualità delle acque a Ostia risulta migliorata negli ultimi anni (in relazione al più attento controllo degli scarichi) ed il generale atteggiamento degli utenti risulta positivo.



### Osservazioni conclusive

E' stato compiuto un grande sforzo per monitorare il sistema di difesa di Ostia Centro per ben 13 anni, anche se appaiono carenti le misure idrodinamiche (moto ondoso direzionale e correnti).

Nonostante la complessità e disomogeneità dei dati disponibili, legata anche alla sovrapposizione dei successivi interventi, la raccolta, validazione ed analisi preliminare dei rilievi ha permesso di ricavare le seguenti osservazioni generali.

La linea di riva tende a ruotare in senso orario verso una posizione di equilibrio più ortogonale alla risultante energetica alquanto obliqua del moto ondoso, accrescendo la spiaggia a ridosso della foce armata del Canale dei Pescatori.

L'originale barriera artificiale sommersa ha avuto un limitato effetto di protezione a causa della relativa profondità a cui è posta la sua sommità, mediamente compresa tra -2,0 m e -2,5 m s.l.m.m. (a seguito dei cedimenti e dei dislocamenti imputabili all'azione diretta del moto ondoso frangente), oltretutto per il progressivo intasamento con sabbia. Gli elementi naturali originali di mantellata sembrano essere sottodimensionati. Il danno medio della barriera è aumentato sino a raggiungere il 12,5% dopo 8 anni, ben prevedibile con le formule di stabilità di Van der Meer. La porzione di barriera a quota più alta conduce ad una ridotta trasmissione ondosa e ad un'evidente maggior stabilità della spiaggia artificiale retrostante. Per prevenire l'insabbiamento della scogliera con relativa riduzione di porosità sarebbe opportuno in fase progettuale prevedere un'attenta disposizione di filtri e geotessuti, compatibilmente con le oggettive difficoltà esecutive a realizzare dette lavorazioni, in ambiente marino.

Si osserva una progressiva demolizione delle barre naturali esistenti che tendono ad unificarsi sulla barriera artificiale fissa.

Le differenti tipologie di sedimento nativo e di apporto (sia per colore che per granulometria) evidenziano nel tempo una indicativa selezione trasversale e longitudinale.

Non si riscontrano evidenze da ricondurre a forti correnti di ritorno anche per la profondità della barriera e l'assenza di varchi.

La cospicua componente netta longitudinale di trasporto solido può essere limitata con l'interposizione di opere trasversali (pennelli semisommersi), i quali sono stati, infatti, posti in opera negli interventi più recenti.

Gli impatti economici ed ecologici devono ancora essere investigati nel dettaglio, ma comunque, in generale, la risposta degli utenti sembra positiva ed il litorale ostiense gode attualmente di un notevole rilancio con grande affollamento estivo e discreto utilizzo anche fuori stagione (per la presenza di servizi permanenti, il buon clima e la vicinanza con la metropoli).

L'attività di monitoraggio morfologico secondo criteri moderni e standardizzati sarà integrata con l'installazione di una stazione ondometrica direzionale.

Si auspica di ampliare ed approfondire le analisi dei rilievi, facendone adeguato uso nell'applicazione di modelli numerici di evoluzione della morfodinamica costiera.

### Riconoscimenti

Lo studio è stato effettuato nell'ambito delle attività del progetto europeo BEACHMED (convenzione 2002-01-4.3-I-028), programma INTERREG IIIB- MEDOCC di cui la Regione Lazio è capofila, nonché nell'ambito del progetto europeo DELOS sulle barriere a cresta bassa (EVK-CT-2000-00041). Alcune attività di analisi sedimentologica hanno beneficiato dei fondi MIUR-PRIN 2000/2002. Si ringraziano l'ing. P. Contini (MODIMAR), l'ing. P. Lupino (Regione Lazio), l'ing. A. Ferrante (Ministero LL.PP.) e il prof. Giovan Battista La Monica (Università di Roma "La Sapienza" - DST) per le utili osservazioni ed informazioni.

### Bibliografia

- AA.VV. (2004) - *Progetto Beachmed*. REGIONE LAZIO, 1° 2° e 3° Cahier Technique. [www.beachmed.it](http://www.beachmed.it).  
 C.E.R.C. (1994) - *Beach Morphology Analysis Package (BMAP)*. Software di gestione dei profili trasversali della spiaggia. CETN II-34.  
 Caputo C., Chiocci F.L., Ferrante A., La Monica G.B., Landini B. e , Pugliese F. (1993) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale ed il problema di reperimento degli inerti*. La difesa dei litorali in Italia, a cura di E. Pranzini e P. Aminti, ed. Autonomie n.34.

- Conti M. (2003) - *Ripascimento artificiale: variazioni granulometriche dell'inerte dalla cava sottomarina, durante il trasporto, al sito di ripascimento e dopo l'azione del mare. Il caso di Ostia Levante*. Tesi di laurea in sedimentologia e regime dei litorali. Università di Roma La Sapienza. Relatore prof. G.B. La Monica.
- Ferrante A., Franco L. e Boer S. (1993) - *Modelling and monitoring of a perched beach at Lido di Ostia*. Proc. 23rd ICCE Int. Conf. Coastal Engineering, vol. 3: pp. 3305-3318.
- Granata M.G. (1995) - *Monitoraggio e modellazione evolutiva del ripascimento protetto del litorale di Ostia* - Tesi di laurea in Ingegneria Civile DSPT svolta presso il Politecnico di Milano. Relatore: prof. Leopoldo Franco.
- La Monica G.B. e, Raffi R. (1995) - *Morfologia e sedimentologia della piattaforma continentale interna. Il mare del Lazio*. Tipografia Borgia.
- Marzetti S. and e Franco L. (2003) - *Contingency evaluation and user preferences for the Ostia beach*. DELOS workshop, Santander.
- Scaloni P. (2003) - *Analisi del monitoraggio della spiaggia di Ostia Levante (Roma)* - Tesi di laurea in Ingegneria Civile Idraulica. Università di Roma Tre. Relatore: Prof. Leopoldo Franco.
- Toti M., Cuccioletta P. e, Ferrante A. (1990) - *Beach nourishment at Lido di Ostia (Rome)*. Proc. 27th AIPCN Congress, Osaka.
- Van Der Meer J.W. (1993) - *Conceptual design of rubble mound breakwaters*. Delft Hydraulics Publications n. 483.

Manoscritto ricevuto il 06/02/2004 , accettato il 27/12/2004.

## Caratteri sedimentologici e dinamica delle spiagge e della piattaforma interna tra Capo Testa e Punta di li Francesi (Sardegna settentrionale)

Sandro DeMuro, Concetta Ferrara, Roberto Follesa e Angelo Ibba

Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Scienze della Terra  
Via Trentino, 51 - 09100 Cagliari

### Riassunto

Vengono esposti i risultati dello studio sedimentologico delle spiagge e della piattaforma interna comprese tra Capo Testa e Punta di li Francesi (Sardegna settentrionale) con lo scopo di individuare la provenienza, la dispersione e la dinamica dei sedimenti. Nei tratti di costa orientati nordest-sudovest (spiagge di La Lìccia, Rena Maggiore, Buredaggia, Lu Litarroni, Naracu Nieddu, Lu Tuvunatu) dall'analisi del diametro medio lungo la battigia si evidenzia una tendenza alla dispersione dei sedimenti da nordest verso sudovest, mentre a profondità di 10 metri essa risulta essere prevalentemente di verso opposto in accordo con lo studio dei flussi di energia incidente.

Trasferendo in carta questi dati si delinea una dispersione controllata da celle a circolazione oraria la cui forma, estensione e dinamica, alla scala dell'osservazione stagionale, sono fortemente condizionate dalla conformazione del fondale e dipendenti dalle condizioni meteomarine. Nelle unità fisiografiche orientate nordovest-sudest (spiagge di Vignola e di La Colba) prevale un trasporto parallelo alla costa orientato da sudest verso nordovest. Nel settore compreso tra Capo di M.ti Russu e Punta di li Francesi, inoltre, alla batimetria dei 20 metri i parametri sedimentologici evidenziano l'esistenza di sedimenti relitti in scarsa relazione con la dispersione attuale.

Mediante lo studio dei minerali pesanti è stata riconosciuta una provenienza da rocce magmatiche intrusive, effusive e metamorfiche. È stata osservata una netta predominanza di Epidoto, nonché di Anfiboli (Orneblenda verde) e Pirosseni.

Trasversalmente alle spiagge si osservano percentuali elevate di minerali pesanti sulla cresta della duna, con diminuzione sulle berme e un relativo aumento sulla battigia. Nella spiaggia sottomarina i valori di concentrazione più elevati sono stati osservati sul piede della barra. Alla battigia si osservano, in linea generale, valori percentuali crescenti da nord verso sud.

**Parole chiave:** sedimentologia; dinamica litorale; Olocene; Sardegna settentrionale.

### Abstract

*The results of a sedimentological study on beaches and the inner shelf between Capo Testa and Punta di li Francesi are herein reported. The aim of the work was to understand provenance, dispersion and sediment dynamics.*

*In the littoral parts oriented NE-SW (beaches of La Lìccia, Rena Maggiore, Buredaggia, Lu Litarroni, Naracu Nieddu, Lu Tuvunatu) a tendency of dispersion in direction NE-SW is evident from the analysis of the mean size along the shoreline, whereas this direction is opposite at a depth of 10 meters, according to the results of the study of the energy fluxes.*

*By mapping these data, dispersion controlled by clockwise circulation cells, whose form and extension are strongly conditioned by the conformation of the sea-floor, is delineated. In the physiographic units oriented NW-SE (beaches of Vignola, and La Colba) longshore transport oriented SE-NW prevails. Furthermore, in the sector between Capo di M.ti Russu and Punta di li Francesi, the sedimentological parameters indicate the existence of relict sediments at a bathymetric depth of 20 meters, that are scarcely related to the present dispersion.*

By means of heavy mineral analysis lithogenic provenance of sediments was recognised to be from intrusive, volcanic and metamorphic rocks.

A clear predominance of Epidote, in its most diffuse variety Pistacite, on Clinzoisite, as well as Amphiboles (Green Hornblende) and Pyroxenes was observed. Other minerals present in minor amounts are: Granates, Zircon, Picotite, Anatase, Andalusite, Staurolite, Sillimanite, Olivine, Tourmalin, Titanite, Rutile and Brookite, with low percentages of Apatite.

High percentages of heavy minerals are observed on the top of the dunes, diminishing on the berms and relatively increasing on the shoreline, if transects perpendicular to the beach are considered. In the submerged beach the highest concentrations have been observed at the foot of the bars. On the shoreline, in general, an increase in percentage can be observed from North to South.

**Key words:** sedimentology, littoral dynamics, Holocene, Northern Sardinia.

### Introduzione e metodologie.

Questo lavoro prosegue nelle ricerche effettuate da Brambati e DeMuro (1992 a, b, c) sulla dinamica dei litorali e sulla geologia della piattaforma prossimale della Sardegna settentrionale. Obiettivo è la caratterizzazione tessiturale e mineralogica dei sistemi deposizionali compresi tra Capo Testa a nord e Punta di li Francesi a sud-ovest (Fig. 1), oltreché l'individuazione delle direzioni di dispersione dei sedimenti.

L'area in esame comprende circa 22 Km di linea di costa di cui 10 di litorale sabbioso, 5 di costa bassa e rocciosa e 7 di costa alta e rocciosa. Essa è stata suddivisa, per esigenze espositive in settore settentrionale, compreso tra Capo Testa e Capo di Monti Russu, e in settore meridionale compreso tra Capo di Monti Russu e Punta di li Francesi. Al primo appartengono le spiagge di La Colba, La Liccia, Rena Majori e Bureddaggia; al secondo quelle di La Piana, Lu Litarroni, Naracu Nieddu, Lu Tuvunatu e Vignola.

La fascia costiera indagata è estremamente dinamica e soggetta a modificazioni stagionali molto marcate, sia dal punto di vista morfologico, sia dal punto di vista granulometrico. Queste modificazioni sono naturalmente in stretta relazione all'intensità e alla direzione del moto ondoso e, in definitiva, dipendenti dalle condizioni meteomarine generali delle Bocche di Bonifacio. Sono state effettuate ottanta stazioni di rilevamento nelle quali si è proceduto alla campionatura dei sedimenti superficiali.

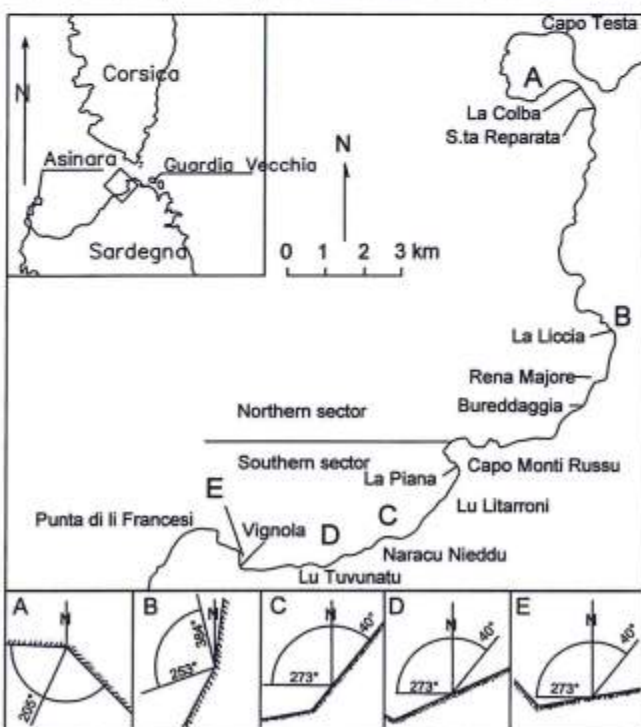


Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio.

Le campionature sono state effettuate lungo profili trasversali alla linea di costa su cresta della prima duna (CD), piede della prima duna (PD), ripiano di metà spiaggia (MS), berma di tempesta (BT), berma ordinaria (BO), battigia (B), gradino (G), piede del gradino (PG), truogolo (T), barra (BR), piede della barra (PB) (Carobene e Brambati, 1975), fino alla profondità di 20 metri. In totale sono stati raccolti e studiati 136 campioni di sabbie e ghiaie.

I sedimenti sono stati sottoposti ad analisi granulometriche eseguite con setacciatura ad  $1/4 \phi$ ; i risultati sono stati rappresentati graficamente mediante le curve di distribuzione granulometrica; per la caratterizzazione tessiturale sono stati utilizzati i parametri di Folk e Ward (1957) e Folk (1980) ( $Mz$ ,  $Sk_1$ ,  $K_G$  e  $\sigma_1$ ; Tab. 1).

L'elaborazione dei dati granulometrici è stata utilizzata per valutare le caratteristiche della sedimentazione attuale e le direzioni di trasporto, sia lungo riva che verso il largo (McLaren, 1981).

Per individuare le aree di provenienza e le direzioni di dispersione dei sedimenti è stata inoltre effettuata al microscopio ottico un'analisi mineralogica

incentrata prevalentemente sulle componenti pesanti, in quanto la componente leggera è risultata essere omogenea, prevalentemente quarzoso feldspatica e scarsamente bioclastica. Fa l'eccezione tra le unità fisiografiche studiate la spiaggia di La Colba dove, a causa dell'affioramento del substrato terziario miocenico, la componente carbonatica risulta in taluni casi anche predominante.

Le facies sedimentarie a componente biogenica e bioclastica si ritrovano confinate a profondità maggiori dei 20 metri e la loro distribuzione è controllata dagli affioramenti di *beach rock* e di *reef* di pre-coralligeno che risultano essere disposti parallelamente alla attuale linea di costa (Brambati e DeMuro, 1992 a, b, c; DeMuro, 1990), tranne che, come già detto, per la spiaggia di La Colba dove la componente carbonatica è importante fin dalla spiaggia sommersa

La separazione dei minerali pesanti è stata effettuata secondo le metodologie consuete (Krumbein e Pettijohn, 1938; Milner, 1962), nelle frazioni granulometriche fini comprese fra 2.25 e 4  $\phi$  (sabbie fini e molto fini). La determinazione dei minerali è stata eseguita contando al microscopio ottico cinquecento granuli; il valore ottenuto è espresso in valore percentuale sul totale dei minerali trasparenti; la percentuale dei minerali opachi e torbidi viene riportata a parte considerando il totale dei minerali trasparenti più gli opachi e i torbidi (Tabb. 2-3).

### Caratteri geologici e geomorfologici dell'area costiera

I principali litotipi affioranti nell'area appartengono al basamento paleozoico (Fig. 2) e sono costituiti da rocce intrusive, metamorfiche e cortei filoniani che intersecano generalmente le plutoniti secondo le direzioni di fratturazione tardo erciniche, determinando l'assetto morfostrutturale dell'intera regione (Bralia et al., 1982; Ghezzi e

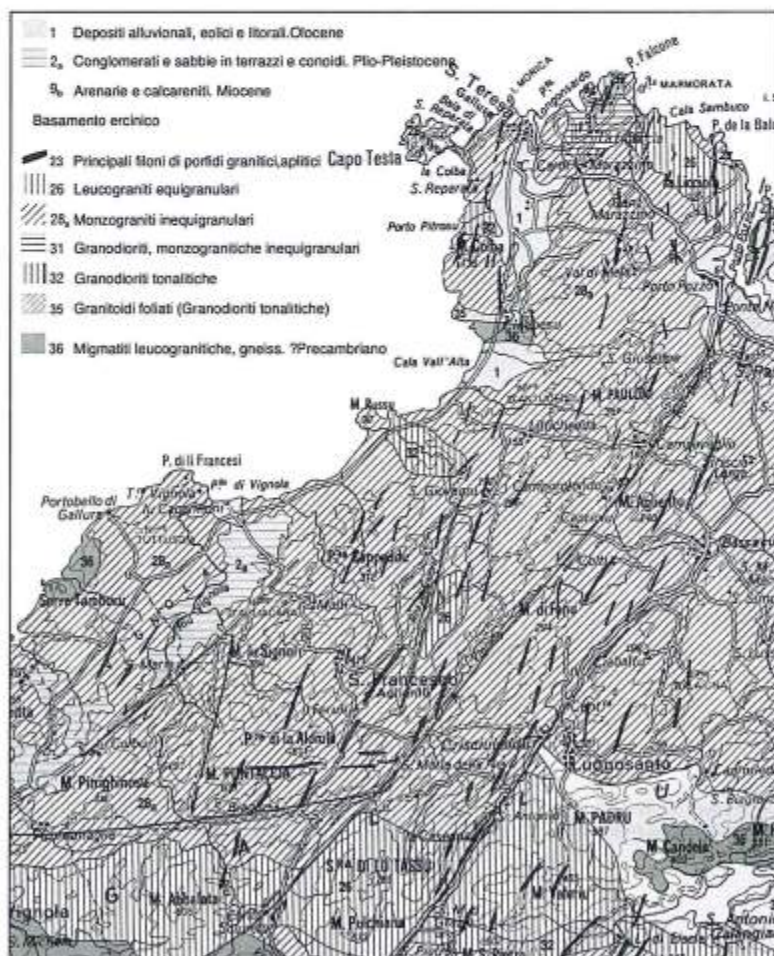


Figura 2 - Carta geolitologica dell'area esaminata (da Carmignani, 1996; modificata. Scala 1:150.000).

Orsini, 1982; Ricci, 1992). Su tale basamento si appoggiano in successione sedimenti marini miocenici, depositi alluvionali terrazzati, depositi eolici (eolianiti plio-quadernarie) e depositi di spiaggia, incoerenti (attuali) e cementati (*beach rock* oloceniche), che, a diverse profondità e distanza dalla costa, orlano l'attuale linea di riva (Brambati e DeMuro, 1992 a, b, c).

I bacini idrografici dei principali corsi d'acqua alimentatori (Tav. 1) si sviluppano essenzialmente sul basamento granitico e sui prodotti del suo disfacimento, e solo nell'ultimo tratto localmente interessano i depositi sabbiosi delle dune costiere; i corsi d'acqua, lungo le cui aste sono assenti dighe e/o sbarramenti artificiali, sfociano in mare solo in occasione delle piene più importanti, durante le quali, tuttavia, immettono grandi quantità di materiale (DeMuro, 2003). Il sedimento è costituito essenzialmente da sabbie a grana grossa quarzoso feldspatiche, peliti e ciottolame eterometrico prevalentemente granitico. La morfologia della spiaggia sommersa è controllata dal basamento affiorante con filoni e/o da *beach rock*, queste ultime si sviluppano parallelamente alla costa attuale; i filoni e le *beach rock* sono tutti localizzati sia sottoriva che a poche centinaia di metri; essi determinano rallentamenti, deviazioni dei fronti d'onda e smorzamenti della loro energia, con interruzioni, deviazioni, variazioni di intensità delle correnti di deriva litorale ed innesco di celle di circolazione asimmetriche che determinano una dispersione non omogenea e irregolare dei sedimenti lungo costa anche con la locale formazione di trappole sedimentarie (Fig. 3). Le spiagge emerse sono morfologicamente e stratigraficamente ben strutturate con corpi dunari la cui estensione può essere limitata all'immediato retrospiaggia (La Colba, Vignola) o svilupparsi per chilometri nell'entroterra (spiagge di La Licia, Rena Majore, Bureddaggia e di Lu Litarroni).

### Analisi delle caratteristiche tessiturali delle spiagge

Le curve granulometriche dei campioni analizzati sono spesso bi- o polimodali per la presenza di popolazioni ghiaiose nei punti di campionatura (Tab. 1). L'analisi dei valori dei parametri tessiturali (Tab. 1) mostra che lungo le traverse, i sedimenti tendono a diventare più fini dalla battigia verso il piede della barra e verso la cresta della duna. Nelle medesime direzioni si ha anche un miglioramento della selezione e la prevalenza delle distribuzioni asimmetriche positive nella spiaggia emersa. I valori del parametro  $K_G$  indicano la prevalenza delle distribuzioni mesocurtiche; la presenza di distribuzioni fortemente platocurtiche sulla battigia, sul piede del gradino di alcune traverse, oltreché su qualche campione a -10 e a -20 metri, è da correlare con il mescolamento di ghiaie percentualmente rilevanti in quei punti di campionatura.

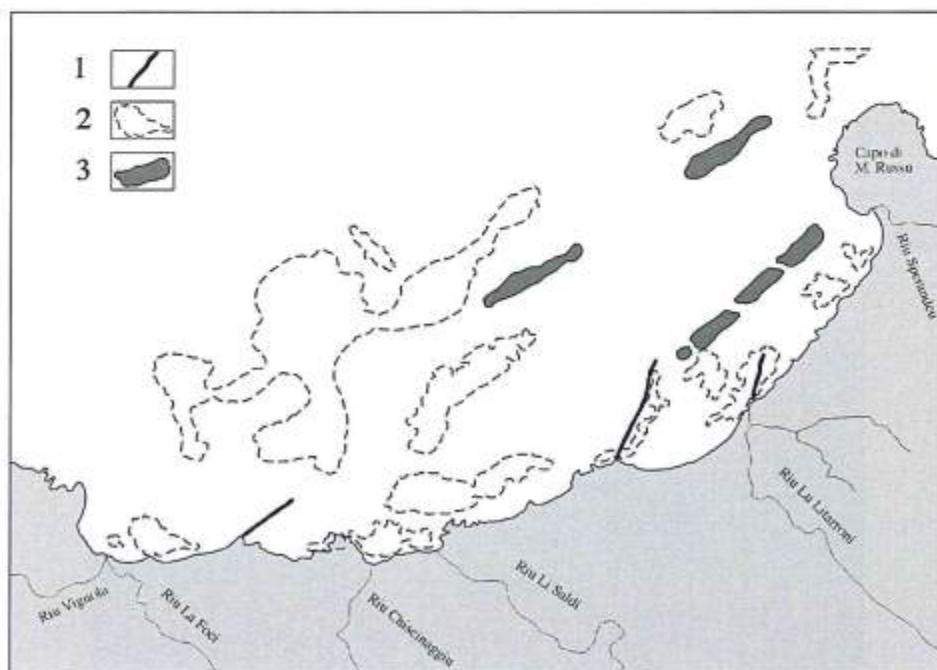


Figura 3 - Principali elementi geologico-morfologici che condizionano la dinamica costiera nel settore ad ovest di Capo di Monti Russo (da DeMuro, 1990; modificata): 1) corteo filoniano; 2) limite basamento cristallino; 3) *beach rock*. Scala 1:50.000



**Nord di Capo Monte Russu - Aree A e B****Spiaggia di La Colba (Area A)**

I sedimenti presentano caratteristiche tessiturali differenti, sintetizzate nelle Figure 4a e 5.

I campioni del settore nord-occidentale sono omogenei, con curve granulometriche caratterizzate da sabbie a grana grossa ( $Mz$  tra 0,64 e 0,33  $\phi$ ) (Tab. 1) passante a molto grossa nel piede del gradino ( $Mz$  -0,42  $\phi$ ); i sedimenti di metà spiaggia, berma di tempesta e berma ordinaria sono asimmetrico positivi ( $Sk_k$  compreso tra 0,14 e 0,23) e gli altri quasi simmetrici ( $Sk_k$  compreso tra -0,09 e 0,11), tutti i sedimenti sono moderatamente selezionati e mesocurtici (Tab. 1).

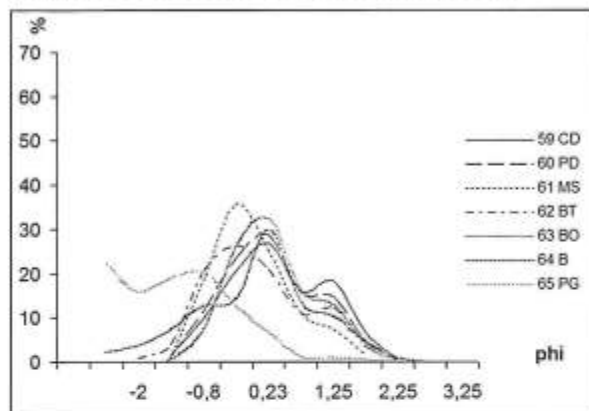


Figura 4a - La Colba W, curve di frequenza di sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

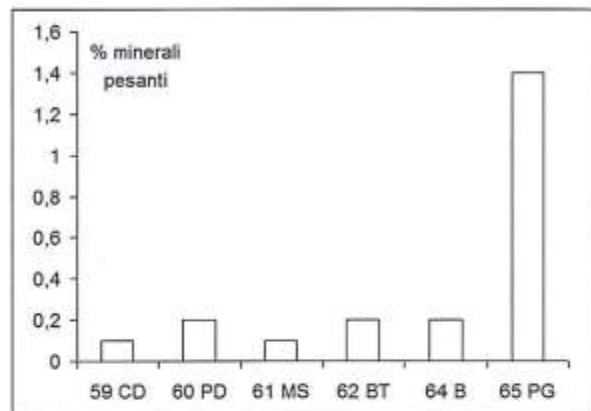


Figura 4b - La Colba W, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

Nel settore sud-orientale, invece, i sedimenti relativi all'alta e bassa spiaggia sono tendenzialmente bimodali, per miscelazione con quelli dunari (Fig. 5).

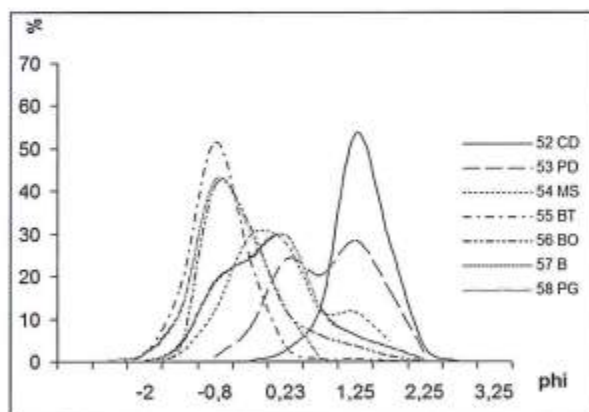


Figura 5 - La Colba E, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

Il sedimento della cresta della duna è invece unimodale (sabbie medie;  $Mz = 1,61 \phi$ ) così come quello delle berme ordinaria e di tempesta anche se a granulometria maggiore ( $Mz = -0,42 \phi$ ).

Dalla comparazione delle due traverse emerge che il corpo della spiaggia medio-bassa è il medesimo con leggere differenze a livello di berme, mentre una differenza sostanziale riguarda i corpi dunari, che, nella traversa orientale, presentano una granulometria più fine ed un grado migliore di selezione. La miscelazione di sedimenti colici con quelli di spiaggia è stata rilevata anche con osservazioni morfoscopiche ed esoscopiche al S.E.M. (Brambati et al., 1992) sui granuli di quarzo; esse hanno evidenziato la contemporanea presenza dei caratteri tipici dei due ambienti, come del resto riscontrato anche in altri sistemi costieri del sud Sardegna (Di Gregorio et al., 1999; Cannillo et al., 1997).



La campionatura primaverile sulla battigia indica una dispersione verso NO, meglio evidenziata in quella invernale dai valori più positivi di  $Mz$  (Figg. 6 e 7), migliori della selezione e più negativi dell'asimmetria (Tab. 1). Sulla piattaforma prossimale, per l'affioramento del basamento terziario a -10 m, si sono potuti campionare sedimenti terrigeni solo a -20 metri; si tratta di sabbie fini, ben selezionate ( $Mz$  intorno a  $2\phi$  e  $Sk_1$  da 0,02 a -0,21 e  $\sigma_1$  da 0,57 a 0,41  $\phi$ ) interpretabili come il prodotto della sedimentazione attuale (Tab. 1; Tav. 1). Le percentuali totali di minerali pesanti nella spiaggia emersa sono comprese tra 0,1 e 0,2% (Tab.1; Fig. 4b) rimanendo nell'ambito delle normali percentuali (0,1-1,0 %) indicate da Folk (1980), mentre sul piede del gradino si osserva un leggero arricchimento pari all'1,4%. I due campioni della piattaforma prossimale, C30 e C29, hanno rispettivamente valori di 0,1%, e 1,1%, quest'ultimo ha una pronunciata coda di sabbie a grana grossa.

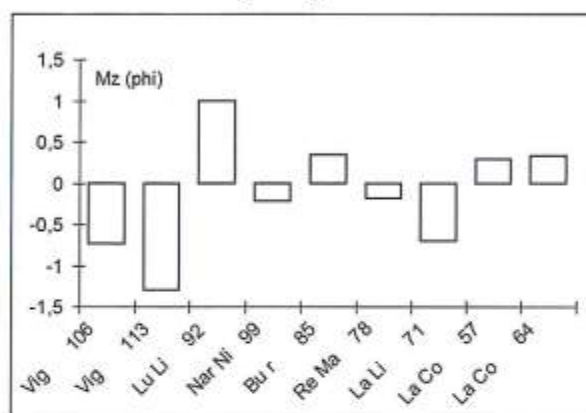


Figura 6 - Valori di  $Mz$  relativi alla campionatura primaverile della battigia nelle diverse spiagge (da SW a NE).

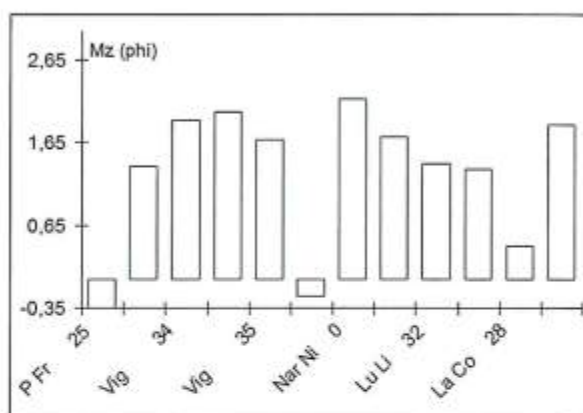


Figura 7 - Valori di  $Mz$  relativi alla campionatura invernale della battigia nelle diverse spiagge (da SW a NE).

### Spiagge di La Liccia, Rena Maggiore, Bureddaggia (Area B)

Questo settore comprende tre spiagge separate da affioramenti del basamento granitico, ma che possono essere considerate come un'unica unità fisiografica.

#### La Liccia

In accordo con le condizioni idrodinamiche presenti nell'ambiente costiero si osservano le granulometrie a grana più grossa e fortemente bimodali sul piede del gradino (73% sabbia e 27% di granuli,  $Sk_1 = 1,95$ ) (Tab.1; Figg. 8a, 9a), sulla battigia (72% sabbia e 28% di granuli,  $Sk_1 = 1,30$ ) e sulla berma ordinaria (60% sabbia e 40% di granuli,  $Sk_1 = 1,19$ ) ( $Mz$  da -0,81 a -0,64  $\phi$ ). I sedimenti più fini e unimodali sono ubicati sia verso la cresta della duna, con valori nell'ambito delle sabbie medie ( $Mz = 1,31\phi$ ), sia nella spiaggia

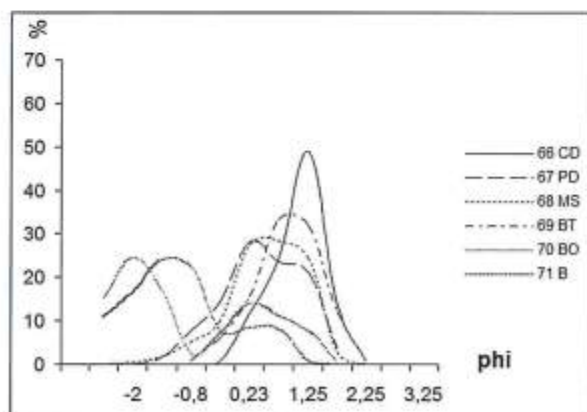


Figura 8a - La Liccia, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

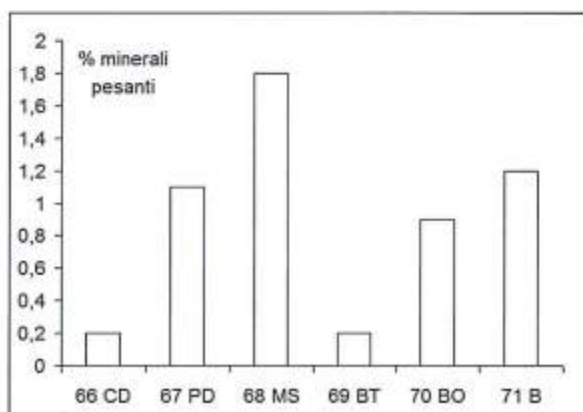


Figura 8b - La Liccia, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

sommersa sul truogolo, sulla barra e nel piede della barra ( $M_z$  compreso tra 2,33 e 2,11  $\phi$ , nell'ambito delle sabbie fini). Sulla battigia la moda principale ricade nell'ambito delle sabbie a grana molto grossa e quella secondaria in quello delle sabbie medie.

I campioni della spiaggia emersa che presentano le percentuali minori di minerali pesanti nei sedimenti appartenenti alla berma di tempesta e alla cresta della duna (Fig. 8b), mostrano curve granulometriche spiccatamente unimodali e leptocurtiche ( $K_G > 1$ ); ai campioni relativamente più ricchi di minerali pesanti (da 1,8 a 0,9%) corrispondono sedimenti caratterizzati da una bimodalità più o meno marcata per l'incremento dei sedimenti più fini.

Nella spiaggia sottomarina i valori percentuali dei minerali pesanti sono bassi, pressochè uguali (0,3÷0,5%), ed associati a materiali granulometricamente più fini e unimodali (Fig. 9b).

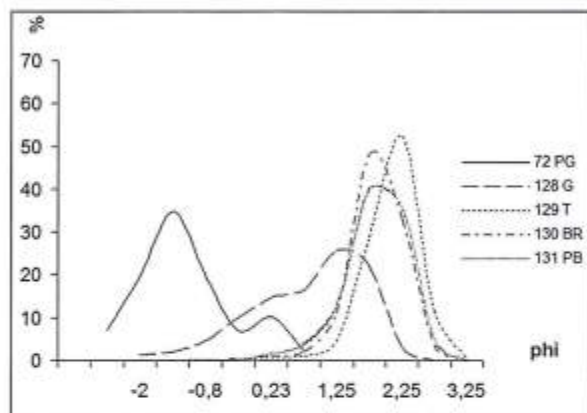


Figura 9a - La Liccia, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

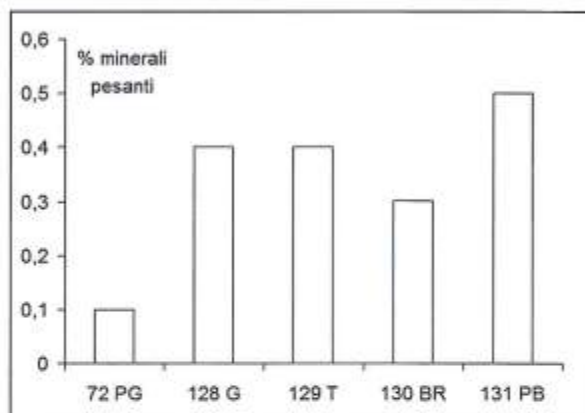


Figura 9b - La Liccia, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia sommersa.

### Rena Majori

I sedimenti di questa unità fisiografica sono costituiti da sabbie fini prevalentemente unimodali (Figg. 10a, 11a) in tutti i punti di campionatura tranne che nella battigia ( $M_z$  -0,18  $\phi$ , sabbie a grana molto grossa) (Tab.1), caratterizzata invece dalla presenza di una coda ben pronunciata di ghiaie. Si osserva una decisa uniformità granulometrica sulla spiaggia emersa ( $M_z$  tra 1,05 e 0,75  $\phi$ ;  $Sk_1$  tra 0,01 e -0,15), meno evidente su quella sommersa ( $M_z$  tra 2,26 e 0,42  $\phi$ ;  $Sk_1$  tra 0,01 e -0,11) dove permane la tendenza alla diminuzione di  $M_z$  verso il largo.

Le percentuali di minerali pesanti, comprese tra 0,3 e 1,4 (Figg. 10b, 11b), si discostano poco dai normali tenori, con i valori maggiori presenti su piede del gradino e sul piede duna, che non sembrano comunque legati a variazioni tessiturali, data l'assenza di mode secondarie e/o code fini.

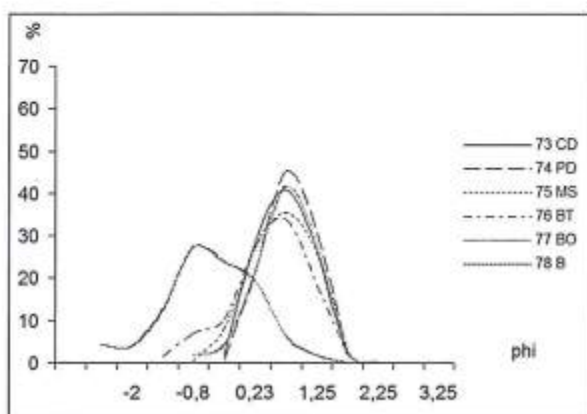


Figura 10a - Rena Majori, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

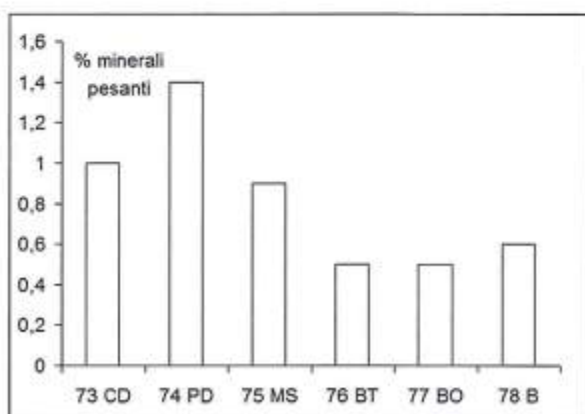


Figura 10b - Rena Majori, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

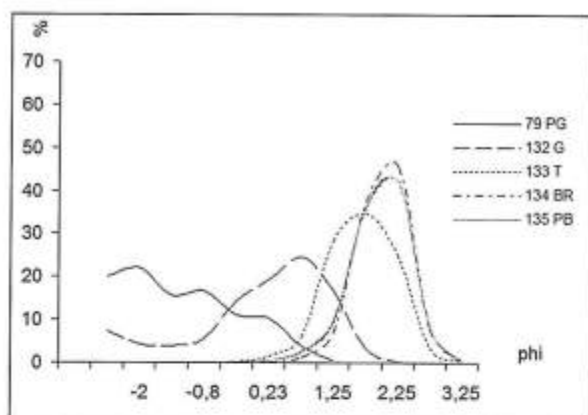


Figura 11a - Rena Majori, curve di frequenza delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

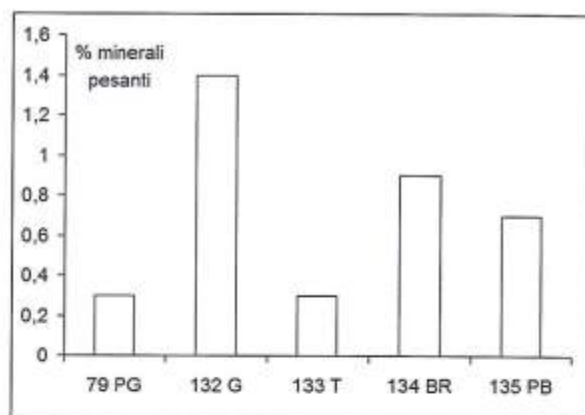


Figura 11b - Rena Majori, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia sommersa.

### Bureddaggia

I sedimenti sono costituiti da sabbie grosse prevalentemente unimodali sulla parte emersa ( $M_z$  tra 0,56 e 0,16  $\phi$ ;  $Sk_1$  tra 0,10 e -0,20) e fini su quella sommersa ( $M_z$  tra 2,53 e 2,47  $\phi$ ;  $Sk_1$  tra -0,01 e -0,03) (Figg. 12a, 13a; Tab. 1). Nella spiaggia sommersa il piede del gradino mostra invece una marcata bimodalità (79% sabbia e 21%

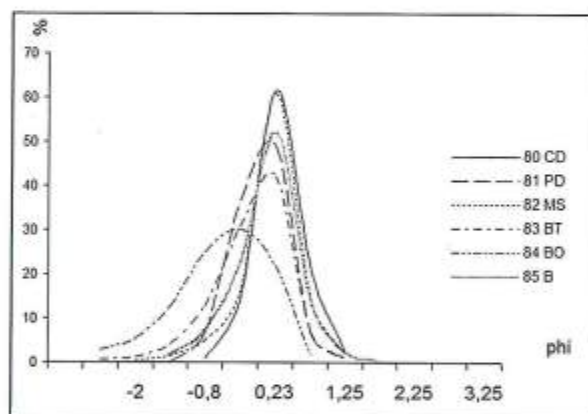


Figura 12a - Bureddaggia, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

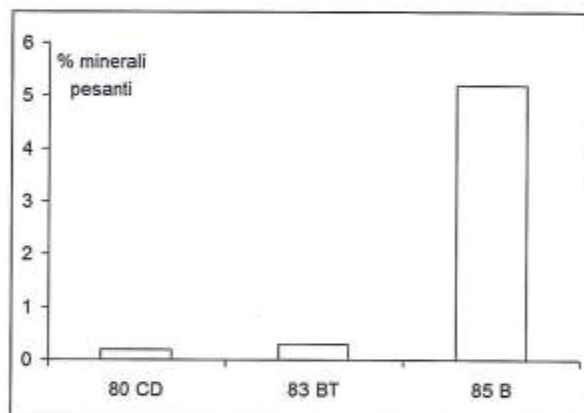


Figura 12b - Bureddaggia, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

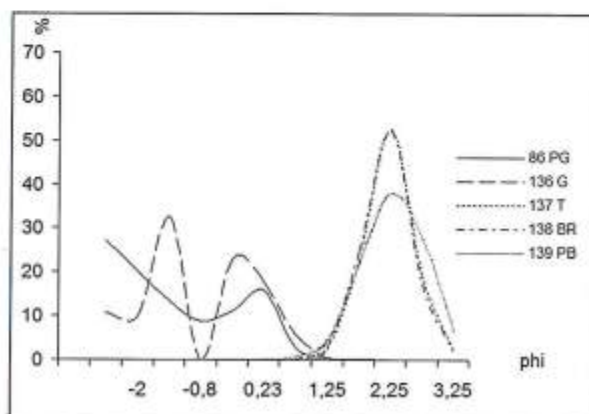


Figura 13a - Bureddaggia, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

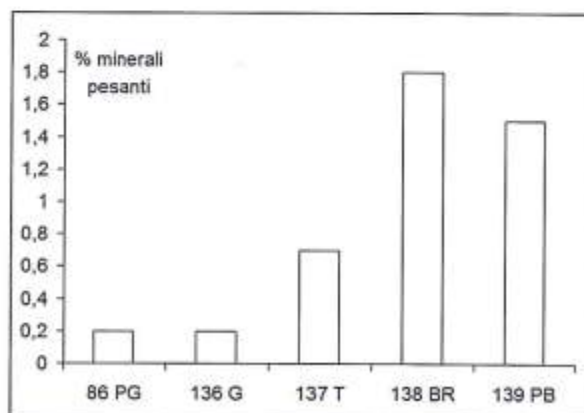


Figura 13b - Bureddaggia, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia sommersa.

granuli;  $Mz = -0,59 \varphi$ ), più evidente che nelle altre spiagge di questo settore, con mode nell'ambito delle sabbie a grana grossa e granuli; non vi è variazione di  $Mz$  nelle unità distali.

Sulla battigia la percentuale di minerali pesanti è di 5,2% (Figg. 12b, 13b), di gran lunga superiore a quanto rilevato nelle spiagge immediatamente a nord. Anche nella spiaggia sommersa si nota un aumento nella presenza dei minerali pesanti verso il largo e rispetto alle altre spiagge, con tenori di 1,8% e 1,5% rispettivamente sulla barra e sul piede della barra.

Dall'analisi delle caratteristiche tessiturali emerge che la maggiore variazione granulometrica si osserva sulla battigia con il passaggio da sabbie a grana molto grossa a grossa, meglio selezionate, più leptocurtiche e asimmetriche negative, da La Liccia a Bureddaggia (Tab. 1 e Fig. 6), suggerendo un trasporto diretto verso sudovest.

I valori di  $Mz$  su barra e piede della barra evidenziano una debole diminuzione granulometrica verso sudovest ( $2,43+2,14 \varphi$ ,  $2,53+2,11 \varphi$ ) seguita da variazioni di  $\sigma_1$ ,  $Sk_1$  e  $K_G$ , in accordo con la tendenza più evidente sulla battigia, ed associata all'approfondimento delle barre nella stessa direzione (Brambati e DeMuro, 1992). Nella spiaggia emersa i valori di  $Mz$  lungo le singole unità morfologiche sono omogenei ad eccezione della cresta della duna, dove i diametri medi diminuiscono invece verso oriente, secondo la direzione dei venti dominanti.

Tale carattere è tuttavia associato ad un peggioramento della selezione e a una forte asimmetria negativa, probabilmente dovuti a mescolamento con sedimenti più grossi provenienti dalla spiaggia emersa.

I tenori dei minerali pesanti vanno in generale aumentando verso sudovest, sui sedimenti della battigia e della spiaggia sommersa, in accordo con la diminuzione del diametro medio

I campioni prelevati alle isobate di 10 e 20 metri sono caratterizzati da sabbie medio-fini ( $Mz$  tra 1,50 e 2,20  $\varphi$ ). All'isobata 10 m (Tab. 1; Tav. 1) il diametro medio diminuisce, come sottoriva, verso sudovest; all'isobata 20 m tale variazione è opposta, in accordo con lo studio dei flussi di energia incidente (DeMuro et al., 2002; DeMuro, 2003). Plottando in carta questi dati si delinea una dispersione controllata da celle a circolazione oraria la cui forma ed estensione sono marcatamente condizionate dalla conformazione del fondale (Tav. 1).

### Sud di Capo Monti Russu - Aree C, D e E

#### Spiagge di La Piana, Lu Litarroni, Naracu Nieddu (Area C)

A sud del Capo M.ti Russu (La Piana, Fig. 1) la spiaggia emersa è costituita da ghiaie; nella parte sommersa il valore di  $Mz$  è decisamente negativo non solo sul piede del gradino, unimodale e ben selezionato ( $Mz = -1,18 \varphi$ ), ma anche nel truogolo dove i sedimenti, costituiti da ghiaie e sabbie molto grosse ( $Mz = -0,73 \varphi$ ) sono bimodali e mal selezionati; tali caratteristiche sono attribuibili alla redistribuzione locale degli apporti grossolani del Rio Sperandeu.

Sulla barra si trovano invece i normali sedimenti medio-fini unimodali, asimmetrici negativi e poco selezionati ( $Mz$  fino a 1,78,  $Sk_1 = -0,32$ ,  $\sigma_1 = 0,73$ ). Sul piede della barra i sedimenti sono invece costituiti da sabbie a grana grossa, asimmetriche positive e mal selezionate ( $Mz = 0,58 \varphi$ ,  $Sk_1 = 0,24$ ,  $\sigma_1 = 0,92$ ) per la presenza di una seconda moda nell'ambito dei sedimenti fini (Tab. 1; Fig. 14a).

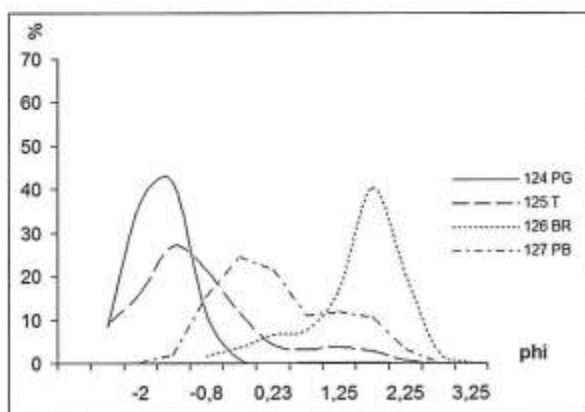


Figura 14a - La Piana, curve di frequenza delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

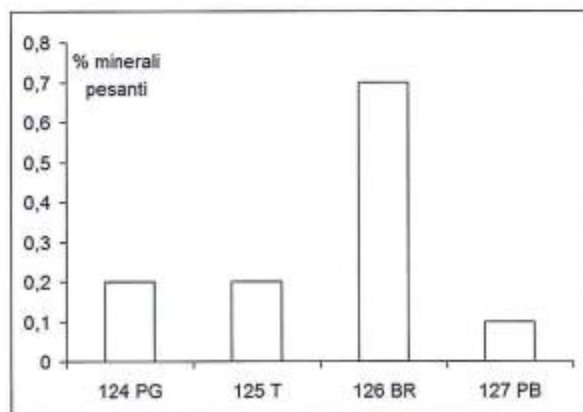


Figura 14b - La Piana, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia sommersa.

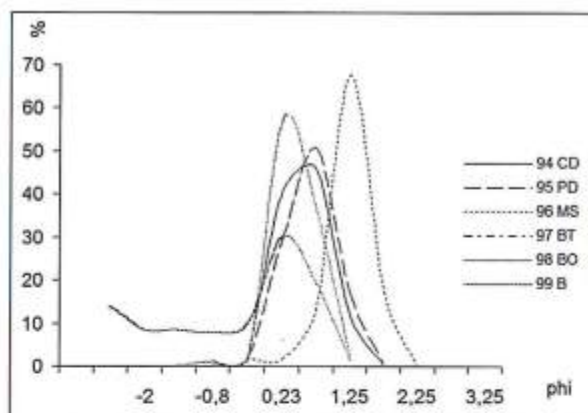


Figura 15a - Lu Litarroni, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

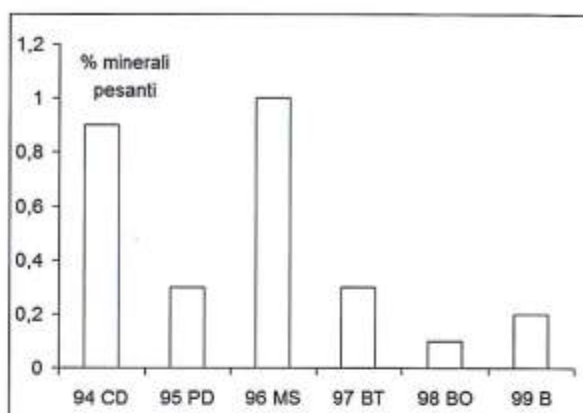


Figura 15b - Lu Litarroni, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

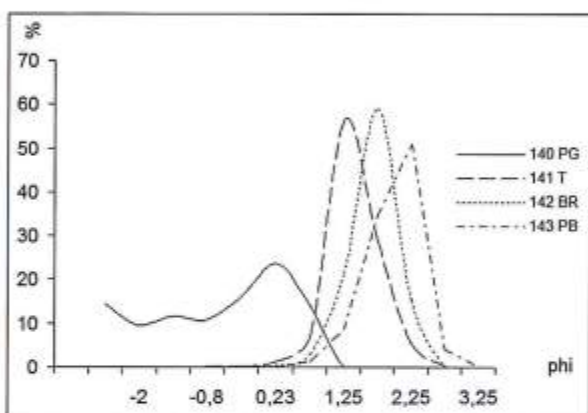


Figura 16a - Lu Litarroni, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

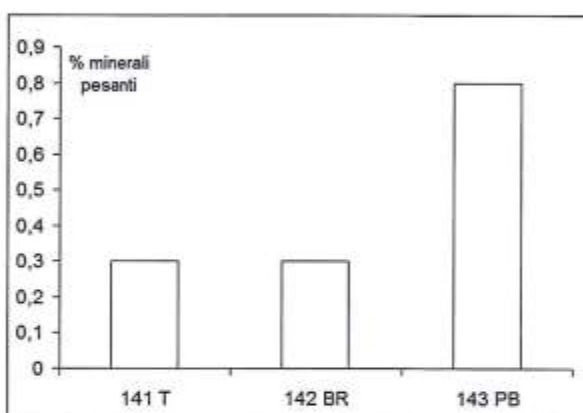


Figura 16b - Lu Litarroni, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia sommersa.

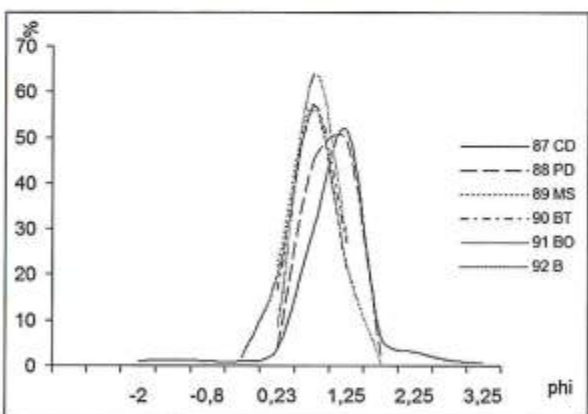


Figura 17a - Naracu Nieddu, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

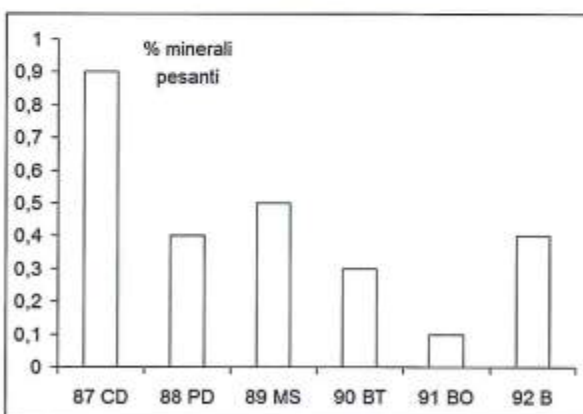


Figura 17b - Naracu Nieddu, percentuali dei minerali pesanti nelle varie unità morfologiche della spiaggia emersa.

A Lu Litarroni nella spiaggia emersa i valori di Mz ricadono nell'ambito delle sabbie a grana grossa (Mz tra 1,01 e 0,6  $\phi$ ; Tab. 1; Fig. 15a) con i sedimenti a granulometria maggiore localizzati su berma ordinaria e cresta della duna, e i più fini a metà spiaggia.

Le curve granulometriche sono unimodali, tranne quella della battigia, e caratterizzate da una coda pronunciata di sabbie molto grosse. Nella spiaggia sommersa, a parte i sedimenti del piede del gradino, decisamente

te a grana grossa e poco selezionati perché bimodali ( $Mz = -0,43 \varphi$ ,  $\sigma_1 = 0,79$ ,  $Sk_1 = 0,47$ ; Tab. 1; Fig. 16a), quelli delle altre unità mostrano solo una diminuzione del diametro medio procedendo verso il largo:  $Mz$  da 1,66 a 2,25  $\varphi$  - da sabbie fini a molto fini.

All'isobata 10 m i valori di  $Mz$  (Tab 1, Tav. 1) sono compresi tra 2,19 e 0  $\varphi$ , quelli di  $Sk_1$  tra -0,24 e 0,65 e  $\sigma_1$  da 0,44 a 0,90  $\varphi$ ; si nota la tendenza alla diminuzione del granulo medio verso nordest accompagnata da un miglioramento della selezione.

A Naracu Nieddu, l'affioramento del basamento, seppur discontinuo, non permette la formazione di barre ben strutturate per cui la campionatura è limitata alla parte emersa; nessuna differenziazione tessiturale di rilievo è presente tra le unità morfologiche (sabbie medie unimodali ed  $Mz$  compreso tra 0,83 e 1,11  $\varphi$ ) (Fig. 16a). I valori dei diametri medi dei campioni prelevati in battigia evidenziano la dispersione verso sudovest (Tav. 1). Questo trend è in accordo con la direzione di trasporto lungo costa indicata dall'applicazione del modello SMB (DeMuro et al., 2002; DeMuro, 2003); sottoriva, invece, è opposto, ad indicare l'esistenza anche in quest'area di celle di circolazione a rotazione oraria.

Da Capo di Monti Russu fino alla foce del Vignola, lungo un allineamento orientato nord-est sud-ovest, parallelo all'attuale linea di costa, si osservano alla profondità di circa -20 metri sabbie molto grosse ( $Mz$  da 0,17 a -0,27  $\varphi$ ) (Tab. 1; Tav. 1), caratterizzate da un discreto grado di bimodalità e di accentuati valori positivi di  $Sk_1$  (fino a 0,74).

Questi sedimenti sono tipici della fascia di transizione compresa tra il piede del gradino e le berme. Potrebbe dunque trattarsi di sedimenti relitti associabili alle paleo linee di riva oloceniche già ricostruite da Brambati e DeMuro (1992), parzialmente rielaborati dalla intensa dinamica attuale (DeMuro et al., 2002; DeMuro, 2003).

In tutta l'area, nell'intero corpo di spiaggia, i tenori dei minerali pesanti rimangono al di sotto del 1%, con i valori relativamente più elevati in corrispondenza della cresta della duna e di metà spiaggia, in concomitanza con l'incremento delle frazioni fini (Figg. 16b, 17b).

Lungo la battigia si ha l'incremento dei valori verso l'estremità sud-occidentale, con notevole arricchimento nei due campioni a granulometria più fine ( $C33 = 2,1\%$ ,  $C0 = 99,4\%$ ), indicanti l'esistenza nella spiaggia di Naracu Nieddu di un'area di accumulo (Tab. 1; Fig. 18).

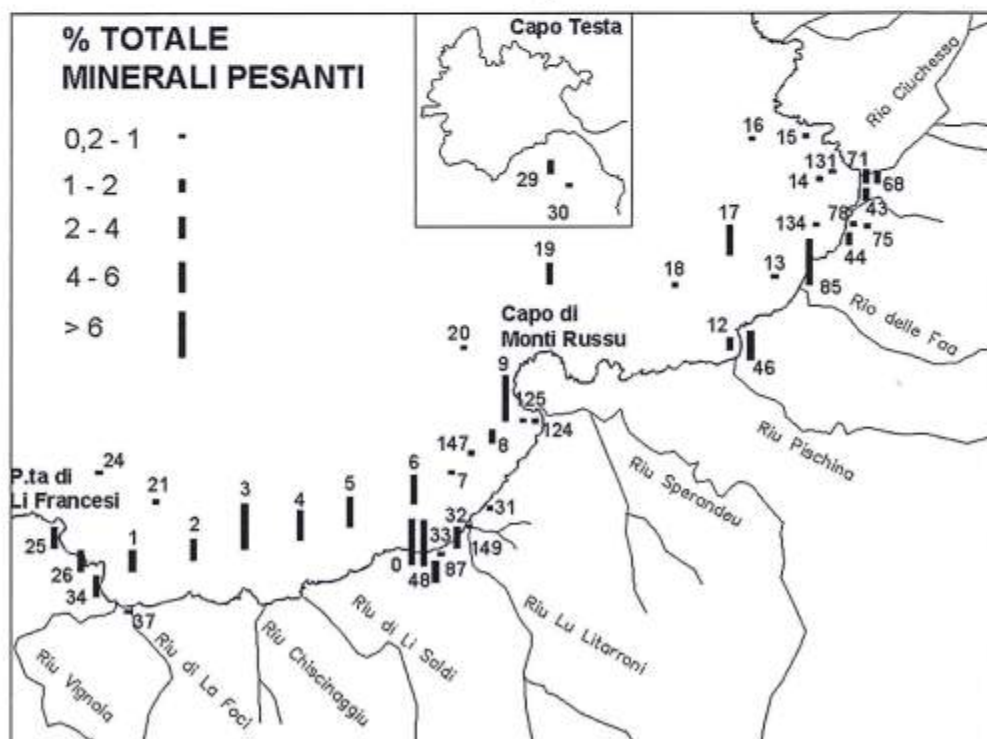


Figura 18 - Ubicazione dei campioni utilizzati per l'analisi mineralogica e sintesi della distribuzione delle percentuali totali dei minerali pesanti.

*Spiaggia di Lu Tuvunatu (Area D)*

La spiaggia emersa è costituita da ghiaie e ciottoli. Nella parte sommersa all'isobata 10 metri i valori di  $Mz$  (C3, C5, Tab. 1, Tav. 1) sono compresi tra 0,18 e 0,7  $\phi$ , quelli di  $Sk_i$  tra 0,01 e -0,24 e quelli di  $\sigma_1$  tra 0,47 e 0,51  $\phi$ ; si nota ancora la tendenza alla diminuzione del granulo medio verso nord est insieme al miglioramento della selezione e ad un incremento della negatività dell'  $Sk_i$ . Su questi campioni i tenori di minerali pesanti (Tab. 1; Fig. 18) sono piuttosto elevati (C3 = 8,9, C5 = 5,9%).

*Spiaggia di Vignola (Area E)*

Sulla spiaggia emersa orientale si hanno sedimenti a granulometria molto grossa, bimodali sulla berma ordinaria (Fig. 19a). I valori del diametro medio sono compresi tra 0,0  $\phi$  sulla cresta della duna e -1,14  $\phi$  sulla berma di tempesta (Tab. 1). Le sabbie del piede del gradino sono fortemente bimodali con la moda principale nel campo delle sabbie a grana grossa e l'altra nel campo delle sabbie fini.

Nella traversa occidentale, presso la foce del Vignola, il diametro medio diminuisce dalla battigia ( $Mz = -0,74 \phi$ ) alla cresta della duna ( $Mz = 0,06 \phi$ ); è evidente la netta bimodalità nella berma ordinaria (Fig. 20), con la moda principale a grana leggermente più grossa rispetto alla battigia, e quella secondaria nettamente spostata su frazioni più fini, peraltro non presenti in quantità significative sulle altre unità di spiaggia emersa.

L'analisi delle caratteristiche tessiturali dei campioni di battigia provenienti dalle due traverse eseguite in primavera, e di quelli prelevati durante l'inverno (Figg. 6, 7, Tab. 1), indica che i sedimenti diventano più fini, meglio selezionati e asimmetrico negativi procedendo verso nordovest. La stessa tendenza è rilevabile nelle stazioni di -10 m di quest'area.

La percentuale di minerali pesanti (Tab. 1; Fig. 18), stimata su alcuni campioni di battigia ubicati prevalentemente a nordovest della foce del Rio Vignola, mostra tenori del 2,5%. All'isobata di 10 metri si hanno valori pari a 3-4%, mentre in quella di 20 metri rimangono al di sotto dell'1%.

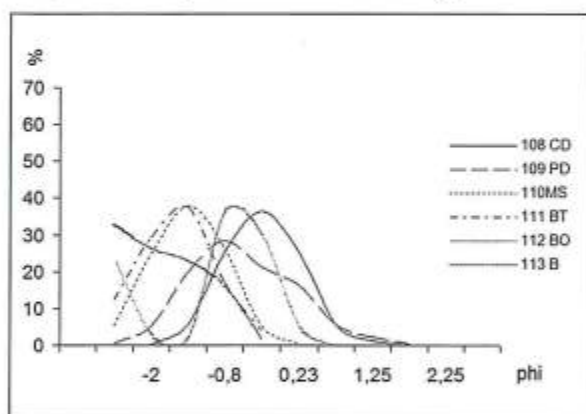


Figura 19a - Vignola E, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia emersa.

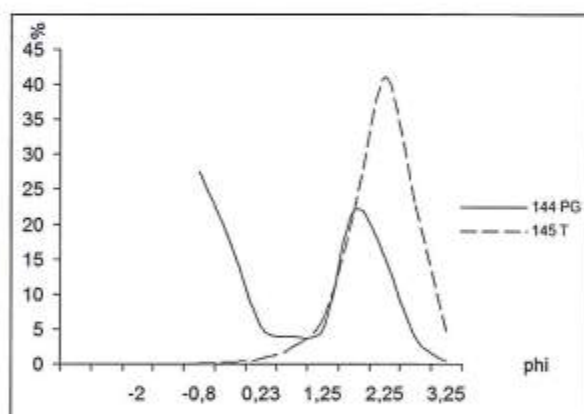


Figura 19b - Vignola E, curve di frequenza dei sedimenti delle unità morfologiche nella spiaggia sommersa.

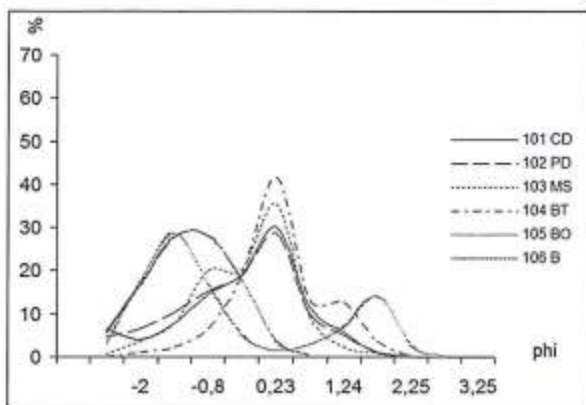


Figura 20 - Vignola W, curve di frequenza delle unità morfologiche nella spiaggia emersa

### Composizione mineralogica della frazione pesante.

L'analisi della composizione mineralogica della frazione pesante evidenzia che circa la metà dei campioni non si discosta molto dai tenori normali (0,1-1,0%) indicati da Folk (1980), mentre i restanti mostrano una certa variabilità con percentuali che in due casi superano il 90% (C9 = 94%, C0 = 99%). I campioni C9 e C10 fanno parte della cella C (Tav. 1): questo settore risulta morfologicamente il più complesso dell'area.

Il basamento cristallino affiora con il corteo filoniano delineando delle barriere diagonali rispetto alla spiaggia orientate sudovest nordest (Fig. 3), che generano di fatto delle trappole sedimentarie per la frazione fine nelle quali i minerali pesanti originano dei veri e propri *placers*. Inoltre, verso mare il sistema di paleospieggie

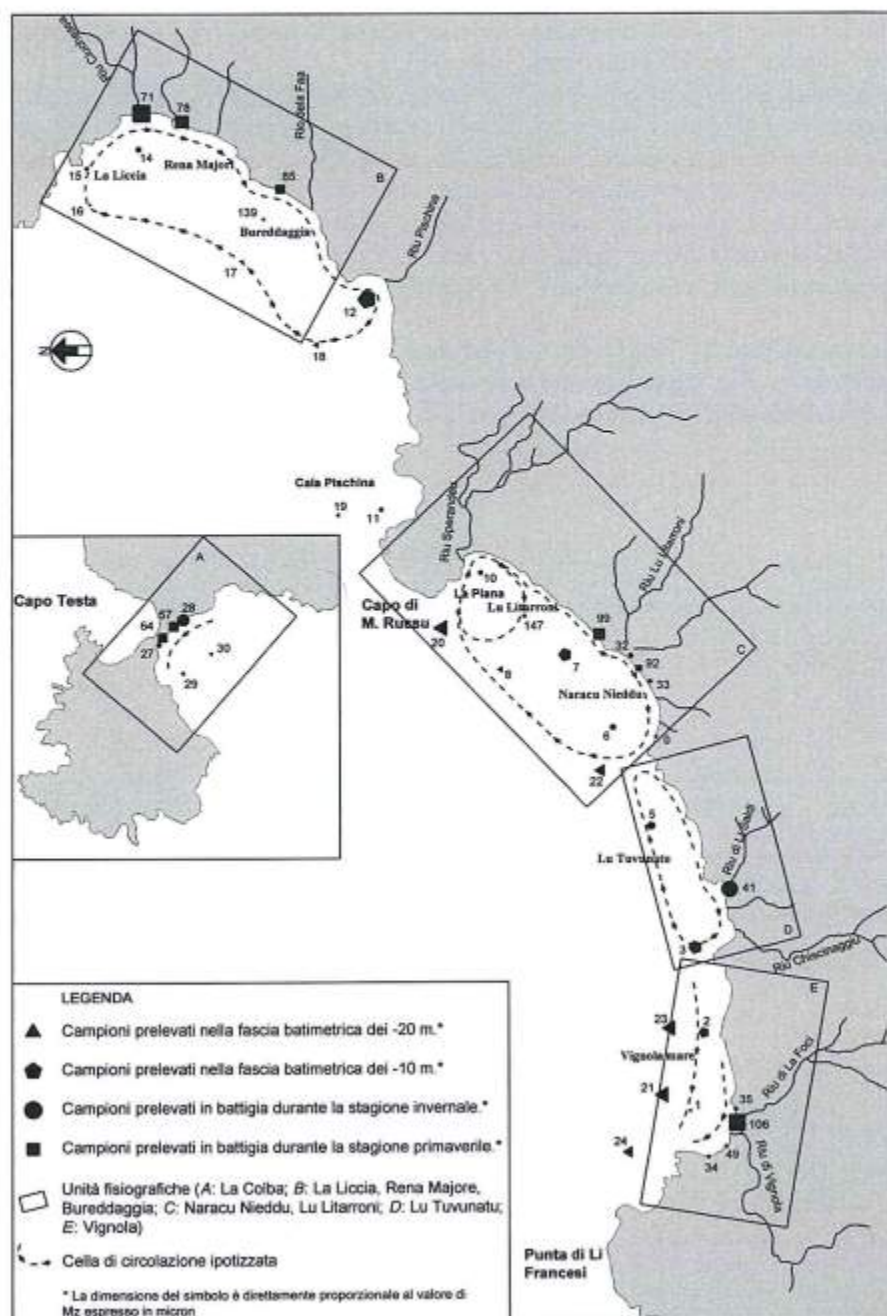


Tavola 1 - Schema della dispersione dei sedimenti lungo la battigia e nella spiaggia sommersa dell'area in studio.



disposto parallelamente alla attuale linea di costa controlla e delimita ulteriormente la circolazione e lo scambio *inshore - offshore*, confinando di fatto le facies sedimentarie terrigene tra 0 e -20 metri (Fig. 3).

I minerali che sono stati riscontrati in quantità arealmente significativa sono i seguenti: Epidoto (Pistacite), Pirosseni (Augite, Iperstene), Anfiboli (Orneblenda), Granato, Andalusite, Sillimanite, Staurolite,

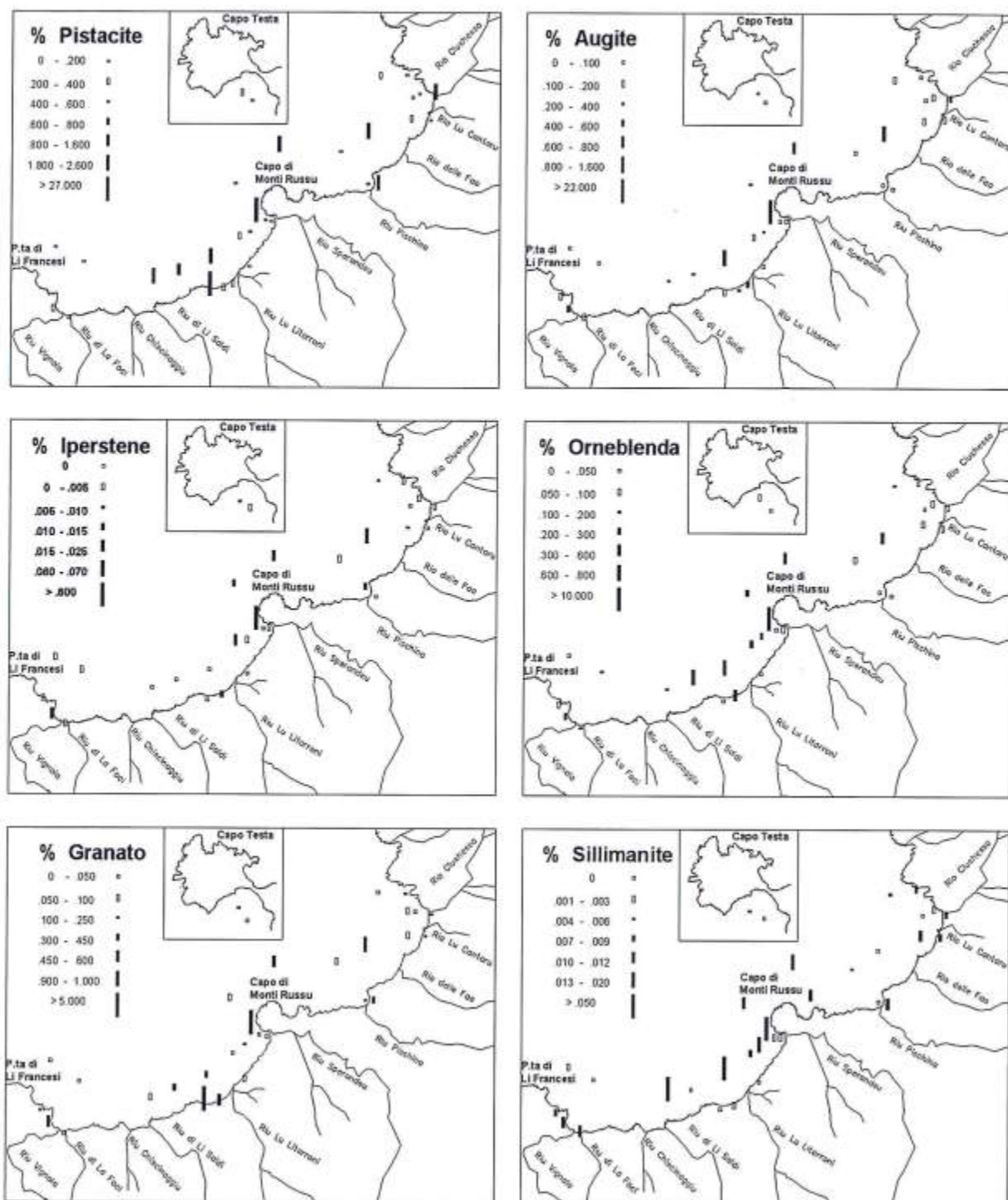


Figura 21a - Ubicazione dei campioni utilizzati per l'analisi mineralogica e sintesi della distribuzione delle percentuali dei vari minerali studiati.

Tormalina, Zircone e altri presenti in percentuali rilevanti solo in alcuni campioni (Tab. 2-3). La loro distribuzione è visualizzata nelle Figure 21a e 21b.

Le specie mineralogiche riconosciute sono del tutto compatibili con la mineralogia dei bacini dei corsi d'acqua che si riversano nell'area studiata.

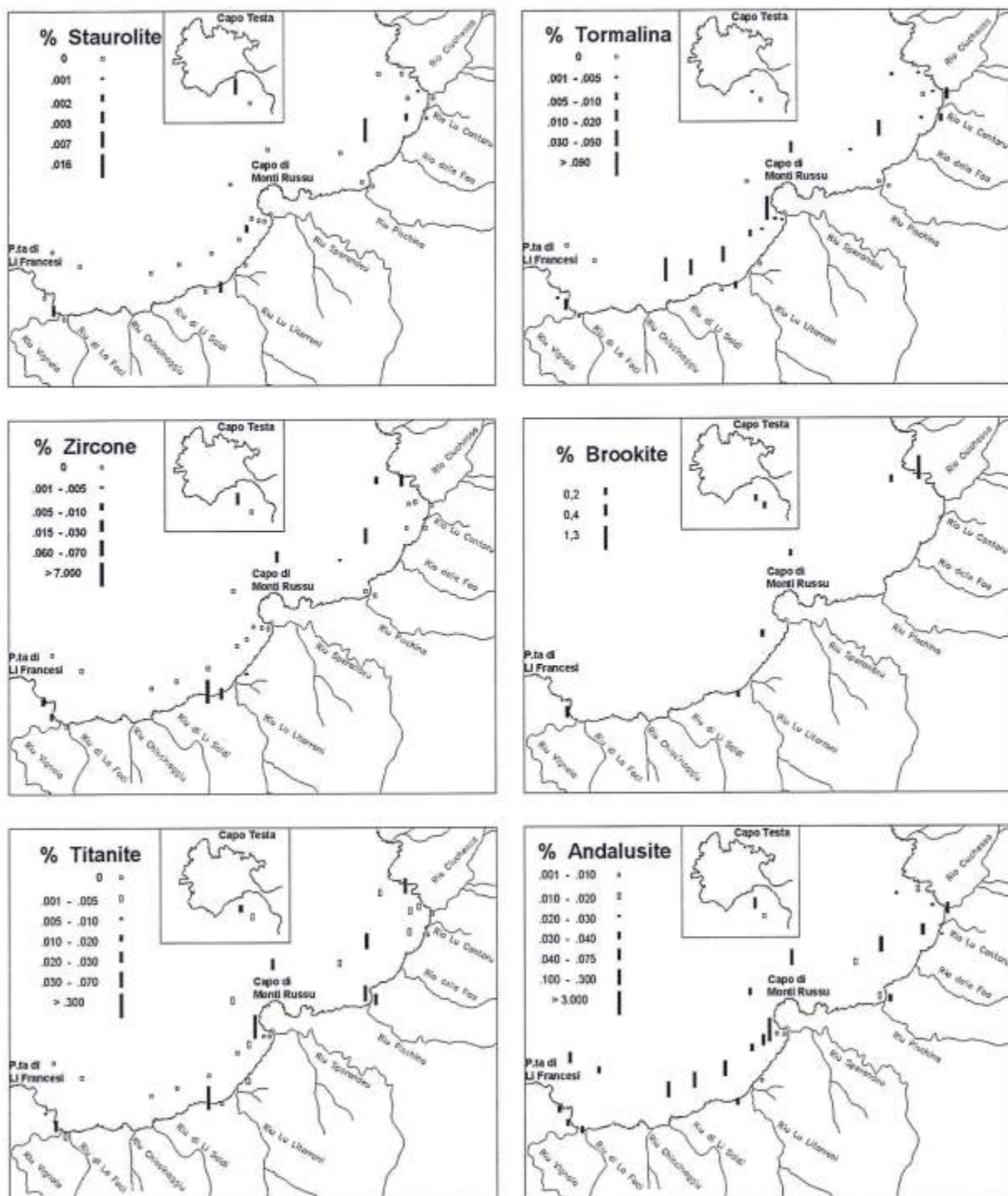


Figura 21b - Ubicazione dei campioni utilizzati per l'analisi mineralogica e sintesi della distribuzione delle percentuali dei vari minerali studiati.



Nei tratti di costa orientati nordest-sudovest (spiagge di La Liccia, Rena Maiore, Bureddaggia, Lu Litarroni, Naracu Nieddu, Lu Tuvunatu) dall'analisi del diametro medio lungo la battigia si evidenzia la dispersione da nordest verso sudovest mentre alle profondità maggiori di 10 metri la dispersione risulta di verso opposto in accordo con lo studio dei flussi di energia incidente (DeMuro et al., 2002; DeMuro, 2003). Trasferendo in carta questi dati si delinea una dispersione controllata da celle a circolazione oraria la cui forma, estensione e dinamica, alla scala dell'osservazione stagionale, sono fortemente condizionate dalla conformazione del fondale e dipendenti dalle condizioni meteomarine (Fig. 3 e Tav 1) che hanno preceduto la campionatura. Nelle unità fisiografiche orientate nordovest-sudest (spiagge di Vignola e di La Colba) sembra che prevalga un trasporto parallelo alla costa orientato da sudest verso nord ovest.

Nel settore compreso tra Capo di M.ti Russu e Punta di li Francesi, inoltre, alla batimetria dei 20 metri, lungo un allineamento orientato nord-est sud-ovest, parallelo alla attuale linea di costa, i parametri sedimentologici evidenziano l'esistenza di sedimenti relitti in scarsa relazione con la dispersione attuale. I caratteri tessiturali riscontrati, elevati valori di  $M_z$  (da -0,27 a 0,17 j), discreto grado di bimodalità e accentuati valori positivi di  $S_{k1}$  (fino a 0,74), sono tipici della fascia di transizione nonchè compresa tra il piede del gradino e le berme. Potrebbe dunque trattarsi di sedimenti relitti riferibili alle paleolinee di riva oloceniche già ricostruite da Brambati e DeMuro (1992), e rielaborati dalla intensa dinamica attuale (DeMuro et al., 2002; DeMuro, 2003), che di fatto rimangono confinati dall'affioramento delle *beach rocks* (Fig. 3).

**Tabella 3 - Composizione mineralogica del contenuto in minerali pesanti nei sedimenti analizzati.**

Campione	C29	C30	C31	C33	C34	C37	C46	C68	C75	C87	C124	C125	C131	C134	C147	C149
% su totale campione	1,1	0,1	0,5	2,1	2,3	0,5	4,9	1,8	0,9	0,9	0,2	0,2	0,5	0,9	1	2,7
PISTACITE	0,312	0,029	0,040	0,208	0,356	0,102	1,183	0,737	0,420	0,363	0,027	0,098	0,184	0,365	0,281	0,395
AUGITE	0,270	0,033	0,003	0,284	0,593	0,119	0,000	0,498	0,145	0,101	0,026	0,006	0,104	0,187	0,178	0,426
IPERSTENE	0,007	0,001	0,000	0,015	0,020	0,001	0,000	0,004	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,008	0,019	0,009
ENSTATITE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ORNEB.V.	0,095	0,012	0,004	0,132	0,261	0,118	0,000	0,096	0,057	0,032	0,061	0,029	0,055	0,082	0,212	0,269
PICOTITE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ANATASIO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ANDALUSITE	0,042	0,004	0,001	0,018	0,034	0,031	0,032	0,075	0,026	0,025	0,009	0,007	0,025	0,043	0,035	0,074
STAUROLITE	0,007	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000
SILLIMANITE	0,005	0,000	0,000	0,003	0,010	0,010	0,011	0,008	0,008	0,000	0,002	0,002	0,003	0,012	0,009	0,000
GRANATO	0,130	0,008	0,087	0,545	0,461	0,017	0,330	0,218	0,119	0,161	0,006	0,008	0,043	0,078	0,044	0,539
OLIVINA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
TORMALINA	0,005	0,000	0,000	0,009	0,020	0,003	0,000	0,013	0,008	0,000	0,003	0,001	0,005	0,003	0,010	0,013
ZIRCONO	0,026	0,000	0,002	0,026	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043
TITANITE	0,016	0,002	0,001	0,000	0,030	0,001	0,021	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,004	0,002	0,000	0,026
RUTILO	0,004	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004
BROOKITE	0,002	0,000	0,000	0,003	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
APATITE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<hr/>																
PISTACITE	33,9	32,0	28,9	16,7	19,7	25,2	75,0	44,7	53,3	53,0	19,8	65,2	43,1	46,8	35,6	22,0
AUGITE	29,3	37,3	2,1	22,8	32,8	29,5	0,0	30,2	18,4	14,7	19,1	3,7	24,3	24,0	22,6	23,7
IPERSTENE	0,8	1,5	0,0	1,2	1,1	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	1,5	0,0	0,6	1,0	2,4	0,5
ENSTATITE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ORNEB.V.	10,3	13,4	2,6	10,6	14,4	29,3	0,0	5,8	7,2	4,6	44,3	19,3	12,8	10,5	26,9	15,0
PICOTITE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ANATASIO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ANDALUSITE	4,6	4,5	0,5	1,4	1,9	7,8	2,0	4,6	3,3	3,7	6,9	4,3	5,7	5,5	4,5	4,1
STAUROLITE	0,8	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0
SILLIMANITE	0,6	0,0	0,0	0,2	0,6	2,6	0,7	0,5	1,0	0,0	1,5	1,2	0,8	1,6	1,1	0,0
GRANATO	14,1	8,7	63,4	43,7	25,5	4,3	20,9	13,2	15,1	23,5	4,6	5,6	10,2	9,9	5,6	30,0
OLIVINA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
TORMALINA	0,6	0,4	0,0	0,7	1,1	0,9	0,0	0,8	1,0	0,0	2,3	0,6	1,1	0,4	1,3	0,7
ZIRCONO	2,9	0,2	1,5	2,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
TITANITE	1,7	1,7	1,0	0,0	1,7	0,2	1,4	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,2	0,0	1,4
RUTILO	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
BROOKITE	0,2	0,2	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
APATITE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<hr/>																
Totale Trasparenti	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TRASPARENTI	83,6	89,5	27,4	59,4	78,5	80,6	32,2	91,6	87,6	76,1	68,6	75,2	85,3	86,8	78,8	66,6
OPACHI	14,2	7,9	70,8	37,8	15,9	5,7	54,9	3,5	8,6	20,4	13,6	6,5	8,3	5,2	6,5	29,1
TORBIDI	2,2	2,5	1,8	2,8	5,6	13,7	12,9	4,9	3,7	3,5	17,8	18,2	6,4	8	14,7	4,3

Dallo studio dei minerali pesanti è stata riconosciuta una provenienza da rocce magmatiche intrusive, effusive e metamorfiche. E' stata osservata una netta predominanza di Epidoto, nella sua varietà più diffusa Pistacite, rispetto alla Clinozoisite, nonché di Anfiboli (Orneblenda verde) e Pirosseni. Sono presenti inoltre subordinatamente: Granati, Zircone, Picotite, Anatasio, Andalusite, Staurolite, Sillimanite, Olivina, Tormalina, Titanite, Rutilo e Brookite, con basse percentuali di Apatite.

Trasversalmente alle spiagge si osservano percentuali elevate di minerali pesanti sulla cresta della duna, con diminuzione sulle berme e un relativo aumento sulla battigia. Nella spiaggia sottomarina i valori di concentrazione più elevati sono stati osservati sul piede della barra e in particolari zone di accumulo che vanno a costituire veri e propri *placers*. Sulla battigia si osservano, in linea generale, valori percentuali crescenti da nord verso sud.

Allo stato attuale delle ricerche la distribuzione delle differenti specie mineralogiche pesanti non consente di individuare direzioni di dispersione preferenziali. Il loro utilizzo come traccianti è infatti limitato dalla omogeneità di apporti in termini di specie minerali dei bacini idrografici che alimentano il settore costiero in esame. Invece la distribuzione delle percentuali totali, sia lungoriva che in piattaforma interna, mostra una maggiore possibilità di utilizzo ai fini delle modalità di dispersione.

### Ringraziamenti

Lavoro eseguito nell'ambito del Progetto Interreg III "Geologia e geomorfologia terrestre e marina dell'insieme Corsica-Sardegna e della Toscana e applicazioni" e del Progetto MPI 60% " Ricostruzioni paleoclimatiche e paleogeografiche pleistocenico-oloceniche da sedimenti marini e continentali della Sardegna".

### Bibliografia

- Bralia A., Ghezzi C., Guasparri G. e Sabatini G. (1982) - *Aspetti genetici del batolite sardo-corso*. Rend. Soc. Min. e Petr., 38, 2: 701-764.
- Brambati A. e DeMuro S. (1992) - *Dynamics of the bar and trough zone between Capo Testa e Punta di li Francesi*. Northern Sardinia. Boll. Oceanol. Teor. Appl., Trieste, 10: 165-179.
- Brambati A. e DeMuro S. (1992b) - *Notes on the geomorphological map of the area between Capo Testa and Punta di li Francesi (Northern Sardinia, Italy)*. Boll. Oceanol. Teor. e Appl., 10, 2-3-4: 133-148.
- Brambati A. e DeMuro S. (1992c) - *Submerged coastlines in the sector between Capo Testa and Punta di li Francesi (northern Sardinia)*. Geomorphological and Sedimentological aspects. Boll. Oceanol. Teor. Appl., Trieste, 10: 149-164.
- Brambati A., DeMuro S. e Forti S. (1992) - *L'utilisation de la Microscopie Electronique à Balayage pour l'étude morphoscopique et exoscopique des quartz appliquée à l'identification des environnements de paléo-plages. Recherches dans le secteur compris entre Capo Testa et Punta di li Francesi (Sardegna Septentrionale)*. Rapp. Comm. int Mer Médit., 33, pp. 120.
- Cannillo C., Di Gregorio F., Ferrara C. e Ibba A. (1997) - *Caratteristiche geoambientali delle dune costiere della baia di Porto Pino*. Mem. Descr. Carta. Geol. d'It., LII: 191-206.
- Carmignani ed. (1966) - *Carta geologica della Sardegna scala 1:200.000*. Serv. Geol. Naz., L.A.C., Firenze.
- Carobene L. e Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 479-493.
- DeMuro S. (1990) - *Carta geomorfologica del settore compreso tra Capo Testa e Punta di li Francesi*. Tesi di dottorato in "Oceanografia geologica e risorse", Trieste.
- DeMuro S. (2003) - *Erosion case study. Lu Litarroni, La Liscia - Isle of Sardegna, Italy*. Wp 4.1 report of UAB Pilot Sites Erosion, www.euroasion.org, <http://www.euroasion.org/shoreline/table.htm>.
- DeMuro S., Ferrara C. e Ibba A. (2002) - *Caratteristiche sedimentologiche delle spiagge tra Capo Testa e Punta di li Francesi - Nord Sardegna*. Proceeding International Congress: Environment and Identity in the Mediterranean, Tome 4: 559-575.
- DeMuro S., Follera R. e Ibba A. (2002) - *Regime, dynamics and balance on the coast between punta di li Francesi and Capo Testa - Northern Sardinia*. Proceeding International Congress: Environment and Identity in the Mediterranean, Tome 4: 577-589.
- Di Gregorio F., Ferrara C. e Ibba A. (1999) - *Geoenvironmental features and human impact in a transitional system in SW Sardinia (Italy)*. Spec. vol. EUCC, pp. 22.

- Folk R.L. (1980) - *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill's, Austin, Texas: pp. 184.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. J. Sediment. Petrol., 27: 3-26.
- Ghezzi C. e Orsini J.B. (1982) - *Lineamenti strutturali e composizionali del batolite ercinico sardo-corso in Sardegna*. In: Guida alla Geologia del Paleozoico sardo. Guide Geologiche Regionali. Soc. Geol. It.: 165-181.
- Krumbein W.C. e Pettijohn F.J. (1938) - *Manual of sedimentary petrography*. Appleton Century Crofts, New York, pp. 549.
- McLaren P. (1981) - *An interpretation of trends in grain size measures*. J. Sediment. Petrol., 51: 611-624.
- Milner H.B. (1962) - *Methods in sedimentary petrography. Principles and applications*. Vol. 2, pp. 715. New York. Macmillan.
- Ricci C. A. (1992) - *From structural thickening to exhumation: petrological, structural and geochronological records in the crystalline basement of the northern Sardinia*. In: Contribution to the Geology of Italy with special regards to the Paleozoic basement. A volume dedicated to Tommaso Coccozza. L. Carmignani e F. P. Sassi. Eds, IGCP n° 276, Newsletter, 5: 187-197.

**Manoscritto ricevuto il 15/12/2003, accettato il 20/5/2004.**

## Evoluzione morfologica del settore costiero di Porto Cesàreo (Penisola Salentina, Puglia)

Tommaso De Pippo, Carlo Donadio, Miela Pennetta,  
Francesco Terlizzi e Carlo Vecchione

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli Federico II,  
Largo San Marcellino, 10 - 80138 Napoli. Email: depippo@unina.it

### Riassunto

Il tipo di modellamento, osservato anche in zone costiere tirreniche, è connesso alla mutua interazione spazio-temporale tra più fattori morfodinamici, quali l'alternanza di differenti litologie a diversa resistenza all'erosione e le rapide fluttuazioni verticali tettono-eustatiche tardoquaternarie che hanno determinato nell'insieme un progressivo incremento del grado di frammentazione della linea di costa. Queste caratteristiche hanno contribuito al modellamento di un paesaggio interessato anche da forme carsiche impostate su lineamenti tettonici a prevalente andamento appenninico.

La ricostruzione delle tappe morfoevolutive ha messo in luce che nel corso del Siciliano la regione emerse, dislocandosi a seguito dell'attivazione di faglie ad andamento appenninico ed antiappenninico anche nell'area costiera di Porto Cesàreo, e che il successivo ribassamento verso SW terminò circa 85 ka *b.p.*

L'esposizione subaerea nel Siciliano diede origine ad un'estesa carsificazione dei calcari in corrispondenza delle linee tettoniche, così come è avvenuto in altre aree pugliesi. Nelle depressioni carsiche si sono sviluppate le attuali cale e baie delimitate verso mare da lembi carbonatici mesozoici relitti dello smembramento tettonico, sormontati dalle calcareniti medio-pleistoceniche, più o meno allineate lungo la direzione della paleolinea di costa.

I lembi di paleofalesie, terrazzi marini emersi e talora di spiagge fossili (*beach rocks*) presenti tra +2 ed oltre +60 m, sono stati dislocati dagli eventi tettonici quaternari. La genesi dei terrazzi marini pleistocenici, sommersi tra -6 e -25 m, è verosimilmente poligenetica e differenziata: policiclica e forse polifasica, per quelli a profondità >-20 m, in prevalenza glacioeustatica postglaciale, invece, per quelli a profondità minori.

Le forme relitte sommerse confermano l'ipotesi di un antico modellamento connesso molto probabilmente anche a processi tettono-carsici oltre che glacioeustatici. Inoltre, le forme carsiche ereditate avrebbero contribuito allo sviluppo della laguna e delle baie, profonde non oltre 5 m, che si estendono per qualche chilometro lungo le principali faglie.

L'assenza dei depositi dunari medio-olocenici, affioranti invece in zone prossime all'area in studio, suggerisce che la porzione più estesa di piattaforma continentale ionica antistante l'area di Porto Cesàreo sia rimasta sommersa durante l'Olocene.

La posizione e quota delle spiagge fossili a *Strombus bubonius* rispetto all'attuale livello del mare, unitamente alle evidenze di attività tettonica, hanno permesso di calcolare i tassi di variazione verticale assoluta mediante l'integrazione delle curve di risalita del livello marino globale (ultimi 125 ka) e del Mar Tirreno (ultimi 43 ka), tratte dalla letteratura. Procedendo da NW verso SE, i tassi tra i MIS 5.5 e 5.1 oscillano tra 0.1 e 0.08 mm/anno, mentre tra il MIS 5.1 e l'attuale variano tra +0.38 e -0.35 mm/anno.

**Parole chiave:** lagune, geomorfologia costiera, Quaternario, Puglia.

**Abstract**

*Morphological, structural, lithostratigraphic and sedimentological analysis of emerged and submarine coastal sector of Porto Cesàreo (Ionian Sea), has shed light on its morphodynamic evolution during the Quaternary. The study area, marked by a more irregular present-day physiography, shows a peculiar horizontal inversion of the coastal design, actually characterized by subelliptical bays, pocket beaches, an open lagoon as well as emerged (between +2 and more than +60 m) and submerged (between -6 and about -25 m) relic morphologies (palaeo-cliffs, marine terraces with rockpools and sea-notches, palaeo-fans, beach rocks, sea-stacks).*

*The modelling processes, as well as observed along other Tyrrhenian Sea coastal zones, are linked to the mutual interaction of several morphodynamic factors, in space and time too. Alternance of different lithology, morphoselective erosion, Quaternary tectonic-eustatic fluctuations, faults' activity and karstic phenomena have caused a gradual increase of the coastal fragmentation.*

*In fact, during the Sicilian (about 800 kyr b.p.), the whole coastal sector uplifted and the coast of Porto Cesàreo was displaced by Apenninic and anti-Apenninic faults; the subsequent dowlift finished about 85 kyr b.p.*

*The continental exposition of limestone in Sicilian time caused wide karstic phenomena in correspondence of the main faults, as registered in other Apulian sites. The present-day bays, seaward delimited by Mesozoic carbonatic strips representing relic morphostructures tectonically displaced, are overlaid by mid-late Pleistocene calcarenites, which are more or less aligned as the palaeo-coastline.*

*The presence of submarine relic morphologies suggests a coast modelling probably due to tectonic-karstic processes. Furthermore, the inherited karst morphologies have contributed to the genesis of the lagoon and the bays, developed for some kilometres along the major faults and less than 5 m depth. Absence of mid-Holocene dune ridge deposits, in spite of the outcroppings along the zones close to Porto Cesàreo, indicates that the wider sector of continental platform in front of the study area was submerged during the Holocene.*

*The submerged palaeo-coast features suggest that the morphological evolutionary processes might be the effects of Pleistocene tectonics, as testified by the submerged palaeo-cliffs partially covered by recent sediments and fans too. Marine terraces genesis is probably polygenetic: polycyclic and maybe polyphasic (pre- and sin-tectonics, secondly glacio-eustatic) for those down to 20 m depth, while mainly due to postglacial eustatic fluctuations (secondly late- and post-tectonics), hence more recent, for those up to -20 m depth.*

*Present-day position and altitude of beach rocks with *Strombus bubonius* together with tectonic activity evidence, both related to global and Tyrrhenian Sea sea-level curves of the last 125 and 43 kyr, drawn from the literature and between them integrated, highlighted that along this Apulian coastal zone the mean rates of vertical absolute movement result quite differential, from NW to SE (0.1±0.08 mm/yr, between MIS 5.5 and 5.1; +0.38±-0.35 mm/yr between MIS 5.1 and the present-day).*

*Finally, the current coastline shows high fragmentation degree, hence indicating morphological control connected to the postglacial eustatic oscillations to which, in recent and historical times, the prevailing modelling acted by coastal dynamic processes has been added.*

**Keywords:** lagoons, coastal geomorphology, Quaternary, Apulia.

**Introduzione**

Il settore costiero di Porto Cesàreo (Fig. 1), ubicato nel versante occidentale ionico della Penisola Salentina, si sviluppa tra Torre Lapillo a NW e Torre Squillace a SE, ed è caratterizzato da due bassi isolotti (I. della Malva e I. Grande o dei Conigli) ed una serie di scogli affioranti separati dalla terraferma da uno stretto braccio di mare.

La baia nord-occidentale, ampia circa 500 m e lunga 1000 m, è orlata verso mare dall'Isola Grande e da una serie di scogli ed isolotti (Isole Cesàree). La laguna di Porto Cesàreo, ampia in media 800 m e lunga 2500 m, è parzialmente chiusa verso mare dalla stretta penisola (250 m circa) di La Strea che si allunga per 2500 m parallelamente alla costa. La comunicazione tra laguna e mare aperto è assicurata solo nel tratto nord-occidentale del bacino; il varco ampio, circa 700 m, è in parte interrotto da scogli ed isolotti. In realtà, pur mostrando una morfologia di tipo lagunare (Fairbridge, 1968; Brambati, 1988, Carter e Woodroffe, 1994), la laguna non ne presenta i caratteri specifici quali il valore della salinità delle acque, le associazioni biocenotiche e di specie di molluschi tipici di ambienti salmastri (Cinelli et al., 1988). Allo stato, quindi, è una baia subellittica caratterizzata da bassi fondali e scarso idrodinamismo, quest'ultimo testimoniato dal-



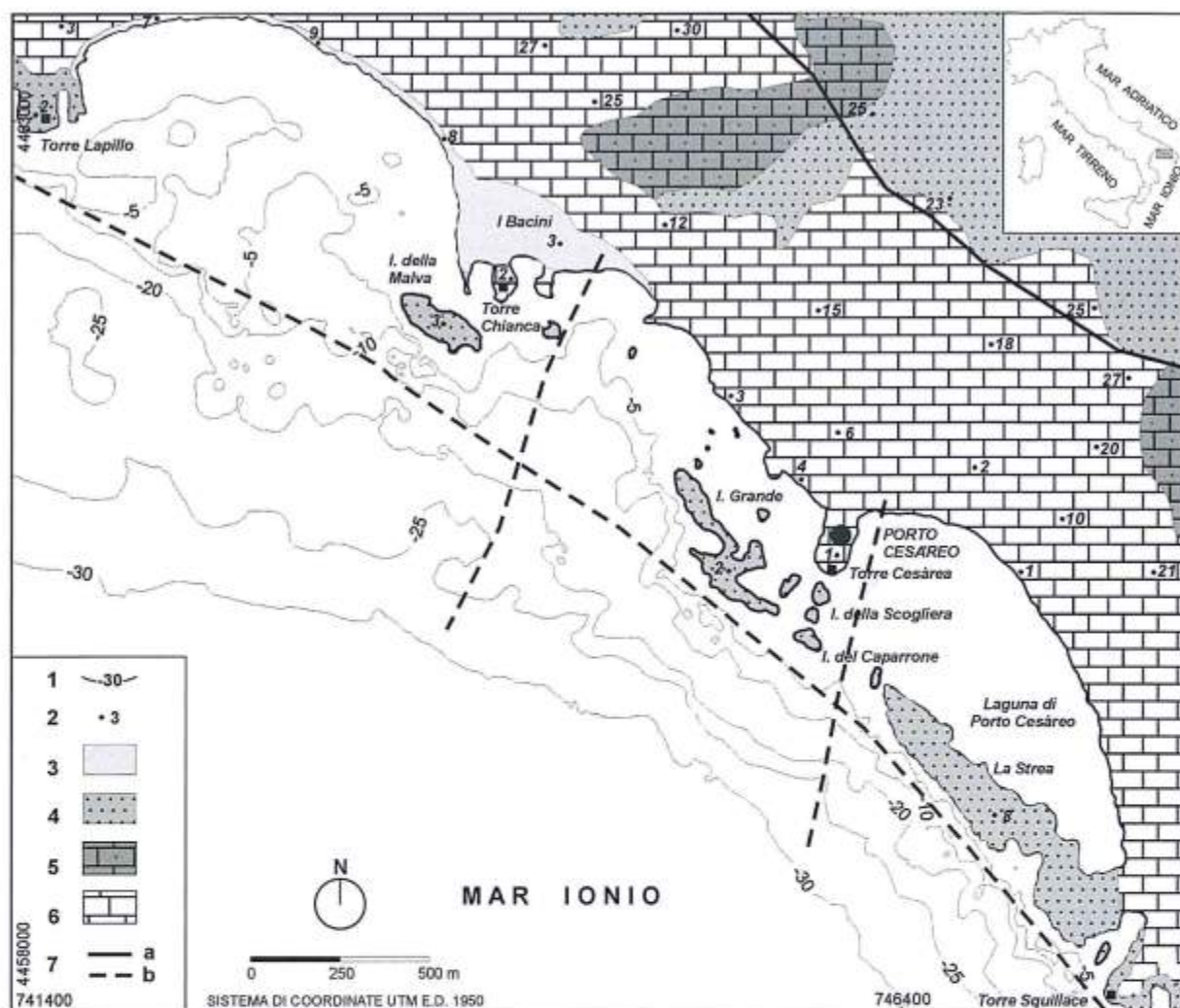


Figura 1 - Schema geologico semplificato del settore costiero di Porto Cesareo; 1) isobata (-m); 2) punto quotato (m s.l.m.); 3) depositi di spiaggia e cordone dunare recenti ed attuali; 4) calcareniti; a) Pleistocene inferiore-superiore; b) Pliocene medio-superiore; 5) calcari mesozoici; 6) faglia: a) certa; b) sepolta o presunta.

l'insediamento di alcune specie floro-faunistiche marine in corrispondenza di *facies* a sedimenti fini (Passeri, 1973). Tuttavia, nell'accezione di Congxian e Ping (1991), dal punto di vista strettamente morfologico può essere classificata come *laguna aperta*, ovvero un tratto di mare parzialmente ridossato, caratterizzato da ampi canali o soglie, da un pronunciato ricambio delle acque e scarsa sedimentazione pelitica.

L'entroterra che sottende le baie e la laguna è caratterizzato da spiagge sabbiose limitate da cordoni dunari attuali, da falesie alte solo qualche metro in corrispondenza dei promontori e degli isolotti e da una serie di terrazzi marini più o meno ampi, lembi di paleofalesie e di spiagge fossili (*beach rocks*) *sensu* Paskoff e Sanlaville (1983).

Le superfici spianate presentano depressioni morfologiche, spesso interessate da fenomeni di alluvionamento a seguito di intense precipitazioni. Alcune di queste, di solito le più estese, sono ubicate in prossimità della costa e sono state interessate nell'ultimo cinquantennio da interventi di bonifica.

Sono altresì evidenti le tracce di reticoli idrografici, talvolta ben incisi, in genere senza evidenti linee spartiacque; l'assenza di deflusso superficiale a vantaggio di quello profondo è da correlare all'elevata permeabilità per fessurazione e carsismo del complesso carbonatico di base.

L'analisi geomorfologica condotta nelle aree emerse e sommerse di questo settore litoraneo ha consentito di

definire che i tratti salienti del disegno costiero attuale e la morfologia dei fondali antistanti sono correlabili all'azione di modellamento operata dai processi tettono-carsici, prevalenti nel passato (Zezza, 1975; Grassi et al., 1982; Abbazzi et al., 1996), a fenomeni eustatici tardopleistocenici-olocenici (Mastronuzzi et al., 1989), all'erosione per opera del moto ondoso e a processi dinamici litoranei, sia recenti sia attuali.

### **Inquadramento geologico**

L'area in studio è attestata su un'impalcatura carbonatica d'età cretacea (Fig. 1) che costituisce buona parte dell'ossatura dell'intera regione pugliese (Ciaranfi et al., 1988). I depositi carbonatici, costituiti da calcari e dolomie stratificati di ambiente di piattaforma, potenti oltre 4000 m, affiorano in zona con uno spessore di soli 100 m (Ricchetti e Nuovo, 1988). Il substrato carbonatico, emerso dopo il Cretaceo, è ricoperto in maniera discontinua da depositi terrigeni, prevalentemente calcarenitici, messi in posto nel corso di varie fasi trasgressive succedutesi tra la fine del Pliocene medio ed il Pleistocene (Palmentola e Vignola, 1980). Il lungo periodo di emersione dei depositi carbonatici mesozoici ha prodotto una spinta carsificazione, similmente a quanto osservato da Abbazzi et al. (1996) nei calcari affioranti nella provincia di Foggia, ricoperti da depositi del Pleistocene medio. Durante il Pliocene la tettonica distensiva ha controllato la sedimentazione, individuando alti e bassi morfostrutturali e formando una successione di depositi di ambienti gradualmente meno profondi (Capuano et al., 1996). Gli effetti di queste fasi tettoniche hanno determinato l'assetto geomorfologico, isolando un ampio pilastro tettonico allungato in direzione NW-SE, in seguito segmentato in aree a differente dislocazione (rilievi del Gargano, delle Murge e del Salento; Largaiolli et al., 1969).

La sostanziale sommersione della Penisola Salentina è durata dalla fine del Pliocene medio fino alla fase finale del Siciliano (Palmentola e Vignola, 1980); subito dopo, a partire dal Pleistocene medio, ebbe inizio la fase conclusiva dell'evoluzione geodinamica del territorio pugliese caratterizzata da un sollevamento discontinuo e differenziato dell'intero sistema che causò un progressivo ritiro del mare, con migrazione delle linee di riva fino a raggiungere l'attuale posizione (Ricchetti, 1999). Infatti, mentre il settore centro-adriatico continuava ad essere influenzato da fenomeni di subsidenza, l'avampaese pugliese e la fossa bradanica subivano un sollevamento discontinuo (0.2-0.5 mm/anno; Ricchetti et al., 1994; Doglioni et al., 1996). Gli effetti di quest'ultimo, unitamente alle fluttuazioni glacioeustatiche, sono testimoniati dai numerosi terrazzi presenti a varie altezze sui versanti costieri e talora nelle valli fluviali, i quali conferiscono al paesaggio un caratteristico assetto a gradinata (Sestini, 1963). In particolare, nel Salento sono state osservate le tracce di almeno dieci paleolinee di riva dislocate tra 180 e 2-3 m s.l.m. (Ciaranfi, 1999), riferibili all'intervallo di tempo compreso tra 800 e 20 ka *b.p.* e rappresentate da superfici d'abrasione marina su cui sono conservati lembi di depositi marino-costieri d'età pleistocenica (Boenzi e Ricchetti, 1999).

Dal Pleistocene medio la regione fu nuovamente sollevata per la riattivazione di antiche faglie con orientamento NW-SE; la combinazione tra sollevamento e tettonica disgiuntiva ha contribuito a delineare l'attuale morfologia del paesaggio, caratterizzato da lunghe dorsali asimmetriche (Serre Salentine) separate da depressioni subpianeggianti.

### **Assetto geomorfologico**

Le oscillazioni del livello del mare, in conseguenza di fenomeni glacioeustatici e neotettonici (Bosi et al., 1996), hanno determinato, a partire dal Pleistocene medio, intense azioni erosive sui depositi dell'Unità Bradanica. Nell'area in studio sono pertanto presenti lembi di depositi calcarenitici infrapleistocenici disposti parallelamente alla linea di costa, con spessori contenuti entro i 10 m (Ricchetti e Nuovo, 1988). Su tali terreni sono presenti depositi dunari calcarenitici tra Serra Iannuzzi, a W (circa 4 km a N di Torre Lapillo), e Torre del Cardo (circa 7 km a N di Porto Cesàreo), ad E, che Ricchetti e Nuovo (1988) attribuiscono probabilmente al Pleistocene superiore; questa successione, rinvenuta a circa +50 m, consente comunque di ricostruire la presenza di un'antica linea di riva sollevata a seguito di eventi tettonici. Tali depositi, potenti una decina di metri, raggiungono anche quote di +62 m (Cappella lo Cagnano). A tergo, invece, s'individua un'area subpianeggiante (+50 m) ascrivibile ad un'antica palude retrodunare, tuttora sede di episodici allagamenti.

In prossimità della costa, tra +15 e +20 m, sono presenti altri depositi marini calcarenitici e biocalcarenitici, probabilmente suprapleistocenici e comunque più recenti dei precedenti; anche in tal caso è possibile ricostruire la presenza di una paleolinea di riva caratterizzata da una falesia costiera alta circa 10 m. Su questi depositi poggiano cordoni dunari, in gran parte smantellati (Isola Grande, Penisola di La Strea, entro-

terra di Porto Cesàreo). Al di sopra dell'attuale livello del mare sono invece assenti le tracce di ulteriori fluttuazioni positive del livello marino in epoca storica.

I lembi di terrazzi marini subpianeggianti sono tra di loro raccordati da ripide scarpate con sviluppo parallelo all'attuale linea di costa e quote pressoché uniformi in tutta l'area indagata, sebbene con pendenze differenti. Lungo le scarpate sono presenti incisioni che, talvolta, dissecano le superfici dei terrazzi e si prolungano anche lungo i versanti dei rilievi collinari. Tali incisioni costituiscono gli elementi di un paleoreticolo idrografico subparallelo e ad andamento cataclinale, di cui non sono più evidenti gli spartiacque; le paleolinee di drenaggio giungono fino al mare solo in corrispondenza delle superfici topograficamente più basse, mentre terminano laddove sono presenti le dune costiere attuali. Questo particolare assetto del reticolo idrografico, indotto sia dal modellamento carsico (le reti di drenaggio individuano bacini endoreici con spartiacque non ben delineati), sia dalle numerose fluttuazioni del livello marino per cause tettono-climatiche durante il Pleistocene e l'Olocene, agevola la raccolta ed il ristagno delle acque superficiali nelle aree subpianeggianti in occasione di intense precipitazioni.

Molto diffuse, soprattutto in corrispondenza di lineamenti tettonici, sono le morfologie di genesi carsica, sia ipogee sia epigee; tra queste, sono comuni le depressioni chiuse, estese per alcuni chilometri, con forma a conca o a canale. Le aree depresse presenti lungo la costa si sono formate in seguito allo sbarramento di insenature ad opera di cordoni litoranei che hanno favorito anche la formazione di stagni retrodunari.

Sedimenti attuali di spiaggia emersa e di duna sono presenti in forma di depositi carbonatici che ricoprono strette fasce delle baie e delle cale presenti tra Torre Lapillo e Torre dell'Inserraglio (circa 6 km a SE); gli originali cordoni dunari, alle cui spalle sono presenti aree palustri retrodunari bonificate (i Bacini), mostrano un'altezza massima pari a +7 m e sono interessati da un'intensa urbanizzazione turistico-residenziale.

### Analisi dei dati

Il rilievo batimetrico di dettaglio (Fig. 2), le osservazioni di campagna e le indagini subacquee dirette hanno consentito di mettere in evidenza e correlare gli aspetti morfologici delle aree sommerse ed emerse del trat-

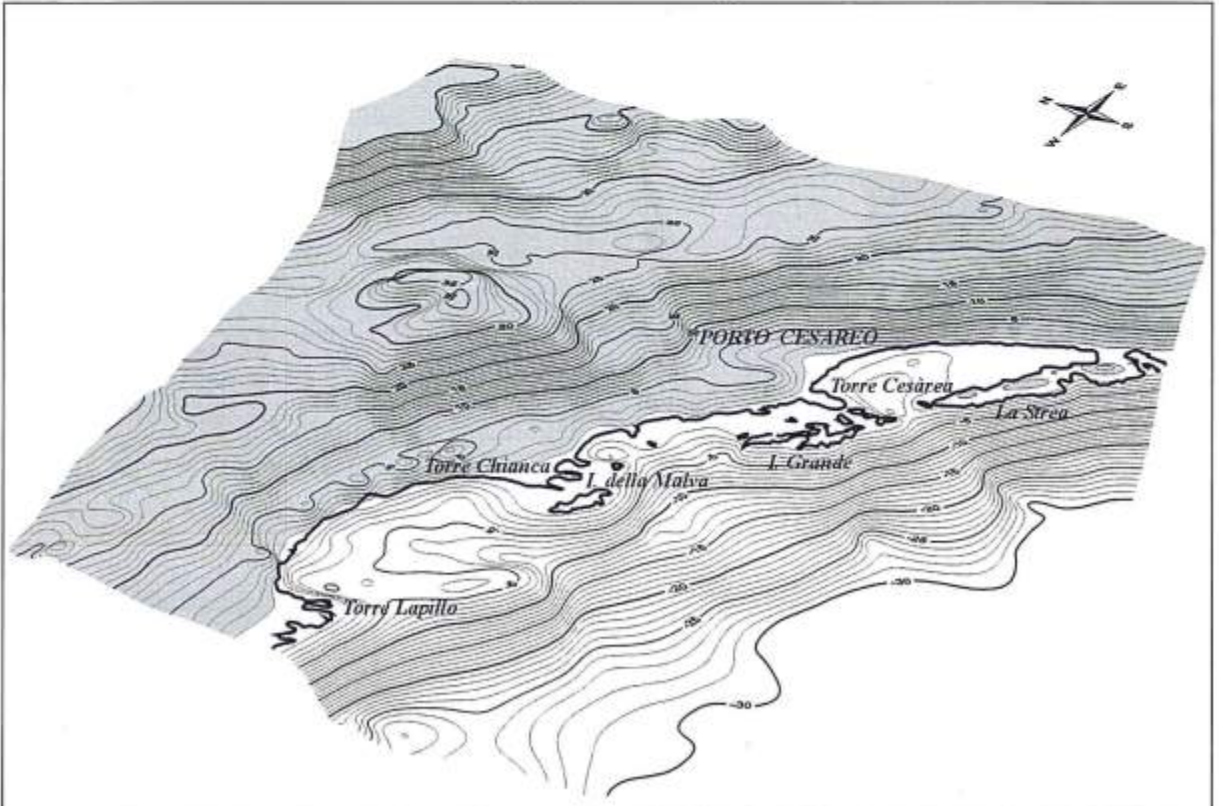


Figura 2 - Stereogramma della zona costiera emersa e sommersa di Porto Cesàreo. Isoipse (+) ed isobate (-) in metri.

ro costiero antistante Porto Cesàreo (Fig. 3).

I fondali prospicienti la costa sono in prevalenza costituiti da rocce carbonatiche cretatiche ricoperte da lembi di calcareniti suprapleistoceniche e talvolta (settor compreso tra Torre Lapillo e La Strea) da sottili e ristretti *trottoirs* algali e da sedimenti attuali (Passeri, 1973; Ambrosano et al., 1986); sedimenti sabbiosi bioclastici sono presenti a ridosso della costa (Viel et al., 1986) e talora sono prevalenti nelle barre all'interno delle baie e nella laguna.

Il disegno costiero è caratterizzato dall'alternarsi di baie semicircolari o subellittiche (Porto Cesàreo), di promontori poco pronunciati (T. Lapillo, T. Chianca, T. Cesàrea, T. Squillace), di isolotti (I. Grande, I. della Malva, I. della Scogliera, I. del Caparrone) e di affioramenti rocciosi, sia emersi sia sommersi. La costa è altresì dissecata da incisioni, allineate ortogonalmente, che talvolta si prolungano anche in ambiente sommerso; il loro sbocco è talora caratterizzato da esigui conoidi detritici in prevalenza sabbiosi.

La piattaforma costiera si estende dalla battigia fino a circa 5 m di profondità, mostrando una maggiore ampiezza all'interno delle cale e a ridosso delle isole Grande e della Malva, dove sono anche presenti incisioni sommerse modellate in ambiente subaereo ed attualmente in parte sepolte da sedimenti. I sedimenti del fondo sono costituiti da sabbie fini depositate su un substrato calcarenitico; solo nella laguna di Porto Cesàreo, caratterizzata da profondità intorno al metro, i depositi sabbiosi sono confinati in una stretta fascia che si allunga a ridosso della Penisola di La Strea.

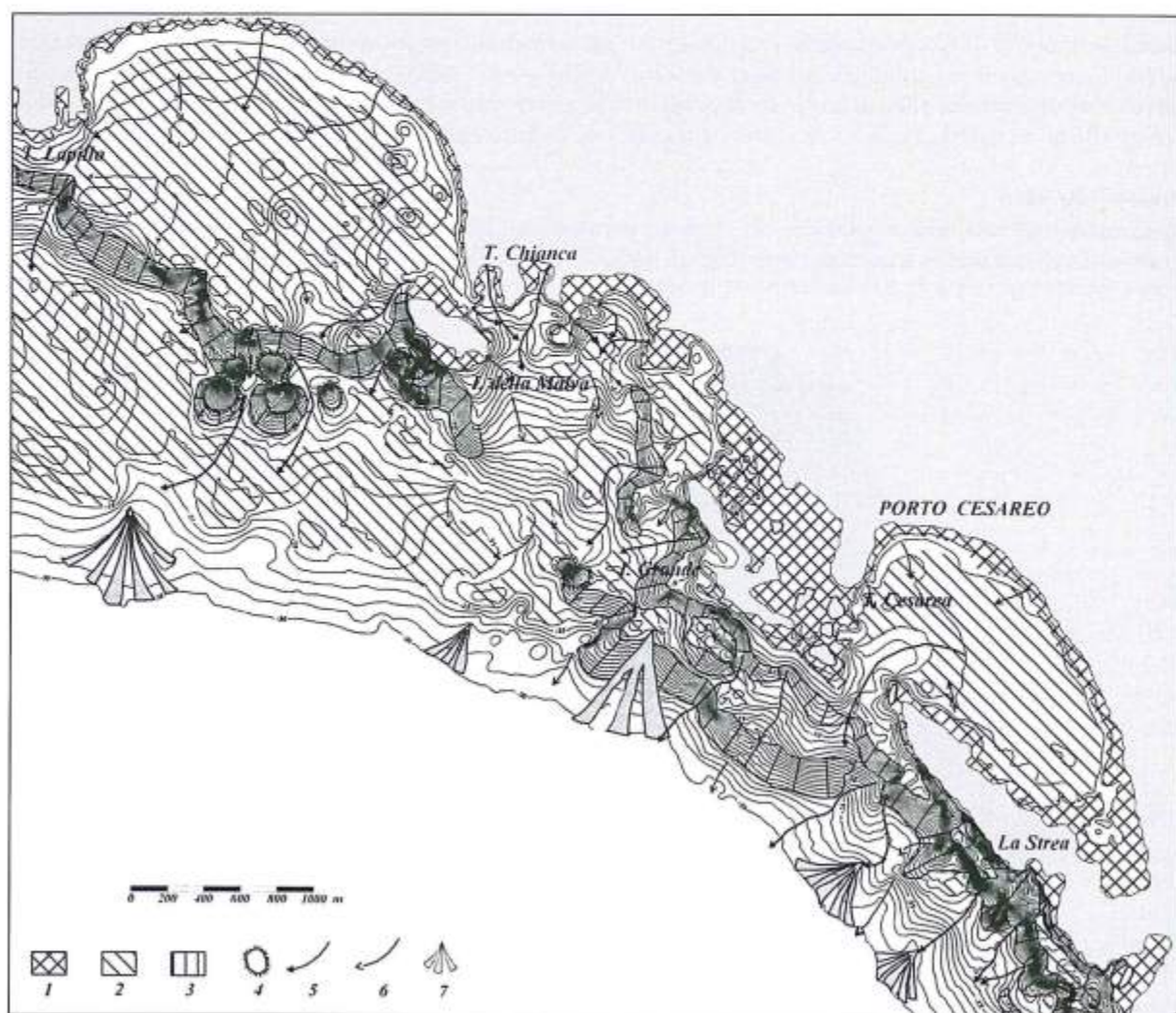


Figura 3 - Carta geomorfologica schematica della costa sommersa di Porto Cesàreo. Isobate (-) in metri; 1) piattaforma costiera; 2) terrazzo marino; 3) scarpata di paleofalesia; 4) scoglio isolato o faraglione; 5) incisione principale; 6) incisione secondaria; 7) paleoconoide sommerso.

Le aree sommerse presentano forme ricollegabili ad almeno due paleofalesie, pressoché parallele all'attuale linea di costa e dislocate a varie profondità: con orlo a -5 e piede a -18/-20 m circa, quella più prossima alla riva, e rispettivamente a -15/-20 e -27/-30 m circa, quella distale.

La loro evoluzione morfologica è stata verosimilmente controllata da linee tettoniche con direzione appenninica (NW-SE) d'età compresa tra il Pliocene medio e la fine del Siciliano (Palmentola e Vignola, 1980; Ciaranfi et al., 1988); i blocchi fagliati si sarebbero poi ribassati verso mare nel periodo compreso tra il Siciliano ed il Tirreniano (Palmentola e Vignola, 1980). Nella porzione centrale, dove la paleofalesia ubicata a minore profondità presenta interruzioni nel suo sviluppo, il controllo è stato operato anche da faglie ad andamento NNW-SSE. Alla sommità, entrambe le paleofalesie sommerse sono caratterizzate da lembi di superfici spianate, mentre alla base sono presenti superfici terrazzate ricoperte in prevalenza da depositi sabbiosi grossolani attuali.

Nell'area sud-orientale i fondali sono inoltre caratterizzati da alcuni lembi di terrazzi d'abrasione marina ubicati alle profondità di circa -6/-8 e -10/-12 m, modellati dall'azione del mare durante i paleostazionamenti pleistocenici. Nell'area nord-occidentale, invece, alla base della falesia sommersa sono presenti forme che rappresentano il relitto di faraglioni o blocchi carbonatici un tempo emersi. Questi ultimi sono stati modellati dall'azione del mare ed attualmente risultano incrostati da Rodoficee calcaree e colonizzati da Echinoidi.

Tra Torre Lapillo e l'Isola della Malva la paleofalesia sommersa mostra una marcata convessità verso Sud. L'evoluzione morfologica della costa è stata quindi interessata nel tratto più occidentale da una singolare inversione orizzontale del disegno costiero, con sostituzione progressiva di un'antica linea di costa convessa verso Sud con l'attuale ampia cala.

Il restante tratto costiero, concavo verso Sud, è invece caratterizzato dalla presenza dell'allineamento delle isole e degli isolotti che si raccordano alla Penisola di La Strea, i quali rappresentano forme relitte di una paleomorfologia costiera ad andamento più o meno continuo e regolare.

Lungo l'intero tratto costiero, ed in particolare alla base della paleofalesia ubicata a maggiore profondità, sono presenti numerose falde detritiche costituite da sabbia grossolana, a testimonianza di un'intensa erosione subaerea connessa all'attività neotettonica.

Nel settore centro-settentrionale sono presenti estesi terrazzi marini, ubicati tra -22 e -25 m e ricoperti da coltri sedimentarie attuali; queste forme sono frequentemente dissecate da marcate incisioni che potrebbero rappresentare forme relitte di un paleoreticolo idrografico d'origine subaerea, al cui sbocco sono presenti conoidi detritici.

La costa, nella porzione orientale, presenta in ambiente sottomarino un'incisione valliva principale (Porto Cesàreo) con andamento angolare, inizialmente orientata all'incirca SE-NW, poi NNE-SSW; tale incisione, originatasi molto verosimilmente in ambiente subaereo e controllata da allineamenti tettonici con andamento appenninico ed antiappenninico, si estende sino a circa 30 m di profondità.

Altre incisioni sottomarine principali, presenti a Est e Ovest di quest'ultima, presentano un orientamento NE-SW, mentre numerose incisioni secondarie si riconoscono in tutta l'area indagata, disegnando nell'insieme un paleoreticolo idrografico a *pattern* parallelo. All'interno della baia nord-occidentale e parzialmente nell'insenatura di Porto Cesàreo il reticolo presenta un *pattern* radiale centripeto, con depocentro asimmetrico, che rappresenta il probabile risultato della sovrapposizione di una paleoidrografia più recente su quella tardopleistocenica subaerea.

### **Evoluzione morfologica**

Sulla base delle differenti forme osservate e dell'assetto geomorfologico emerso e sommerso, si ritiene che nell'area in studio dal Pliocene superiore fino alla fase finale del Siciliano si sia attivata una serie di faglie normali, parallele fra di loro ed alla costa, con orientamento NW-SE (Palmentola e Vignola, 1980), che hanno determinato un ribassamento dell'area costiera. Successivamente, dal Siciliano alla fine del Tirreniano, si è manifestato un nuovo sollevamento, mentre verosimilmente perdurava il ribassamento verso mare dei blocchi dislocati, con sviluppo di lineamenti orientati in direzione N-S; tale ribassamento probabilmente si è protratto sino a quasi tutto il Tirreniano (MIS 5.5).

Successivamente, si è avuta una fase di sollevamento ed infine, a partire da 85 ka *b.p.*, si sono sedimentati depositi di spiaggia (MIS 5.1). Nel Tirreniano, lungo la costa ionica della Penisola Salentina si depositarono

no sottili livelli calcarenitici a *Strombus bubonius*; la quota originaria del livello marino globale durante tale periodo sembra sia stata pari a +6 m rispetto al livello marino attuale (Ku et al., 1974).

Allo stato, invece, tali depositi sono presenti in maniera discontinua (Palmentola e Vignola, 1980), risultando dislocati dagli eventi tettonici ad una quota generalmente contenuta entro i +15 ed i +30 m tra Lido Silvana a Santa Maria di Leuca (Dai Pra, 1982; Bordoni e Valensise, 1998; Ciaranfi, 1999), circa 70 km a SE dell'area in studio, e con quote gradualmente più basse procedendo da NW verso SE. Solo in posizione baricentrica, nei pressi di Torre di Castiglione (7 km a NW di Porto Cesàreo), tale livello è dislocato ad una quota di soli +2 m (Dai Pra, 1982), risultando del tutto assente a Porto Cesàreo (Dai Pra e Hearty, 1989) e riaffiorando circa 20 km a SE, nei pressi dell'Ospedale di Gallipoli, ad una quota di +3/+4 m (Dai Pra e Hearty, 1988).

Pertanto, posteriormente all'episodio deposizionale a *Strombus bubonius*, lungo il versante ionico della Penisola Salentina sono avvenuti movimenti tettonici differenziali (Dai Pra, 1982), testimoniati dalle diverse quote dei depositi del massimo trasgressivo; tali movimenti si sono esauriti successivamente a 85 ka *b.p.* (MIS 5.1). Infatti, nell'area di Porto Cesàreo i depositi di spiaggia messi in posto 85 ka *b.p.* sono direttamente sovrapposti ai depositi marini costituiti da calcari bioclastici con età superiore a 300 ka *b.p.*, posti a tetto del substrato carbonatico mesozoico (Dai Pra e Hearty, 1989).

Le differenti quote dei depositi ascrivibili al picco interglaciale testimoniano, quindi, la presenza di faglie trasversali alla costa, con orientamento N-S; queste, verosimilmente individuate nell'entroterra dell'area in studio, combinate con quelle ad orientamento NW-SE, avrebbero determinato un consistente ribassamento della zona costiera, con l'effetto di una più prolungata sommersione dell'area di Porto Cesàreo a profondità maggiore o comunque tale da non consentire un habitat idoneo alla sopravvivenza del gasteropode *Strombus bubonius*. Tali lineamenti potrebbero essere legati a movimenti dell'intera Penisola Salentina, con rotazione oraria (Guerricchio, 1988) o antioraria (Tozzi et al., 1988) e con probabile articolazione proprio nell'area di Porto Cesàreo.

Infine, la genesi della laguna è legata verosimilmente anche all'ingressione marina nelle depressioni retrodunari in seguito allo smantellamento di preesistenti cordoni dunari (De Pippo et al., 2001a e 2001b), oggi in parte sommersi, a causa della risalita del livello marino successiva all'ultimo pleniglaciale pleistocenico (Pirazzoli, 1981 e 1993; Alessio et al., 1996).

## Conclusioni

Sulla base di rilevamenti geomorfologici diretti condotti in ambiente subacqueo, unitamente a rilievi ecobatimetrici, è stato possibile ricostruire l'evoluzione morfologica dell'area costiera emersa e sommersa.

La costa cesàrea mostra una morfodinamica caratterizzata da una singolare inversione orizzontale della fisiografia, con sviluppo di baie subellittiche, di una laguna aperta (*sensu* Congxian e Ping, 1991) e progressiva genesi di forme relitte emerse e sommerse (isolotti, scogli, affioramenti rocciosi, lembi di paleofalesie e terrazzi marini, spiagge fossili, faraglioni) a spese dei promontori, oggi ubicate nell'entroterra, all'interno delle cale ed in ambiente sottomarino (Fig. 4).

Questo modellamento, riscontrato anche in zone costiere tirreniche (De Pippo et al., 1996; De Pippo et al., 2004), è connesso alla mutua interazione spazio-temporale tra più fattori, fenomeni e processi morfodinamici, quali l'alternanza di diversi affioramenti rocciosi costieri, con differente resistenza all'erosione, e le rapide fluttuazioni verticali tettono-eustatiche; elementi che hanno peraltro modellato un paesaggio interessato da forme carsiche impostate in prevalenza su lineamenti tettonici. Tale evoluzione ha determinato nell'arco del Quaternario un generale incremento del grado di frammentazione della linea di riva (De Pippo et al., 2004).

La ricostruzione delle tappe morfoevolutive fa ritenere che nel corso del Siciliano la regione emerse, frammentandosi per l'attivazione di faglie ad andamento NNW-SSE e NW-SE anche nell'area costiera di Porto Cesàreo; il successivo ribassamento verso mare durò fino a 85 ka *b.p.*

L'esposizione subaerea nel Siciliano avrebbe determinato un'estesa carsificazione dei calcari proprio in corrispondenza dei lineamenti tettonici, processo questo molto frequente in altre aree pugliesi. Le depressioni carsiche corrisponderebbero quindi alle attuali cale e baie delimitate verso mare da lembi carbonatici mesozoici relitti, sormontati dalle calcareniti del Pleistocene medio, più o meno allineate lungo la direzione che caratterizza l'antica linea di costa.

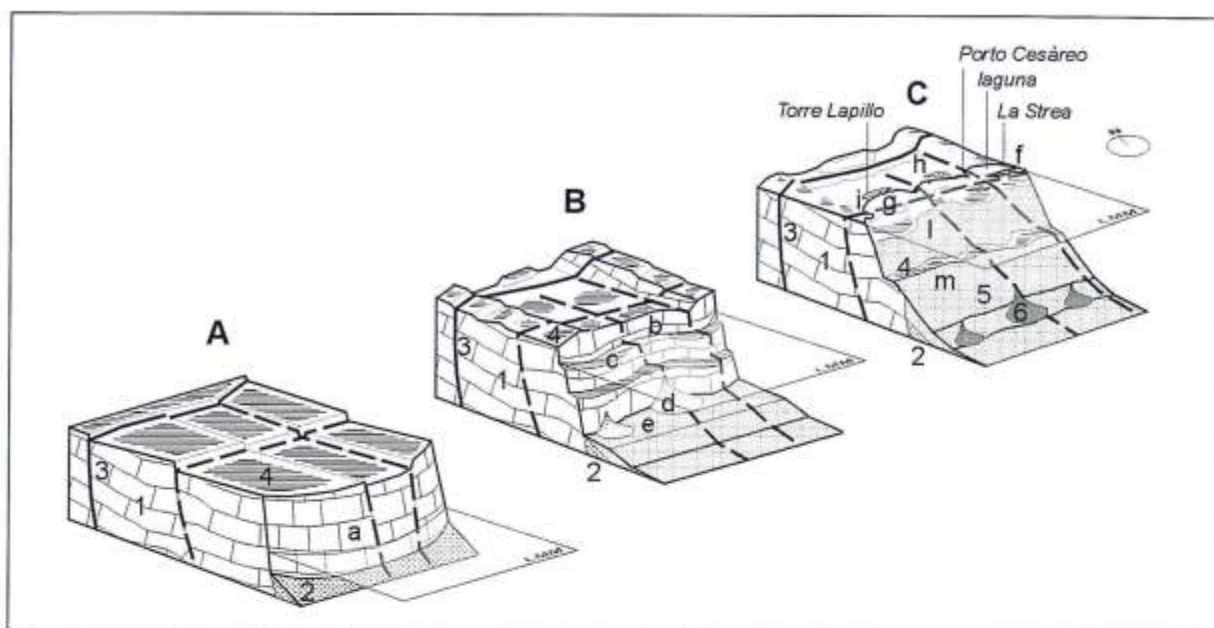


Figura 4 - Schema dell'evoluzione morfologica pleisto-olocenica del settore costiero di Porto Cesareo, caratterizzato da una singolare inversione orizzontale della fisiografia riconducibile alla mutua interazione di movimenti verticali tettonici, fluttuazioni glacioeustatiche, fenomeni carsici e processi dinamici litoranei tarsoquaternari.

A) Pleistocene inferiore-medio: costa a falesia alta convessa (a);

B) Pleistocene medio-superiore: arretramento della costa con genesi di una falesia degradata o di linea di faglia (b), formazione di terrazzi d'abrasione marina (c), conoidi di deiezione (d) ed accumulo di sedimenti sabbioso-ciottolosi al piede (e), a seguito dell'interazione tra sollevamento tarso-neotettonico e risalita del livello marino postglaciale;

C) Pleistocene superiore-Olocene: inversione orizzontale della fisiografia costiera con genesi di una falesia bassa concava (f), caratterizzata da ampie baie (g) con sviluppo di dune (h) tra l'epoca greco-romana ed il recente, in fase smantellamento, nonché da cordoni litorali attuali (i); le due scarpate sommerse rappresentano i lembi delle paleofalesie pleistoceniche, di cui quella proximale (-5/-20 m) è più o meno continua (l), mentre quella distale (-15/-30 m) è in parte sepolta da sedimenti sabbiosi recenti (m).

Legenda: 1) rocce carbonatiche mesozoiche e quaternarie; 2) sedimenti sabbiosi: a) Pleistocene superiore; b) Olocene; 3) faglia: a) certa; b) sepolta o presunta; 4) terrazzo marino; 5) paleoconoide; 6) orlo di paleofalesia sommersa: a) ± continuo; b) parzialmente mascherato da sedimenti.

Le forme relitte riconoscibili dall'analisi morfologica e dalle osservazioni dirette dei fondali marini confermano che la costa presenta elementi di un modellamento antico connesso a prevalenti processi tettono-carsici e subordinatamente all'azione del mare. Le diffuse forme carsiche hanno verosimilmente contribuito all'origine delle cale e della laguna che su di esse si sono in parte impostate; queste sono rappresentate da depressioni profonde al massimo 5 m che si estendono per alcuni chilometri lungo lineamenti tettonici importanti e sono riparate dall'azione del moto ondoso da promontori, isolotti e circoscritti affioramenti rocciosi. L'assenza dei depositi dunari medio-olocenici, infine, presenti invece in siti prossimi all'area in studio, indicherebbe che la porzione più ampia di piattaforma continentale ionica che sottende l'area di Porto Cesareo sia rimasta sommersa per tutto l'Olocene. Infatti, nell'area indagata sono presenti depositi marini con età da medio-pleistocenica ad olocenica, trasgressivi sui calcari mesozoici del substrato; alla base, invece, la successione è costituita da calcari bioclastici del Pleistocene medio (300 ka *b.p.*), cui seguono depositi di spiagge a tasca (*pocket beach*) a fauna banale (80 ka *b.p.*) ricoperti da depositi dunari d'epoca greco-romana, medievale e recenti, in fase di smantellamento.

I lembi di paleofalesie, terrazzi marini emersi e talora spiagge fossili, presenti a quote comprese tra +2 e oltre +60 m, sono stati dislocati dagli eventi tettonici quaternari. Inoltre, in accordo con quanto osservato in alcune zone costiere tirreniche (Cinque et al., 1995; De Pippo et al., 1998; De Pippo e Donadio, 1999), la genesi dei terrazzi d'abrasione marina e delle loro forme accessorie (solchi di battente, pozze di scogliera), attualmente sommersi a profondità comprese tra 6 e 25 m e modellati nell'arco del Pleistocene, è verosi-

milmente poligenetica e distinta: policiclica e forse polifasica, ovvero pre- e sin-tettonica, oltre che glacioeustatica, per quelli posti a profondità maggiori di 20 m; in prevalenza glacioeustatica postglaciale e subordinatamente tardo- e post-tettonica, ovvero più recente, per quelli presenti a profondità minori di tale quota. Infine, considerando gli elementi indicatori di paleostazionamenti del mare, quali l'ubicazione e la quota delle spiagge fossili (*beach rocks* a *Strombus bubonius*) riferita all'attuale livello marino, nonché le evidenze di attività tettonica e le curve di risalita del livello marino globale negli ultimi 125 ka (Grootes et al., 1993; Taylor et al., 1993) e del Mar Tirreno negli ultimi 43 ka (Alessio et al., 1996), tra di loro integrate, si evince che per questo settore costiero salentino i tassi di variazione verticale assoluta, espressa in termini medi, risultano alquanto differenziati. Infatti, a differenza di quanto affermato da altri Autori, procedendo da NW verso SE i valori calcolati per l'intervallo temporale di 40 ka, intercorso tra i MIS 5.5 e 5.1, oscillano tra 0.1 mm/anno (Torre di Castiglione, 7 km a NW) e 0.05+0.08 mm/anno (Ospedale di Gallipoli), mentre sono quasi nulli per la zona sita 70 km a SE di Porto Cesàreo; invece, i tassi medi nell'intervallo temporale di 85 ka, tra il MIS 5.1 e l'attuale, risultano compresi tra +0.38 mm/anno nella zona centro-settentrionale e -0.18/-0.35 mm/anno in quella sud-orientale.

### Bibliografia

- Abbazzi L., Benvenuti M., Boschian G., Dominici S., Masini F., Mezzabotta C., Piccini L., Rook L., Valleri G. e Torre D. (1996) - *Revision of the Neogene and Pleistocene of the Gargano Region (Apulia, Italy). The Marine and continental successions and the mammal faunal assemblages in an area between Apricena and Poggio Imperiale (Foggia)*. Atti 77<sup>a</sup> Riun. Estiva, Congr. Naz. Soc. Geol. It., Geologia delle Aree di Avampaese, Bari, 26-28 settembre 1994, Mem. Soc. Geol. It., LI(1): 383-402.
- Alessio M., Allegri L., Antonioli F., Belluomini G., Improta S., Mandra L. e Preite M. (1996) - *La curva di risalita del mare Tirreno negli ultimi 43 ka ricavata da datazioni su speleotemi sommersi e dati archeologici*. Atti Conv. Int. "Geosub '94", Palinuro (SA), giugno 1994, Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LII: 261-276.
- Ambrosano E., Ferretti O. e Falcinelli F. (1986) - *Tipologia geomorfologica costiera e caratterizzazione mineralogica dei sedimenti di spiaggia del litorale pugliese*. In: Indagine Ambientale del Sistema Marino Costiero della Regione Puglia. Elementi per la Definizione del Piano delle Coste. ENEA, Roma, 55-67.
- Boenzi F. e Ricchetti G. (1999) - *Aspetti geomorfologici*. In: Itinerari Puglia e Monte Vulture. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., BE-MA ed., pp. 287.
- Bordoni P. e Valensise G. (1998) - *Deformation of the 125 ka marine terrace in Italy: tectonic implications*. In: I. Stewart e C. Vita-Finzi (eds.) Coastal Tectonics, Geol. Soc., London, spec. publ., 146: 71-110.
- Bosi C., Carobene L. e Sposato A. (1996) - *Il ruolo dell'eustatismo nella evoluzione geologica nell'area mediterranea*. Atti 77<sup>a</sup> Riun. Est. - Congr. Naz. Soc. Geol. It., "Geologia delle Aree di Avampaese", Bari, 26-28 settembre 1994, Mem. Soc. Geol. It., LI(1): 363-382.
- Brambati A. (1988) - *Lagune e stagni costieri: due ambienti a confronto*. In: Le lagune costiere, ricerca e gestione, G.C. Carrada, F. Cicogna e E. Fresi (a cura di), CLEM ed., pp. 9-33.
- Capuano N., Pappafico G. e Augelli G. (1996) - *Ricostruzione dei sistemi deposizionali plio-pleistocenici del margine settentrionale dell'Avanfossa Pugliese*. Atti 77<sup>a</sup> Riun. Est. - Congr. Naz. Soc. Geol. It., "Geologia delle Aree di Avampaese", Bari, 26-28 settembre 1994, Mem. Soc. Geol. It., 51(1): 273-292.
- Carter R.W.G. e Woodroffe C.D. (eds.) (1994) - *Coastal Evolution - Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. A Contribution to IGCP Project 274, Cambridge University Press, pp. 517.
- Ciaranfi N. (1999) - *Le successioni plioceniche e pleistoceniche dell'avampaese*. In: Itinerari Puglia e Monte Vulture. Guide Geologiche Regionali. Soc. Geol. It., BE-MA Ed., pp. 287.
- Ciaranfi N., Pieri P. e Ricchetti G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia Centromeridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 42: 449-460.
- Cinelli F., Cognetti G., Grasso M., Monelli S., Orlando E. e Pagliai A.M. (1988) - *Studio ecologico dell'area marina di Porto Cesàreo*. Regione Puglia, Congedo ed., Galatina, pp. 138.
- Cinque A., De Pippo T. e Romano P. (1995) - *Coastal slope terracing versus relative sea level changes. Deductions based on computer simulations*. Earth Surf. Proc. Landf., 20: 87-103.
- Congxian L. e Ping W. (1991) - *Stratigraphy of Late Quaternary barrier-lagoon depositional system along the coast of China*. Sedim. Geol., 72, Elsevier Sc. Publ., pp. 189-200.



- Dai Pra G. (1982) - *The late Pleistocene marine deposits of Torre Castiglione (southern Italy)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 5: 115-119.
- Dai Pra G. e Hearty P.J. (1988) - *I livelli marini pleistocenici del Golfo di Taranto. Sintesi geocronostratigrafica e tettonica*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 633-644.
- Dai Pra G. e Hearty P.J. (1989) - *Variazioni del livello del mare sulla costa ionica salentina durante l'Olocene. Epimerizzazione dell'isoleucina in Helix SP*. Mem. Soc. Geol. It., 42: 311-320.
- De Pippo T. e Donadio C. (1999) - *Morphology, genesis and evolution of rockpools along Italian coasts*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 22: 129-141.
- De Pippo T., Donadio C. e Pennetta M. (2001a) - *Evoluzione morfologica della laguna di Sabàubia (Mar Tirreno, Italia centrale)*. Geologica Romana, 36: 1-12.
- De Pippo T., Donadio C. e Pennetta M. (2001b) - *Morphological evolution of Lesina Lagoon (southern Adriatic, Italy)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 24: 29-41.
- De Pippo T., Donadio C. e Sgrosso A. (1998) - *Geomorfologia sottomarina di un settore della Penisola Sorrentina (Campania)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 21: 103-110.
- De Pippo T., Donadio C., Mazzarella A., Paolillo G. e Pennetta M. (2004) - *Fractal analysis applied to coastal and submarine features*. Z. Geomorph. N. F., 48(2): 185-199.
- De Pippo T., Donadio C., Russo F. e Valente R. (1996) - *Evoluzione morfologica e caratteristiche ambientali del tratto costiero occidentale napoletano*. VI Conf. Sc. Ann. Attiv. Ric. Dip.ti, Territorio ed Ambiente: Giornate Poster Ric. Gruppo Geomineral., Napoli, 27-29 marzo 1996, De Frede ed., pp. 150-151.
- Dogliani C., Mongelli F. e Pieri P. (1994) - *The Puglia uplift (SE Italy): an anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere*. Tectonics, 13(5): 1309-1321.
- Fairbridge R.W. (ed.) (1968) - *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold Book Corporation, NYC, pp. 1295.
- Grassi D., Romanazzi L., Salvemini A. e Spilotro G. (1982) - *Grado di evoluzione e ciclicità del fenomeno carsico in Puglia in rapporto all'evoluzione tettonica*. Geol. Appl. e Idrogeol., 17(2): 55-73.
- Groote P.M., Stuiver M., White J.W.C., Johnsen S. e Jouzel J. (1993) - *Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores*. Nature, 336: 552-554.
- Guerricchio A. (1988) - *Aspetti geologici sull'erosione dei litorali e loro influenza nel campo applicativo*. Geol. Appl. e Idrogeol., 23: 29-78.
- Ku T.L., Kimmel M.A., Easton W.H. e O'Neil T.J. (1974) - *Eustatic sea level 120.000 years ago on Oahu, Hawaii*. Science, 183: 959-962.
- Largaiolli T., Martinis B., Mozzi G., Nardin M., Rossi D. e Unfaro S. (1969) - *Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio 214 - Gallipoli*. Serv. Geol. d'It., Roma.
- Mastronuzzi G., Palmentola G. e Ricchetti G. (1989) - *Aspetti della evoluzione olocenica della costa pugliese*. Mem. Soc. Geol. It., 42: 287-300.
- Palmentola G. e Vignola V. (1980) - *Dati di Neotettonica sulla penisola Salentina (Fogli 204 "Lecce", 213 "Maruggio", 214 "Gallipoli", 215 "Otranto" e 223 "Capo S.Maria di Leuca"* - Contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica di Italia. C.N.R., Progetto Fin. Geodin., Sottopr. Neotett., vol. I: 173-202.
- Paskoff R. e Sanlaville P. (1983). *Les Côtes de la Tunisie, variations du niveau marin depuis le Tyrrhénien*. Maison de l'Orient Méditerranéen, Lyon, pp. 192.
- Passeri L. (1973) - *Sedimentazione carbonatica attuale e diagenesi precoce nella laguna di Porto Cesareo (Penisola Salentina)*. Boll. Soc. Geol. It., suppl. 1973, 92: 3-40.
- Pirazzoli P.A. (1981) - *Le variazioni del livello del mare durante il post-glaciale*. Riv. Geogr. It., LXXXVIII, 2, Firenze, pp. 154-164.
- Pirazzoli P.A. (1993) - *Global sea-level changes and their measurements*. Global and Planetary Change, 8, Elsevier Sc. Publ. B.V., Amsterdam (Holland), pp. 135-148.
- Pyökäri M. (1997) - *The provenance of beach sediments on Rhodes, southeastern Greece, indicated by sediment texture, composition and roundness*. Geomorphology, 18(3-4): 315-332.
- Ricchetti G. (1999) - *Inquadramento geologico*. In: Puglia e Monte Vulture. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., BE-MA ed., pp. 287.
- Ricchetti G. e Nuovo G. (1988) - *Aspetti geologici e geomorfologici*. In: F. Cinelli, G. Cognetti, M. Grasso, S. Monelli, E. Orlando e A.M. Pagliai (a cura di), Studio ecologico dell'area marina di Porto Cesareo, Regione Puglia, Congedo ed., Galatina (LE), pp. 14-23.

- Ricchetti G., D'Alessandro A., De Fino M., La Volpe L., Luperto Sinni E., Piccarreta G., Posenato R. e Reina A. (1994) - *Geologia delle aree di avampaese. Guida alla escursione pregressuale e alla escursione tematica sul Cretaceo murgiano*. Soc. Geol. It., 77<sup>a</sup> Riun. Est., Congr. Naz., Bari, 23-25 settembre 1994, pp. 86.
- Sestini A. (1963) - *Il Paesaggio*. In: Conosci l'Italia, Touring Club Italiano, Milano, vol. VII, pp. 352.
- Taylor K.C., Hammer C.U., Alley R.B., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gow A.J., Gundestrup N.S., Kipfstuhl J., Moore J.C. e Waddington E.D. (1993) - *Electrical conductivity measurements from GISP2 and GRIP Greenland ice cores*. Nature, 336: 549-552.
- Tozzi M., Kissel C., Funicello R., Lai C. e Parotto M. (1988) - *Nuovi dati paleomagnetici nella Puglia meridionale*. Atti 74° Congr. Naz. Soc. Geol. It., Sorrento, 13-17 settembre 1988, B: 419-423.
- Viel M., Damiani V. e Setti M. (1986) - *Caratteristiche granulometriche e composizione mineralogica dei sedimenti della Piattaforma Pugliese*. In: Indagine Ambientale del Sistema Marino Costiero della Regione Puglia. Elementi per la Definizione del Piano delle Coste. ENEA, Roma, pp. 127-146.
- Zeza F. (1975) - *Le facies carbonatiche della Puglia ed il fenomeno carsico ipogeo*. Geol. Appl. e Idrogeol., 10(1): 1-54.

**Manoscritto ricevuto il 16/06/2004, accettato il 21/02/2005.**

## Arretramento ed indice d'erosione lungo il litorale di Alghero

Sergio Ginesu e Stefania Sias

Istituto di Scienze Geologico Mineralogiche, Università di Sassari.  
Corso Angjoi, 12 - 07100 Sassari. Email: ginesu@uniss.it, stesi@uniss.it

### Riassunto

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva nel litorale di Alghero ha messo in evidenza, nei tre anni di osservazione 1999-2002, un arretramento medio della linea di riva di circa 3,5 m, un dato che messo a confronto con quelli desunti da informazioni storiche, confermerebbe un progressivo avanzamento del livello del mare. Il litorale, a bilancio chiuso, evidenzia un forte spostamento dei sedimenti dal tratto centrale verso gli opposti promontori, determinando una deriva indotta dalla presenza dell'isola della Maddalenetta posta all'imboccatura del Golfo. Le cause del fenomeno erosivo sono attribuibili in parte al pesante intervento antropico che ha interessato l'intera rada di Alghero con interventi di ogni tipo e con una marcata urbanizzazione. Lo studio ha considerato 10 stazioni di monitoraggio fisse che hanno permesso di ricavare il volume complessivo della sabbia perduta durante il periodo di osservazione al fine di quantificare l'entità di un possibile intervento di ripascimento del litorale.

L'erosione della spiaggia risulta più grave nel settore meridionale, dove sono concentrate le attività economiche protette dai primi interventi di protezione delle spiagge attuati in Sardegna. Tra gli elementi naturali che favoriscono l'erosione non è trascurabile l'effetto eolico delle masse d'aria provenienti dal IV quadrante che, con letture al suolo, dimostra una propria attività influenzata dalle condizioni locali.

**Parole chiave:** spiagge, evoluzione della costa, erosione, Sardegna.

### Abstract

*The study on shorelines evolution along the coast of Alghero has pointed out a mean shoreline recession of about 3.5 m in 3 years of observation. This data confirms the continuous advancing of the sea supported by the historical documentations. The littoral, a pocket beach, shows an evident drift of sediments moving from a central point to the opposite promontories because of the presence of Maddalenetta, a little island located at the entrance of the bay. The reasons for the erosion process can be partially attributed to the vast anthropic utilization of the territory with important public and private works (coastal defence, harbours and resorts). This study has considered 10 observation stations in order to obtain the whole quantity of sand moved during the 3 years in order to renew the beach. Beach erosion is more evident in the southern sector where the most important economic structures of the territory are located. Here, the first coastal defence works of the island are present. The eolian process is an element that contributes to the coastal erosion, mainly due to winds coming from the northwestern sector.*

**Key words:** beaches, coastal evolution, erosion, Sardinia, Italy.

## Introduzione

Il presente studio si inquadra nell'attività di ricerca che l'Unità operativa dell'Università di Sassari svolge, da tempo, sullo studio dell'evoluzione costiera e nel monitoraggio dei processi erosivi in atto sui litorali settentrionali dell'Isola nel quadro del programma nazionale M.U.R.S.T. COFIN 2000 e 2002, coordinato dall'Università degli Studi di Genova.

L'indagine sulla rada di Alghero è stata intrapresa per alcuni aspetti peculiari di questo territorio che conferma ancora una volta la rapidità del fenomeno erosivo anche lungo le coste della Sardegna settentrionale (Spano e Pinna, 1956; Aminti e Pranzini, 1993; Atzeni e Ginesu, 1993).

La città catalana, edificata nel 1102 da una famiglia genovese, i Doria, conosce l'industria turistica, prima timidamente, poi sempre più massicciamente fin dal secolo scorso, conoscendo un'affluenza turistica crescente che, nel periodo estivo, aumenta in modo esponenziale.

Inseguendo le richieste del mercato, le amministrazioni pubbliche hanno incentivato tutte le opere turistiche che hanno favorito l'espansione della città verso il litorale determinando il tal modo l'urbanizzazione di tutta la fascia meridionale del litorale nel corso degli ultimi 50 anni.

A condizionare l'assetto del litorale sono anche gli eventi meteomarini più recenti; si possono ricordare gli eventi di tempesta provenienti da Libeccio e da Ponente che, nel 1983, determinarono numerosi danni sulla costa. A causa di questi episodi vennero realizzate alcune opere di protezione del litorale che risultarono essere le prime a difesa delle spiagge nell'intero perimetro costiero della Sardegna. Nove scogliere parallele sormontabili e permeabili furono realizzate a circa 150 metri dalla riva nello specchio di mare antistante l'Ospedale marino ed il nuovo molo di sottoflutto del porto d'Alghero.

Dieci anni dopo questo intervento, in corrispondenza dell'ultima scogliera parallela, a Punta del Paru, antistante il campeggio "Mariposa", vennero realizzate le barriere aderenti. Le evidenti situazioni di degrado, testimoniate dalle forme erosive ai piedi delle dune prospicienti al mare in tutto l'arenile antistante la pineta di Maria Pia, con gli apparati radicali oramai aerei, stanno ad indicare l'intensa erosione marina ancora oggi in atto.

Dal confronto dei dati e delle testimonianze documentali storiche e topografiche, è stato possibile ricostruire le continue trasformazioni che il litorale ha subito nel corso degli ultimi 150 anni. I dati ricavati hanno permesso di elaborare i dati batimetrici riportati nella relativa Carta geomorfologica in scala 1:10.000, relativa alla situazione generale di tutta l'insenatura.

Negli ultimi anni sono state realizzate opere anche a monte della spiaggia che hanno condizionato, anche se marginalmente, l'apporto di sedimenti verso mare; infatti, sono presenti sbarramenti fluviali nel reticolo idrografico che alimenta lo Stagno del Calich dove sono state effettuate diverse opere di bonifica. Inoltre, la costruzione del molo del porto di Fertilia ha ulteriormente diminuito e ostacolato l'apporto sedimentario a mare.

Questo studio, iniziato nel 1999 e concluso nel 2002, tende a valutare il fenomeno dell'erosione marina con l'utilizzo dei dati raccolti e del confronto con quelli storici e quelli provenienti dalla prospezione geomorfologica sul terreno al fine di quantificare la dinamica del litorale e le cause dell'erosione in questo tratto di spiaggia. A tal fine sono stati considerati alcuni lavori effettuati in circostanze e ambienti simili relativi a tratti di costa nell'Italia peninsulare (Caputo et al., 1993; D'Alessandro et al., 1982) che hanno consolidato l'interesse e la validità di alcuni dati ottenuti.

## Lineamenti geomorfologici

Il territorio d'Alghero, è ubicato nella parte meridionale della Nurra, sub-regione della Sardegna Nord-occidentale (Fig. 1), che comprende anche parte della costa del Golfo dell'Asinara. Ha uno sviluppo costiero di circa 80 km, dall'insenatura di Porto Poglina, situata a sud della città, sino Porto Ferro a Nord, in un succedersi di insenature e promontori su substrati carbonatici e vulcanici.

Morfologicamente il territorio della Nurra rappresenta i lembi di una microzona piuttosto stabile che conserva nei suoi lineamenti le tracce di un territorio molto evoluto riconducibile a resti di un paleopaesaggio (Pecorini, 1968; Federici et al., 1999; Ginesu, 1984, 1999). In particolare, l'area oggetto del presente studio si trova inserita tra calcari del Mesozoico ed i depositi recenti del Plio-Pleistocene che determinano l'estesa piana retrostante lo Stagno del Calich; lungo il cordone litorale che separa questa piana dal litorale, affiorano le rocce ignimbritiche del ciclo calcareo del Terziario. Tali rocce, accompagnate da sequenze tufaceo-cineritiche, hanno invaso una paleomorfolgia modellata sul paesaggio calcareo del Terziario antico costituendo, in tal modo, un substrato ideale alla costituzione di un, seppur modesto, reticolo fluviale.



Figura 1 - Localizzazione dell'area di studio.

Come è evidente dalla Carta geomorfologica allegata, i differenti litorali influenzano fortemente le forme del territorio come i rilievi cupoliformi che spiccano sul paesaggio pianeggiante, denotando un elevato grado di maturità (*inselberg*) del substrato carbonatico. Le ampie superfici pianeggianti che ricordano questi rilievi sono dei *pediments* sui quali si osservano, localmente, depositi di travertino originatisi dall'alterazione degli stessi calcari, probabilmente durante il tardo Terziario (Cremaschi e Ginesu, 1990) e oggi costituiscono un substrato che influenza particolarmente le coperture di suolo. Il territorio, per la sua condizione di continentalità sin dalla fine del Mesozoico, presenta una complessità geomorfologica definita dal susseguirsi di eventi continentali riferibili a condizioni climatiche con persistenti fasi caldo-umide (Miocene inferiore) e arido-caldo (Miocene superiore) (Cremaschi et al., 1990; Federici et al., 1999). Il modellamento recente risulta più evidente lungo la fascia costiera, dove depositi eolici, intercalati da vecchie linee di riva, ricoprono gran parte del litorale algherese ed in particolare la cala di Porticciolo; qui si osserva la successione classica del Pleistocene superiore marino caratterizzata dalla presenza dei livelli di spiaggia del Tirreniano coperti dalle colianiti del Würm, con livelli di paleosuoli, sino alla quota dei 10 metri s.l.m.

### Evoluzione della linea di costa

Come gran parte della costa della Nurra, anche il litorale di Alghero è stato coinvolto nelle profonde modificazioni della costa seguite alle periodiche oscillazioni climatiche del Quaternario.

Testimonianze di queste regressioni e trasgressioni marine sono ampiamente documentate nell'immediato entroterra della rada, lungo il cordone litorale che separa la spiaggia dal retrostante Stagno del Calich. Nella vicina spiaggia di Porto Conte, la linea di costa è avanzata profondamente lungo la *ria* trasformando drasticamente il profilo della costa e causando la sparizione del paleostagno fin dal periodo Nuragico (Federici et al., 1999). In quest'area, numerose testimonianze archeologiche hanno permesso un confronto, anche stratigrafico tra le modificazioni della costa e l'attività antropica storica e preistorica.

Anche all'interno della rada di Alghero esistono tracce storiche della profonda variazione della linea di costa, in particolare, nel tratto di mare antistante l'ospedale marino, a pochi metri di profondità, sono emersi i resti di due galeoni spagnoli sepolti dai sedimenti sabbiosi che costituiscono il serbatoio di alimentazione della stessa spiaggia (comunicazione orale dott. Francesco Guido).

Probabilmente, le opere a mare e le difese costiere hanno favorito lo spostamento delle sabbie da questo tratto verso nord, causando l'emersione della struttura lignea di queste imbarcazioni che sono a tutt'oggi ancora allo studio da parte della Soprintendenza Archeologica per le Province di Sassari e Nuoro.

La presenza di questi resti evidenzia una sostanziale modifica anche dei fondali della baia, in un tempo relativamente breve, e costituisce un dato storico recente nella raccolta della letteratura e delle informazioni esistenti, oltre i dati cartografici.

Il rilevamento sul terreno si è dimostrato difficile e complesso a causa della elevata fruizione delle aree più interne, sia per usi agricoli che turistici, che per le condizioni morfologiche caratterizzate dalla presenza di una estesa pianura impostata sui depositi lacustri e travertinosi (calcrete) del Plio-Pleistocene (Cremaschi e Ginesu, 1990).

Si è pertanto proceduto mediante il raccordo delle quote di tali depositi in rapporto alle varie linee di riva e alle superfici di abrasione marina che le separano. In tal modo, è stato possibile confermare tali ipotesi attraverso i rari affioramenti delle spiagge Tirreniane e delle paleofalesie presenti sulle sponde orientali dello Stagno.

L'erosione recente ha messo in luce, in un breve tratto di spiaggia verso Fertilia, la *beach rock* del Tirreniano ancora al livello del mare, mentre nel tratto corrispondente verso lo Stagno, affiorano estesamente le colianiti Würmiane, la *beach rock* Tirreniana e, limitatamente, anche le ignimbriti Terziarie.

L'intero profilo dello Stagno mostra per lunghi tratti una falesia impostata su questi litotipi confermando una dinamica intensa, non certo ascrivibile alla persistenza di morfologie lacustri ma confermando il periodico instaurarsi di condizioni lagunari.

La Carta geomorfologica allegata evidenzia l'esistenza di un paleocanale, documentato da un deposito argilloso-sabbioso emerso in un recente scavo effettuato per lavori di riqualificazione della spiaggia antistante il centro Congressi, che taglia il cordone litorale nel settore settentrionale e prosegue nell'area sommersa, sottolineando questa trasformazione della costa con la modifica sostanziale della spiaggia dell'intera rada.

### Le forme costiere

La sostanziale trasformazione di questo litorale nel corso del tempo ha determinato una certa varietà di forme e di depositi in tutta la porzione interna della costa; a questa si associano tutte le forme derivate dalla modificazione antropica della fascia costiera che, nel tratto meridionale dell'area in studio, ha completamente assorbito le spiagge residue nel tessuto urbano.

La spiaggia presenta un profilo a debole pendenza che tende ad accentuarsi nella parte centrale della baia, dove è presente un'incisione che produce un solco di circa 5 metri nei sedimenti limoso sabbiosi dell'insegnatura. Nella parte settentrionale, la superficie del fondale conserva ancora, nei sedimenti limoso-argillosi e nelle forme di colmamento, le testimonianze del paleocanale che tagliava il cordone litorale più a est dell'attuale bocca dello Stagno del Calich. Oggi il canale è attivo dalla foce dello Stagno del Calich e risulta caratterizzato da una sedimentazione ricca di limi che costituisce una conoide di fondo lungo il promontorio calcareo di Fertilia, verso est. Questo canale costituisce la confluenza a mare del corso d'acqua più significativo di tutta la Nurra occidentale, dal momento che i movimenti legati alla tettonica recente hanno imposto al reticolo idrografico una vergenza nord-nord/est, verso il Golfo dell'Asinara.

Il sollevamento recente del livello marino ha determinato una profonda penetrazione del mare nell'entroterra secondo un modello a *ria* che ha determinato una diversificazione nella componente sedimentologica oggi riconoscibile dai caratteri pedogenici nei tratti morfologicamente più depressi dell'immediato entroterra.

Nelle porzioni dove il substrato è costituito dalle rocce carbonatiche del Mesozoico, questo processo è testimoniato solamente da morfologie debolmente concave, non sempre riconoscibili, ma ben documentate dalla variazione dei suoli. L'antica costa a *rias* sui calcari non determinava, come oggi, accumuli di sabbie o detriti tali da lasciare dei veri affioramenti in prossimità dell'antica linea di riva.

Più evidente è la linea di riva Tirreniana dove il substrato è costituito dalle rocce travertinose del tardo Terziario o dalle vulcaniti. Qui, infatti, l'antica linea di riva viene testimoniata da una evidente scarpata o da un gradino di erosione che conserva, talvolta, le tracce della paleospiegia nell'elevata percentuale di sabbia silicea presente nello scheletro del suolo.

Nel settore meridionale in prossimità della periferia urbana, giace un campo di dune potente, ma di modesta estensione. Gli scavi per la costruzione del Centro Congressi della città catalana hanno messo in luce la sequenza stratigrafica del cordone. Questo risulta costituito da un basamento ignimbrico piuttosto alterato, che affiora unicamente in un breve tratto di costa, sormontato direttamente da una *beach rock* di circa 1,5 m, riferibile al Tirreniano. Tale livello, come precedentemente detto, affiora estesamente nel tratto interno del cordone ed in un breve tratto della spiaggia dove l'erosione ha asportato la copertura di sabbia.

I depositi eolici nella parte settentrionale della spiaggia non danno luogo a forme dunali ma costituiscono una semplice copertura eolica; tuttavia questo carattere può essere attribuito all'intervento antropico in questa zona dove sono presenti anche insediamenti turistici quali campeggi ed una vasta pineta artificiale; purtroppo non è stato possibile rinvenire alcuna documentazione storica sulla presenza di eventuali dune in questo settore del litorale.

### Area di studio

La porzione di costa considerata nello studio interessa tutto il litorale della rada di Alghero, corrispondente alla fascia compresa tra il porto di sottoflutto (S. Giovanni), nel centro urbano d'Alghero, ed il porto della frazione di Fertilia (Punta del Gall), per un'estensione complessiva di circa 5,4 km.

L'area si presenta separata in due falcature dal promontorio di Punta del Paru (Ospedale Marino); qui, il cordone litorale è in parte costituito da dune recenti e in parte da dune fossili sulle quali si estende la Pineta di Maria Pia. La presenza della pineta ha certamente condizionato l'uso antropico contenendo le iniziative turistiche ma lasciando sostanzialmente integro il litorale in condizioni di semi-naturalità.



Figura 2 - Particolare della spiaggia di Alghero, si può osservare il punto di più intensa attività erosiva del settore "artificiale" protetto dalle 9 barriere a mare e dalla barriera parallela a difesa dell'ospedale marino.

Il tratto di spiaggia antistante l'abitato di Alghero mostra, invece, un pesante intervento antropico con opere marittime e strutture turistiche, che hanno modificato in maniera sostanziale questo tratto di litorale che, per esigenze di studio, è stato definito "artificiale" (Fig. 2).

Al centro della rada si trova l'isolotto della Maddalenetta, distante circa 1,5 km, a nord-ovest del porto di Alghero. L'Isola, costituita da eolianiti pleistoceniche, intercetta il moto ondoso ad una certa distanza della battigia e altera sensibilmente la sua direzione. Infatti, si osserva una duplice area d'inflessione del treno d'onde: la prima nel settore nord (nel tratto "naturale"), e l'altra a mezzogiorno (tratto "artificiale").

Nella fascia "naturale" è presente il cordone delle dune, con la pineta artificiale di Maria Pia e lo stagno retrodunale del Calich, che sbocca all'interno del porto di Fertilia (Fig. 3).



Figura 3 - Panoramica della bocca a mare dello Stagno del Calich, presso Fertilia, dove è evidente l'accumulo delle sabbie sul molo di Ponente del porticciolo turistico.

Tra le strutture antropiche presenti, dall'abitato di Fertilia fino all'Ospedale Marino, sono da menzionare anche i fortini militari, del periodo bellico ed i resti di un antico molo, di cui non si ha alcuna documentazione storica, probabile testimone di un antico sbocco a mare dello Stagno del Calich.

Qui, il profilo della spiaggia sommersa presenta un'inclinazione maggiore rispetto a quella che si riscontra nella seconda fascia; la granulometria della spiaggia è caratterizzata anche da elementi dell'ordine del centimetro.

La spiaggia, nel primo tratto, è normalmente coperta da uno spesso deposito di posidonia frammentata e sminuzzata a differenza della stazione opposta, San Giovanni, dove gli apparati fogliari si mostrano integri. Gli elementi più grossolani del sedimento presenti in quest'area, favoriscono la triturazione del deposito organico.

In questa porzione, solo il primo tratto, adiacente al porto di Fertilia, è risultato stabile, grazie alla sua condizione morfologica (si trova a ridosso dei venti) e alla presenza del deposito di posidonia spiaggiata, che lo protegge.

La seconda fascia "antropizzata", è sede di stazioni balneari, costruzioni alberghiere, edifici urbani, strade, scarichi di acque bianche; mentre, a mare, si trovano numerose opere marittime: il porto, le barriere parallele, le opere di difesa aderenti. Per meglio identificare questo settore di litorale ad elevato impatto antropico, è stato definito "artificiale".

Lungo le due fasce così distinte sono state eseguite misure periodiche in apposite stazioni fisse, prescelte al fine di rilevare le variazioni della linea di spiaggia. Queste ultime consistono in 10 stazioni di monitoraggio, mentre nella stazione denominata "G" (sulla carta, Fig. 4), situata in posizione mediana rispetto al litorale e lontana dal centro abitato, sono state effettuate letture anemometriche al livello del suolo.

Dal confronto dei dati forniti dal S.A.R. (Servizio Agrometeorologico della Regione), si osserva una variazione significativa tra i valori elaborati sulla stazione di Alghero rispetto a quelli registrati al suolo; differenza dovuta probabilmente alla differente quota di rilevazione, alla posizione geografica e alle condizioni locali.

Il monitoraggio del litorale è stato effettuato attraverso una campagna di controlli realizzata in tre anni, dal 1999 fino al Dicembre 2002. I dati sono stati elaborati secondo metodi statistici ed elaborati in grafici al fine di evidenziare l'arretramento puntuale di ogni singola stazione e quello complessivo dell'intera rada.

Sono state considerate 10 stazioni di controllo, di cui nove, le più significative sono riportate in testo

(Fig. 4) e, alla fine dello studio, hanno confermato una generale tendenza all'arretramento ben leggibile dai singoli grafici delle medie di tutte le stazioni. La tendenza al ritiro della linea di spiaggia è altresì confermata anche da tutti i documenti d'archivio e storici che sono stati recuperati nel corso dell'indagine, confrontati sia con la cartografia più recente che con le misure ottenute sul terreno.

Complessivamente sono state effettuate e documentate circa 2000 osservazioni durante i tre anni e consultati oltre 250 documenti d'archivio storico e fotografico. Tra i documenti consultati riguardanti il litorale si possono menzionare:

- 1 La "Carta particolar de la Nurra" anno 1742;
- 2 I profili della scogliera, del muro di difesa e della torretta per il fanale. Scala 1:2.000 anno 1871 C. Castiglioni;
- 3 La Pianta del porto di Alghero, scala 1:1.000, anno 1869 A. Musso;
- 4 La Pianta del porto di Alghero, scala 1:2.000, anno 1871 C. Castiglioni;
- 5 Il Progetto di sistemazione ed ampliamento del porto di Alghero, pianta del porto, pianta e sezione della scogliera, scala 1:100 anno 1871 C. Castiglioni;

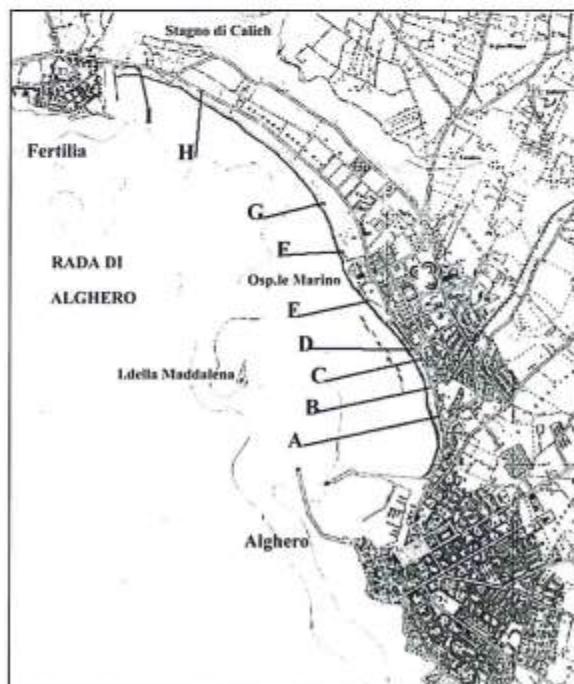


Figura 4 - Ubicazione delle stazioni di monitoraggio (Base cartografica 1:25.000).



- 6 La Pianta di una parte dell'abitato di Alghero. Progetto di un nuovo condotto di spurgo, per deviare dal porto, mediante una galleria, il corso del canale principale. Scala 1:500, anno 1880 A. Musso;
- 7 La Pianta del porto di Alghero. Prolungamento del molo. Demolizione delle opere avanzate del terrapieno antistante il forte della Maddalena, opere di ampliamento per mettere in comunicazione la porta a mare con la strada per Porto Conte, anno 1870 E. Contin;
- 8 La Planimetria del porto di Alghero, scala 1:1000 anno 1902 S. Giardine;
- 9 Foto Storiche, che raccontano la vita del porto di Alghero nel novecento.

Tutto il materiale storico è stato gentilmente fornito dall' Archivio Storico di Alghero e di Sassari, dalla biblioteca della Facoltà di Lettere dell'Università di Sassari, dal Genio Civile Opere Marittime di Porto Torres e dalle ricerche personali.

## Risultati

Lo studio ha messo in luce il ruolo dell'intervento antropico nel processo di erosione, attraverso la ricostruzione geomorfologica e la storia delle opere marittime eseguite a difesa ed a fruizione turistica del litorale. L'insieme dei dati raccolti ha permesso di realizzare una Carta geomorfologica del litorale alla scala di 1:20.000. Infatti, è stato possibile registrare valori di arretramento significativo in soli tre anni (1999-2002) di osservazioni sul campo eseguite nel corso di questa nota (De Santis, 2000).

Come precedentemente detto, i dati ricavati nei tre anni di monitoraggio hanno confermato che l'intero litorale della rada di Alghero - Fertilia continua a subire l'effetto erosivo da parte del mare. Al di là delle evidenze morfologiche che testimoniano questo processo, come in località San Giovanni dove le mareggiate di Maestrale continuano a demolire le pesanti lastre di accesso all'arenile, l'elaborazione dei dati sulle singole stazioni mostra una generale tendenza all'arretramento. Anche l'elaborazione dei dati storici basati sul confronto delle variazioni con la cartografia più recente e con le foto aeree confermano questa tendenza (Fig. 5).

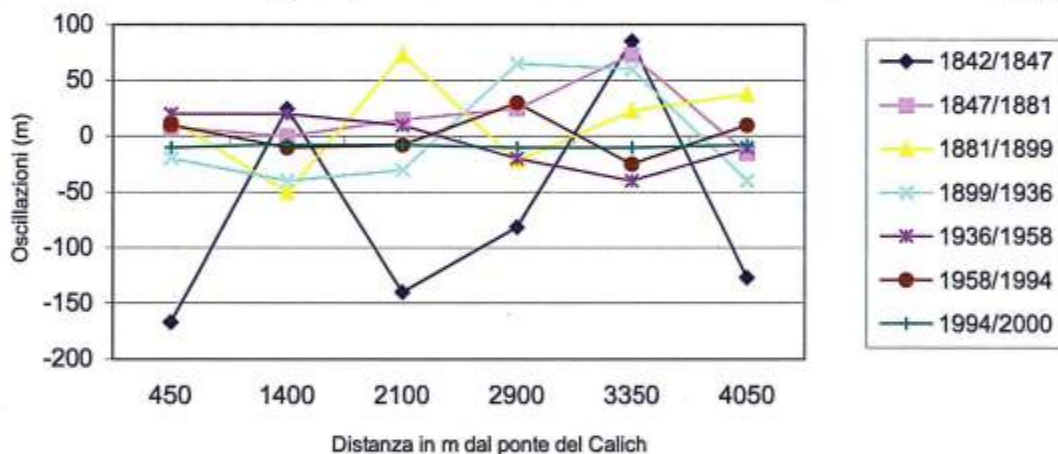


Figura 5 - Grafico delle variazioni storiche sul confronto con la cartografia attuale (Carta tecnica regionale).

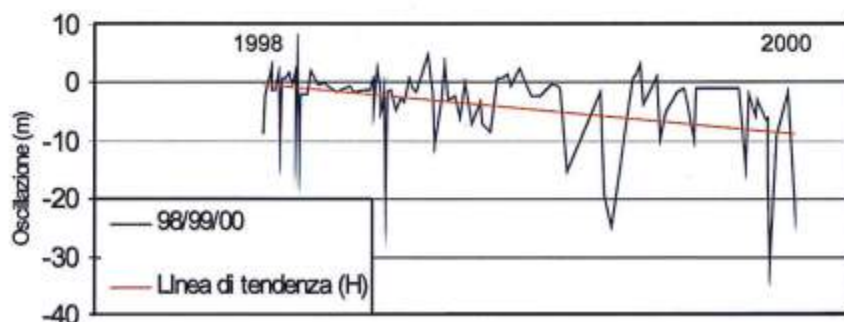


Figura 6 - Grafico e linea di tendenza elaborata sulla base della media dei dati desunti nei tre anni di osservazione nella stazione di monitoraggio H.

I grafici delle medie triennali considerati, alcuni dei quali riportati in questa nota (Figg. 5 e 6), confermano questa tendenza attenuata dai valori meno significativi e meno preoccupanti; tuttavia in alcuni siti i grafici mostrano con evidenza lo stato di estremo degrado, situazioni che sfociano in dissesti ogni qual volta che le condizioni meteomarine si scostano dalle medie.

I recenti avvenimenti di dissesto verificatisi negli ultimi anni sulla costa algherese vanno ricollegati a condizioni di questo tipo; le mareggiate sulla strada litoranea e nei pressi del Centro Congressi, durante l'inverno del 2000, hanno determinato notevoli disagi e profonde preoccupazioni per la popolazione locale e per gli operatori turistici. In particolare, dalle letture dei dati nella stazione H della carta (Fig. 6) emerge una delle situazioni di maggior degrado ma a minor rischio poiché non esistono importanti infrastrutture ma solo la strada litoranea.

Stazioni dove l'energia del mare viene espressa con particolare efficacia risultano la E e la F, oggi protette da un'importante opera longitudinale aderente costruita a difesa delle strutture ospedaliere ed in continuità con le difese a mare della zona del "Lido", stazione C.

La condizione di *pocket beach* dell'intero litorale di Alghero Fertilia favorisce il calcolo del bilancio di perdita della spiaggia nel corso del periodo di osservazione, periodo che ha consentito di verificare che il contributo proveniente dalla bocca a mare dello Stagno del Calich rappresenta un valore del tutto trascurabile.

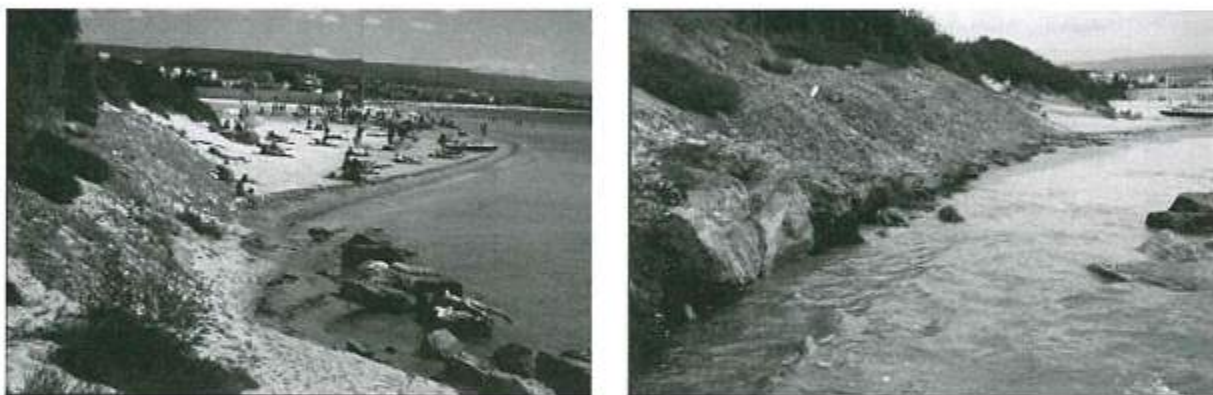


Figura 7 - Stazione E, in prossimità della chiusura della protezione a mare delle barriere parallele. Si può osservare la variazione della linea di costa tra l'inizio delle osservazioni (1999) e alla conclusione del lavoro (2002).

Al fine di valutare l'intensità del fenomeno e quantificare il volume delle sabbie in movimento (Fig. 7), si è considerata l'area di spiaggia perduta nei tre anni e si è calcolato, sulla base dell'inclinazione del profilo di spiaggia fino all'isobata dei 3 metri sufficiente a calcolare il volume della figura geometrica tridimensionale delle sabbie asportate.

Il volume così calcolato ha fornito un valore di circa  $264 \text{ m}^3$  all'anno, pari ad un movimento di  $0.03 \text{ m}^3$  per metro quadrato nell'arco dei tre anni considerati.

Sebbene tali valori siano inevitabilmente accompagnati da un margine d'errore dovuto principalmente alle minime variazioni di marea, tuttavia forniscono, per la prima volta, dei precisi valori di riferimento per quei movimenti che sono inevitabilmente legati al trasporto delle correnti di deriva litoranea; con lo stesso metodo è stato possibile calcolare il movimento delle sabbie sommerse anche in altri settori dell'isola (Ginesu et al., 1994).

I valori considerati evidenziano un processo di erosione modesto se confrontato con altre situazioni dell'isola, ma sottolineano la velocità con cui il fenomeno si è manifestato tanto da destare preoccupazione alla luce degli ultimi avvenimenti di dissesto.

Appare, pertanto, evidente il ruolo risolutivo che può avere un intervento di ripascimento della spiaggia al fine di risolvere, con una modesta quantità di sabbie ed un limitato costo economico, un problema sentito da tempo da tutti gli operatori economici del turismo locale e dalla stessa popolazione.

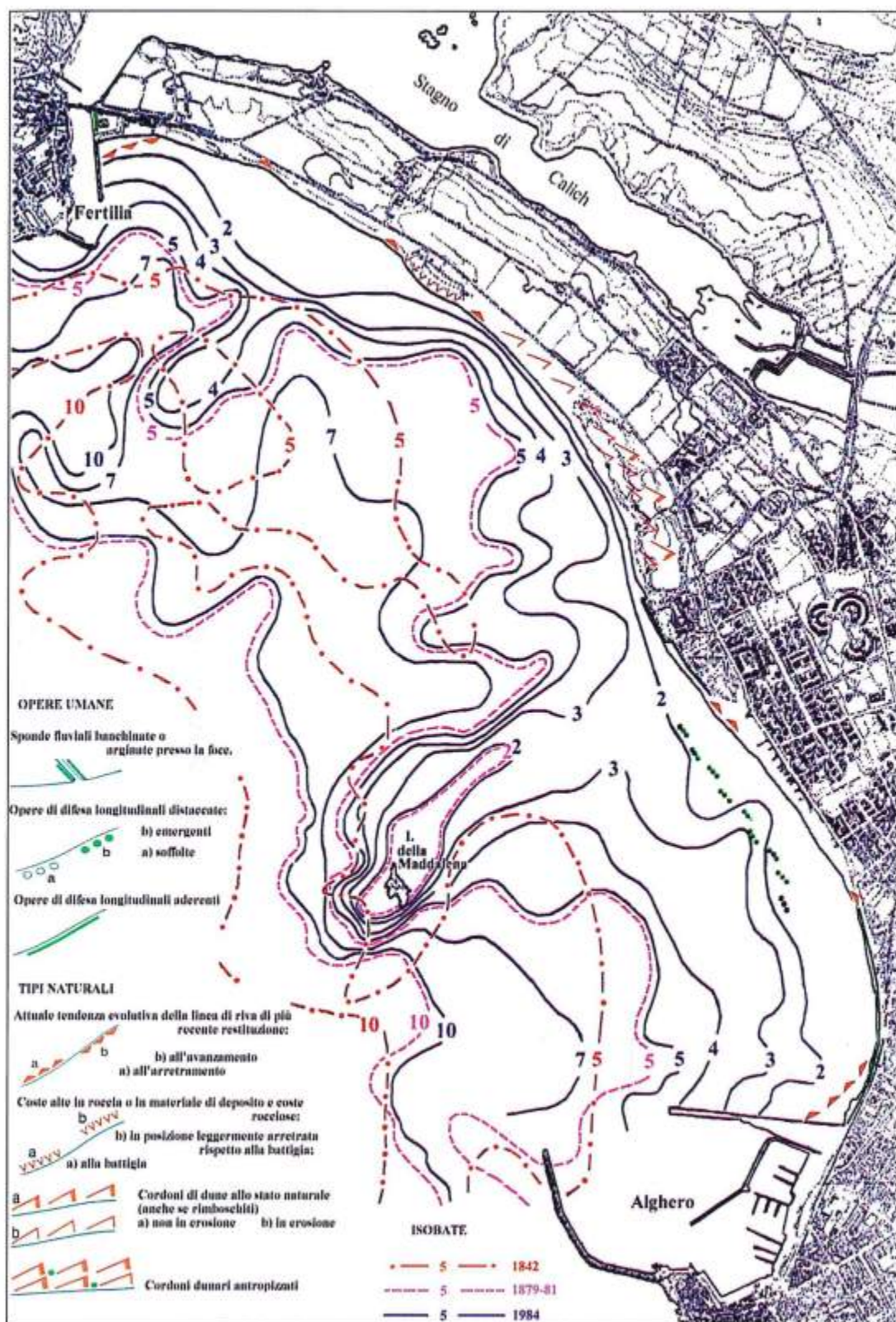


Figura 8 - Carta geomorfologica schematica dell'area studiata.

**Bibliografia**

- Aminti P. e Pranzini E. (1993) - *L'erosione e la difesa dei litorali*. In "La difesa dei litorali in Italia", a cura di Aminti P. e Pranzini E., Edizioni delle Autonomie, Roma, pp. 326.
- Atzeni A. e Ginesu S. (1993) - *Evoluzione dei litorali della Sardegna e interventi di riequilibrio*. In "La difesa dei litorali in Italia" a cura di Aminti P. Pranzini E., Edizioni delle Autonomie, Roma, pp. 215-233.
- Caputo C., Latino Chiocci F., Ferrante A., La Monica G. B., Landini B. e Pugliese F. (1993) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*. Da "La difesa dei litorali in Italia" a cura di Aminti P. e Pranzini E., Edizioni delle Autonomie, Roma, pp. 121-151.
- Cremschi M. e Ginesu S. (1990) - *Morfogenesi e pedogenesi tardo terziaria e Pleistocenica antica nella Nurra occidentale*. Geogr. Fis. Dinam. Quat. 13, 81/82.
- D'Alessandro L., Davoli L., Fredi P. e Lupia Palmieri E. (1982) - *Il litorale calabro compreso tra il delta del F. Savuto e Capo Bonifati: evoluzione recente della spiaggia e variazione del regime anemometrico*. Consiglio Nazionale delle Ricerche Progetto finalizzato "Conservazione del suolo. Sottoprogetto: Dinamica dei litorali", n° 201.
- De Santis N. (2000) - *L'erosione marina lungo il litorale della rada di Alghero*. Tesi di laurea inedita, Università degli studi di Sassari, AA. 1999\2000, pp.120.
- Federici P., Ginesu S. e Sias S. (1999) - *Lineamenti geomorfologici ed evoluzione recente del paesaggio nella Nurra occidentale (Sardegna N. W.). La fascia costiera di Porto Conte - Porto Ferro*. In "Protezione dell'ambiente e gestione delle risorse naturali" a cura di Gutierrez M.M. CEDAM, Padova 93/138.
- Federici P. R., Ginesu S., Deroma M., Marogna A. e Sias S. (1996) - *Atlante delle spiagge italiane (Dinamismo, Tendenza evolutiva, Opere umane)*. F° 192 Alghero. Scala 1:100.000. S.El.Ca., Firenze.
- Ginesu S. (1999) - *Sardegna: aspetti del paesaggio fisico in un microcontinente*. Ed. Poddighe, Sassari, pp. 193.
- Ginesu S., Marogna A. e Sias S. (1994) - *Evoluzione quaternaria e dinamica attuale della fascia costiera di Fiume Santo (Sassari, Sardegna)*. Il Quaternario, 7: 317/324.
- Pecorini G. (1968) - *Cenni geomorfologici sulla Nurra e sul Logudoro Occidentale (Sardegna)*. Istituto di Geologia e Paleontologia, Università di Cagliari, 73: 1-22.
- Spano B. e Pinna M. (1956) - *Le spiagge della Sardegna*. Stabilimento Grafico F.lli Lega, Faenza, pp. 254.

**Manoscritto ricevuto il 25/06/2004, accettato il 23/05/2005.**

## Dinamica morfologica e sedimentaria del litorale di Castellammare di Stabia (Golfo di Napoli)

Chiara Cammelli, Pierluigi Iannotta, Valentina Matucci e Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze  
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze

### Riassunto

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva del Golfo di Castellammare di Stabia indica che questo tratto di litorale non soffre, nel suo insieme, di un deciso deficit sedimentario, ma che vi è una consistente ridistribuzione dei sedimenti a favore dei tratti che ricevono protezione dai due porti costruiti ai due lati dell'unità fisiografica; questo flusso sedimentario è in parte dovuto alla diffrazione delle onde sull'estremità delle dighe foranee. Progradazione o stabilità della spiaggia si ha anche in quei settori del litorale nei quali recentemente sono state costruite opere di difesa; ma, mentre le scogliere parallele, emerse o sommerse, sono state efficaci, quelle ortogonali a riva hanno prodotto risultati più modesti, dato che la direzione di provenienza delle onde è quasi sempre ortogonale alla costa. Lo studio granulometrico dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa, effettuato solo nel settore meridionale, conferma l'esistenza di un flusso sedimentario che porta materiali fini nell'area riparata dal porto di Castellammare di Stabia e lascia sedimenti grossolani residui nei tratti di litorale più esposti. In tutto il settore studiato si evidenzia un flusso sedimentario diretto da nord verso sud, tale da far considerare il Fiume Sarno, che pure ha una modesta portata solida, come il principale alimentatore di questa parte del golfo. Questi risultati portano a ritenere necessaria la modifica sia delle strutture portuali, in modo da ridurre l'impatto sui litorali adiacenti, che di alcune opere di difesa, per aumentarne l'efficacia. Potrebbe essere inoltre opportuno un refluento dei sedimenti depositatisi in prossimità dei porti verso le zone che più se ne sono impoverite ed un ripascimento con materiali grossolani dei settori meno interessati dall'attività turistica.

**Parole chiave:** Evoluzione della linea di riva, parametri tessiturali, difese costiere, porti.

### Abstract

*The study of the shoreline evolution of the Castellammare di Stabia Gulf proves that this coast, as a whole, does not experience a sedimentary deficit, but that a significant sediment redistribution exists favouring the beaches protected by the two harbours present on both the gulf extremities; this flux is partially due to wave diffraction at the tips of the harbours breakwaters. Beach progradation or stability is present where shore protection works were executed during the last years, but parallel emerged and submerged breakwaters were more effective than groins due to the prevailing orthogonal approach angle of most of the waves in the area. Textural sediment analysis, performed on the southern side of the gulf, confirms the harbour-ward directed sedimentary flux, responsible of fines deposition in the protected area and of the existence of coarse lag deposits in the most exposed beaches. The River Sarno, although its limited bedload, is recognized as the main feeder of the southern part of the physiographic unit. Changes in the harbours configuration is therefore necessary in order to prevent further silting and the erosion of the unprotected beaches. Shore protections must be modified in order to meet the sediment dynamics of this coast, and sediment should be dredged in the harbour protected areas to feed eroded beaches. Coarse material could be used for artificial nourishment in those sectors where touristic activity is limited.*

**Key-words:** Shoreline evolution, textural parameters, shore protections, harbours.

### Inquadramento geografico

Il Golfo di Castellammare di Stabia costituisce la parte più meridionale del Golfo di Napoli ed è compreso fra le propaggini del Vesuvio e la Penisola Sorrentina, che si protende in mare per circa 20 km (Fig. 1).

Protetto da questa e dal suo prolungamento strutturale dell'Isola di Capri nei confronti dei mari meridionali, è esposto direttamente solo alle ondate di SSO, dato che ad Ovest vi sono le Isole di Ischia e di Procida e a NO il Monte di Procida ed il promontorio dei Campi Flegrei.

I dati raccolti dall'ondametro di Ponza (posto a circa 120 km a W-NW) indicano una prevalenza delle onde dal settore occidentale (Fig. 2) con una risultante da  $249^\circ$ , ossia praticamente ortogonale alla spiaggia, tanto da fare ipotizzare un flusso lungo riva estremamente limitato sul litorale del Golfo di Castellammare.



Figura 1 - Posizione geografica dell'area di studio.

I fondali, entro l'isobata dei 10 m, hanno una pendenza media del 2%, con una leggera prominente in corrispondenza dello Scoglio di Rovigliano, un isolotto del diametro di un centinaio di metri posto a circa 300 m da riva poco più a nord della foce del Fiume Sarno e che determina la formazione di un saliente visibile in tutte le edizioni della cartografia IGM.

Il principale corso d'acqua che raggiunge questo tratto di litorale è il Fiume Sarno, con un bacino di circa 438 km<sup>2</sup>, ma per il quale non esistono misure o stime di portata solida. Nel settore meridionale del golfo sfocia il Fosso Gragnano (o Vernotico), con un bacino di circa 40 km<sup>2</sup> ed una portata solida, calcolata per un evento con tempo di ritorno di 10 anni, pari a 8.480 m<sup>3</sup>/anno (Paris et al, 2002).

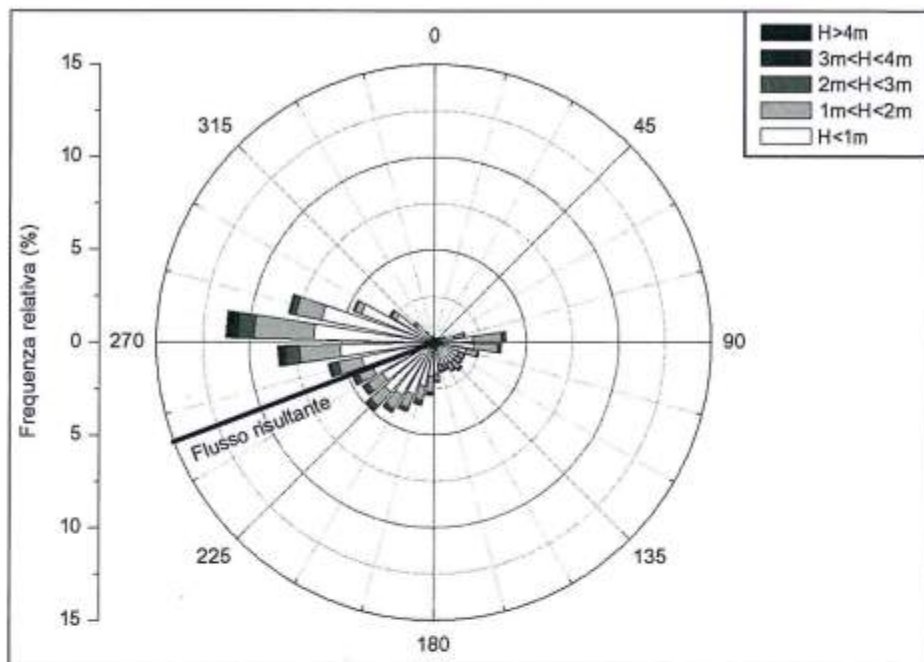


Figura 2 - Stato del mare ricostruito sulla base dei dati rilevati dall'ondametro di Ponza della Rete Ondametrica Nazionale (Periodo di osservazione: 1989 - 2001).

Sulla spiaggia di Castellammare sfocia anche il Rivo della Calcatella (o Cametello), che ha un bacino idrografico che non raggiunge i 6 km<sup>2</sup> e di cui non è nota la portata.

Nella Tavola relativa ai Fogli 183, 184 e 185 "Isola d'Ischia", Napoli" e "Salerno" dell'Atlante delle Spiagge Italiane (Cocco et al., 1996) la gran parte di questo litorale è indicata in equilibrio, con l'eccezione del settore centrale, in erosione, e di un piccolo tratto prossimo all'estremità meridionale, in ripascimento.

### Evoluzione della linea di riva

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva del litorale compreso fra il porto di Torre Annunziata e quello di Castellammare di Stabia si basa sui dati tratti dalla cartografia dell'Istituto Geografico Militare, in scala 1:50.000 del 1870 (circa) ed in scala 1:25.000 degli anni 1907/09, 1954 e 1968, sulle foto aeree riprese negli anni 1989 (1:75.000, Volo Italia), 1994 (1:75.000 Volo Italia) e 1998 (1:40.000), nonché sui dati rilevati nel 2002 dalla Soc. GeoLab di Napoli su incarico dell'ENEA. Dato che quest'ultimi non si estendono al tratto adiacente al porto di Castellammare, nel 2003 si è proceduto ad un nuovo rilievo della linea di riva da 500 m a nord della foce del Rio Gragnano fino al porto.

La linea di riva è stata digitalizzata dalla cartografia IGM da parte della Ricerche Marine s.n.c. di Pozzuoli, mentre quella tratta dalle foto aeree, che sono state acquistate in formato digitale dalla Compagnia Generale RipreseAeree s.p.a. di Parma, è stata ottenuta per fotointerpretazione dopo la georeferenziazione delle immagini nel sistema di riferimento Gauss-Boaga (fuso Est).

Si fa presente che, per la disomogeneità dei documenti originali e, talvolta, per oggettive difficoltà di estrazione della linea di riva dalle foto aeree e da immagini telerilevate, i dati ottenuti possono essere soggetti ad errori anche rilevanti. Bartolini et al. (1989), per una cartografia realizzata da un unico operatore con grande esperienza in fotorestituzione e con documenti di partenza omogenei, hanno stimato l'errore di posizione della linea di riva in 5 m, cosa che porta ad un errore possibile nel confronto fra due linee a ben 10 m. Nel nostro caso si ritiene che l'errore relativo ai rilievi più antichi possa essere anche superiore e i dati prodotti, seppur riportati in formato numerico con approssimazione al cm, devono essere considerati come semi-quantitativi.

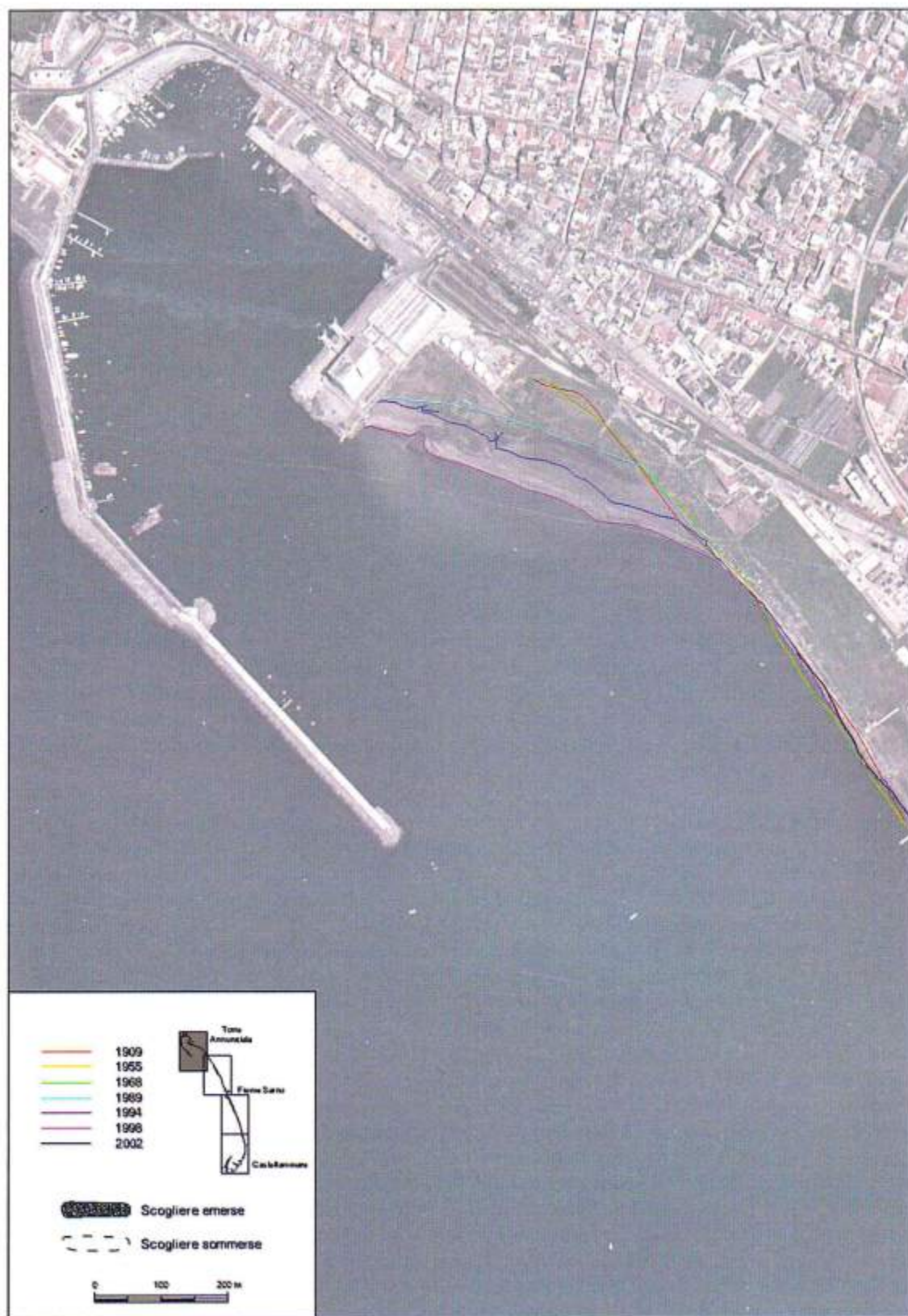


Figura 3a - Evoluzione della linea di riva nel tratto settentrionale del Golfo di Castellammare di Stabia.



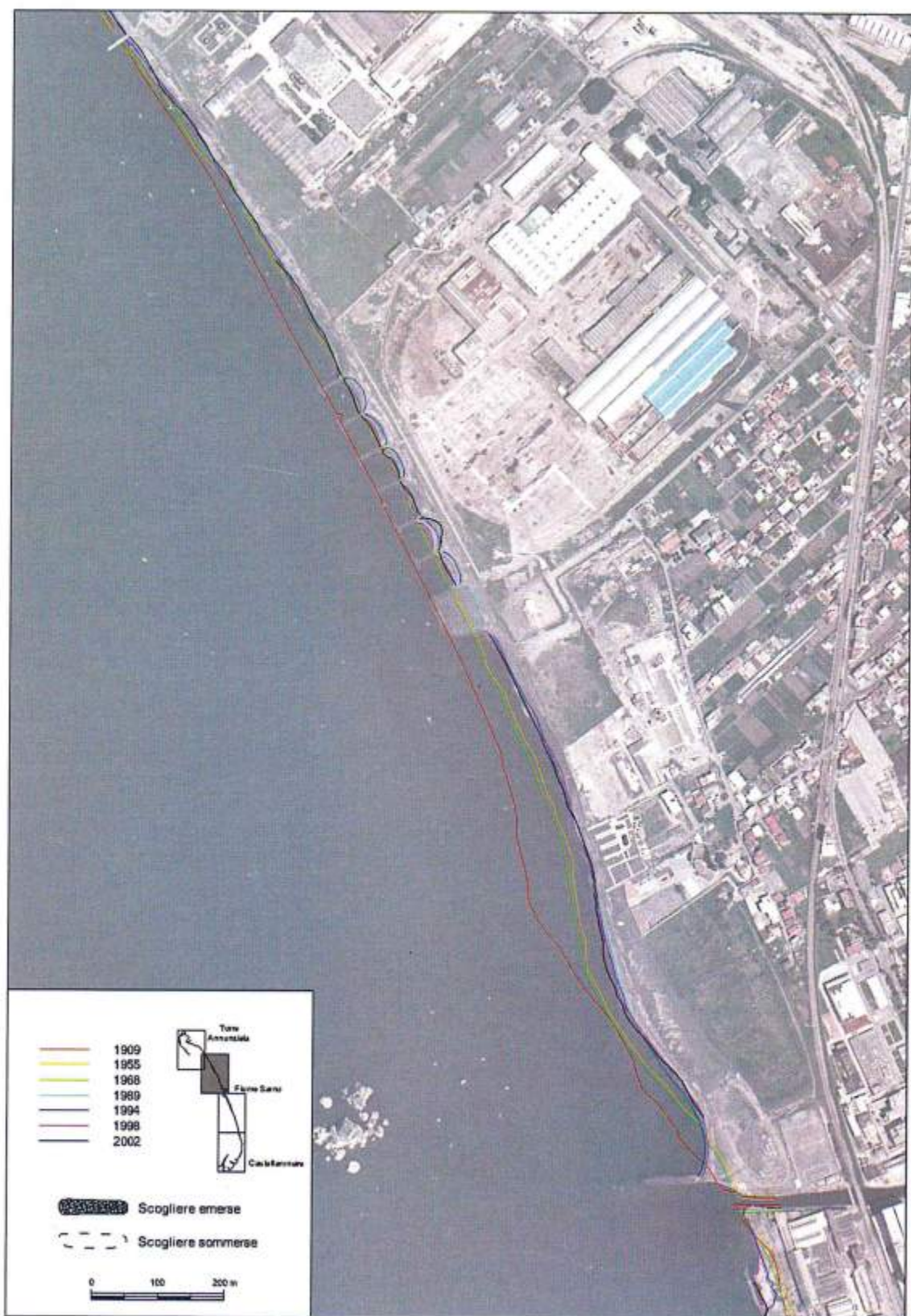


Figura 3b - Evoluzione della linea di riva nel tratto centro-settentrionale del Golfo di Castellammare di Stabia.



Figura 3c - Evoluzione della linea di riva nel tratto centro-meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.



Figura 3d - Evoluzione della linea di riva nel tratto meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.



Figura 4 - Settori nei quali è stato diviso il litorale per lo studio dell'evoluzione della linea di riva.

Tabella 1a - Variazione areale della spiaggia emersa nei diversi settori nei vari intervalli di tempo.

Settori	Lung. (m)	L. set. Ridotti	1909 1954	1954 1968	1968 1989	1989 1994	1994 1997	1994 1998	1997 2002	1998 2002	1954 2002/3
1	460	409		11230	6203	7813	8973	12707			
2	421	280	33,72	4768	-1789	2165	-701	-140	1459	1778	5116
3	481		2423	5911	-3194	615	-2406	-1866	1896	1356	2822
4	504		-4831	6219	-1962	739	-1382	-1027	742	387	4356
5	637		-2888	6271	-4927	1395	-1643	-621	303	-719	1399
6	1244	1146	-10183	10348	4152	397	6607	2712	-1317	2267	18143
7	822	758	-33054	4860	-23450	638	842	-503	18	1298	-17527
8	518		-18707	582	-7029	-1405	-233	4947	3440	-1741	-4645
9	587		-11948	-915	-2490	-499	1052	1331	-1272	-1551	-4124
10	406	308	4518	1224	-3441	-804	1109	1060	-1517	-1186	-2925
11	457		-1732	-254	8418	13155	-13383	13385			
Tot	6537	2907	-76402	50243	-29509	24209	-1164	31987	3764	1889	2616

Tabella 1b - Spostamento lineare medio della linea di riva nei diversi settori nei vari intervalli di tempo.

Settori	Lung. (m)	L. set. Ridotti	1909 1954	1954 1968	1968 1989	1989 1994	1994 1997	1994 1998	1997 2002	1998 2002	1954 2002/3
1	460	409		24,43	13,49	17,00	19,52	27,65			
2	421	280	0,15	11,33	-4,25	5,14	-1,67	-0,33	5,20	6,34	18,25
3	481		5,04	12,30	-6,65	1,28	-5,01	-3,88	3,94	2,82	5,87
4	504		-9,58	12,34	-3,89	1,47	-2,74	-2,04	1,47	0,77	8,64
5	637		-4,53	9,85	-7,73	2,19	-2,58	-0,98	0,48	-1,13	2,20
6	1244	1146	-8,18	8,32	3,34	0,32	5,31	2,18	-1,14	1,98	15,85
7	822	758	-40,20	5,91	-28,52	0,78	1,02	-0,61	0,02	1,71	-23,14
8	518		-36,09	1,12	-13,56	-2,71	-0,45	9,54	6,64	-3,36	-8,96
9	587		-20,34	-1,56	-4,24	-0,85	1,79	2,27	-2,17	-2,64	-7,02
10	406	308	11,14	3,02	-8,48	-1,98	2,73	2,61	-4,91	-3,85	-9,50
11	457		-3,79	-0,56	18,41	28,76	-29,26	29,27			

Tabella 1c - Tasso di spostamento lineare medio della linea di riva nei diversi settori nei vari intervalli di tempo.

Settori	Lung. (m)	L. set. Ridotti	1909 1954	1954 1968	1968 1989	1989 1994	1994 1997	1994 1998	1997 2002	1998 2002	1954 2002/3
1	460	409		1,75	0,64	3,40	6,51	6,91			1,66
2	421	280	0,00	0,81	-0,20	1,03	-0,56	-0,08	1,04	1,59	0,32
3	481		0,11	0,88	-0,32	0,26	-1,67	-0,97	0,79	0,71	0,14
4	504		-0,22	0,88	-0,19	0,29	-0,91	-0,51	0,29	0,19	0,18
5	637		-0,10	0,70	-0,37	0,44	-0,86	-0,24	0,10	-0,28	0,05
6	1244	1146	-0,19	0,59	0,16	0,06	1,77	0,54	-0,23	0,49	0,34
7	822	758	-0,91	0,42	-1,36	0,16	0,34	-0,15	0,00	0,43	-0,49
8	518		-0,82	0,08	-0,65	-0,54	-0,15	2,39	1,33	-0,84	-0,19
9	587		-0,46	-0,11	-0,20	-0,17	0,60	0,57	-0,43	-0,66	-0,15
10	406	308	0,25	0,22	-0,40	-0,40	0,91	0,65	-0,98	-0,96	-0,20
11	457		-0,08	-0,04	0,88	5,75	-9,75	7,32			

I valori in corsivo sono riferiti a settori per i quali, in un determinato intervallo di tempo, la linea di riva è disponibile per un tratto minore, la cui lunghezza è indicata nella terza colonna. Il confronto 1909 - 1954 nel settore n. 2 interessa solamente i 228 m settentrionali. Per i primi tre settori l'anno del rilievo è il 2003.

Le linee di riva sono state riportate, in scala 1:5.000, su di una base costituita dalla foto aerea del 1998 in scala originaria 1:40.000 con risoluzione a terra di 1 m (nelle Figure 3a, 3b, 3c, 3d compaiono questi documenti in scala adattata). Il litorale è stato quindi suddiviso in 11 settori di circa 500 m ciascuno (Fig. 4), ma estendendone alcuni in modo da avere, all'interno di essi, condizioni omogenee per quanto riguarda le

difese costiere. Per ciascun settore, e per ciascun intervallo di tempo, è stata misurata la variazione areale della spiaggia emersa ( $m^2$ ) dalla quale si sono ottenuti gli spostamenti medi della linea di riva (m) ed i rispettivi tassi di spostamento ( $m/anno$ ) (vedi Tabelle 1a, b, c).

### Dal 1909 al 1954

La cartografia IGM in scala 1:25.000 del 1909 (1907 per il solo porto di Torre Annunziata) costituisce il documento più antico disponibile di accuratezza accettabile per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva<sup>1</sup>. Purtroppo, nel settore n. 1 e per buona parte del settore n. 2 la presenza della ferrovia e di abitazioni (elementi per i quali non viene rispettata la scala o la posizione) rende impossibile l'acquisizione del dato di nostro interesse.

Il confronto fra la linea di riva estratta da questa carta e quella riportata sulla successiva cartografia IGM 1954 (Fig. 5) indica una prevalenza dei processi erosivi, con valori elevati in corrispondenza dei settori n. 7, 8 e 9, posti immediatamente a nord della foce del Sarno.

Anche se i valori devono essere normalizzati sulla lunghezza del periodo di tempo considerato (vedi Tab.

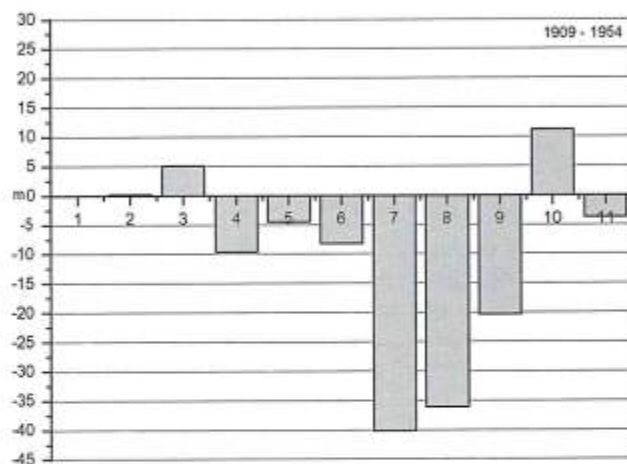


Figura 5 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1909 e il 1954.

1c) l'erosione in questo tratto è rilevante e non può essere messa in relazione ad eventuali opere a mare, dato che il rilievo del 1954 riporta solo un pontile a giorno posto in corrispondenza dello stabilimento ILVA, comunque presente anche nel 1909. Si pone quindi l'ipotesi che in questo periodo si sia verificata una riduzione dell'apporto sedimentario da parte del Fiume Sarno.

In modesto avanzamento risultano i settori n. 3 e 10, mentre il settore n. 2 è praticamente in equilibrio. Si tratta di settori prossimi ai porti di Torre Annunziata e di Castellammare; nel primo già nel 1907 (Fig. 6) vi era un molo foraneo che poteva esercitare un effetto di richiamo dei sedimenti, mentre nel secondo un'analoga struttura viene realizzata fra il 1936 e il 1941.

### Dal 1954 al 1968

Il primo dato disponibile per tutta l'unità fisiografica è costituito dalla linea di riva del 1954 che, messa a confronto con quella del 1968, fornisce indicazioni sull'evoluzione del litorale (Fig. 7) quando i fenomeni erosivi si erano già da tempo affermati, tanto che erano già state costruite 5 scogliere parallele a nord dell'Hotel Miramare e due scogliere aderenti a protezione del Lungomare Garibaldi. Nonostante ciò, il confronto fra le due linee di riva mostra una forte espansione della spiaggia, con un incremento di superficie di circa  $50.000 m^2$ , pari ad un ampliamento di quasi 8 metri. Solo i settori n. 9 e n. 11, sul lato di Torre Annunziata, mostrano una leggera tendenza all'arretramento, con il settore n. 9 che perde circa 1,5 m di arenile, valore comunque abbondantemente all'interno del margine di errore atteso nel confronto.

<sup>1</sup> Il precedente rilievo del 1870 è in scala 1:50.000.



1907 (originale 1:25.000)



1984 (originale 1:25.000)

Figura 6 - Il porto di Torre Annunziata nelle edizioni della cartografia IGM del 1907 e del 1984.

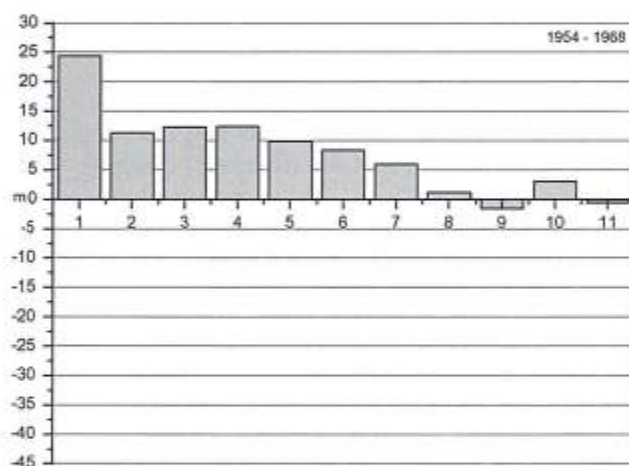


Figura 7 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1954 e il 1968.

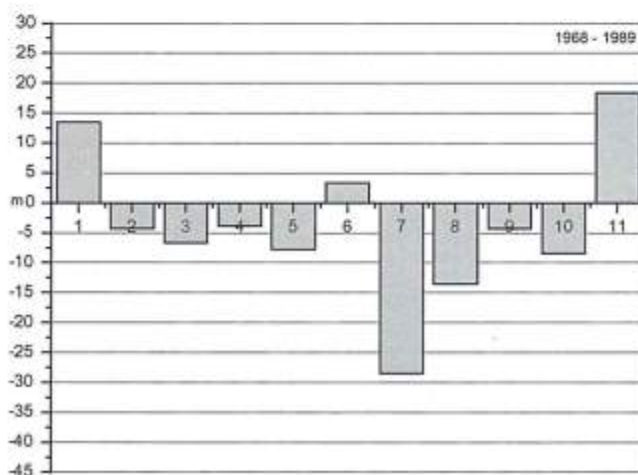


Figura 8 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1968 e il 1989.

Il tratto meridionale, dove erano state costruite le difese, ma non certamente solo a causa di esse, avanza in modo consistente, e nel settore n. 1, adiacente al porto di Castellammare, la spiaggia avanza di più di 24 m ad un tasso di 1,75 m/anno.

Non si hanno dati certi sulle fasi di costruzione e di espansione del porto, ma negli anni 1967/68 fu esteso leggermente il molo in corrispondenza della Villa Comunale e fu prolungata di oltre 100 metri la diga foranea: si ritiene che queste opere siano le principali responsabili della progradazione della spiaggia in questo tratto.

#### *Dal 1968 al 1989*

La situazione risulta ben diversa nel successivo intervallo di tempo (Fig. 8), quando 8 degli 11 settori considerati risultano in erosione. Particolarmente grave è la situazione del settore n. 7, posto immediatamente a nord della foce del Sarno (Fig. 9), dove la linea di riva arretra di quasi 30 m, ad un tasso di quasi 1,5 m/anno. Di ciò è certamente responsabile il pennello di foce in lato destro, che impedisce l'alimentazione diretta della spiaggia settentrionale. Non è stato possibile determinare la data esatta di costruzione di quest'opera, ma essa compare per la prima volta nella cartografia basata sul volo aerofotogrammetrico del 1984 (Fig. 10).

I tratti adiacenti ai due porti subiscono un accrescimento consistente, più di 13 m sul margine di Castellammare e più di 18 su quello di Torre Annunziata, entrambi, quasi certamente, a causa del riparo offerto dalle dighe foranee e dal flusso sedimentario indotto dalla diffrazione delle onde alla loro estremità.

Nei settori adiacenti alla foce del Rio Gragnano la spiaggia arretra di 4 + 7 m, e nel tratto antistante la foce, proprio dopo le mareggiate del 1987, vengono costruite le prime scogliere soffolte.

Complessivamente il litorale perde, in questo intervallo di tempo, quasi 30.000 m<sup>2</sup>, con un arretramento medio di circa 4,5 m.

#### *Dal 1989 al 1994*

L'insabbiamento delle zone protette dai due porti prosegue anche nel periodo successivo (Fig. 11), con una espansione media della spiaggia di quasi 29 m a nord e di circa 17 m a sud; mentre i settori centrali risultano quasi in equilibrio.

I settori adiacenti alla foce del Rio Gragnano, grazie anche alle scogliere soffolte realizzate alla fine del periodo precedente, recuperano una parte della spiaggia che avevano perso. Si ritiene comunque che parte di questo avanzamento, in particolare nel settore n. 2, sia dovuto all'espansione laterale dell'effetto di riparo del porto (Fig. 12).

Complessivamente il litorale si accresce di 24.000 m<sup>2</sup>, con un avanzamento medio della linea di riva di 7,7 m.



Figura 9 - La foce del Sarno e la spiaggia posta a nord di essa, soggetta ad una forte erosione nonostante la protezione fornita dallo Scoglio di Rovigliano.





1870 (originale 1:50.000)



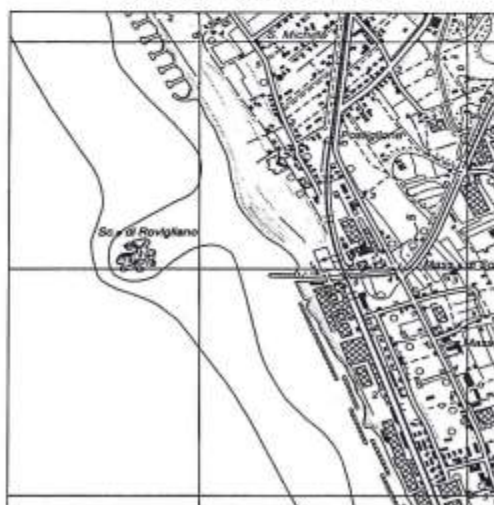
1909 (originale 1:25.000)



1941 (originale 1:25.000)



1954 (originale 1:25.000)



1984 (originale 1:25.000)

Figura 10 - La foce del Sarno nelle diverse edizioni della cartografia IGM.

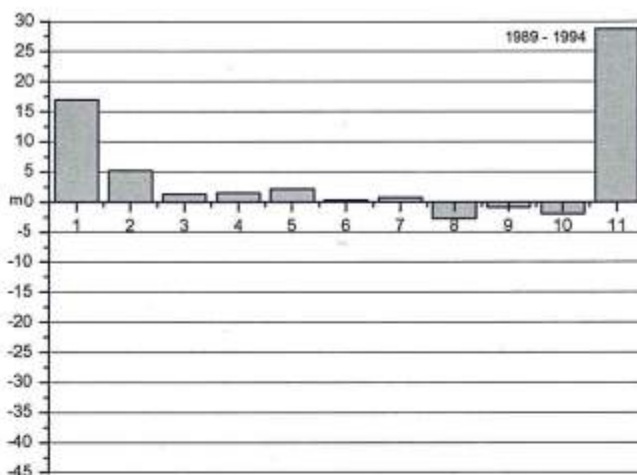


Figura 11 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1989 e il 1994.

#### *Dal 1994 al 1997/98*

I dati relativi alle linee di riva del 1997 e del 1998 indicano tendenze evolutive del litorale sufficientemente concordanti, salvo che nel settore n. 11, adiacente al porto di Torre Annunziata, dove fra il 1994 e il 1997 si sarebbero persi quasi 30 m di spiaggia, completamente recuperati nell'anno successivo (Fig. 13). E' probabile che ciò sia dovuto a lavori eseguiti in questo tratto estremamente alterato dall'attività antropica.

Il lato opposto, settore n. 1, continua nella sua progradazione, con un ulteriore avanzamento di quasi 20 metri fino al 1997 a cui si aggiungono altri 8 metri nell'anno successivo.

Gli altri settori mostrano variazioni modeste, prevalentemente negative nel tratto meridionale e positive in quello settentrionale. Un avanzamento considerevole è presente nel settore n. 8, dove sono stati costruiti 6 pennelli a T (Fig. 14) ed una piattaforma in scogli a protezione dello scarico a mare del Canale industriale (Fig. 15). I pennelli hanno prodotto una risposta immediata del litorale che, come vedremo, non è proseguita nel tempo data la modesta dinamica longitudinale di quest'area e la carenza di sedimenti.

Facendo un bilancio areale complessivo fra il 1954 e il 1998 (non è possibile farlo per il periodo 2002/03 dato che manca la linea di riva nel settore n. 11) si ha un incremento di spiaggia di circa 80.000 m<sup>2</sup>, pari ad un avanzamento medio di quasi 12 metri. Quasi tutto l'incremento areale (76.000 m<sup>2</sup>) si ha nei due settori adiacenti ai porti, mentre nei 9 settori rimanenti si ha un incremento di soli 4.000 m<sup>2</sup>, con alternanza di tratti in erosione e tratti in rispascimento.

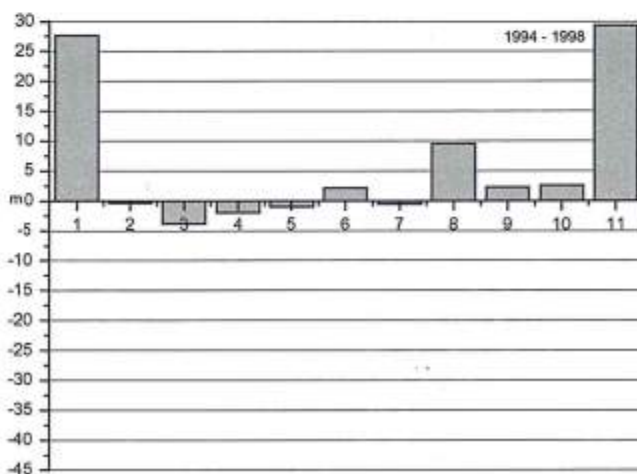
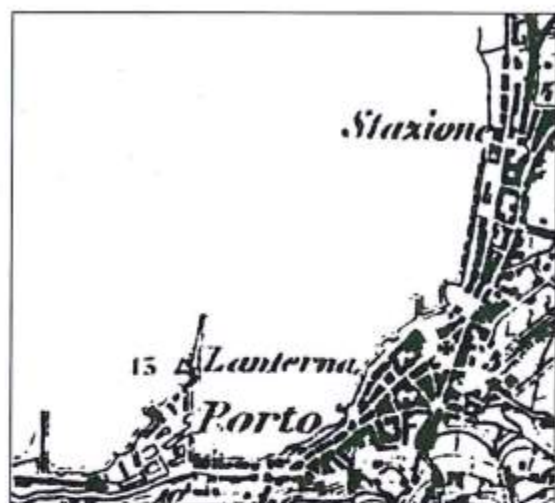


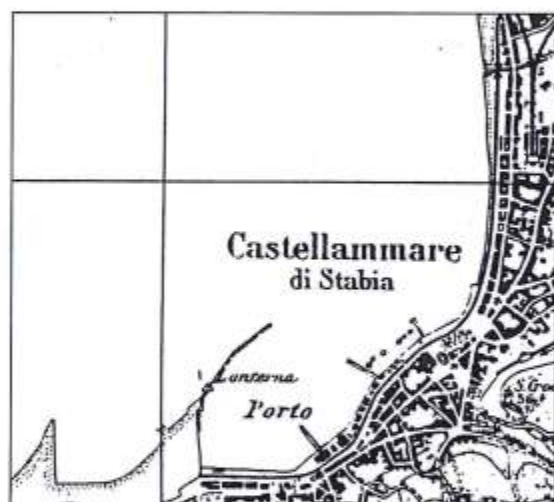
Figura 13 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1994 e il 1998.



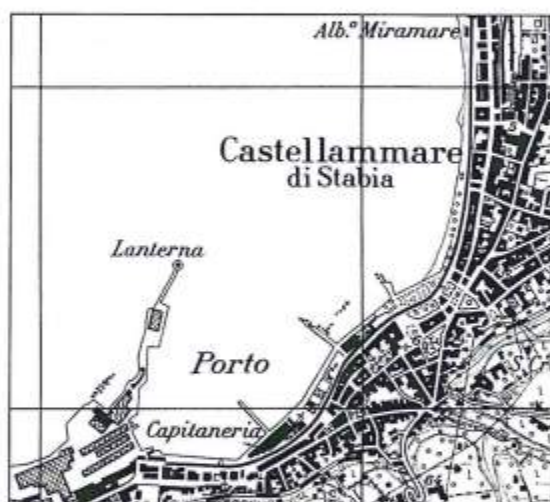
1870 (originale 1:50.000)



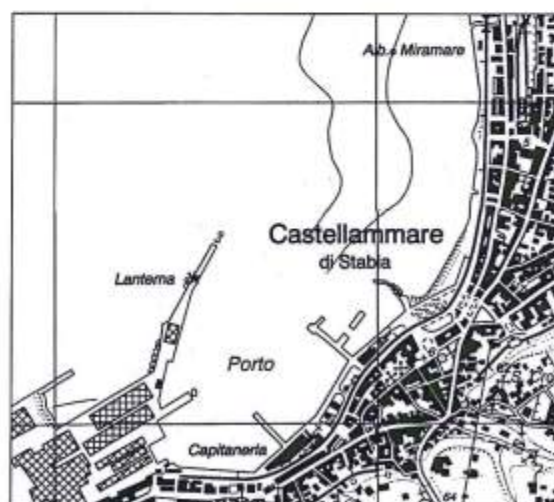
1909 (originale 1:25.000)



1941 (originale 1:25.000)



1954 (originale 1:25.000)



1984 (originale 1:25.000)

Figura 12 - Il porto di Castellammare di Stabia nelle diverse edizioni della cartografia IGM.



Figura 14 - Pennelli a T del tratto centro-settentrionale del Golfo di Castellammare fotografati dalla scogliera posta a difesa dello sbocco del Canale industriale.



Figura 15 - Scogliera aderente a difesa dello scarico del Canale industriale nel tratto settentrionale del litorale.



Figura 16 - La spiaggia adiacente al porto di Castellammare di Stabia, che si è accresciuta di oltre 80 m fra il 1954 e il 1998. Vista verso sud (a sinistra) e verso nord (a destra).

### *Dal 1998 al 2002/03*

Come accennato in precedenza, il rilievo del 2002 dell'ENEA non copre i settori esterni (n. 1 e n. 11), mentre per i settori n. 1 + 3 è disponibile il rilievo effettuato nel 2003 dall'Università di Firenze in occasione del prelievo dei campioni di sedimenti di spiaggia.

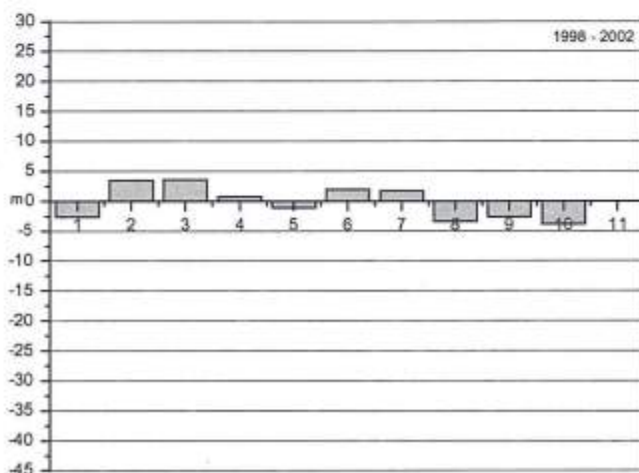


Figura 17 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1998 e il 2002 (2003 nei settori n. 1+3).

I settori del tratto settentrionale mostrano una prevalente tendenza all'arretramento (Fig. 17), dovuta probabilmente alla riduzione dell'alimentazione diretta del Fiume Sarno, la cui foce è ora protetta da due lunghi moli guardiani, mentre in quello meridionale si ha una generale espansione dell'arenile. Ciò è particolarmente evidente nei settori n. 2 e 3, che avanzano rispettivamente di circa 6 e 3 metri. E' credibile che questa progradazione sia l'effetto delle ultime scogliere soffolte, realizzate proprio all'inizio di questo periodo. Il richiamo di sabbia da esse esercitato interesserebbe il settore n. 1, adiacente al porto, che per la prima volta troviamo in leggera erosione.

Il settore n. 6, difeso dalle scogliere parallele (Fig. 18), presenta un avanzamento di un paio di metri, ma i sedimenti presenti sulla parte più alta della spiaggia sono costituiti prevalentemente da materiale di discarica e non è dato di valutare le reale efficacia delle opere di protezione.



Figura 18 - Il tratto difeso dalle scogliere parallele (settore n. 6) sulla cui spiaggia sono presenti ingenti quantità di materiale di discarica.

### Considerazioni generali sull'evoluzione della linea di riva

Sebbene i dati disponibili per lo studio dell'evoluzione della linea di riva del Golfo di Castellammare siano estremamente eterogenei e di difficile confronto, forniscono comunque indicazioni coerenti con le osservazioni effettuate sul posto e, almeno per il settore meridionale, con quanto emerge dallo studio sedimentologico.

Nel complesso l'unità fisiografica non sembra soffrire di un consistente deficit sedimentario, ma anzi, almeno in termini areali, le spiagge nel complesso si è accresciuta di circa 80.000 m<sup>2</sup> fra il 1954 e il 1998. Ciò non è immediatamente interpretabile in termini di volume dato che il profilo della spiaggia, in particolare nella parte sommersa, non si mantiene costante nei vari settori.

La forte espansione della spiaggia nei due settori riparati dai moli foranei dei porti di Torre Annunziata e di Castellammare di Stabia interessa probabilmente solo la fascia prossimale, mentre nei settori in erosione è probabilmente tutto il profilo, fino alla profondità di chiusura, che risulta ribassato.

In ogni caso è possibile affermare che, dal 1954 ad oggi, questo tratto di litorale ha visto una consistente redistribuzione dei sedimenti presenti a favore dei tratti posti alle due estremità, dove i moli foranei dei due porti determinano condizioni di bassa energia e favoriscono i processi di sedimentazione (Fig. 20). Il flusso diretto verso queste zone è favorito dalla diffrazione delle onde sulla testata dei moli, che determina la rotazione dei fronti d'onda che giungono paralleli alla costa conferendo loro una componente longshore in direzione dei porti.

Le opere di difesa hanno avuto in genere un effetto limitato, in quanto lontano dalle strutture portuali il flusso sedimentario è modesto, sia per la limitatezza degli input sedimentari che per la direzione di approccio del moto ondoso, prevalentemente ortogonale a costa. Ciò è dimostrato anche dal ridotto insabbiamento dei pennelli.



Figura 19 - Il litorale del settore n. 2 nel tratto adiacente alla foce del Rio Gragnano (a sinistra) e davanti al Lungomare Garibaldi (a destra), dove la spiaggia si è riformata negli ultimi anni.

Di difficile valutazione è l'efficacia delle scogliere soffolte, poste su fondali notevoli e che in alcuni tratti hanno una forte sommergenza: nel loro breve periodo di presenza il litorale su cui insistono mostra comunque una leggera tendenza alla progradazione e le caratteristiche granulometriche dei sedimenti, che analizzeremo nel prossimo paragrafo, mostrano di risentire della presenza di queste opere.

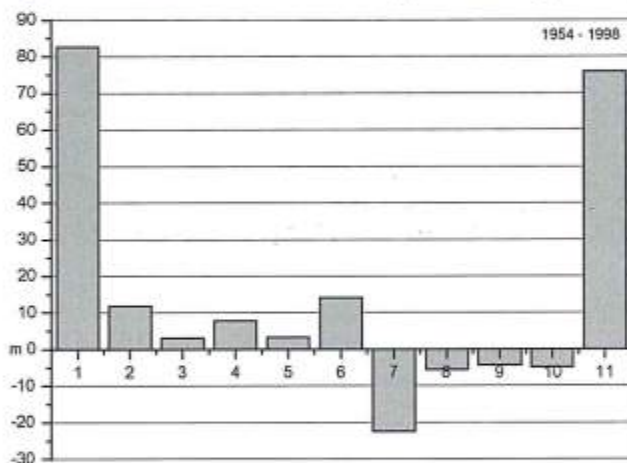


Figura 20 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1954 e il 1998. La scala verticale del grafico è compressa rispetto a quella dei grafici precedenti.



Figura 21 - La scogliera parallela posta nel settore n. 2. A causa di uno sfavorevole rapporto lunghezza/distanza da riva, la sua efficacia è assai limitata e determina solo un debole saliente.



Figura 22 - La spiaggia del settore n. 3, che ha subito alterne fasi di erosione e progradazione e che, dopo la costruzione delle scogliere soffolte, mostra una tendenza all'avanzamento.

## Caratteristiche granulometriche dei sedimenti del paraggio

### Materiali e metodi

Nel gennaio 2003 è stata effettuata una campionatura di sedimenti di spiaggia emersa e sommersa durante la quale sono stati prelevati, con una benna Van Veen, 75 campioni su 13 profili perpendicolari a costa. Il posizionamento è stato effettuato con GPS differenziale e la profondità di ciascun campione è stata stimata per mezzo di uno scandaglio a mano.

A causa di una elevata presenza di piroclastiti (Fig. 23), si è resa necessaria una preliminare separazione dei granuli a bassa densità, per evitare di includere nelle varie classi dimensionali elementi che, in funzione del loro peso specifico, hanno un comportamento idraulico notevolmente diverso, falsando le considerazioni che dallo studio tessiturale consentono di trarre indicazioni sulla dinamica dei sedimenti. I campioni, dopo la separazione della frazione fine ( $< 4 \text{ phi} = 0,063 \text{ mm}$ ), sono stati immersi in una soluzione salina di densità 1.3 che ha messo in galleggiamento i granuli di piroclastiti. Il campione è stato quindi lavato con lo stesso setaccio da 0,063 mm per estrarre il sale ed asciugato in forno. Il problema non è stato comunque completamente risolto, anche se una successiva analisi al microscopio ha indicato che i granuli piroclastici rimasti nel campione sulla quale è stata effettuata l'analisi granulometrica sono relativamente pochi.

I campioni sono stati quindi sottoposti ad analisi granulometrica per mezzo di setacciatura meccanica a secco con intervallo di  $1/2 \text{ phi}$  e per una durata di 10 minuti al fine di ottenere i parametri grafici di Folk e Ward (1957): Media ( $M_z$ ), Classazione ( $\sigma_1$ ) ed Asimmetria ( $Sk_1$ ).

Per ciascun parametro, ad eccezione dell'Asimmetria, sono state disegnate carte in scala 1:5.000 ed è stata effettuata l'analisi delle possibili direzioni di trasporto dei sedimenti sia sulla base dei vettori Media ( $M_z$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ ) che con il metodo di Gao e Collins (1992).

Nella discussione di questi dati è opportuno tenere presente che una parte non quantificabile del materiale presente in prossimità della riva proviene da demolizioni o altre attività antropiche e può compromettere la ricostruzione della dinamica sedimentaria di questo tratto di litorale.

### Dimensioni medie ( $M_z$ ) dei sedimenti

I sedimenti presenti nell'area di studio mostrano una notevole varietà dimensionale, passando da  $-3.88$  a  $+3.86 \text{ phi}$ , ossia dalla *ghiaia media* alla *sabbia molto fine*, secondo la classificazione di Krumbein (1934).

La correlazione fra il parametro  $M_z$  e la profondità di campionamento (Fig. 24) è piuttosto scarsa con una debole tendenza alla riduzione delle dimensioni con la profondità. Da questo trend escono comunque i campioni di *step*, qui associati alla profondità di 0,5 m, che sono in genere rappresentativi delle condizioni di massima energia nel profilo della spiaggia.

Le dimensioni massime si ritrovano nel settore settentrionale che, probabilmente, risente in modo più diretto dell'alimentazione fornita dal Fiume Sarno. Gli altri punti in cui i sedimenti di *step* sono più grossolani sono posti in corrispondenza della foce del Fosso Gragnano (Fig. 25) e del Rivo della Calcatella (Fig. 26), che dimostrano così di contribuire, seppure in modo marginale, all'alimentazione del litorale. Anche dal punto di vista areale (Fig. 27) i sedimenti delle classi maggiori si ritrovano nel tratto settentrionale, dove la *sabbia grossolana* si spinge fino alla profondità massima campionata (4 m). Procedendo verso sud si ha una progressiva riduzione delle dimensioni medie, fino a che nel tratto adiacente al porto sulla battigia si hanno delle *sabbie medie e fini*. Sui fondali antistanti si ritrovano *sabbie molto fini* che, nel tratto settentrionale, sono presenti solamente dietro alle scogliere sommerse, dove l'energia del moto ondoso viene attenuata.

Figura 23 - Fotografia di una campione di battigia particolarmente ricco di frammenti di piroclastiti.



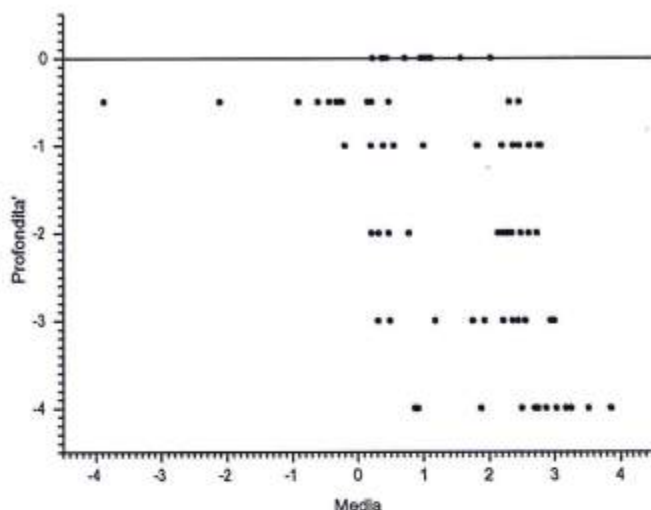


Figura 24 - Confronto fra il valore delle dimensioni medie ( $M_z$ ) dei sedimenti del settore meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia e la loro profondità.



Figura 25 - Asta terminale del Rio Gragnano. Si notano in alveo materiali a granulometria estremamente eterogenea.



Figura 26 - Sbocco del Rivo della Calcatella sulla spiaggia di Castellammare.

### *Dimensioni del Primo percentile*

Le dimensioni del Primo percentile della distribuzione granulometrica sono rappresentative dei granuli di dimensioni massime presenti nei campioni e sono da correlare all'energia del moto ondoso capace di muovere questi elementi. Ciò ovviamente non è vero in quei casi in cui il deposito è residuale, cosa che può avvenire in corrispondenza delle foci di fiumi e di fossi o dove vi è stato un versamento artificiale di materiale: in queste zone si possono ritrovare degli elementi grossolani che il moto ondoso non riesce a rimuovere.

Si ritiene che questo sia il caso dei materiali presenti alla foce del Rivo Calcatella (Fig. 28) dove, per il riparo fornito dalla diga foranea e dal primo tratto della scogliera soffolta, non vi è energia sufficiente a mobilitare i materiali più grossolani che si accumulano in prossimità della foce.

La limitatezza dell'area investigata non consente una chiara interpretazione della dinamica sedimentaria del tratto settentrionale, dove i sedimenti grossolani potrebbero essere correlati, come precedentemente ipotizzato, all'input sedimentario del Fiume Sarno, ma potrebbero essere dovuti anche alla discarica di materiali poco classati.

I valori più elevati delle dimensioni del Primo percentile si ritrovano al largo della zona precedentemente citata e in corrispondenza dei varchi fra le scogliere soffolte, anche se sorprende che opere posizionate su di un fondale di 5 m e con una notevole sommersa (localmente anche più di 3 m) possano avere un così evidente impatto sulla dinamica sedimentaria.



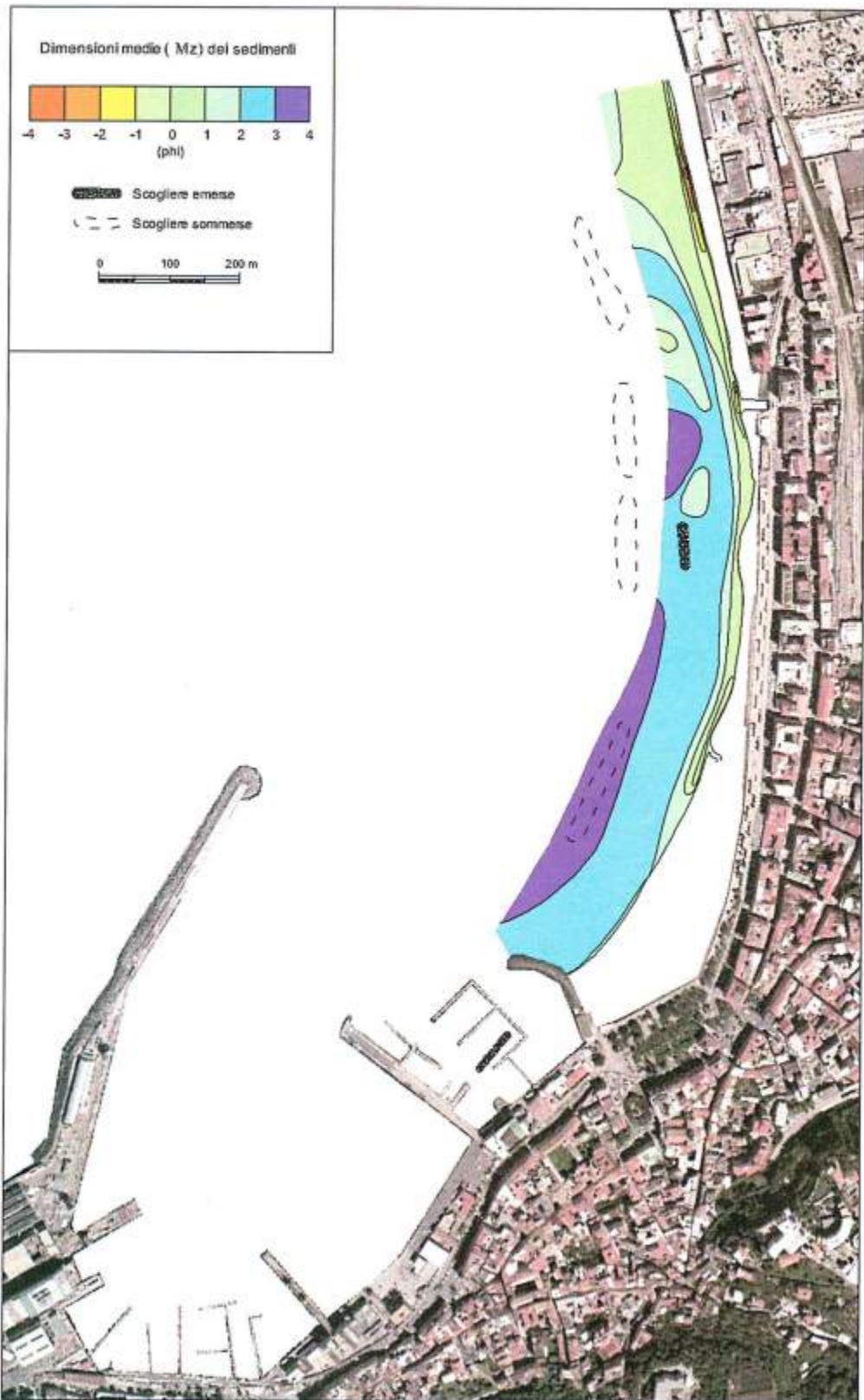


Figura 27 - Dimensioni medie (Mz) dei sedimenti del settore meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.

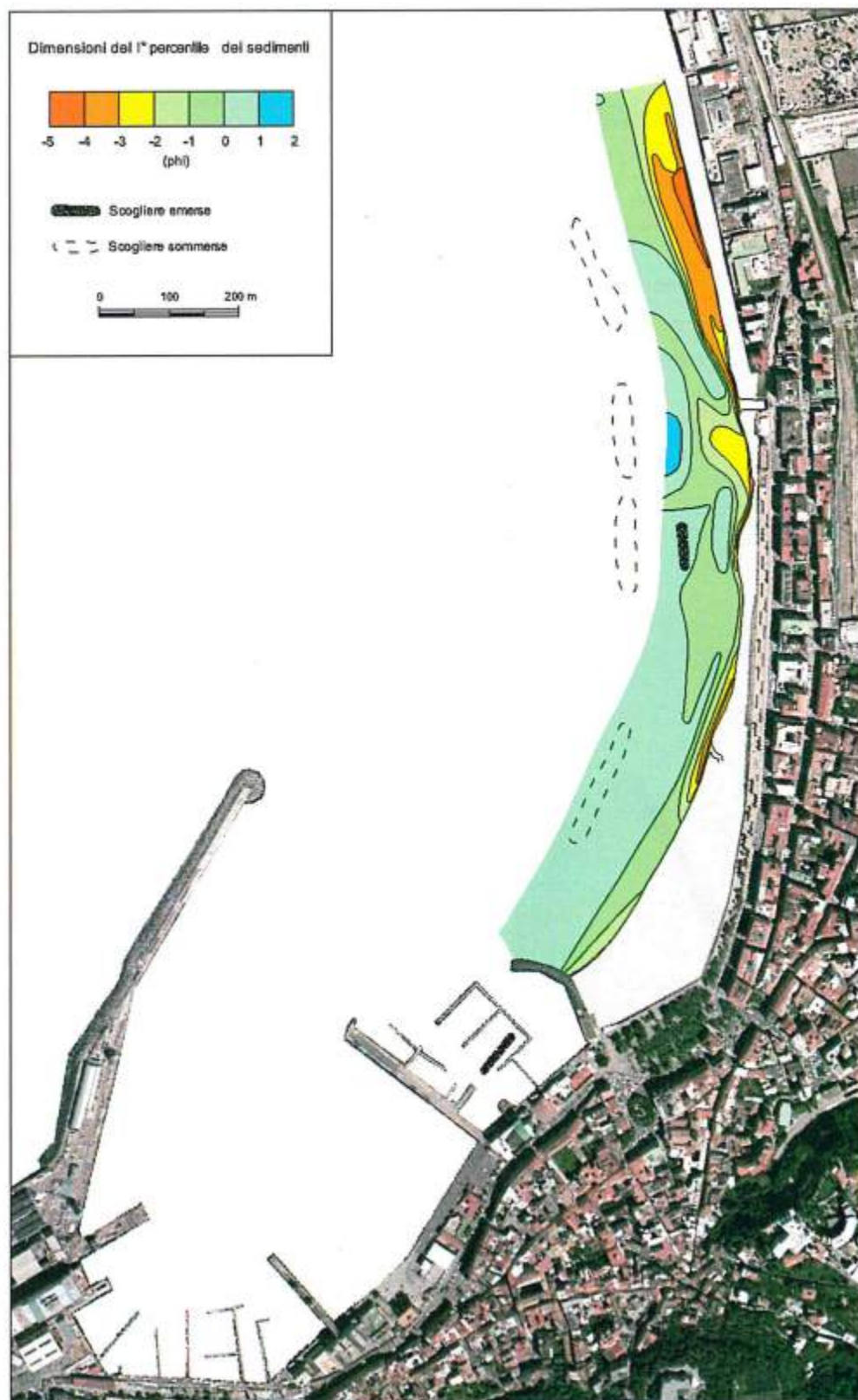


Figura 28 - Dimensioni del primo percentile dei sedimenti del settore meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.

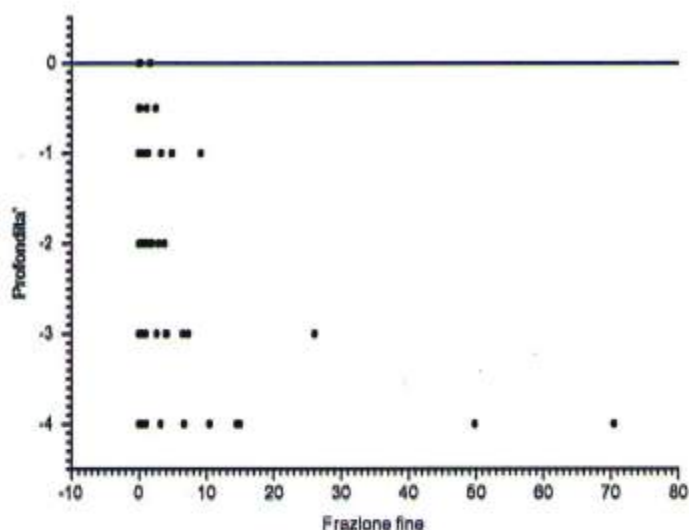


Figura 29 - Confronto fra la percentuale di frazione fine nei sedimenti e la loro profondità.

#### Percentuale di frazione fine (<0.063 mm)

I granuli di dimensioni inferiori a 0.063 mm (argille e limi) generalmente non si trovano in ambienti ad elevata energia poiché sono da questa rapidamente asportati. Nelle spiagge raramente raggiungono percentuali apprezzabili in prossimità della battigia e tendono ad accumularsi sui fondali maggiori.

Ciò appare evidente nel grafico che correla la percentuale di frazione fine con la profondità (Fig. 29); in esso si nota la presenza di alcuni punti che escono dal trend generale, in particolare alle profondità di 3 e 4 metri. Il valore massimo (70%) si ha dietro alla scogliera soffiata posta al largo della foce del Rio Gragnano (Fig. 30). Qui, grazie alla protezione della struttura, si depositano i materiali fini, in parte organici (residui vegetali ed animali), portati da questo corso d'acqua.

Un'altra zona di sedimentazione dei limi è posta nel tratto meridionale, dove si risente della protezione del molo foraneo del porto.

#### Classazione dei sedimenti ( $\sigma_1$ )

La Classazione dei sedimenti è correlabile in modo diretto all'energia dell'ambiente di sedimentazione, ma purtroppo questo parametro, in natura, è strettamente influenzato anche dalle dimensioni medie dei sedimenti e quindi una sua interpretazione in termini energetici è assai più complessa. La Classazione è generalmente buona per le *sabbie fini*, cosa che nel nostro caso risulta evidente anche dal diagramma di Figura 31, ma anche per la *sabbia grossolana* e *molto grossolana* che si ritrova sullo *step* (Fig. 32) e quindi in condizioni di maggiore energia.

Va comunque sottolineato che in nessuna posizione del profilo di spiaggia si ritrovano sedimenti *molto ben classati* (secondo la classificazione di Folk e Ward, 1957) e pochi sono anche quelli *ben classati*, a riprova dei modesti livelli energetici di questo tratto di costa e della difficoltà che ha il moto ondoso a selezionare i materiali eterogenei portati dai corsi d'acqua.

Per quanto riguarda la distribuzione areale dei valori (Fig. 32) si nota una forte variabilità nel tratto settentrionale e centrale, dove il litorale è più articolato e dove si hanno diverse provenienze dei sedimenti, mentre in prossimità del porto, dove i livelli energetici sono inferiori ma più costanti, i materiali presentano una classazione simile.

Si sottolinea che la scarsa classazione dei sedimenti di battigia e di *step* presenti in prossimità del porto è, almeno in parte, dovuta alla presenza di molti granelli di pomice<sup>2</sup> che evidentemente si accumulano nelle zone più riparate allargando le distribuzioni granulometriche.

<sup>2</sup> Si ricorda a questo proposito che la pomice è stata solo parzialmente separata e che granelli di dimensioni maggiori, ma di peso specifico minore, hanno un comportamento idraulico analogo a quello delle sabbie più fini.

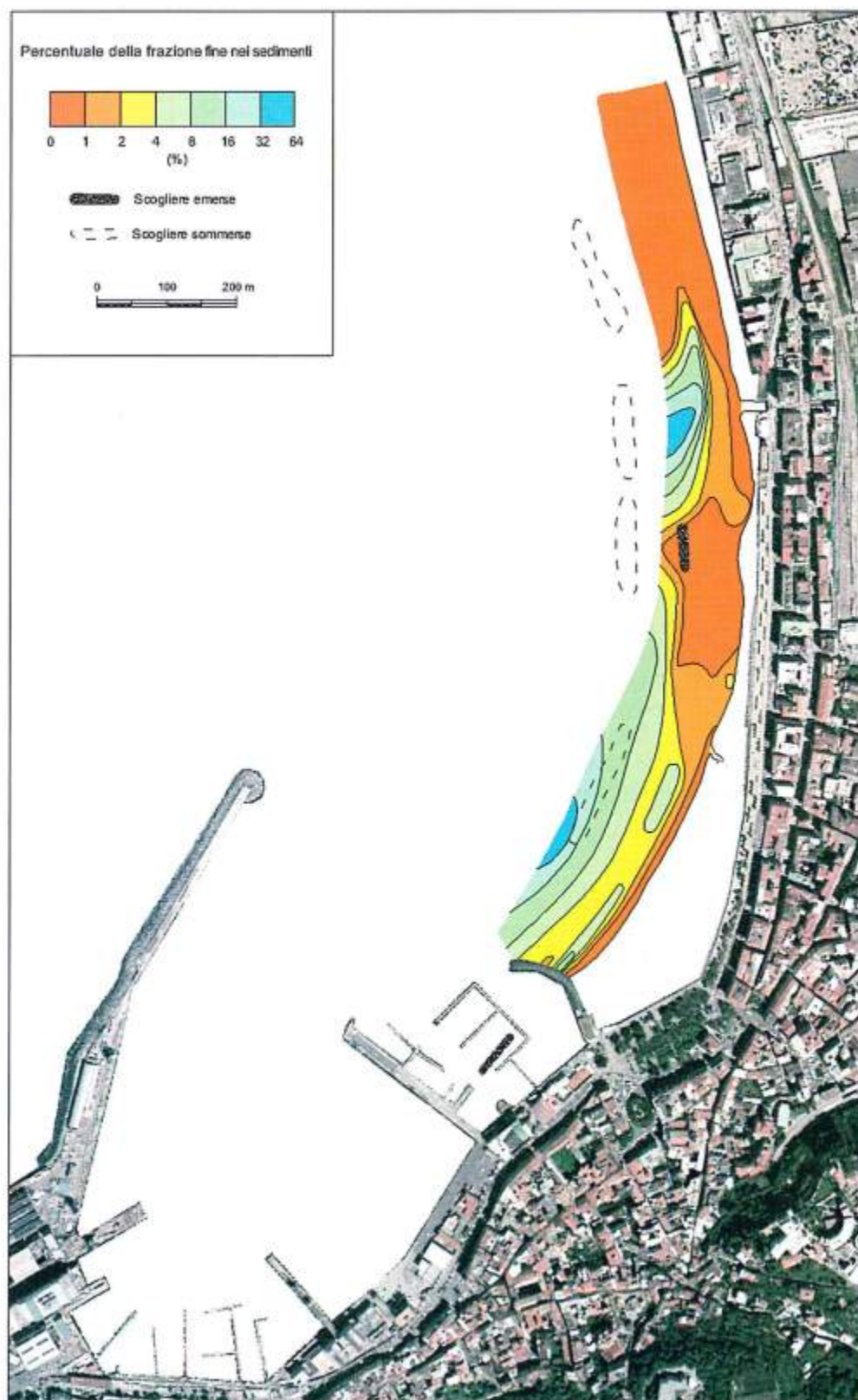


Figura 30 - Percentuale di frazione fine nei sedimenti del settore meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.

### *Direzione di trasporto dei sedimenti*

L'analisi delle caratteristiche granulometriche di campioni di sedimenti raccolti in una determinata area consente di formulare ipotesi sul flusso sedimentario nella zona. Questa possibilità deriva dal fatto che il trasporto dei materiali da parte di un fluido ne determina una variazione granulometrica ed è quindi possibile associare a coppie di campioni caratteristiche rispettivamente di "sorgente" e di "deposito".

I presupposti teorici sono in realtà ancora oggetto di discussione e i diversi Autori riconoscono effetti diversi all'azione di trasporto. Mentre inizialmente si pensava che durante il processo di trasporto i materiali dovessero necessariamente assumere dimensioni minori (*downdrift fining*, vedi ad esempio Pettijhon e Ridge, 1932 e McCave, 1978), si è poi scoperto che è anche possibile un fenomeno inverso, nel quale i sedimenti diventano progressivamente più grossolani lungo le direzioni di trasporto, in particolare quando si ha una graduale perdita verso il largo delle frazioni a granulometria minore (Schalk, 1938). In ogni caso la gran parte dei modelli oggi utilizzati si basa sul presupposto che i materiali che costituiscono un deposito hanno una Classazione migliore di quelli riconoscibili come sorgente.

Inoltre, sono stati sviluppati modelli, talvolta in contrasto fra loro, che si basano anche sul valore che assume l'Asimmetria (vedi Gao e Collins, 1992 per un elenco piuttosto completo di questi modelli).

In questo lavoro si fa riferimento al modello sviluppato Gao e Collins (1992) per una descrizione del quale si rimanda a Pranzini e Rossi (2000).

Comunque, anche le direzioni secondo le quali si ha una semplice riduzione delle dimensioni medie dei sedimenti (direzione di incremento del parametro  $Mz$ ) e quelle nelle quali si ha un miglioramento della Classazione (direzione di riduzione del parametro  $\sigma_1$ ) possono dare informazioni utili sulla dinamica sedimentaria del paraggio, in particolare se letti alla luce di altri parametri morfologici.

In ogni caso, gli originari vettori in uscita da ciascun punto vengono successivamente sommati a dare un vettore risultante. L'insieme dei vettori risultanti viene quindi sottoposto ad un processo di filtratura "passa basso" per eliminare l'informazione ad alta frequenza ed ottenere quindi i flussi sedimentari regionali. Se ciò fa perdere l'informazione puntuale, d'altra parte consente una più facile lettura dei risultati e l'eliminazione di punti singolari che potrebbero essere legati a fattori estremamente locali od anche a piccoli errori di analisi, probabili nel nostro caso per la presenza delle piroclastiti.

In questo studio il confronto fra campioni adiacenti è effettuato per mezzo di un programma implementato presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze e che consente di tracciare le direzioni dei vettori relativamente a qualsiasi parametro granulometrico e all'insieme dei parametri considerati da Gao e Collins (1992). In considerazione del fatto che il riconoscimento delle possibili direzioni di trasporto avviene in una logica SI/NO non quantificata, si è preferito assegnare, contrariamente a quanto proposto da Gao e Collins (1992), una dimensione costante alle frecce che identificano i vettori.

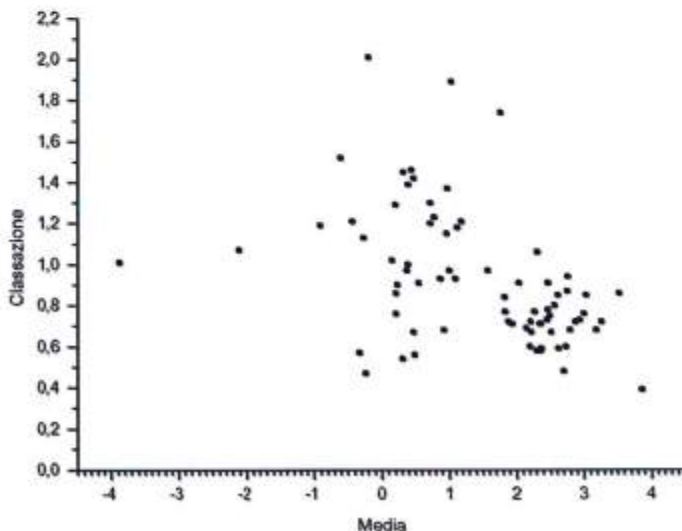


Figura 31 - Confronto le dimensioni medie ( $Mz$ ) e la classazione ( $\sigma_1$ ) dei sedimenti.

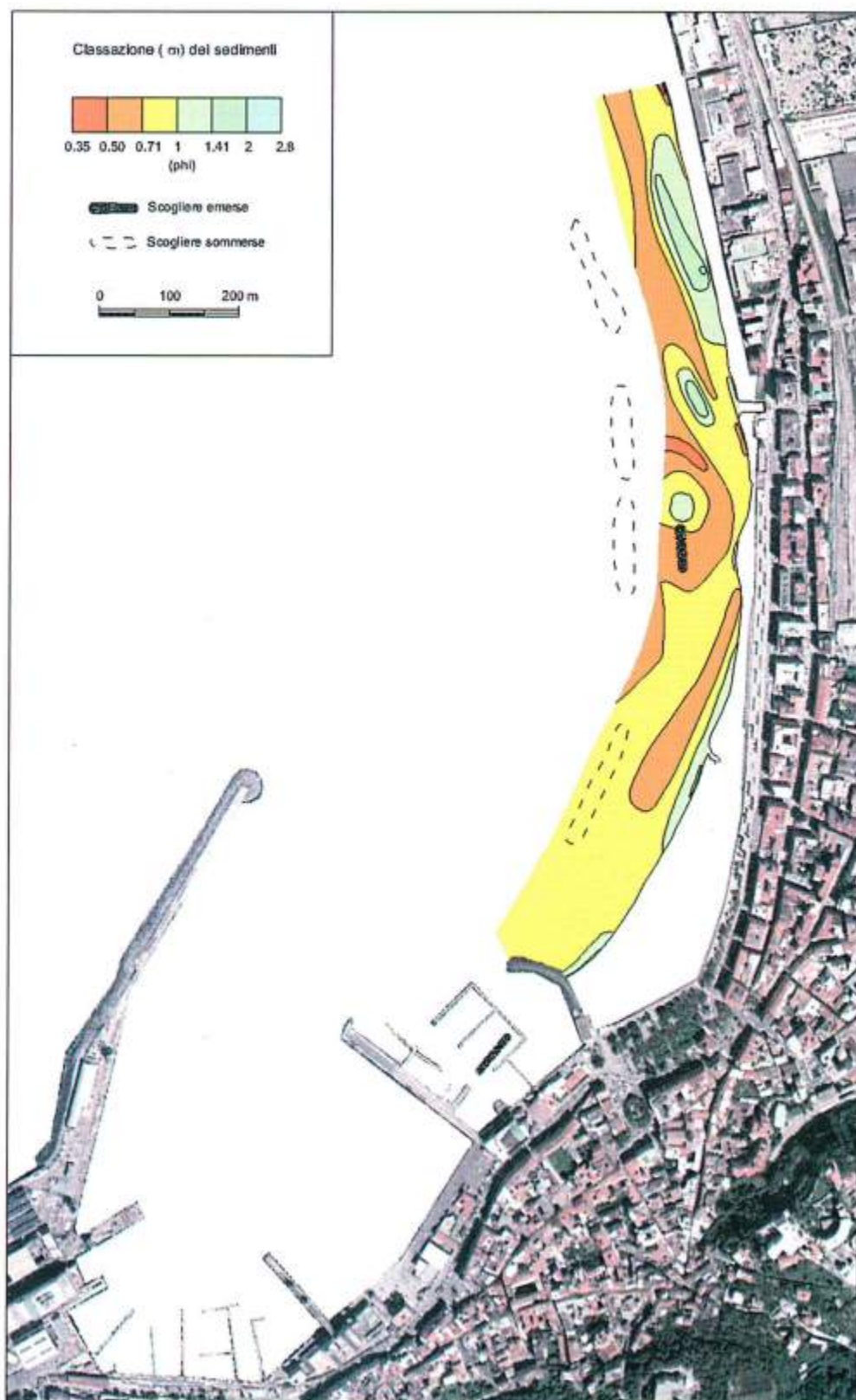


Figura 32 - Classazione ( $\sigma$ ) dei sedimenti del settore meridionale del Golfo di Castellammare di Stabia.

### Vettori Media ( $Mz$ )

Tracciando la direzione nelle quali il valore di  $Mz$  diventa maggiore (dimensioni dei sedimenti minori) si identificano i flussi sedimentari quali risulterebbero nell'ipotesi di un *downdrift fining* (Fig. 33).

Nel nostro caso, dopo la filtratura su di una maglia 3x3 dei vettori risultanti, si ottiene la rappresentazione di un flusso prevalente diretto da nord verso sud, che subisce però un'inversione in prossimità del porto di Castellammare, con una convergenza che si colloca in corrispondenza dell'ultima scogliera soffolta, convergenza che potrebbe essere correlata a fenomeni di riflessione sul molo di sottoflutto del porto.

In corrispondenza di tutte le sezioni, fatta eccezione per quella più meridionale, i sedimenti di battaglia mostrano una debole componente *on-shore*.

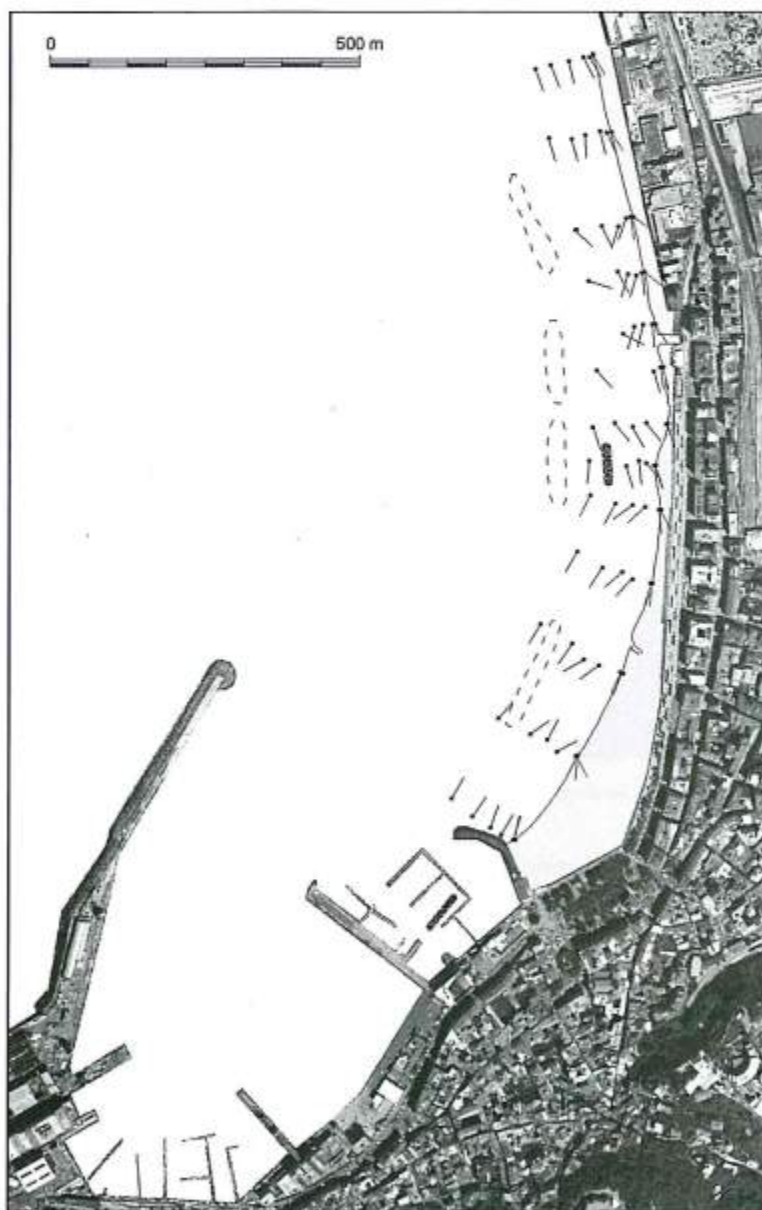


Figura 33 - Flussi sedimentari nell'ipotesi di un *downdrift fining*.

### Vettori Classazione ( $\sigma_1$ )

Il quadro precedentemente tracciato trova conferma nell'elaborazione dei dati relativi alla Classazione ( $\sigma_1$ ), che mostra un flusso prevalente diretto verso sud e l'inversione in prossimità del porto (Fig. 34). La situazione è leggermente più articolata in corrispondenza della scogliera parallela emersa ed immediatamente a sud di essa, mentre i campioni prelevati alle profondità maggiori mostrano una chiara componente *on-shore*.

### Vettori di trasporto di Gao e Collins

Il confronto contemporaneo dei valori di Media ( $Mz$ ), Classazione ( $\sigma_1$ ) ed Asimmetria ( $Sk_1$ ) pone restrizioni assai maggiori alle possibilità di flusso, ma queste vengono poi mascherate dall'operazione di filtratura.

I vettori di trasporto che si evidenziano (Fig. 35) coincidono abbastanza bene, come era da attendersi, con quelli precedentemente identificati. In particolare abbiamo lo spostamento dei sedimenti del tratto settentrionale in direzione del porto, con un'evidente componente *on-shore* per quasi tutti i vettori.

Nel tratto centrale i flussi mantengono la stessa direzione, ma tutti acquisiscono progressivamente una più forte componente *on-shore* che diventa prevalente a sud della scogliera parallela.

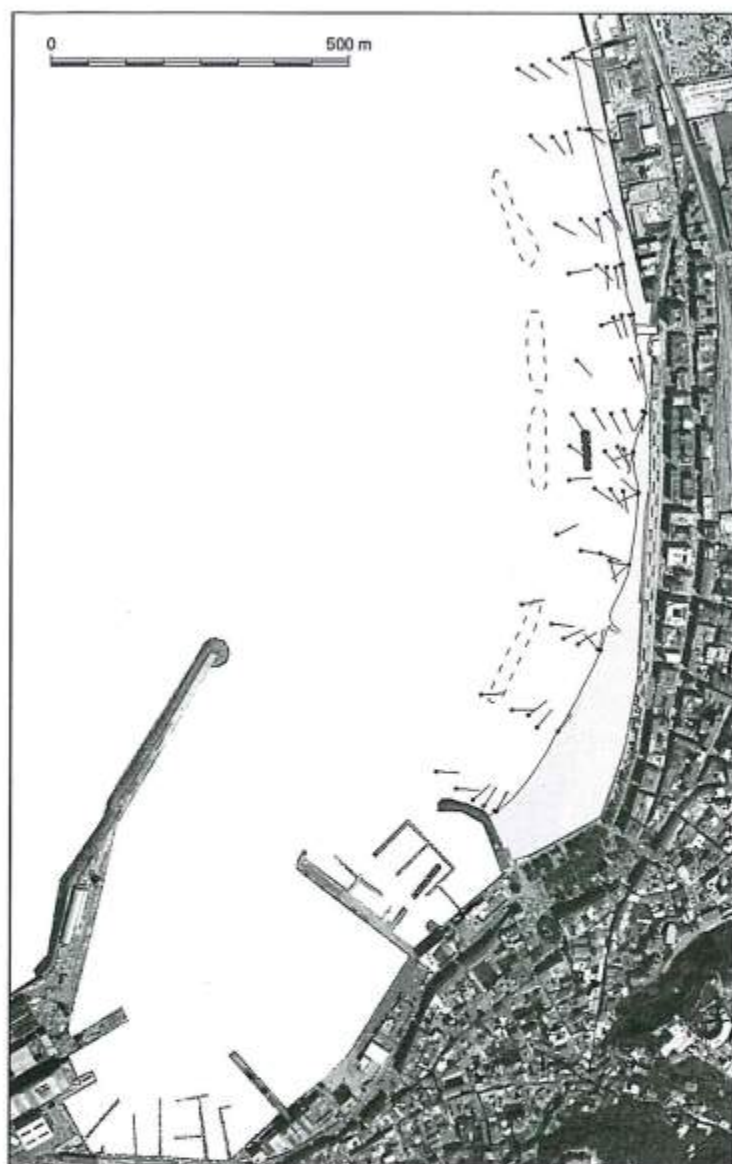


Figura 34 - Flussi sedimentari nell'ipotesi di un *downdrift sorting*.

Tutte le elaborazioni prodotte consentono di identificare un flusso sedimentario diretto da nord verso sud, con una più o meno evidente componente *on-shore*. Ciò significa che questo tratto di litorale è alimentato prevalentemente da sedimenti provenienti dall'esterno della zona considerata e che i contributi locali, seppur identificabili su alcune elaborazioni, sono minoritari.

*Considerazioni conclusive sulle direzioni di trasporto dei sedimenti*

Il flusso sedimentario si riduce in corrispondenza del porto, non tanto per l'ostacolo costituito dal molo di sottoflutto, che anzi determina localmente un'inversione del *drift* per fenomeni di riflessione del moto ondoso, quanto per la riduzione dell'energia dovuta alla presenza della diga foranea. In quest'area, comunque, possono farsi sentire anche gli effetti negativi dell'operazione di filtratura effettuata sui vettori risultanti in ciascuna elaborazione.

Le opere di difesa realizzate su questo tratto di costa, che pure abbiamo visto avere un effetto locale sulle caratteristiche tessiturali dei sedimenti, non influenzano in modo rilevante la dinamica sedimentaria a scala regionale.

### Conclusioni e suggerimenti per il riequilibrio del litorale

Il confronto fra le varie linee di riva disponibili consente di affermare che l'intera unità fisiografica compresa fra Torre Annunziata e Castellammare di Stabia non soffre oggi di un deciso deficit sedimentario.

Negli ultimi anni si sono però verificate forti e localizzate variazioni della linea di riva conseguenti agli interventi antropici realizzati lungo il litorale, ma nel complesso gli avanzamenti pareggiano le erosioni.

I due porti posti alle estremità, per la configurazione dei moli foranei, costituiscono un forte richiamo dei sedimenti e determinano un avanzamento della spiaggia nei settori di litorale adiacenti. Ciò avviene a spese dei tratti contigui, che hanno registrato, in alcuni intervalli di tempo, forti tassi di arretramento.

Per contrastare l'erosione sono state adottate diverse tipologie di difesa: opere ortogonali a riva (pennelli) e parallele (scogliere emerse e sommerse).

In considerazione del fatto che, a causa della configurazione del golfo, le onde giungono a riva quasi sempre ortogonalmente, l'efficacia dei pennelli è stata limitata e il loro effetto è più dovuto alla configurazione a T, che crea diffrazione dell'onda, che non all'opera di intercettazione del modesto flusso sedimentario.





Figura 35 - Flussi sedimentari derivanti dall'applicazione del metodo di Geo e Collins (1992).

Le opere parallele presenti nel golfo sono di tre tipi: nella parte centrale sono emerse, vicinissime a riva e con varchi molto stretti, vi è poi una scogliera parallela più lontana da riva ed una lunga soffolta segmentata su alti fondali. Le prime hanno intrappolato un po' di sedimenti, forse anche materiale di riporto, ma si comportano essenzialmente come una scogliera radente ed impediscono la sedimentazione nel tratto di fondale antistante. Lo specchio d'acqua interno è assolutamente inutilizzabile per la balneazione dato che non vi è ricambio idrico.

Quella esterna è isolata ed assai lontana da costa: ha potuto generare solamente un piccolo saliente che però si riduce per il flusso di sedimenti diretto verso il porto di Castellammare.

I vari tratti della scogliera soffolta risultano, dai rilievi effettuati dall'ENEA, posti su di un fondale di circa 5 metri ed inoltre presentano una sommergenza variabile, spesso anche notevole. Nonostante ciò queste opere interagiscono in modo sensibile con il flusso dei sedimenti nella zona e sembrano influire positivamente sul bilancio sedimentario dei tratti da esse protetti.

I dati sedimentologici, relativi al solo settore meridionale (che comunque è speculare a quello settentrionale), confermano questa dinamica con un flusso di materiali fini diretto verso l'area più riparata e la presenza di sedimenti grossolani residuali nei tratti di litorale più esposti. Complessivamente si evidenzia un flusso sedimentario diretto da nord verso sud, tanto da fare ritenere che l'alimentazione di questo settore sia garantita prevalentemente dal Fiume Sarno.

Ciò consente di affermare che è possibile raggiungere un equilibrio della costa con impegni sostenibili sia in termini economici sia in termini ambientali. Non è infatti necessario compensare un forte deficit sedimentario, quanto ristabilire equilibri all'interno dell'unità fisiografica.

Per fare ciò è assolutamente indispensabile modificare i moli di sottoflutto dei porti per impedire un ulteriore richiamo di sedimenti o, in alternativa, costruire opere in grado di ridurlo.

Si ritiene inoltre opportuno rimuovere o abbassare le scogliere parallele vicine a riva, in modo da eliminare o ridurre la riflessione del moto ondoso su di esse.

Il tratto di litorale difeso dai pennelli a T necessiterebbe di periodici ma modesti interventi di ripascimento, in modo da ottenere e mantenere una spiaggia sufficientemente ampia per un uso turistico-balneare.

E' comunque necessario un avanzamento generalizzato della linea di riva che consenta di gestire l'interfaccia terra-mare senza il condizionamento delle strutture industriali e residenziali esistenti, salvo che nei tratti in cui non si possa procedere alla loro demolizione.

L'avanzamento della linea di riva, ad eccezione del tratto difeso dai pennelli a T, non può avvenire con sabbia fine che, assumendo un profilo a debole pendenza, richiederebbe volumi ingenti. D'altra parte si ritiene che debba essere limitata al massimo la costruzione di difese rigide, che in genere comportano una perdita del valore paesaggistico del litorale, hanno elevati costi di manutenzione e determinano l'erosione dei settori costieri limitrofi. Le opere di difesa possono essere ridotte al massimo impiegando ghiaia nei ripascimenti. Essa fa assumere al profilo della spiaggia una pendenza maggiore e determina un maggiore avanzamento della linea di riva a parità di volume impiegato. Dato che i tratti sabbiosi utilizzati turisticamente sono pochi, si ritiene che non vi siano pregiudiziali da parte degli abitanti e degli operatori turistici alla realizzazione di spiagge con tessitura più grossolana di quella attuale. La ghiaia è più facilmente reperibile sul mercato ed ha costi decisamente inferiori. Inoltre, i sedimenti grossolani presentano il vantaggio di non accumulare gli inquinanti come invece fanno le sabbie fini. Parte del materiale di ripascimento potrebbe provenire dalle aree di sedimentazione adiacenti ai due porti, dove la spiaggia ha assunto un'ampiezza tale che una parte consistente non viene più modellata e ripulita dal moto ondoso, tanto che è in atto un processo di inerbimento. Queste due spiagge sono comunque talmente ampie che la loro utilizzazione per un uso turistico-balneare porrebbe gravi problemi. E' anche possibile una conversione della loro parte interna a verde pubblico attrezzato al fine di costituire una fascia di transizione fra l'abitato e la spiaggia. In un'eventuale realizzazione di questa, si deve tenere conto che l'auspicato riequilibrio del litorale determinerà una riduzione del flusso sedimentario verso queste zone e si dovrà quindi garantire un'ampiezza della spiaggia sufficiente ad assorbire occasionali arretramenti per eventi marini eccezionali.

### Ringraziamenti

Studio eseguito nell'ambito di una convenzione stipulata fra la Provincia di Napoli e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze e coordinato con altre ricerche affidate all'ENEA e al Dipartimento di Ingegneria civile dell'Università Federico II di Napoli.

Il rilievo batimetrico è stato eseguito dalla Soc. GeoLab di Pozzuoli per conto dell'ENEA.

Si ringrazia il Prof. Ennio Cocco, del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università Federico II di Napoli e il Dott. Federico Tarallo, della Ricerche Marine s.n.c. di Pozzuoli, per aver messo a disposizione dati non pubblicati di loro proprietà.

Si ringrazia inoltre il Dott. Licinio Ferretti, presidente della Compagnia Generale Ripresaeree di Parma, per aver fornito e concessa l'autorizzazione alla pubblicazione delle immagini aeree TerraItaly(tm).

### Bibliografia

- Bartolini C., Cipriani L.E., Pranzini E. e Sargentini M. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano e criteri di lettura*. In: "Coste toscane", Regione Toscana, pp. 33-56.
- Cocco et al. (1986) - *Atlante delle Spiagge Italiane*. Fogli 183 "Isola d'Ischia", 184 "Napoli", 185 "Salerno". CNR - S.El.Ca.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journ. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedim. Geol., 81: 47-60.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. Journ. Sedim. Petrol., 4: 65-77.
- McCave I.N. (1978) - *Grain-size trends and transport along beaches: examples from Eastern England*. Marine Geology, 28: M43-M51.
- Paris E., Rinaldi M. e Solari L. (2002) - *Studio morfologico e sedimentologico delle spiagge del litorale alla foce del Rio Vernotico*. Provincia di Napoli, Relazione inedita, pp. 84.
- Pranzini E. e Rossi S. (2000) - *L'erosione del litorale di Punta Ala: una caso di naturale riequilibrio morfologico*. Studi costieri, 3: 3-27.

Manoscritto ricevuto il 30 Dicembre 2004, accettato il 25 Febbraio 2005.

## Ipotesi di rinaturalizzazione della spiaggia di Gabicce Mare

Elena Primavera<sup>1</sup> e Barbara Zanuttigh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Idraulica & Ambiente, Pesaro, E-mail: prielena@libero.it.

<sup>2</sup>DISTART Sede di Idraulica, Università di Bologna, Viale Risorgimento, 2 - 40136 Bologna, Tel. 0512093754, Fax 0516448346 E-mail: barbara.zanuttigh@mail.ing.unibo.it

### Sommario

Scopo del presente contributo è proporre un sistema di difesa sostenibile eco-compatibile per la spiaggia di Gabicce. Si è scelto questo sito a motivo delle sue peculiari caratteristiche ambientali: le protezioni costiere costruite negli anni hanno arrestato l'erosione della spiaggia e hanno permesso la realizzazione di una più ampia area adibita all'attività ricreativa, ma hanno ridotto la circolazione di acqua nello specchio protetto e quindi la sua qualità; l'instabilità della falesia, che racchiude ad Est la spiaggia, ha determinato un incremento del rischio dell'abitato; lo sviluppo di una prateria di fanerogame, protette dalle direttive Europee, ha peggiorato le condizioni della balneazione e le attività turistiche in generale, ma ha contribuito in modo significativo alla stabilità della spiaggia e all'ossigenazione dell'acqua. Si presenta uno schema di difesa alternativo rispetto alla situazione attuale, che intende ripristinare condizioni della spiaggia compatibili con la sua fruibilità; si effettua la progettazione di tale schema mediante formule ben note e si verificano i suoi effetti mediante simulazioni numeriche.

**Parole chiave:** spiaggia, erosione, fanerogame, turismo, costi, sostenibilità.

### Abstract

*This contribution is aimed at proposing a sustainable and eco-compatible defence system for Gabicce beach. This site was chosen because of its peculiar environmental characteristics: the defence works performed during the years stopped beach erosion and allowed a wider recreational area but reduced water circulation in the protected area and thus water quality; the instability of the cliff that closes the beach at the East side produced an increase in risk for the built-up area; the development of a phanerogam sea-grass, protected by European directives, worsened the conditions for bathing and tourism activities but significantly contributed to beach stability and to water oxygenation. An alternative defence to the present scheme, which intends to restore beach conditions compatible to its usage, is presented, designed with well-established formulae and verified through numerical simulations.*

**Keywords:** beach, erosion, phanerogams, tourism, cost, sustainability.

### Introduzione

La spiaggia di Gabicce Mare è racchiusa tra il molo del porto canale di Cattolica a Nord e la falesia del colle S. Bartolo a Sud. E' attualmente difesa da una serie di barriere foranee emerse, ad una distanza di circa 100 metri da riva, imbasate su fondale di diversa profondità e caratterizzate da altezze in sommità un poco differenti, costruite negli anni 1960-1970. Tali barriere, non perfettamente allineate e modificate nel corso degli anni per costituire un più ampio litorale sabbioso e proteggere la falesia a Sud dall'azione erosiva del mare, hanno generato uno squilibrio ambientale del tutto singolare. Infatti, a causa della completa chiusura verso il largo operata dalla difesa costiera, si sono create le condizioni ottimali per lo sviluppo delle fanerogame marine, piante acquatiche considerate elementi qualificanti dello stato dell'ambiente e protette dalla Direttiva 92/43 dell'Unione Europea. Tali piante hanno generato, però, problemi turistici correlati alla balneazione ed alla presenza di materia organica in

lento dissolvimento sulla spiaggia. Inoltre, la forte erosione del lato meridionale della spiaggia, indotta dalle mareggiate invernali, è proseguita ugualmente, con conseguente asportazione dei sedimenti più fini e annuale franamento della falesia (Nesci, 2003; Colantoni et al., 2004). Unitamente a tali aspetti, il peggioramento della qualità dell'acqua nei mesi estivi ha reso necessaria la valutazione di un intervento per ripristinare condizioni di spiaggia compatibili con le esigenze di sfruttamento economico della stessa.

Lo scopo del contributo è proporre, sulla base delle indicazioni tecniche ed economiche fornite dalla Regione Marche nel Piano di Gestione delle Aree Costiere (2003), un'alternativa progettuale alle esistenti barriere emerse, al fine di migliorare lo stato attuale del litorale tutelando il fragile ecosistema marino ivi creatosi.

Si presenta e si verifica dapprima l'alternativa progettuale strettamente basata sul progetto della Regione, composta da un'unica barriera sommersa, con una serie regolare di varchi, dal molo al San Bartolo, da realizzarsi dopo la rimozione integrale della attuali barriere.

Si evidenzia quindi una seconda alternativa progettuale, che ottimizza la precedente, in particolare dal punto di vista della economicità di realizzazione e della salvaguardia delle piante, da attuarsi mediante scapitozzamento delle barriere attualmente presenti e regolarizzazione parziale del loro tracciato.

Si modellano col codice MIKE21 le condizioni di onda, corrente e trasporto sedimentario per la condizione esistente e la soluzione progettuale proposta. Sulla base dei risultati delle simulazioni numeriche (Primavera, 2004), si tracciano scenari di impatto ambientale, con particolare riferimento alla sopravvivenza delle praterie di fanerogame marine ed alla pericolosità della zona in frana.

### Descrizione del territorio

#### *Le spiagge di Gabicce Mare e Cattolica*

La spiaggia di Gabicce Mare ha una lunghezza totale di 1.75 Km; è delimitata a Nord dal molo del porto canale di Gabicce-Cattolica, che protegge l'uscita a mare del torrente Tavollo, e a Sud dalla falesia del Colle San Bartolo (Fig. 1).



Figura 1 - Veduta aerea del litorale di Gabicce al 1998 (per concessione di ARPA Emilia-Romagna).

Le caratteristiche sedimentologiche della spiaggia emersa evidenziano la presenza del 94% di sabbia e del 6% di ghiaia. La sorgente principale di apporto solido è costituito dalla falesia del colle San Bartolo e, in minore misura, dal bacino del torrente Tavollo.

Le strutture aggettanti del porto canale di Gabicce-Cattolica, alla foce del Tavollo, sono state le prime opere artificiali realizzate a partire dalla fine dell'Ottocento. In seguito, si realizzò un pennello di scogli poi trasformato in molo e successivamente prolungato con un pontile su cui si costruì il locale Mississippi. Negli Anni '50, per limitare l'arretramento della parte centro-orientale della spiaggia, posta sottoflutto all'aggettante punta settentrionale del promontorio del San Bartolo, si posero dei piccoli pennelli e dei brevi tratti di scogliere foranee ad una distanza di circa 20 m dalla riva, poi salpati o rimasti sepolti sotto i sedimenti. Dagli Anni '60 alla fine dei '70, di fronte all'intero tratto di spiaggia fu realizzata una serie di scogliere foranee, a circa 100 m dalla

riva, modificate nel corso degli anni successivi al fine di costituire un più ampio litorale sabbioso.

La spiaggia di Cattolica ha uno sviluppo di 2.1 km ed è interamente protetta da 18 scogliere parallele emerse realizzate nel periodo 1961-1971. Queste opere di difesa hanno permesso un notevole avanzamento della linea di battigia, che ha toccato l'attuale massimo storico, generando, però, il problema dei tomboli sabbiosi fino alle scogliere e conseguenti brevi bracci di mare e scarsa circolazione idrica davanti ai varchi. In particolare, nel primo tratto a Nord del porto, della lunghezza di oltre 1 km, si sono riscontrati avanzamenti di circa 6 m/anno nel periodo 1983-1991, mentre nel tratto restante si riscontra tutt'ora un sostanziale equilibrio della linea di riva.

Attualmente, quindi, il litorale di Cattolica non presenta problemi dovuti all'erosione marina, ma al peggioramento della qualità delle acque intercluse tra scogliere e battigia, riscontrato specialmente nel periodo estivo, aspetto in comune con la spiaggia di Gabicce.

### ***Il promontorio del colle San Bartolo***

Parte del territorio del Comune di Gabicce Mare ricade all'interno del Parco Regionale del monte San Bartolo, che emerge dalle basse spiagge romagnolo-marchigiane come un susseguirsi ondulato di speroni e valli digradanti verso il mare. Alla base della falesia corre una sottile spiaggia di ghiaie e ciottoli, risultante dalla demolizione e dal franamento delle pareti sovrastanti, usata, in passato, come cava di ghiaie e di pietre per pavimentazione.

La falesia del colle San Bartolo evidenzia una successione di strati sedimentari piuttosto complessa (Colantoni et al., 2004); strutturalmente, la dorsale del monte San Bartolo è costituita da una coppia sinclinale-anticlinale delimitata a NE da un *thrust* frontale, ubicato a mare, e da un complesso sistema di retroscorrimenti a SW (De Donatis et al., 1995). Il substrato presenta faglie e fratture con direzioni preferenziali N-S nella parte meridionale, N60 e N120 nell'area centrale e E-W nella zona settentrionale.

La linea di costa subisce una netta flessione verso Est, in concomitanza della cosiddetta Punta del Gesso, e prosegue fino a Gabicce in direzione E-W. La spiegazione di questo cambiamento repentino di direzione è da attribuire primariamente all'andamento della struttura costiera, ma anche alla maggiore esposizione della costa, in questo settore, ai venti provenienti da Nord (Bora e Tramontana) che producono le mareggiate e le erosioni più intense. Nella dinamica della costa assume importante significato Punta del Gesso che costituisce una sorta di ostacolo naturale alla deposizione dei sedimenti provenienti da Sud, i quali oltrepassano il promontorio e sono spinti più al largo (Colantoni et al., 2004).

Il rilevamento geomorfologico della falesia costiera tra Pesaro e Gabicce Mare, eseguito per il Progetto Costa Italiane Protette (CIP), ha portato a riconoscere e cartografare più di 100 movimenti franosi classificati come scivolamenti traslativi e/o rotazionali, colamenti, crolli e frane complesse (Nesci, 2003). I dati ottenuti per il settore Punta del Gesso-Gabicce Mare hanno evidenziato che il 31.6 % di esso risulta in frana. La forte pendenza della costa, la morfologia del versante e le caratteristiche lito-strutturali delle formazioni geologiche che lo costituiscono sono i fattori che determinano l'instabilità della falesia; a questi si unisce l'erosione al piede del monte causata dal moto ondoso, che determina un continuo scalzamento alla base, richiamando movimenti franosi regressivi verso monte. Il tratto, attualmente considerato più critico, è quello immediatamente sottostante l'abitato di Gabicce Monte (Fig. 2), sia per l'evoluzione del fenomeno sia per-



Figura 2 - Zona in frana al piede della falesia del San Bartolo, all'estremità Sud.

ché risulta coinvolto il centro abitato. Nell'autunno 2003 sono stati posizionati in mare alcuni tratti di grossi massi a ridosso della falesia, in direzione delle imboccature delle ultime tre scogliere, ed un piccolo pennello radicato a riva, in prossimità della punta della falesia stessa, per proteggerla dalle mareggiate invernali.

### ***Il Torrente Tavollo ed il porto canale di Gabicce***

Il Torrente Tavollo ha le sue origini a Mondaino sul monte Zaccarelli (421 m s.l.m), percorre 21 km per poi sfociare nell'Adriatico, presso il porto di Gabicce-Cattolica, rappresentando il confine naturale tra Marche ed Emilia Romagna. Il bacino del Tavollo risulta incuneato tra quelli del Ventena e del Foglia; l'unica confluenza di rilievo è quella della F.ssa Taviolo che si immette in destra idraulica poco prima dello sbocco a mare.

L'alveo, di ridotte dimensioni trasversali, risulta profondamente incassato rispetto alle aree collinari e pseudo-piagneggianti circostanti, salvo che nel tratto cittadino interno a Cattolica e Gabicce. In relazione all'antropizzazione del territorio, all'estensione delle aree inondate in anni recenti e alla consistenza degli elementi coinvolti, si determinano situazioni di rischio idraulico di scarso rilievo. Il trasporto solido è fisiologicamente di entità limitata.

Alla foce del Torrente Tavollo si trova il porto di Gabicce-Cattolica, classificato di seconda categoria e di terza classe; la parte del porto canale che ricade nel comune di Gabicce Mare è il molo di sovralfutto, in riva destra, che si protende di 170 m dall'attuale linea di spiaggia. Il porto, oltre ad essere legato all'attività peschereccia locale, viene utilizzato principalmente come approdo per le imbarcazioni turistiche. E' costituito da una darsena rettangolare di oltre 2.1 ettari ad Ovest, difesa da due moli guardiani paralleli e distanziati tra loro di 30 m con bocca rivolta verso Nord. I fondali sono costituiti da sabbia e fango. Le opere eseguite nel porto canale sono la sostituzione, da parte della Regione Emilia Romagna, della banchine su pali, già esistenti in riva sinistra, con diaframmi in conglomerato cementizio tirantati per consentire l'escavazione dei fondali a quattro metri. La Regione Marche sta, invece, completando il consolidamento della banchina in riva destra con l'infissione di palancole in cemento armato tirantate. La darsena lato Cattolica è in esecuzione.

### **Clima meteomarinario**

Per definire il clima meteomarinario relativo al litorale di Gabicce Mare, sono state utilizzate le registrazioni effettuate dalla boa ondometrica direzionale della Rete Ondometrica Nazionale posto al largo di Ancona nel periodo Marzo 1999 - Dicembre 2002. L'ondametro è stato varato inizialmente stato posto su una profondità di 55 metri, circa 15 miglia marine ad Est del porto di Ancona, in posizione di coordinate geografiche 43°51'30"N-13°51'04"E, dove ha funzionato fino al Maggio 2000. Poi è stato spostato sulla profondità di 70 metri, in prossimità dell'isola artificiale Clara Ovest della società AGIP, circa 15 miglia marine a NNE dal porto di Ancona, in posizione di coordinate geografiche 43°49,78'N-13°42,77'E, per ovviare al problema del frequente disancoraggio della boa riscontrato nel sito precedente.

I dati sono stati elaborati utilizzando il criterio di trasposizione basata sulla similitudine dei *fetches* efficaci. Si ipotizza che lo stesso evento climatico responsabile del moto ondoso registrato dall'ondametro di riferimento abbia interessato anche l'area di generazione delle mareggiate che investono il sito costiero in esame. Si suppone, inoltre, che le aree di generazione del moto ondoso possano essere descritte, per ciascun punto, utilizzando i concetti di *fetch* geografico ed efficace.

In bacini semichiusi, di estensione limitata come il Mar Adriatico, l'individuazione dei *fetches* può essere eseguita facendo ricorso al concetto di *fetch* geografico, poiché le dimensioni caratteristiche delle perturbazioni sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i *fetches* geografici (circa 400-500 km). Il valore del *fetch* efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei *fetch* geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i *fetches* efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento, ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento. Per il calcolo dei *fetches* geografici si sono considerate, con l'ausilio di una carta nautica, le posizioni successive occupate dalla boa R.O.N. al largo di Ancona negli anni e quella del faro del porto di Cattolica-Gabicce come punto di trasposizione.

Si sono valutate poi le direzioni del vento, i *fetches* efficaci e le direzioni delle onde per i siti di interesse e, con interpolazioni successive, per il sito di Cattolica. Infine, si sono calcolate le altezze medie  $H_{m0}$  ed i periodi medi  $T_{m0}$  a Cattolica (pedice C nelle seguenti) sulla base di onde, periodi e *fetches* osservati F ad Ancona (pedice A nelle seguenti):

$$H_{m0C} = \left( \frac{F_C}{F_{A^*}} \right)^{1/2} H_{m0A}, \quad T_{m0C} = \left( \frac{F_C}{F_{A^*}} \right)^{1/3} T_{m0A}$$

Grazie al procedimento di trasposizione sono stati ricavati per il sito di Cattolica-Gabicce 9348 dati ondosi. Valutando l'andamento cronologico stagionale delle altezze medie delle onde (Fig. 3), si nota che la maggior parte degli eventi ondosi con altezza media superiore ai 3 metri sono concentrati nei mesi autunnali ed invernali, dove le mareggiate risultano essere più frequenti ed intense, mentre in primavera ed in estate i valori di  $H_{m0}$  tendono a mantenersi al di sotto dei 4 metri.

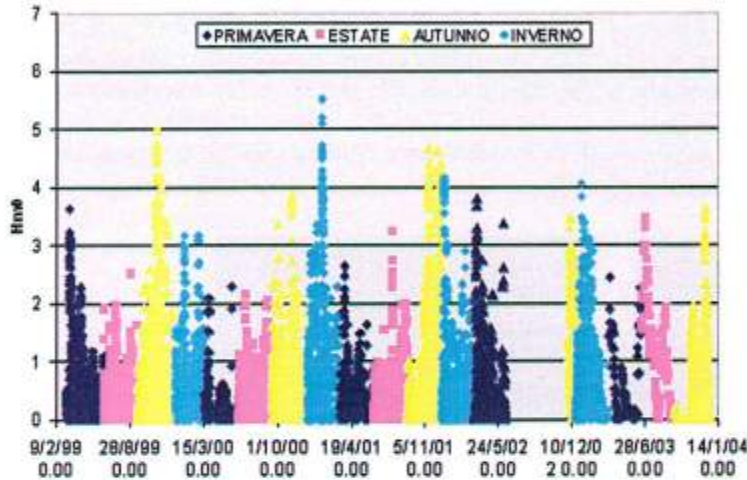


Figura 3 - Andamento cronologico delle altezze d'onda medie a Cattolica.

Suddividendo i 9348 dati in classi di altezza d'onda e settori di provenienza sono state calcolate le frequenze percentuali relative all'intero periodo (Tab. 1). Dall'analisi della Tabella 1 si nota che:

- il 66% degli eventi ha un'altezza media inferiore a 0.5 m;
- gli eventi con maggior frequenza di accadimento (prossima al 35%) sono relativi al settore di levante (75-105°N);
- gli eventi con maggior intensità ( $H_{m0} > 4m$ ) provengono esclusivamente da un limitato settore di traversia (15-75°N) e presentano una frequenza di accadimento molto limitata;
- non ci sono eventi con  $H_{m0} < 2m$  nel settore compreso tra 135 e 345°N.

Per quanto riguarda l'analisi statistica dei valori estremi delle altezze d'onda, per ogni mareggiata indipendente sono stati selezionati i valori massimi di  $H_{m0}$  sopra la soglia dei 2 metri in base alla direzione di provenienza.

Tabella 1 - Distribuzione delle frequenze per classi di altezza d'onda e settori di provenienza sulla base dei dati ondosi registrati e rielaborati nel periodo Marzo 1999-Dicembre 2002.

DIR ° N	$H_{m0}$ (m)											TOT
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	> 5	
345-15	5.68	2.80	0.84	0.38	0.03	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	9.84
15-45	3.13	3.35	2.44	1.90	1.36	0.80	0.40	0.42	0.22	0.00	0.00	14.02
45-75	1.97	2.08	1.28	1.02	0.84	0.49	0.34	0.50	0.24	0.14	0.04	8.94
75-105	24.62	6.10	2.25	1.10	0.25	0.04	0.03	0.10	0.00	0.00	0.00	34.49
105-135	4.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.99
135-165	0.11	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
165-195	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
195-225	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
225-255	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
255-285	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
285-315	9.75	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.76
315-345	15.03	2.11	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.26
TOT	65.81	16.49	6.92	4.42	2.48	1.41	0.81	1.02	0.46	0.14	0.04	100.00

Restano individuate 64 mareggiate tutte comprese nel settore direzionale 0°-70° e ciò come conseguenza della protezione esercitata dal Promontorio del colle S. Bartolo contro le mareggiate provenienti da S-E (Scirocco).

### Le praterie sommerse di Gabicce Mare

#### *Ruolo ecologico e caratteristiche delle fanerogame marine*

Le fanerogame marine sono vegetali dotati di radici, rizoma (fusto modificato in parte sotterraneo), fiori e foglie generalmente nastriformi. Queste piante colonizzano fondali sabbiosi e fangosi di ambienti marini, costieri e lagunari, e sono considerate elementi qualificanti dello stato dell'ambiente (Direttiva 92/43 Unione Europea).

Nel Mediterraneo esistono cinque specie di fanerogame: *Zostera marina*, *Zostera noltii*, *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceanica* e *Halophila stipulacela* (Fig. 4), tutte sottoposte a vincoli più o meno restrittivi di protezione. Le fanerogame sono importanti per l'ecosistema marino in quanto il loro complesso apparato radicale esercita un'azione di stabilizzazione dei fondali e, insieme alle foglie, contribuisce allo smorzamento idrodinamico del moto ondoso e delle correnti di fondo.

Calcoli teorici ed esperimenti condotti in vasca su praterie di fanerogame hanno dimostrato che la capacità di dissipazione per attrito di queste superfici elastiche è del 30-40% per il moto ondoso e del 60-70% per le correnti

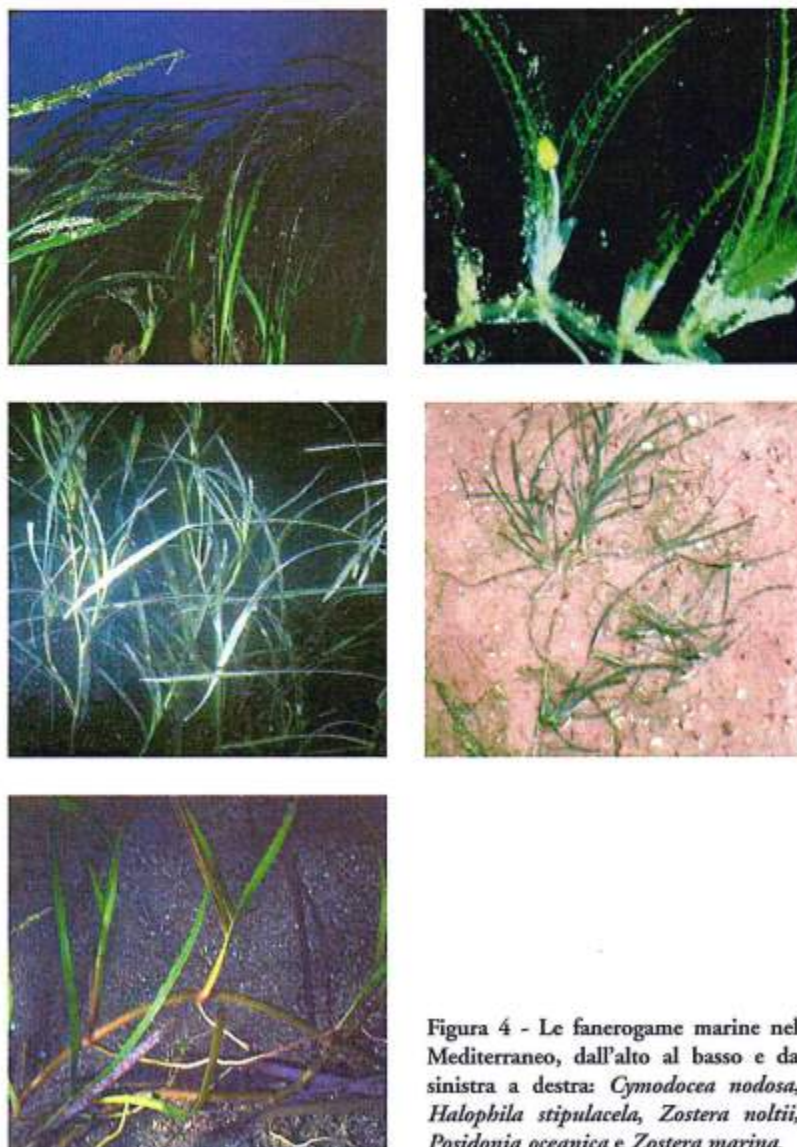


Figura 4 - Le fanerogame marine nel Mediterraneo, dall'alto al basso e da sinistra a destra: *Cymodocea nodosa*, *Halophila stipulacela*, *Zostera noltii*, *Posidonia oceanica* e *Zostera marina*.



Tabella 2 - Caratteristiche dell'habitat della *Zostera marina* e *noltii*. Da [www.marlin.ac.uk](http://www.marlin.ac.uk)

	<i>ZOSTERA MARINA</i>	<i>ZOSTERA NOLTII</i>
DISTRIBUZIONE	Atlantico Pacifico Circolo polare Artico Ristretta distribuzione nel Mediterraneo	Atlantico Mar Caspio Mar Nero Ristretta distribuzione nel Mediterraneo
PREFERENZE FISIOGRAFICHE	Estuari Lagune salate isolate Coste riparate, insenature	Stretti bracci di mare Lagune salate isolate Coste riparate, insenature Estuari
SUBSTRATI PREFERITI <sup>1</sup>	Ghiaia - ciottoli Ghiaia con fango Fango con sabbia Sabbia fangosa	Sabbia fangosa Fango con sabbia Fango
INTENSITÀ DI CORRENTE SOPPORTATA	Debole (<0.2 m/s) Estremamente debole	Moderata (0.2-1.5 m/s) Debole (<0.2 m/s) Estremamente debole
ESPOSIZIONE ONDOSA PREFERITA <sup>2</sup>	Zone protette Zone estremamente protette	Zone protette Zone molto protette Zone estremamente protette
SALINITÀ	Variabile (18 - 40 psu)	Alta (30-40 psu) Variabile (18-40 psu) Ridotta (18-30 psu) Bassa (<18 psu)
PROFONDITÀ	Da 0 a 5 m	Intertidale

<sup>1</sup> Ghiaia-ciottoli: 4-16 mm  
 Ghiaia con fango: 10-80% ghiaia, 20-90% fango.  
 Sabbia fangosa: 50-90% sabbia, 10-50% fango.  
 Fango con sabbia: 50-90% fango, 10-50% sabbia.  
 Fango: < 0.063 mm.

<sup>2</sup> Estremamente protetta: costa completamente chiusa con *fetch* < 3 km.  
 Molto protetta: costa con *fetch* < 3 km se la zona è esposta ai venti prevalenti;  
 costa con *fetch* circa di 20 km se la zona non è esposta ai venti prevalenti oppure è protetta da scogliere.  
 Protetta: costa con *fetch* < 20 km se la zona è esposta ai venti prevalenti o con estesa zona *offshore* poco profonda  
 oppure costa protetta dai venti prevalenti.

(Fonseca et al., 1998). La distruzione di un metro di prateria può comportare l'instaurarsi di un processo erosivo che, in zone caratterizzate da litorali sabbiosi, genera un arretramento della linea di costa di diverse decine di metri. La crescita delle fanerogame marine dipende dalla luce e quindi dalla trasparenza dell'acqua ed è fortemente influenzata dalla temperatura.

Studi condotti su *Zostera noltii* e su *Zostera marina* hanno evidenziato come la prima presenti una maggior adattabilità ad ampie fluttuazioni della quantità di luce (Vermaat et al., 1996; Davison e Hughes, 1998). La riproduzione delle fanerogame marine avviene sia per via sessuata, attraverso l'impollinazione, sia per via vegetativa attraverso la crescita del rizoma; la riproduzione avviene prevalentemente per via vegetativa ove il reclutamento di semi sia ostacolato dal disturbo dei sedimenti di fondo, dalla dispersione dovuta alle correnti o dai predatori.

La distribuzione e la descrizione dell'habitat ideale per lo sviluppo della *Zostera marina* e *noltii* sono riportate in Tabella 2; i principali parametri a cui sono sensibili/intolleranti sono descritti in Tabella 3. Negli ultimi 30 anni, a causa della crescente pressione antropica, si è assistito ad una forte regressione di tali praterie che sono oggi concentrate lungo la costa pugliese, ligure e, in Adriatico, lungo la costa sloveno-croata e nella laguna di Venezia (ove si sono effettuati anche i primi interventi di trapianto, in particolare presso l'isola di Pellestrina). Tra gli effetti principali ai quali ascrivere la scomparsa delle praterie sommerse si possono ricordare: effetti meccanici (dragaggio, strascico, ancoraggi), effetti fisici (diminuzione della quantità di luce, variazione climatiche) ed effetti dovuti alla diminuzione della qualità dell'acqua (inquinamento chimico, biologico, fisico).

Tabella 3 - Fattori che influenzano lo sviluppo della *Zostera marina* e *noltii*. Da [www.marlin.ac.uk](http://www.marlin.ac.uk)

		INTOLLERANZA		RECUPERO		SENSIBILITÀ	
		Z. M.	Z. N.	Z. M.	Z. N.	Z. M.	Z. N.
FATTORI FISICI	Perdita di substrato	H	H	VL	L	VH	H
	Copertura	H	H	VL	L	VH	H
	Variazione sedimenti sospesi	I	I	M	H	M	L
	Essiccazione	I	L	H	VH	L	VL
	Cambiamento regime di emergenza	I	I	H	H	L	L
	Cambiamento di tasso di flusso d'acqua	I	I	M	H	M	L
	Variazione di temperatura	T	T	NR	NR	NS	NS
	Variazione di torbidità	H	I	VL	H	VH	L
	Variazione posizione ondosa	H	H	VL	L	VH	H
	Rumore	T	T	NR	NR	NS	NS
	Presenza visuale	T	T	NR	NR	NS	NS
	Abrasione e disturbi fisici	I	I	M	H	M	L
	Dispiegamento	H	I	L	H	H	L
FATTORI CHIMICI	Contaminazione da componenti sintetici	I	I	M	H	M	L
	Contaminazione da metalli pesanti	L	L	VH	VH	VL	VL
	Contaminazione da idrocarburi	L	I	VH	H	VL	L
	Contaminazione da radionuclidi	-	-	-	NR	-	-
	Variazione del livello di nutrienti	H	I	VL	H	VH	L
	Variazione di salinità	L	L	VH	VH	VL	VL
	Variazione di ossigenazione	L	L	VH	VH	VL	VL
FATTORI BIOLOGICI	Introduzione di microbi patogeni/parassiti	H	L	VL	VH	VH	VL
	Introduzione di specie non native	I	I	L	L	H	H
	Estrazione di queste specie	I	I	M	H	M	L
	Estrazione di altre specie	I	H	M	L	M	H

Legenda: Z. M.=*Zostera marina*; Z. N.=*Zostera noltii*; VH=Molto Alto; H=Alto; I=Intermedio; M=Moderato; T=Tollerante; L=Basso; VL=Molto basso; NR=Non Rilevante; NS=Non Sensibile.

### Progetto pilota di trapianto eseguito a Gabicce Mare

Nell'area balneare di Gabicce Mare, è recentemente comparsa una prateria di fanerogame di estensione stimata tra i 10.000 e i 12.000 m<sup>2</sup>, dei quali circa il 90% occupati da *Zostera marina* ed il restante 10% da *Zostera noltii* e ciuffi interspersi di *Cymodocea nodosa*.

Dietro richiesta delle autorità locali, l'Istituto di Scienze del Mare dell'Università di Ancona ha proposto, in collaborazione con l'ARPAM e la Regione Marche, un esperimento pilota di "trapianto" di tale prateria in aree contigue, al fine di proteggerla dall'inevitabile pressione antropica e di ridurre il problema creato alla balneazione. In concomitanza con l'attività di trapianto si è reso necessario effettuare una serie di analisi sulle acque e sui sedimenti marini per verificare che tale intervento non comportasse alterazioni delle caratteristiche dell'ambiente né danni alla balneabilità della costa. Il progetto pilota si è articolato in quattro fasi: mappatura dell'estensione e caratteristiche del prato ed identificazione dei siti di trapianto; determinazione delle caratteristiche strutturali e funzionali (dimensioni, densità e crescita) delle praterie; espianto e trapianto di una porzione di campione del prato con diverse tecniche (a zolle oppure mediante vasetti idrosolubili); valutazione dei risultati, identificazione della migliore e più conveniente modalità di trapianto, nonché definizione dei tempi e dei costi di

tale attività, inclusa una previsione della durata nel tempo di tale tipo di intervento.

Mediante osservazione in campo (sia in immersione sia in emersione), sono state raccolte le informazioni necessarie alla ricostruzione di una mappa biocenotica dell'intera area di Gabicce Mare. Nell'area di interesse sono stati individuati 24 transetti ciascuno dei quali composto di tre stazioni (rispettivamente in prossimità della barriera frangiflutti, in mezzo ed in prossimità dell'arenile) in cui sono state misurate temperatura dell'acqua, trasparenza e profondità. La zona caratterizzata dalla prateria, in Figura 5, è costituita prevalentemente da sabbie fini (40%), molto fini (31%) e fango (23%), presenta una profondità variabile tra 1.4 e 3.4 m, idrodinamismo ridotto del 10-15% rispetto all'area non vegetata e conseguente maggiore tendenza all'accumulo di sabbia. Occorre notare che, nonostante l'area sia estremamente protetta, i varchi ne garantiscono una buona ossigenazione.

Si sono effettuate le attività di espianto e trapianto nel periodo 5-11 Agosto 2002. La *Zostera Noltii* è stata trapiantata a ridosso della terza barriera frangiflutti partendo dal promontorio San Bartolo; la *Zostera marina* è stata impiantata in un'area posta tra la quarta barriera frangiflutti e la battigia.

L'analisi delle aree trapiantate, nell'Ottobre dello stesso anno, ha evidenziato un'elevata percentuale di successo, considerato anche l'effetto stagionale. Sebbene le piante più vicine all'arenile mostrino inevitabili segni di maggior sofferenza a causa del disturbo indotto dai bagnanti, lo stato di salute delle praterie spontanee presenti a Gabicce Mare è decisamente buono e quindi possono essere utilizzate anche per la riforestazione delle aree costiere del litorale marchigiano attualmente soggette a problemi di erosione. Inoltre, un recente sopralluogo da noi effettuato nel Maggio del 2004 ha dato modo di riscontrare una progressiva diffusione delle praterie verso ovest in direzione del locale Mississippi ed in prossimità delle scogliere emerse (Fig. 5).

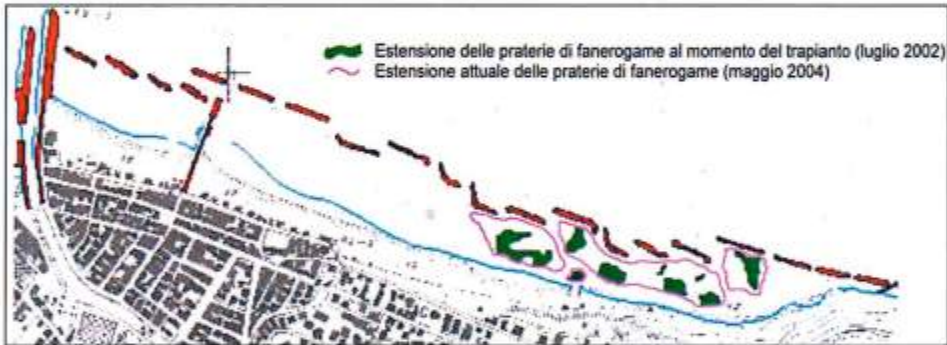


Figura 5 - Estensione delle praterie di fanerogame al momento del trapianto (chiazze verdi); estensione attuale delle praterie di fanerogame, Maggio 2004 (magenta).

## I Alternativa Progettuale: unica barriera sommersa basata sul disegno della Regione Marche

### Il progetto

La prima alternativa progettuale presa in esame si basa sul disegno di massima della barriera sommersa proposta dalla Regione ed è presentata in Figura 6. La barriera ha la stessa distanza da riva e la stessa inclinazione di quella proposta dalla Regione, ma una lunghezza maggiore, pari a 1669,5 m, per l'aggiunta di una soglia in corrispondenza del molo del porto canale di Gabicce-Cattolica, in modo tale da evitare la concentrazione di pericolose "rip currents" ed un'accentuata escavazione del fondale.

Si sono progettate tre diverse tipologie di sezioni sia per la barriera sia per le soglie (Fig. 7), per tenere in considerazione la progressiva riduzione del fondale da -3.5 m a -2.5 m procedendo da Ovest in direzione del promontorio del colle San Bartolo. La berma di sommità ha una larghezza di 10 m ed è posta da una profondità di 0.5 metri per tutte e tre le sezioni di barriera, mentre per le sezioni delle soglie la larghezza è stata ampliata a 17 m con una sommersenza di 1.5 metri. Le pendenze sono state mantenute di 1:4 lato mare e 1:3 lato terra, come proposto dalla Regione.

Lo strato di protezione è stato progettato di altezza 0.8 metri e la larghezza è stata aumentata in corrispondenza delle soglie per evitare fenomeni di escavazione al piede dovuti alla caduta del frangente (Sumer et al., 2005). Nel dimensionare l'opera, occorre osservare che il fondale su cui essa viene realizzata è troppo basso per essere interessato da onde con periodo di ritorno di 20 o 25 anni (periodi di ritorno normalmente scelti per il dimensionamento di opere marittime di difesa). Infatti, secondo i noti criteri di frangimento delle onde dovute

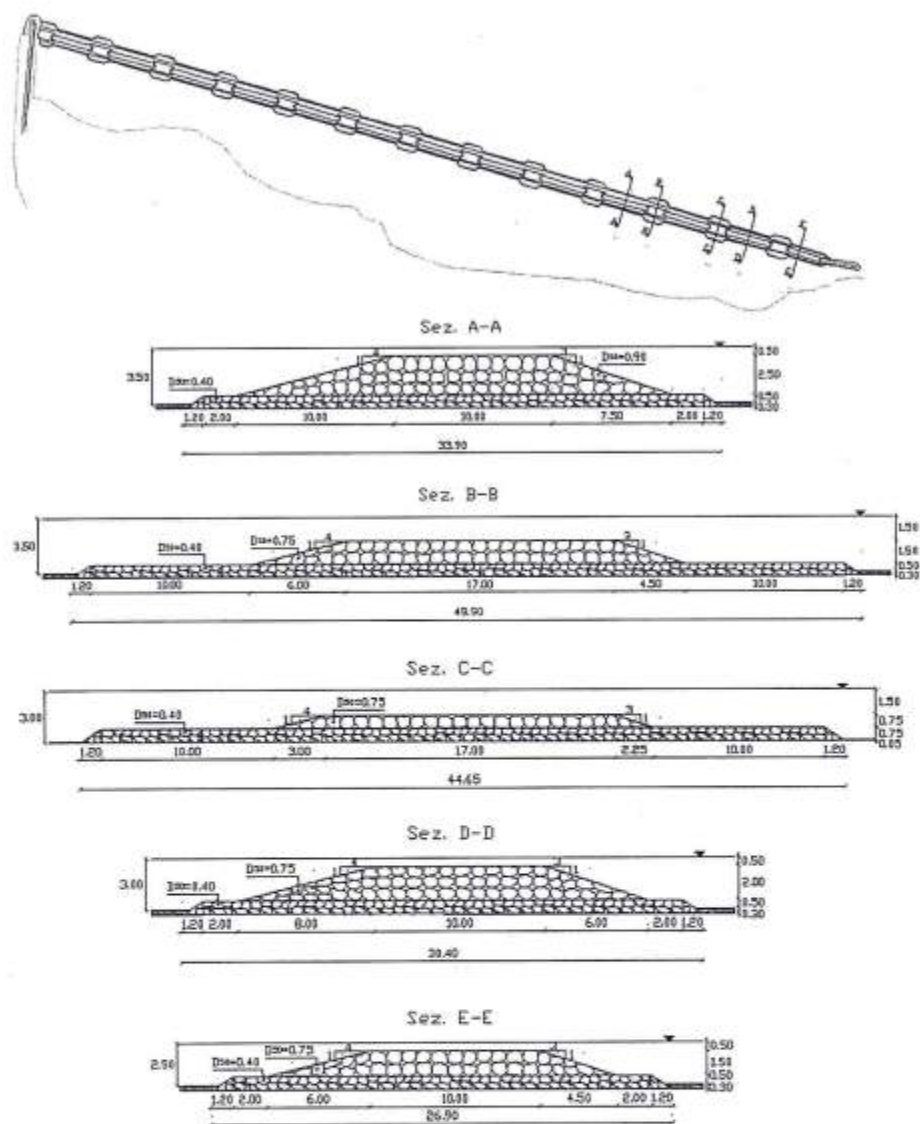


Figura 6 - Pianta e sezioni trasversali della barriera sommersa, I Alternativa.

ti all'effetto del fondale (Battjes e Janssen, 1978), la linea dei frangenti per tali onde si trova molto più al largo dell'isobata in questione; si assumerà quindi l'onda di progetto di altezza  $H$  pari all'80% del fondale su cui l'opera viene costruita.

La barriera poggia su di uno strato di pietrame, caratterizzato da una pezzatura minore rispetto agli elementi sovrastanti, che separa la struttura dal piano di posa.

Per determinare le dimensioni medie del pietrame costituente il basamento si utilizza la formula di Van Der Meer (1992):

$$\frac{b_f}{b} = 0.22 \left( \frac{H}{\Delta \cdot D_{n50}} \right)^{0.7} \quad (1)$$

con:  $D_{n50}$ =diametro nominale dei massi,  $H$ =altezza d'onda di progetto=3.6 m,  $b_f$ =profondità del piede dell'opera e  $b$ = profondità del fondale sotto il livello di alta marea,  $\Delta = \frac{\delta_c - \delta_w}{\delta_w}$  =densità relativa  $\approx 1.5$  ( $\delta_c$ =densità del materiale impiegato=2600 Kg/m<sup>3</sup> e  $\delta_w$ =densità dell'acqua di mare=1025 Kg/m<sup>3</sup>).

I massi naturali costituenti la barriera si possono dimensionare dalle formule di Givler e Sorens (1986), nelle forma revisionata da Van Der Meer (1992) con l'introduzione del numero di stabilità modificato, (Ahrens, 1987), che tiene conto della ripidità dell'onda:

$$\frac{b_c}{b} = (2.1 + 0.1 \cdot S) \cdot e^{(-0.14 \cdot N_S^*)} \quad (2)$$

con:  $b_c$  = altezza della barriera sommersa,  $S$  = parametro di danneggiamento = 1,  $N_S^*$  = parametro di stabilità spettrale,  $N_S^* = \frac{H}{\Delta \cdot D_{n50}} \cdot s_p^{-\frac{1}{3}}$ ,  $s_p$  = ripidità dell'onda calcolata con il periodo di picco = 4%.

Per maggior precauzione il  $D_{n50}$  viene moltiplicato per un fattore di sicurezza pari ad 1.1. Per le diverse profondità di imbasamento della barriera e per le relative soglie si ottengono i parametri dimensionali riportati nella Tabella 4. Il basamento è composto da due strati di massi di I categoria con  $D_{n50} = 400$  mm ai quali va aggiunto scapolame di cava (peso compreso tra 1 e 500 Kg) per costituire un filtro composto da tre strati caratterizzati da  $D_{n25} = 100$  mm,  $D_{n10} = 22.5$  mm,  $D_{n5} = 6$  mm. Pur essendo il  $D_{n50}$  dello strato più fine pari a 6 mm e quindi maggiore del  $D_{n50}$  della sabbia del fondo (0.29 mm), si è verificato che il materiale al fondo non viene trasportato dal moto ondoso causa insufficiente gradiente idraulico.

Tabella 4 - Parametri dimensionali, I Alternativa.

Fondale	Barriera	Soglia	Basamento
-3.5 m	3 strati con $D_{n50} = 0.90$ m	2 strati con $D_{n50} = 0.75$ m	
-3.0 m	3 strati con $D_{n50} = 0.75$ m	1 strato con $D_{n50} = 0.75$ m	2 strati con $D_{n50} = 0.40$ m
-2.5 m	2 strati con $D_{n50} = 0.75$ m		

### Effetti sull'ecosistema

Si sono sommariamente valutati gli effetti della barriera sommersa sull'ecosistema di Gabicce, in particolare sulle fanerogame marine, mediante lo studio della trasmissione ondosa sulla barriera e quindi la determinazione dell'agitazione ondosa residua a tergo della barriera stessa. Si sono considerate diverse condizioni di marea, altezze d'onda incidenti  $H_{si}$  (assunta pari al 60% della profondità di imbasamento) e profondità del fondale e quindi della cresta del medio mare  $R_c$ , corrispondenti alle diverse profondità di imbasamento. Il coefficiente di trasmissione  $K_t$  è stato calcolato sulla base della formula di Briganti et al. (2003), che modifica la formula di D'Angremond et al. (1996) per strutture a cresta bassa considerando come parametro anche la larghezza di berma  $B$  in rapporto all'onda incidente  $H_{si}$

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.64 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5\xi}), \text{ per } B/H_{si} < 10 \quad (3)$$

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51 \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} \cdot (1 - e^{-0.41\xi}), \text{ per } B/H_{si} > 10 \quad (4)$$

Per ogni condizione di marea e di fondale si è verificato che  $B/H_{si} < 10$ , quindi la formula usata è sempre la (3). Le altezze d'onda trasmesse sono confrontate in Tabella 5 con le altezze d'onda caratterizzanti l'habitat ideale per lo sviluppo delle praterie di fanerogame.

Si può concludere che la barriera sommersa non genera modifiche significative dell'habitat ideale per la sopravvivenza delle fanerogame, in quanto l'area risulta estremamente protetta in condizioni di marea nulla e protetta anche in condizioni di alta marea. Risultati di maggior dettaglio ma di analogo contenuto si sono ottenuti con le simulazioni numeriche presentate nell'ultima sezione.

Tabella 5 - Altezze d'onda trasmesse e corrispondenti classificazioni dell'area protetta, I Alternativa.

Marea	Altezza d'onda trasmessa						Zona
	Fondale -3.50 m		Fondale di -3.00 m		Fondale -2.50 m		
	barriera	soglia	barriera	soglia	barriera	soglia	
-	0.58	0.93	0.51	0.87	0.45	-	Estremamente protetta
+ 0.50	0.86	1.18	0.78	1.12	0.71	-	Protetta
+ 1.00	1.13	1.45	1.06	1.39	0.98	-	Protetta

Tabella 6 - Costo dell'intervento per la I<sup>a</sup> alternativa progettuale.

	Massi di I Categoria	Scapolame	Barriere emerse esistenti da salpare da mare a terra
	Volumi (m <sup>3</sup> )		
Barriera	40.920	-	
Soglia	8.250	-	
Basamento	41.200	7.270	
Totale	90.370	7.270	31.000
	Costi (€)		
€/ m <sup>3</sup>	45,86	31,82	41,62
Totale(M€)	4,14	0,23	1,29
Costo totale intervento + IVA 20% + imprevisti 10% ~ 7,36 M€			

### Valutazione economica

La valutazione economica si discosta da quella proposta dalla Regione Marche in quanto considera l'impossibilità esecutiva di riutilizzare tutto il materiale costituente le scogliere emerse per la costruzione della nuova barriera sommersa. Questo perché parte del materiale stesso è ormai inglobato nel fondale e quindi difficile da recuperare ed anche perché, in tal modo, porzioni di spiaggia rimarrebbero esposte all'agitazione ondosa durante lo smantellamento ed il trasporto dei massi dall'attuale posizione alla zona di costruzione.

Quindi, la seguente valutazione è stata eseguita considerando il salpamento completo delle scogliere esistenti da mare ad un sito di deposito a terra e la costruzione della barriera sommersa costruita totalmente con materiale di cava trasportato via mare.

Sulla base del prezzario proposto dalla Regione Marche approvato con delibera della G.R. n.1484 OT/LPU del 02.08.2002 e pubblicato nel supplemento n.21 al B.U.R. n.97 del 05.09.2002 (Vol.1 e Vol.2), è stato formulato il seguente quadro economico dell'intervento (Tab. 6).

## II Alternativa Progettuale: serie di barriere sommerse lungo il tracciato delle attuali emerse

### Il progetto

Visto l'eccessivo costo ed i problemi esecutivi dell'alternativa I, si è pensato di proporre un'alternativa progettuale che permettesse di non stravolgere completamente l'attuale disposizione delle scogliere emerse, ma semplicemente di scapitozzarle alle quota desiderata e riutilizzarne il materiale per costruire la nuova barriera sommersa, riprofilando le sezioni con massi provenienti da cave di prestito a terra, trasportati via mare. Il nuovo progetto prevede, quindi, la costruzione di un'unica barriera sommersa che segua il più possibile il tracciato delle attuali scogliere emerse, composta da 12 tratti di barriera di lunghezza variabile e 12 soglie di lunghezza pari a 30 metri, secondo lo schema presentato in Figura 7.

Le sezioni sono le stesse viste nell'alternativa progettuale precedente, ma con un accorgimento in più per quanto riguarda la larghezza del basamento di protezione delle soglie. Per evitare il danneggiamento delle praterie sommerse durante l'esecuzione dei lavori, si è provveduto a ridurre l'ampiezza del basamento di protezione lato terra per quelle soglie direttamente interessate dalla proliferazione delle fanerogame. In tal modo si cerca di evitare, sia l'eccessiva risospensione dei sedimenti di fondo in prossimità delle praterie, dannosi per il regolare sviluppo dell'attività fotosintetica, sia la probabilità che le piante possano essere direttamente schiacciate dalla posa in opera dei massi costituenti il basamento di protezione della barriera.

Rispetto all'alternativa I, non variando le profondità di imbasamento, le sommergenze e le altezze della struttura e del basamento, rimangono inalterate le considerazioni relative alla stabilità. Ciò che varia invece è il costo complessivo dell'opera, che risulta cospicuamente ridotto grazie al notevole volume di massi riutilizzabile.

### Valutazione economica

Sulla base delle sezioni della scogliera sommersa e delle soglie e del prezzario proposto dalla Regione Marche, è stato formulato il seguente quadro economico dell'intervento (Tab. 7).

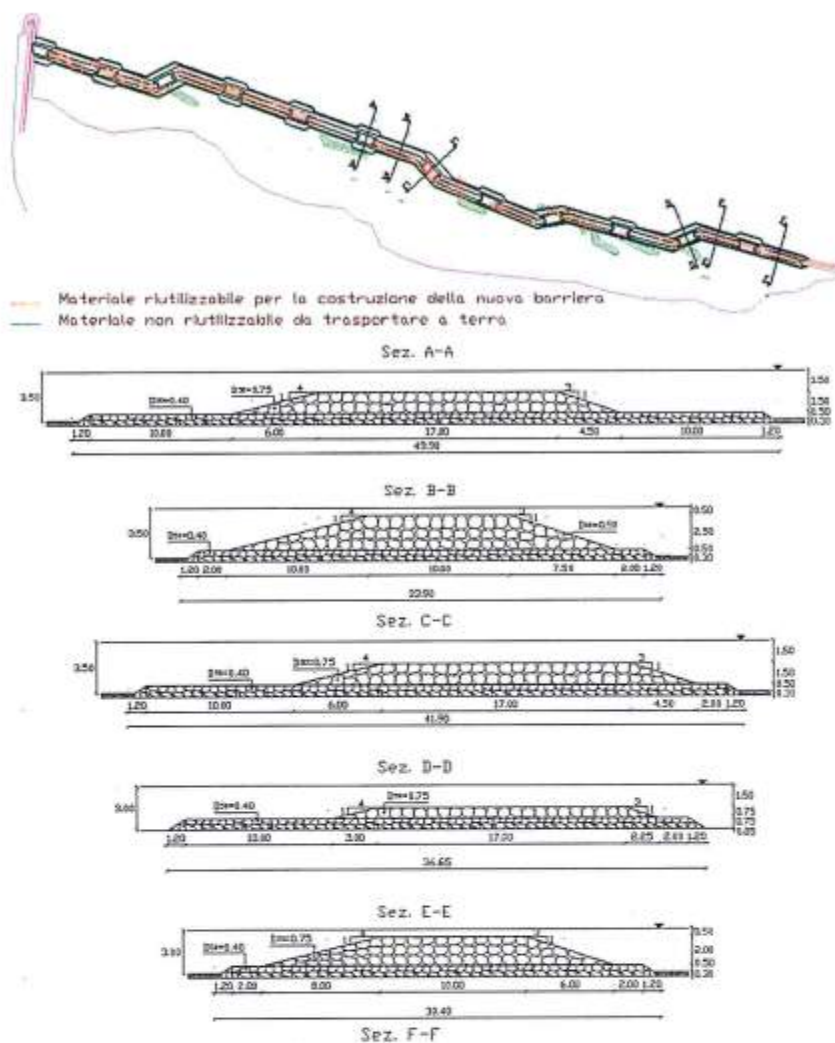


Figura 7 - Pianta e sezioni del progetto ottimizzato, con indicazione del tracciato attuale delle barriere (in alto) al fine di evidenziare quelle da rimuovere e quelle da scapitozzare.

Tabella 7 - Costo dell'intervento per la II alternativa progettuale.

	Massi di I Categoria	Scapolame	Massi riutilizzabili	Massi non riutilizzabili
<b>Volumi (m<sup>3</sup>)</b>				
<b>Barriera</b>	38.790		10.000 (da lasciare in posto) + 10.000 (salpamento mare - mare)	11.000
<b>Soglia</b>	6.420			
<b>Basamento</b>	29.350	5.180	13.120 (da lasciare in posto)	
<b>Totale</b>	74.560			
<b>Totale massi da acquistare</b>	54.560	5.180		
<b>Costi (€)</b>				
<b>€/m<sup>3</sup></b>	45,86	31,82	27,06 (salpamento mare - mare)	41,62 (salpamento mare - terra)
<b>Totale (M€)</b>	2,50	0,16	0,27	0,46
<b>Costo totale intervento + IVA 20% + imprevisti 10% ~ 5,42 M€</b>				

## Analisi numerica dell'evoluzione costiera indotta

### Obiettivo

Tale analisi si è proposta di valutare l'idrodinamica indotta dalla situazione attuale e prevedere gli effetti degli interventi di progetto proposti sull'idrodinamica e morfologia della spiaggia. Si sono quindi ricostruite le condizioni di moto ondoso, le circolazioni idrodinamiche e il regime di trasporto solido mediante il modello matematico bidimensionale MIKE 21 sviluppato dal DHI Water & Environment.

### Il codice di calcolo

Il modello MIKE 21 supporta vari moduli che permettono di trasferire il moto ondoso da largo verso riva (NSW), di propagare le onde in presenza di strutture (PMS), di calcolare le correnti marine indotte dal moto ondoso (HD) e di valutare i tassi di trasporto solido (ST). Il modulo PMS si basa sulla approssimazione parabolica dell'equazione di Kirby (1986), che assume una direzione d'onda predominante e trascura la diffrazione e la rifrazione nella direzione di propagazione dell'onda. Il modulo HD risolve le equazioni del moto alle differenze finite utilizzando uno schema implicito ADI (Alternating Direction Implicit) che fornisce una precisione del secondo ordine (Abbot et al., 1973). Il modulo di trasporto solido MIKE 21 ST calcola il tasso di trasporto solido di materiali non coesivi ed il valore istantaneo iniziale di modificazione del fondo per effetto dell'azione combinata di onde e correnti. Implementa un algoritmo di calcolo deterministico basato sul modello di Engelund e Fredsoe (1976) e valuta separatamente il contributo dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione.

### Dati batimetrici, sedimentologici, meteomarini

Per ridurre i tempi di calcolo senza perdere gli effetti del moto ondoso sul regime globale del litorale, le simulazioni idrodinamiche sono state effettuate adottando un clima rappresentativo, costituito dalle 6 onde in Tabella 8, trascurando gli effetti del vento e delle maree.

Le onde di input sono state impostate nel modello come onde irregolari e direzionali di uno spettro *Jonswap*. Questa impostazione consente di determinare in maniera realistica il campo di *radiation stress*, il *wave set-up*, e le condizioni al contorno da impostare nel modello di circolazione idraulica.

Tali onde sono state simulate su due batimetrie, con diverse orientazioni a 5° e 45° N, per tenere conto del limite del modello nel rappresentare correttamente onde provenienti da  $\pm 30^\circ$  rispetto alla orientazione media delle batimetrie.

Entrambe le batimetrie sono state ottenute utilizzando una carta nautica del Nord Adriatico e considerando una zona di interesse dalla foce del Po ad Ancona fino ad una profondità di 50 m, per includere la collocazione della boa RON di Ancona da cui si sono desunti i dati meteomarini. Le batimetrie sono costituite da 700 celle in direzione E-W e 2200 in direzione Nord-Sud, con maglia di 100x25 m, per un'area complessiva di pari a 70x55 km. Dalle simulazioni effettuate con il modulo NSW si sono ottenute le altezze d'onda e direzioni di propagazione, nonché i *radiation stresses*, per tutta l'area considerata.

Si sono estratte in particolare le onde davanti alla spiaggia di Gabicce Mare ad una profondità di -10 m (Tabella 9) per essere successivamente utilizzate nelle simulazioni con il modulo PMS su una batimetria ridotta di dettaglio della zona di interesse.

La batimetria di dettaglio per il modulo PMS è unica per tutte e sei le condizioni ondose, poiché le direzioni delle onde sono comprese tra 3.5° e 47° Nord (Tab. 9). Sono state prodotte tre batimetrie differenti solo per le opere: la prima corrispondente alla condizione attuale, con barriere emergenti; la seconda rappresentativa della prima alternativa progettuale simile al disegno della Regione; la terza basata sulla seconda alternativa progettuale, con una serie di barriere sommerse lungo un'ipotetica linea dell'attuale tracciato di barriere.

Le tre batimetrie si compongono di celle di 2x2 m e si estendono per 1701 celle in direzione Est-Ovest e 2301 in direzione Nord-Sud, per un'area totale di 3402x4602 m.

Si sono analogamente costruite tre batimetrie di dettaglio anche per il modulo HD, in questo caso differenti dalle tre batimetrie PMS per la dimensione di griglia, 4x4 m, e per l'estensione verso il largo, fino alla batimetria 6 m anziché fino alla 10 m. In Figura 8 si riportano le batimetrie HD per la condizione attuale e per la seconda alternativa progettuale.

Si sono, infine, predisposte per ogni batimetria ed ogni modulo del codice, delle mappe dei sedimenti del



Tabella 8 - Clima ondoso di input al modulo NSW.

Onda	Direzione (°)	$H_{m0}$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)	Frequenza (%)
1	60	2.60	6.40	7.70	2.00
2	60	1.10	5.00	6.00	13.83
3	45	4.00	8.00	9.60	1.66
4	30	2.60	6.40	7.70	2.70
5	30	1.10	5.00	6.00	7.69
6	350	1.10	4.00	5.00	6.25

Tabella 9 - Clima ondoso estratto dall'applicazione del modulo NSW alla profondità di 10 m.

Onda	Direzione (°)	$H_{m0}$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)
1	46.74	2.29	6.39	9.14
2	47.00	1.01	5.00	7.14
3	45.19	3.41	7.89	11.27
4	11.89	1.63	6.40	9.14
5	11.90	0.91	5.00	7.14
6	3.50	1.07	4.00	5.71

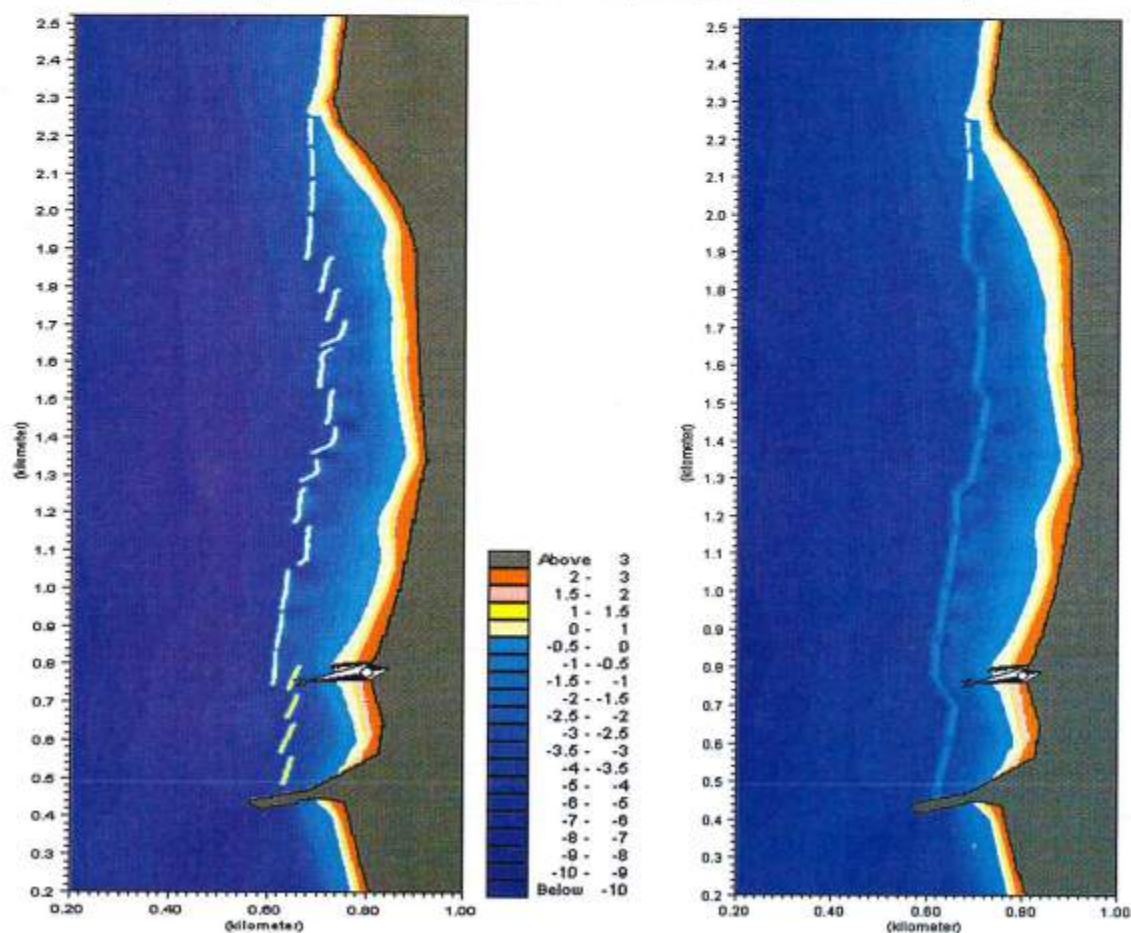


Figura 8 - Batimetrie utilizzate nel modulo HD. A sinistra, condizione esistente, a destra alternativa II con una serie di barriere sommerse.

fondale e delle corrispondenti mappe di scabrezza al fondo, che sono essenziali alla valutazione del trasporto solido ed alla corretta stima della dissipazione dell'energia ondosa. Per semplicità si è ritenuto opportuno considerare solo tre valori del  $D_{n50}$  rappresentativi dell'intera area in esame: 0.29 mm per le sabbie, 10 mm per la ghiaia e 800 mm per i massi. La scabrezza di Nikuradse è stata assunta pari a due volte il  $D_{n50}$  e i corrispondenti coefficienti di Manning sono stati ottenuti come 26 volte l'inverso della scabrezza di Nikuradse alla potenza 1/6.

Condizioni al contorno per i moduli NSW e PMS sono di tipo 'symmetrical', al fine di riprodurre condizioni speculari nelle zone laterali adiacenti il dominio di calcolo; per il modulo HD, si impone al contorno verso largo la condizione di flusso nullo, mentre sui contorni laterali si utilizzano livelli e flussi generati dai radiation stresses derivati dai risultati del PMS.

I parametri di frangimento assunti nel modulo PMS, non disponendo di dati per la calibrazione, sono i valori suggeriti:  $\gamma_1=1.0$  (controlla il frangimento per ripidità dell'onda),  $\gamma_2=1.0$  (controlla il frangimento per profondità del fondale) and  $\alpha=0.8$  (indica la dissipazione per frangimento). La viscosità turbolenta viene simulata nel modulo HD mediante la formula di Smagorinski con coefficiente 0.5.

### Risultati delle simulazioni

Per la similarità delle batimetrie e dei risultati ottenuti con le due alternative sommerse, si riportano per brevità solo i confronti relativi alla situazione attuale e all'alternativa progettuale II consigliata.

Per eseguire un confronto tra il comportamento della barriera sommersa e l'attuale scogliera emersa sono stati scelti dodici punti nella zona protetta (Fig. 9), in corrispondenza dei quali sono stati rilevati i valori delle altezze d'onda propagate con il modulo PMS (Tab. 10), le elevazioni superficiali (Tab. 11) e le velocità delle correnti (Tab. 12) ottenute con il modulo HD sia per la situazione attuale sia per l'alternativa II. Dall'analisi delle Tabelle si nota che la barriera sommersa, rispetto alla situazione attuale, genera mediamente una maggior trasmissione ondosa (0.34-0.44 m contro 0.13-0.56 m), un tirante idrico nella zona protetta più elevato (0.07-0.20 m contro 0.02-0.11 m) ed una più intensa velocità della corrente (0.14-0.32 m/s contro 0.09-0.37 m/s), ad eccezione dell'onda 1 da Bora. Le correnti ai varchi (p.ti 3, 7, 8, 10, 12), in particolare, risultano sempre superiori nella configurazione con barriera sommersa, tuttavia non destano preoccupazione ai fini della balneazione tendendo a richiudersi con rapidità verso la barriera e dunque all'interno della zona protetta.

Si riportano per l'onda 4, a titolo esemplificativo, le velocità delle correnti ottenute col modulo HD (Fig. 10). Si può notare, nella situazione attuale, un flusso di corrente piuttosto vorticoso nella zona esterna, mentre all'interno delle barriere si ha una corrente ben definita da Est verso Ovest. Le correnti tendono ad uscire dall'area protetta in direzione largo da tutti i varchi, eccetto quello compreso tra la terza e la quarta scogliera dal molo, dove si nota un'accentuata corrente in ingresso. La velocità della corrente è modesta, mediamente 0.3 m/s, tranne in prossimità della falesia del colle San Bartolo, dove si raggiungono valori maggiori.

Il progetto di barriera sommersa genera correnti più regolari e più intense nella parte esterna alle scogliere con direzione E-W.

Rispetto alla situazione attuale, le correnti presentano un'intensità maggiore, in corrispondenza delle soglie centrali verso largo, lungo riva, in prossimità del molo del porto canale e della falesia del colle San Bartolo.

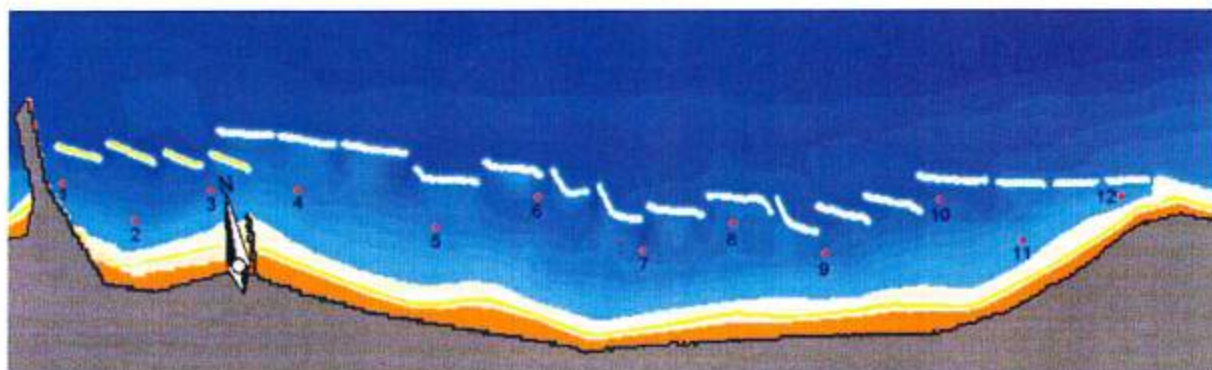


Figura 9 - Individuazione dei dodici punti nella zona protetta della barriera emersa.

Tabella 10 - Valori delle altezze d'onda propagate con il modulo PMS (m).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2
2	0.5	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
3	1.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
5	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4
6	1.0	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
7	0.9	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
8	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
9	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
10	0.8	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5
11	0.6	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
12	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.9	0.7	0.9	0.1	0.6	0.1
Medio	0.56	0.13	0.29	0.20	0.14	0.16	0.44	0.41	0.48	0.35	0.37	0.34
Max	1.0	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.9	0.7	0.9	0.5	0.6	0.6

Tabella 11 - Valori delle elevazioni superficiali ottenuti con il modulo HD (m).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.075	0.025	0.025	0.075	0.025	0.025	0.075	0.225	0.225	0.125	0.075	0.075
2	0.075	0.025	0.025	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
3	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.025	0.075
4	0.125	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
5	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
6	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.225	0.125	0.075	0.075
7	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
8	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
9	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
10	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
11	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.175	0.125	0.075	0.075
12	0.075	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.125	0.125	0.075	0.025	0.075
Medio	0.079	0.025	0.108	0.075	0.025	0.025	0.075	0.175	0.196	0.121	0.067	0.075
Max	0.125	0.025	0.125	0.075	0.025	0.025	0.075	0.225	0.225	0.125	0.075	0.075

Tabella 12 - Valori della velocità della corrente ottenuti con il modulo HD (m/s).

P.ti	Situazione attuale, Onde						II Alternativa, Onde					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0.600	0.075	0.400	0.200	0.030	0.030	0.400	0.200	0.200	0.200	0.075	0.200
2	0.200	0.03	0.200	0.200	0.003	0.030	0.400	0.200	0.200	0.030	0.075	0.075
3	0.600	0.200	0.400	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200
4	0.400	0.075	0.075	0.200	0.030	0.075	0.400	0.200	0.400	0.200	0.030	0.075
5	0.400	0.030	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.030	0.075	0.075	0.075	0.200
6	0.600	0.030	0.030	0.200	0.030	0.200	0.400	0.200	0.600	0.200	0.200	0.200
7	0.200	0.075	0.200	0.075	0.030	0.030	0.200	0.075	0.200	0.075	0.030	0.075
8	0.200	0.003	0.030	0.030	0.030	0.007	0.200	0.200	0.600	0.200	0.200	0.200
9	0.400	0.003	0.200	0.030	0.030	0.030	0.200	0.075	0.200	0.200	0.030	0.030
10	0.400	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.200	0.200
11	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.075	0.200	0.030	0.075	0.030
12	0.200	0.200	0.200	0.400	0.200	0.200	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.200
Medio	0.367	0.093	0.211	0.195	0.099	0.117	0.300	0.205	0.323	0.184	0.149	0.140
Max	0.600	0.200	0.400	0.400	0.200	0.200	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.200

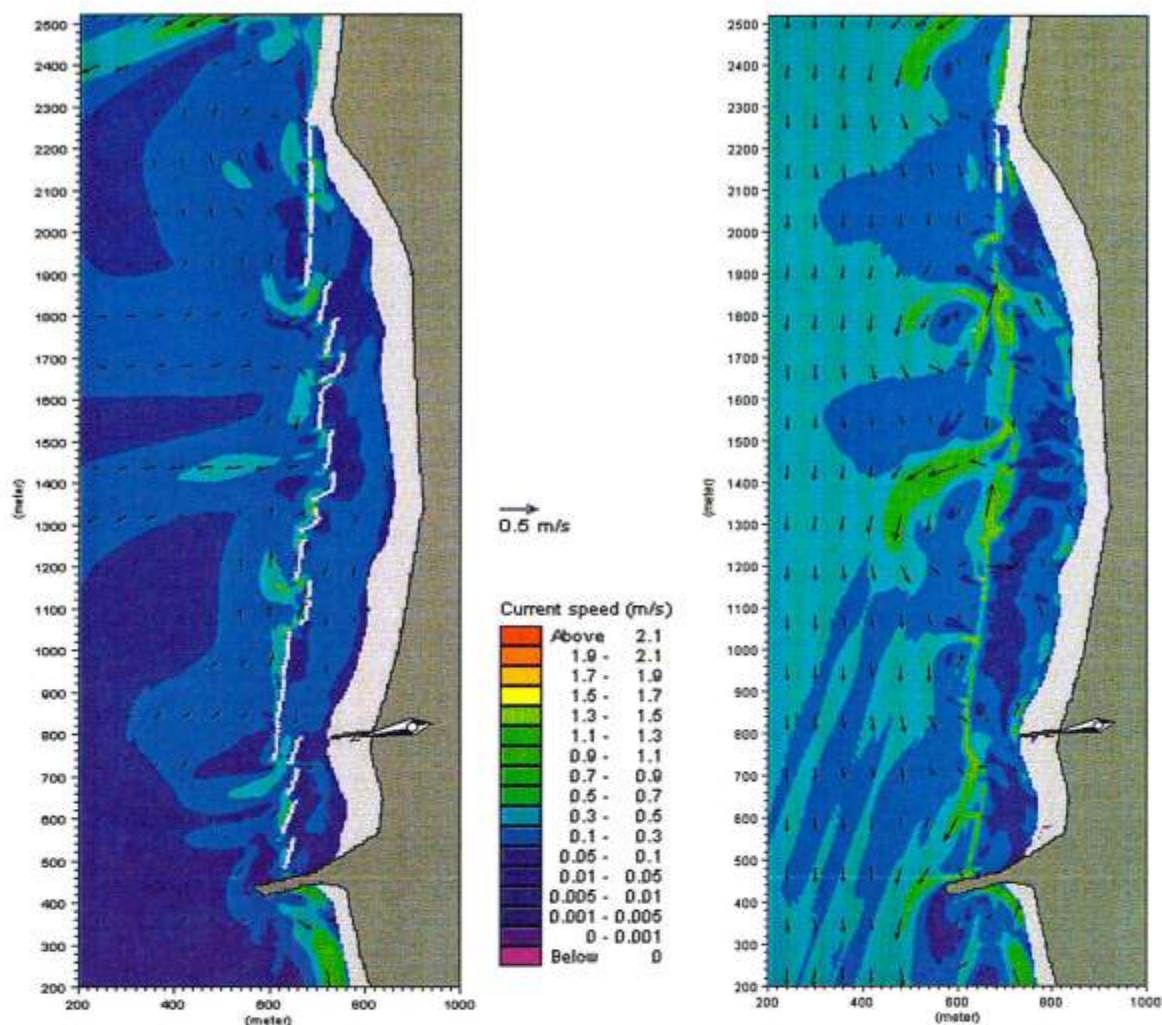


Figura 10 - Intensità e direzione della velocità corrente in scala di colore e vettori, onda 4, per l'attuale disposizione delle scogliere e per l'alternativa II.

Nella Figura 11, sono rappresentati i flussi sedimentari ottenuti dalla integrazione dei flussi sedimentari ottenuti col modulo ST per le singole condizioni ondose, sulla base della frequenza delle stesse nel clima ondoso tipico annuale. Nell'esame dei risultati si deve ricordare che rappresentano solo la tendenza al deposito/erosione media annua, perché sono derivati dalla composizione degli effetti di diverse onde in ordine casuale su una batimetria fissa del fondo.

Per l'attuale disposizione delle barriere, i flussi sedimentari entrano nella zona protetta solo attraverso i varchi e tutto il materiale in ingresso rimane intrappolato all'interno delle barriere. Le zone di accumulo sono maggiormente visibili in prossimità del pontile del locale Mississippi e nella parte centro-orientale.

Nel caso della barriera sommersa si può invece evidenziare che i flussi sedimentari entrano nello specchio protetto anche attraverso la tracimazione sulla scogliera. L'area più critica in cui i flussi sono diretti verso largo, sebbene modesta entità, si trova in corrispondenza dei varchi delle ultime due barriere, in prossimità del colle San Bartolo, per proteggere la quale, si può prevedere la costruzione di due soglie protette tra le barriere in questione.

Confrontando i due grafici di Figura 11, si può riscontrare un andamento dei flussi simile per quanto riguarda la zona ad est del molo del porto canale di Gabicce-Cattolica e la parte ad Est del monte San Bartolo, con una chiara tendenza all'accumulo in prossimità della battigia.

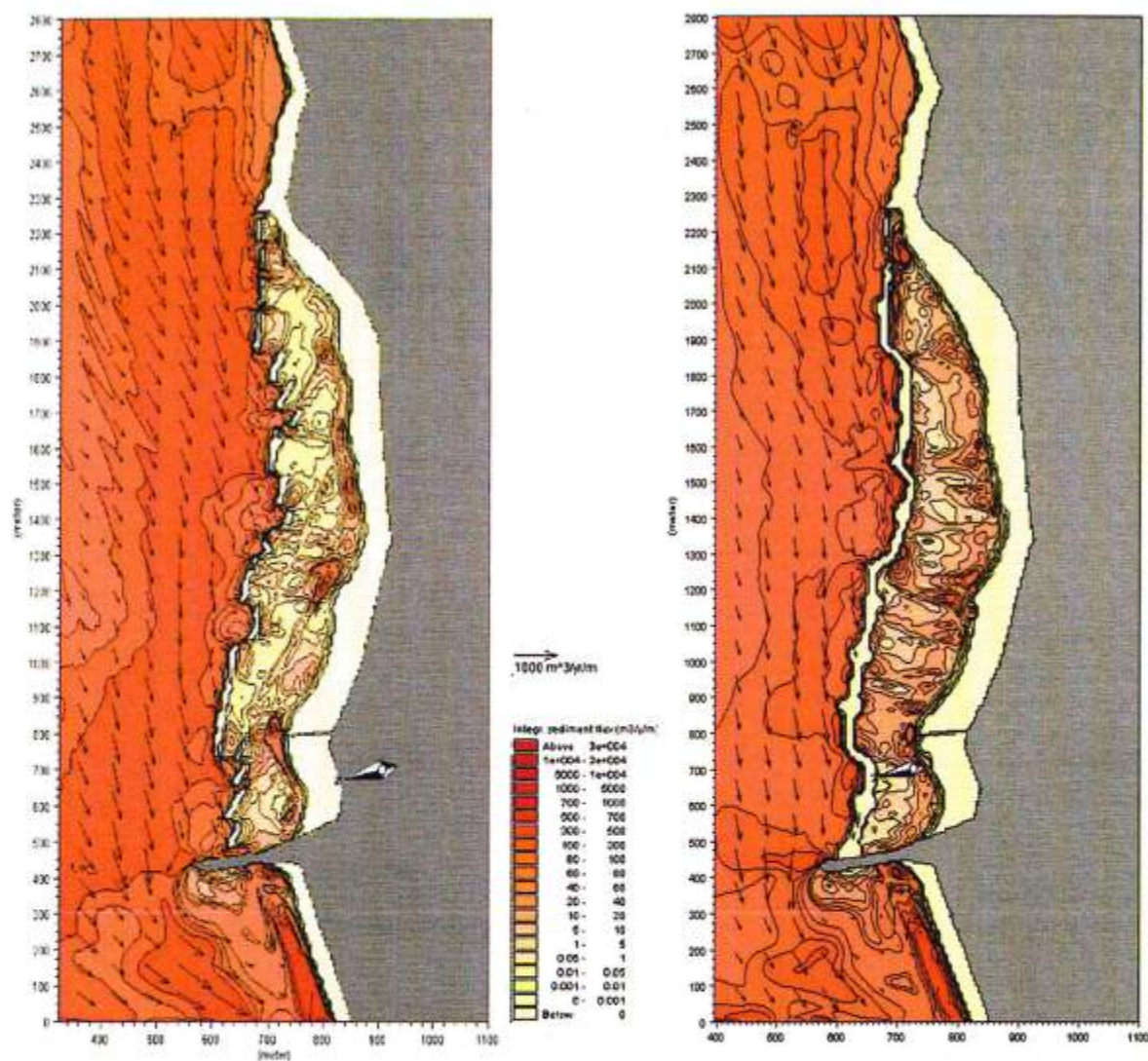


Figura 11 - Flussi sedimentari medi annui nella configurazione attuale e nell'alternativa II.

## Conclusioni

Il contributo si prefigge di proporre un sistema di difesa costiera sostenibile ed eco-compatibile per la spiaggia di Gabicce Mare, stanti le problematiche emerse nella configurazione attuale.

L'alternativa progettuale, sulla base delle indicazioni della Regione Marche, si compone di un'unica barriera sommersa con varchi e si propone di migliorare la circolazione nello specchio protetto preservando le praterie di fanerogame attualmente presenti e senza aggravare i fenomeni erosivi che già interessano la parte centro-orientale della spiaggia ed i fenomeni di instabilità relativi alla falesia del colle San Bartolo. La verifica del progetto è stata effettuata sulla base dei risultati di simulazioni numeriche bidimensionali.

Le variazioni della distribuzione planimetrica e puntuale di onde e correnti, indotte dalla barriera, producono un effettivo incremento dello scambio d'acqua nella zona protetta garantendone una migliore qualità. Inoltre, la circolazione delle correnti dovuta alla presenza della barriera sommersa risulta più regolare di quanto si può riscontrare con la presenza delle scogliere emerse esistenti.

La barriera sommersa non genera modifiche significative all'habitat ideale per lo sviluppo delle praterie di fanerogame. Infatti, nonostante l'agitazione ondosa dietro la scogliera sommersa sia indubbiamente mag-

giore di quella attuale, l'area rimane classificata come zona protetta per condizioni di alta marea di 0.50 ed 1 metro sul l.m.m. e come zona estremamente protetta per condizioni di alta marea nulla, rientrando quindi nei parametri limite visti precedentemente.

In merito alla fruibilità turistica della spiaggia, l'innalzamento del livello di medio mare causato dalla barriera sommersa genera un maggior tirante d'acqua sulle praterie di fanerogame agevolando la balneabilità della zona. Inoltre, la maggior agitazione ondosa residua, unita all'incremento del tirante idrico, potrebbe frenare la diffusione delle fanerogame nell'area occidentale dello specchio protetto (zona di maggiore cambiamento idrodinamico), ove sono collocati tutti gli stabilimenti balneari. Infine, il processo di frangimento sulla barriera o a tergo di essa e sulla spiaggia genererà una zona di massima dissipazione e risospensione di fini in battaglia, che insieme all'aumento di livello a parità di fondale e quindi al mutamento delle condizioni attuali di luce ed ossigeno, potrebbe ridurre l'estensione, in direzione perpendicolare a riva, della zona interessata dalle fanerogame con chiaro beneficio per le attività ricreative.

Gli strumenti numerici a disposizione non consentono però di garantire con ragionevole certezza questo scenario di mantenimento della prateria esistente e contenimento del suo sviluppo nelle zone a maggior interesse ricreativo. Ovviamente, bisognerà adottare particolari accorgimenti in fase di esecuzione dell'opera, onde evitare di incrementare eccessivamente la torbidità dell'acqua ed il rimaneggiamento del fondale, dannosi per tali piante.

Per quanto riguarda l'erosione riscontrata nella parte centro-orientale della spiaggia ed i fenomeni di instabilità della falesia del colle San Bartolo, la costruzione della barriera sommersa non genera condizioni di criticità. Tuttavia, per una maggior sicurezza dell'area, si prevede la costruzione di soglie di protezione per i varchi delle due barriere più prossime al monte (lasciate emerse) ed il prolungamento dell'esistente scogliera di protezione al piede del San Bartolo, fino al tratto sottostante l'abitato di Gabicce Monte.

In conclusione, il progetto di barriera sommersa soddisfa gli obiettivi prefissati. Per quanto riguarda i costi di realizzazione, l'alternativa di scapitozzare e riprofilare le barriere esistenti è da prediligere alla variante fatta alla proposta presentata dalla Regione Marche.

### Ringraziamenti

Si desidera ringraziare: il Prof. Ing. Alberto Lamberti, per la supervisione del lavoro; il Dott. Ing. Massimo Guerrero, per l'aiuto nella realizzazione delle batimetrie; il Dott. Ing. Luca Martinelli, per i consigli sul dimensionamento delle opere; il Prof. Ing. Vittorio Curzi, per le indicazioni sull'area del S. Bartolo; il Dott. Ing. Mentino Preti, ARPA Emilia-Romagna, per la foto aerea in Figura 1.

### Bibliografia

- Abbott M.B., Damgaard A. e Rodenhuis G.S., (1973) - *System 21, Jupiter. A design system for two-dimensional nearly-horizontal flows*. IAHR, J. Hydraul. Res. 1: 1-21.
- Ahrens J.P., (1987) - *Characteristics of reef breakwaters*. CERC, Vicksburg, Technical Report CERC: 87-17.
- Battjes J. A. e Janssen J. P.F.M. (1978) - *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. Coastal Eng., New York, ASCE ed., 16: 569-587.
- Briganti R., Van Der Meer J.W., Buccino M. e Calabrese D M., (2003) - *Wave trasmission behind low crested structures*. ACSE, Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon.
- D'Angremond K., Van Der Meer J.W. e Dejong R.J., (1996) - *Wave trasmission at low-crested structures*. ASCE, Proc. ICCE, Orlando, Florida, pp. 3305-3318.
- Colantoni P., Mencucci D. e Nesci O., (2004) - *Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (Northern Adriatic Sea): a case history*. Geomorphology, 62 (3-4): 257-268.
- Davison D.M. e Hughes D.J., (1998) - *Zostera biotopes: an overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs*. Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project), Vol.1.
- De Donatis M., Mazzoli S., Paltrinieri W. e Wezel F. C., (1995) - *Evoluzione tettonica dell'avanfossa appen-*

- ninica marchigiano-romagola dal Miocene superiore al Pleistocene*. St. Geol. Cam., Volume Speciale: 359-371.
- Engelund F. e Fredsoe J. (1976) - *A sediment transport model for straight alluvial channels*. Nordic Hydrology, 7: 293-306.
- Fonseca M.S., Kenworthy W.J. e Thayer G.W., (1998) - *Guidelines for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent waters*. NOAA'S Coastal Ocean Program, 12, pp. 222.
- Givler L.D. e Sorehsen R.M. (1986) - *An investigation of the stability of submerged homogeneous rubble-mound structures under wave attack*. Lehigh University, H.R. IMBT Hydraulics, Report IHL: 110-86.
- Kirby, J.T. , 1986 - Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. Coastal Eng., 10: 355-378.
- Nesci O. (2003) - *Evoluzione geomorfologica della falesia costiera del Monte San Bartolo*. Quaderni del Centro di Geobiologia Università degli Studi di Urbino, Vol. n. 1: 15-39.
- Regione Marche, Dipartimento Territorio e Ambiente, Servizio Progettazione Opere Pubbliche di Interesse Regionale, Attività Estrattive e V.I.A., (2003) - *Piano di Gestione Integrata delle Aree Costiere*.
- Sumer M., Fredsøe J., Zanuttigh B., Lamberti A., Gislason K., Dixer M. e Di Penta A. (2005) - *Local scour and erosion around low crested coastal defence structures*. Coastal Engineering, DELOS Special Issue, in revisione.
- Primavera E. (2004) - *Studio della dinamica del litorale di Gabicce (PU): modifica dell'attuale scogliera ed effetti sull'ecosistema marino*. Tesi di Laurea, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.
- Van der Meer J. W. (1992) - *Conceptual design of rubble mound breakwaters*. ICCE 1992, Proc. Of the short course on Design and reliability of coastal structures, Venice, 1-3 October 1992: 447-510.
- Vermaat J.E., Agawin N.S.R, Fortes M.D., Uri J.S., Duarte C.M., Marbà N., Enriquez S. e Van Vierssen W., (1996) - *The capacity of seagrasses to survive increased turbidity and siltation: the significance of growth form and light use*. Ambio 25: 499-504.

**Manoscritto ricevuto il 24/12/2004, accettato il 30/05/2005.**

## Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di fotoaeree e immagini MIVIS e Quickbird.

Alessandra Grignetti, Ruggero Casacchia e Rosamaria Salvatori

CNR - IIA Via Salaria, km 29 - 00016 Monterotondo Stazione (Roma). Email: grignetti@iia.cnr.it

### Riassunto

Questo studio analizza le variazioni avvenute dalla fine degli anni '50 al 2002 sul sistema dunale di un'area costiera a circa 30 km a sud di Roma, utilizzando fotografie aeree del 1959, 1985 e 1994, dati aerei iperspettrali (MIVIS) del 1995 e immagine del satellite Quickbird del 2002. Dalla fotointerpretazione sono stati ricavati i tematismi relativi ai cordoni dunali, alla vegetazione e alle infrastrutture per le tre epoche. Le immagini digitali sono state trattate con tecniche di filtraggio e di classificazione per estrarre i dati utili per lo studio. I risultati ottenuti evidenziano che l'estensione dei cordoni dunali è progressivamente diminuita (10%-15%) sia nell'area protetta che nelle aree caratterizzate da una fruizione pubblica, a causa dell'aumento di infrastrutture. I dati MIVIS e Quickbird si sono rivelati estremamente utili nel riconoscimento dei diversi tipi vegetazionali e nella realizzazione di carte tematiche da confrontare con i risultati delle analisi dei dati storici.

### Abstract

*This study refers to the variations occurred in a dune system, located about 30 km south-east of Rome, from late fifties to 2002, making use of aerial photographs acquired in 1959, 1985 and 1994, airborne hyperspectral data (MIVIS) of 1995 and high resolution satellite data of 2002. Using photo-interpretation dune features, vegetation units and infrastructures were mapped and digitised to create a geocoded data set. High-pass filtering and different classification techniques were applied on digital data. Results of this study show that the surface extension of the dune has decreased (10%-15%) in both protected and public areas as a consequence of infrastructures increase. MIVIS and Quickbird data were extremely useful to better define the vegetation units and to provide a detailed mapping of the dune system features to compare with historical data.*

### Introduzione

Gli ecosistemi costieri costituiscono entità complesse e dinamiche i cui equilibri sono legati sia alla componente marina e terrestre, sia ad aspetti socioeconomici e culturali. Questi ambienti sono quindi estremamente fragili e sensibili; pertanto, se sottoposti ad uno sfruttamento eccessivo, dovuto all'aumento incontrollato degli insediamenti residenziali, o ad un uso massiccio a fini turistici, sono soggetti a gravi alterazioni che determinano erosione costiera, inquinamento delle acque, e danneggiamento delle dune litoranee. In Italia il crescente intervento antropico sulle coste ha condizionato la tendenza evolutiva delle spiagge, rendendo il bilancio sedimentario sempre più in difetto e tale da innescare considerevoli processi erosivi [Fierro, 2004]. Per le coste italiane, caratterizzate per il 61% da arenili, si è osservato che il 27% delle spiagge risulta attualmente in erosione, il 70% può essere considerato in equilibrio (in parte dovuto agli interventi di difesa), mentre solo il 3% mostra quella tendenza verso l'avanzamento che caratterizzava nei secoli scorsi la maggior parte delle spiagge [Caputo et al., 1990 e 1991].

Numerosi studi sugli effetti del disturbo antropico in relazione alla distribuzione spaziale delle comunità vegetazionali psammofile nel litorale laziale [Acosta et al., 2003; Blasi et al., 1999] hanno messo in evidenza che tali



cenosi si comportano da bioindicatori dello stato di conservazione dell'ambiente dunale [Iannantuono et al., 2004]; pertanto, stimando l'estensione superficiale, la struttura e la composizione floristica della vegetazione dunale, è possibile dedurre l'intensità e l'entità del danno presente in una zona e approntare adeguati strumenti di pianificazione territoriale per la corretta gestione di queste aree.

Sebbene la raccolta di dati con metodi tradizionali rimanga una componente fondamentale nello studio di questi ambienti [Baily e Nowell, 1996], dati acquisiti mediante sensori remoti ottici contribuiscono in modo sostanziale agli studi sull'uso e copertura del suolo, sull'idrologia ed ecologia costiera, nonché sulla qualità delle acque e sul trasporto dei sedimenti [Phinn et al., 2000; Ramsey III et al., 2001; Torres-Pulliza et al., 2001]. In particolare, i dati satellitari di nuova generazione, con risoluzioni spaziali sub-metriche [Boccardo, 2000], permettono di monitorare i cambiamenti territoriali, ottenendo prodotti cartografici a scala confrontabile con quella dei prodotti derivati dalle foto aeree acquisite in epoche precedenti [Peccol et al., 2003].

In tale contesto si inserisce questo studio che, avvalendosi di dati storici e recenti provenienti da fonti diverse, ha lo scopo di rilevare e di quantificare, a cadenza temporale, le variazioni occorse in un'area costiera a sud di Roma, sottoposta ad un'intensa pressione antropica. Inoltre questo studio, realizzato nell'ambito di una collaborazione tra il Comune di Roma, Dipartimento X, ed il CNR, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, ha fornito gli elementi utili per valutare l'efficacia degli interventi adottati dall'Amministrazione Comunale negli ultimi dieci anni.

### Area di studio

L'area di studio è costituita da una fascia costiera a sud di Roma che si estende per circa 8 Km dalla Tenuta Presidenziale di Castelporziano fino alla città di Torvaianica (Figura 1) ed è caratterizzata da depositi sabbiosi appartenenti al sistema della duna recente. Tale fascia costiera, proposta come Sito di Importanza Comunitaria (IT6030027), è caratterizzata dalla seriazione psammofila costituita dall'insieme di comunità effimere del primo tratto di spiaggia emersa (1210)<sup>1</sup>, comunità a *Elytrigia juncea*<sup>2</sup> e *Sporobolus virginicus* (2210) e popolamenti ad *Ammophila littoralis* (2120). Questo insieme di cenosi risulta caratterizzato da poche specie fortemente selezionate per le estreme condizioni di vita (vento, salinità del suolo), che svolgono un importante ruolo nella prima azione di colonizzazione della spiaggia e nella formazione e stabilizzazione delle dune embrionali. Sono comunità a bassa copertura (20-30%) che compaiono lungo il litorale in maniera sporadica e spesso in situazioni di mosaico tra di loro [Pignatti et al., 2001].

Tabella 1. Descrizione fisionomica dei tipi vegetazionali analizzati sulle fotografie aeree e sulle immagini.

Tipi vegetazionali	Descrizione fisionomica strutturale
Sabbia	Dune mobili in embrione prive di vegetazione e/o con vegetazione effimera a dominanza di <i>Cakile maritima</i> ssp. <i>maritima</i>
Vegetazione psammofila	Dune mobili con vegetazione erbacea emicriptofitica a copertura bassa (<30%) caratterizzata da <i>Elytrigia juncea</i> e <i>Ammophila littoralis</i>
Macchia bassa	Dune stabili con vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura media (40%-70%) caratterizzata da <i>Cistus</i> sp. pl. e <i>Rosmarinus officinalis</i>
Macchia alta	Dune stabili con vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura elevata (>70%) caratterizzata da <i>Juniperus</i> sp. pl., <i>Pistacia lentiscus</i> e <i>Phyllirea latifolia</i>
Boscaglia igrofila	Retroduna umida con nuclei residuali a <i>Fraxinus angustifolia</i> ssp. <i>oxycarpa</i> con <i>Alnus glutinosa</i> e <i>Ficus carica</i>
Pratelli	Vegetazione erbacea terofitica in mosaico con gariga e macchia

<sup>1</sup> Codice Natura 2000 secondo Interpretation Manual of European Union Habitats, EU15/2, October 1999.

<sup>2</sup> Per la nomenclatura delle specie si fa riferimento ad Anzalone B. (1994). Prodromo della flora romana (Elenco preliminare delle piante vascolari spontanee del Lazio) Parte 1<sup>a</sup>. Ann. Bot. (Roma), LII, Suppl. 11 e Parte 2<sup>a</sup>. Ann. Bot. (1996) LIV.

Procedendo verso l'entroterra, la vegetazione dominante è la gariga, costituita da bassi arbusti che raramente raggiungono il metro e caratterizzata dall'elevata copertura di *Cistus creticus ssp. eriocephalus* con *Erica multiflora* e *Rosmarinus officinalis*. A contatto con la gariga risultano presenti significativi aspetti di macchia a ginepri (*Juniperus oxycedrus ssp. macrocarpa* e *J. phoenicea*) accompagnata da *Phyllirea latifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Rhamnus alaternus*, *Arbutus unedo* (5210), che determinano il consolidamento e la stabilizzazione del suolo. Tale comunità si va strutturando in altezza raggiungendo anche i 2 o 3 metri (macchia alta) soprattutto nelle zone sottovento.

E' importante inoltre menzionare la presenza, nelle depressioni interdunali in cui affiora la falda acquifera, di popolazioni a carattere residuale in cui il *Fraxinus angustifolia ssp. oxycarpa* è la specie dominante, accompagnato da *Alnus glutinosa* e *Ficus carica* (2190). Localmente si rinvencono anche pratelli terofitici (2240 e 2230), spesso presenti in mosaico con macchia e gariga, a fenologia primaverile con *Tuberaria guttata*, *Aira elegantissima*, *Trifolium cherleri* e *Vulpia myuros* [Pignatti et al., 2001].

Le tipologie brevemente descritte sono state successivamente riunite in tipi vegetazionali così come descritti in tabella 1, successivamente individuati e cartografati sia sulle fotoaeree che sulle immagini telerilevate.

#### Acquisizione ed elaborazione dati

I dati utilizzati in questo lavoro sono costituiti da foto aeree acquisite con il volo effettuato dallo Stato Maggiore dell'Aeronautica nel 1959 (scala 1:10000), e con i voli effettuati dalla Soc. S.A.R.A. NISTRIS nel 1985 (scala 1:12000) e nel 1994 (scala 1:15000); immagini riprese dal sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS (*Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer*) il 20 giugno 1995, e dal satellite multispettrale Quickbird il 16 maggio 2002.

L'area di studio (figura 1) è stata suddivisa in tre zone che si distinguono in base al diverso tipo di gestione ed utilizzo del territorio come riportato in tabella 2.

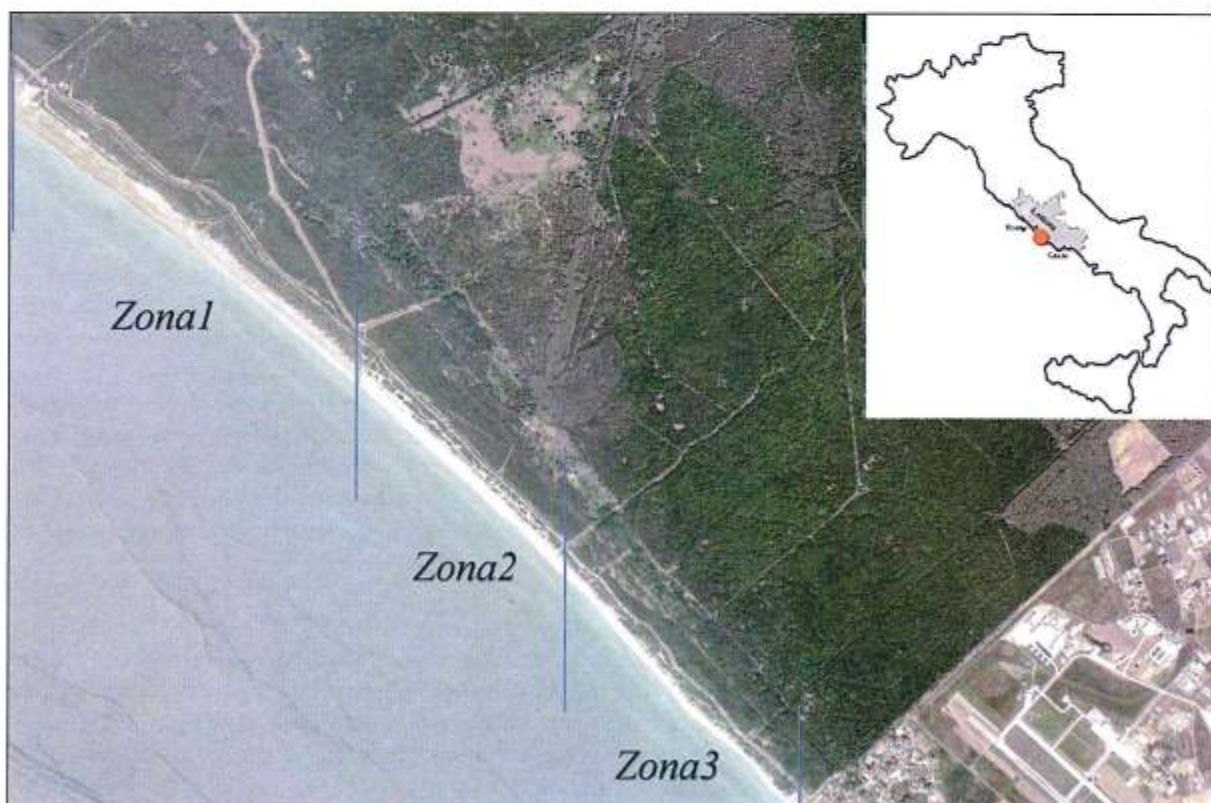


Figura 1 - Area di studio compresa tra la Tenuta di Castelporziano (a nord) e la città di Torvaianica (a sud).

Tabella 2. Suddivisione dell'area di studio e caratteristiche delle zone individuate.

	Descrizione delle tre zone
<b>Zona 1</b>	Area protetta della Tenuta Presidenziale di Castelporziano con limitato accesso alla spiaggia (superficie 95 ha)
<b>Zona 2</b>	Area pubblica comunale definita come "Cancelli", caratterizzata da numerosi punti di fruizione con ampi parcheggi nell'area retrodunale (superficie 38 ha)
<b>Zona 3</b>	Area pubblica comunale corrispondente all'area di Capocotta, priva di parcheggi nell'area retrodunale, con limitati punti di fruizione e con camminamenti per l'accesso al mare istituiti negli anni '90 (superficie 40 ha)

### Fotografie aeree e dati cartografici

Dall'analisi stereoscopica delle foto aeree sono state estratte le informazioni relative all'estensione dei cordoni dunali, alla distribuzione della vegetazione litoranea e allo sviluppo delle infrastrutture (strutture per la balneazione, strade, parcheggi) presenti lungo la fascia costiera. I tematismi così selezionati sono stati quindi georiferiti rispetto alla Carta Tecnica Regionale a scala 1:10000, al fine di derivare carte tematiche multitemporali dell'estensione dei cordoni dunali, e della presenza di infrastrutture e dei tipi vegetazionali descritti in tabella 1. La fotointerpretazione non ha permesso il riconoscimento e la mappatura dei pratelli, per la limitata estensione di tale comunità, non rilevabile pertanto alla scala delle foto aeree.

### Immagini MIVIS

Le immagini del sensore iperspettrale MIVIS sono state acquisite a 1000 metri di quota, con una risoluzione spaziale di circa 2m/pixel [Marino, 2001]. La copertura complessiva dell'area di studio ha richiesto due passaggi MIVIS. L'elaborazione di queste immagini è stata finalizzata al riconoscimento dei cordoni dunali e alla classificazione delle formazioni vegetazionali. L'individuazione dei cordoni dunali è stata effettuata a seguito dell'elaborazione della banda 28 (1.5-1.55  $\mu\text{m}$ ) mediante l'applicazione di filtri a convoluzione passa-alto [Chavez e Bauer, 1982]. La classificazione è stata invece eseguita sulle prime 20 bande spettrali (0.43-0.83  $\mu\text{m}$ ), selezionate tra le 102 disponibili, mediante l'applicazione degli algoritmi di Massima Verosimiglianza (ML) e *Spectral Angle Mapper* (SAM). Prima di essere classificate, le immagini MIVIS sono state trasformate in riflettanza, mediante la tecnica dell'*empirical line* [Moran et al., 2001]. La metodologia utilizzata per il trattamento delle immagini è ampiamente descritta in Casacchia et al., 2002.

L'accuratezza della classificazione è stata stimata mediante test statistici e controlli in campo. I rilievi di campo, effettuati nella primavera del 2003, hanno permesso di individuare 15 aree relative alle tipologie vegetazionali: di queste circa i 2/3 sono stati utilizzati per selezionare le aree test per la classificazione, e le restanti per verificare l'accuratezza delle classificazioni.

La matrice degli errori [Congalton, 1991] ha fornito un'accuratezza totale del 97% utilizzando l'algoritmo ML e del 87%, con l'algoritmo SAM. Nella classificazione ML gli errori di classificazione sono molto bassi e sono dovuti ad una errata attribuzione di pixel di bosco alla macchia alta; nella classificazione SAM, invece, gli errori di classificazione sono più consistenti e riguardano l'attribuzione dei pixel alle due tipologie di macchia mediterranea. Pertanto, ai fini dell'analisi multitemporale sono state utilizzati i risultati delle classificazioni ML.

### Immagine Quickbird

I dati relativi al 2002 sono stati estratti da un'immagine Quickbird che acquisisce quattro bande spettrali (0.450-0.520  $\mu\text{m}$ , 0.520-0.600  $\mu\text{m}$ , 0.630-0.690  $\mu\text{m}$ , 0.760-0.900  $\mu\text{m}$ ) con risoluzione spaziale di circa 2.8  $\mu\text{m}$ . Le procedure di elaborazione adottate sono state simili a quelle utilizzate per le immagini MIVIS per mantenere una omogeneità di analisi e hanno avuto come scopo quello di migliorare il contrasto spaziale tra le strutture del sistema dunale e di riconoscere i principali tipi di vegetazione presenti sul litorale.

Tabella 3. Estensione areale (percentuale) dei cordoni dunali e delle infrastrutture (la descrizione delle zone è riportata in tabella 2).

Anno	1959			1985			1994			1995			2002		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Cordoni dunali (%)</b>	38	23	34	23	17	14	27	11	19	24	12	20	30	11	24
<b>Infrastrutture (%)</b>	0.2	3	0	5.6	12	7	7	12	5	6	12	5	3.1	16.8	1

Il miglioramento del contrasto spaziale tra le strutture del sistema dunale è stato ottenuto applicando filtri a convoluzione alla banda 4. L'immagine filtrata è stata ricombinata con i dati originali per ottenere un'immagine con la migliore definizione possibile dei cordoni dunali. Sull'immagine risultante sono stati quindi digitalizzati i limiti dei cordoni ed estratte le informazioni riguardanti la struttura delle dune.

Anche l'immagine Quickbird è stata classificata utilizzando le procedure ML e SAM per il riconoscimento dei tipi vegetazionali riportati in tabella 2. Anche in questo caso la scelta delle aree test e la verifica della bontà delle classificazioni si è basata sui rilievi di campo precedentemente citati. In base ai coefficienti di accuratezza, la classificazione SAM (accuratezza 97%) ha fornito risultati più affidabili rispetto al metodo ML (accuratezza 88%), sia dal punto di vista statistico sia per il riconoscimento dei singoli tipi vegetazionali. In questo caso, nell'analisi multitemporale, sono stati utilizzati i tematismi derivati dalla classificazione SAM.

### Risultati e discussione

I risultati ottenuti in questo lavoro interessano la distribuzione di cordoni dunali/infrastrutture (figura 2, tabella 3) e dei tipi vegetazionali (figura 3 e tabella 4). I valori riportati nelle tabelle sono calcolati come percentuali normalizzate rispetto all'estensione delle singole zone. Nelle figure sono riportati i risultati ottenuti per ciascuno dei periodi considerati, con l'esclusione dei dati relativi al 1995 (derivati dall'elaborazione dell'immagine MIVIS) perché, rispetto al 1994, le variazioni areali dei tematismi considerati non sono apprezzabili alla scala di rappresentazione adottata. I dati del 1995 sono stati comunque riportati nelle tabelle 2 e 3 e discussi.

#### *Analisi multitemporale di cordoni dunali ed infrastrutture*

Dalla analisi dei dati in tabella 3, è possibile individuare una correlazione tra aumento di infrastrutture e diminuzione della percentuale areale dei cordoni, in tutte le zone analizzate. Questo dato emerge soprattutto dall'analisi dei dati compresi nel periodo 1959-1985 ed interessa maggiormente la zona 1 (Tenuta di Castelporziano) e la zona 3 (Capocotta). Nei dieci anni successivi (1985-1995) si assiste ad una stabilizzazione della presenza di infrastrutture a cui corrisponde una relativa stabilizzazione dell'estensione dei cordoni dunali, tranne nella zona 1 dove l'aumento di infrastrutture è associato ad un aumento dei cordoni.

Va però tenuto in considerazione che tale zona è ad accesso limitato e la maggior presenza di strade, utilizzate prevalentemente per fini di sorveglianza, induce l'aumento percentuale delle infrastrutture, ma non determina alcun danno alla duna. Nella zona 2 invece, pur essendo costante la presenza di infrastrutture, l'estensione dunale è diminuita sensibilmente: ciò è facilmente spiegabile considerando che in questa zona è più intensa la fruizione pubblica.

Nel periodo 1995-2002, nelle zone 1 e 3 si assiste ad un aumento percentuale dei cordoni dunali con relativa diminuzione della presenza di infrastrutture. Infatti nel 1995, nella zona della Tenuta sono state costruite dune artificiali allo scopo di riqualificare il sistema più prossimo alla linea di riva [Bianco et al., 2001], mentre nella zona di Capocotta (zona 3) la pubblica Amministrazione, nei primi anni '90, ha realizzato interventi di protezione per impedire il camminamento sulle dune.

In figura 2 sono riportati i cordoni dunali, numerati a partire dalla I duna mobile, la più vicina alla linea di costa, e le infrastrutture comprendenti le strade e le strutture per la balneazione. La rappresentazione grafica di queste strutture conferma quanto osservato in base ai dati percentuali.

Tabella 4. Estensione percentuale della vegetazione in ciascun periodo (la descrizione delle zone è riportata in tabella 2).

Anno	1959			1985			1994			1995			2002			
	Zona	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sabbia		15	24	20	26	44	37	21	49	40	30	49	47	35	46	37
Veg. psammofila		19	11	15	20	7	5	24	10	11	24	17	14	20	17	18
Macchia bassa		44	48	46	29	45	41	45	39	45	26	33	38	37	33	37
Macchia alta		22	17	9	10	3	12	10	0	1	18	1	0	8	2	2
Boscaglia igrofila				11			5			3			1	0.1	0.5	5

Nel 1985 e nel 1994 è evidente una progressiva diminuzione delle serie dei cordoni con un costante assottigliamento delle dune e la scomparsa dei cordoni più prossimi al mare. In questo periodo si osserva una netta differenza dovuta alle modalità di gestione tra la spiaggia di Castelporziano (zona 1) e le altre due zone. Laddove sono ubicate strutture per la balneazione, si nota il dissolversi della continuità tra le dune mobili, che rimangono elementi isolati e non collegati tra loro. Nelle zone 2 e 3, infatti, i cordoni dunali risultano esigui ed estremamente frastagliati.

Nel 2002 il depauperamento del sistema dunale interessa prevalentemente l'area dei "cancelli" (zona 2), mentre a Capocotta si osserva una fase di recupero del sistema dunale, testimoniato dalla presenza di nuove dune, in una fase iniziale di sviluppo.

#### *Analisi multitemporale delle formazioni vegetazionali*

Nella tabella 4 sono riportate le percentuali di estensione dei diversi tipi vegetazionali descritti in tabella 1, con l'esclusione dei pratelli, individuati solo sull'immagine Quickbird.

Dall'analisi dei dati si osserva che la percentuale di superficie di sabbia priva di vegetazione aumenta nel tempo in tutte le zone. Tale aumento è più evidente negli anni 1959-1985 rispetto ai decenni successivi. Per quanto riguarda la vegetazione psammofila, in zona 1 nel periodo compreso tra il 1959 e il 1985, mantiene costante la sua estensione percentuale mentre diminuisce drasticamente nelle zone 2 e 3. Tra il 1985 e il 1995 in zona 2 e 3 si nota al contrario un limitato aumento di tale tipologia osservabile anche negli anni successivi, fino ad arrivare nel 2002 a valori simili a quelli ottenuti nel 1959.

La superficie coperta da macchia bassa diminuisce dal 1959 al 1985, prevalentemente in zona 1 che passa dal 44% al 29 % del totale. Analizzando i dati relativi al periodo 1985 e 1994 riguardanti sempre la zona 1, si può osservare un forte aumento della macchia bassa, al contrario di quanto avviene nelle zone 2 e 3 dove la percentuale di superficie di tale formazione diminuisce negli anni fino al 2002.

Passando alla macchia alta, si nota che tale tipologia diminuisce consistentemente in tutte le zone. Tra gli eventi di natura antropica che possono aver determinato la diminuzione di superficie a macchia alta si deve menzionare un incendio avvenuto nel 1985 in zona 1, che comportò la distruzione di circa 12 ha di macchia alta. Tale evento distruttivo è oltretutto connesso all'aumento della macchia bassa rilevato sempre in zona 1 nel 1994. E' noto infatti che le garighe a *Cistus* sp.pl. (incluse nella tipologia macchia bassa come descritto in tabella 1) si sviluppano rapidamente a seguito di un incendio, in quanto aumenta in maniera significativa la germinabilità dei semi a causa del forte riscaldamento [Troumbis e Trabaud, 1986; Pignatti et al., 2001].

La boscaglia igrofila ha un'estensione molto limitata ed è stata riscontrata solo in zona 3 (figura 2). Tale consorzio, dal 1959 al 1995, ha subito un forte decremento dovuto probabilmente ad una minore disponibilità di risorse idriche a seguito dell'intensa urbanizzazione nelle aree circostanti la Tenuta [Busuoli et al., 2001].

Dall'analisi dei valori percentuali e dalla figura 2 in cui si possono osservare le variazioni areali dei tipi vegetazionali considerati, emerge che le maggiori variazioni sono avvenute nell'arco di tempo tra il 1959 e 1995 quando era più intensa la fruizione pubblica della spiaggia e non erano stati presi in considerazione interventi di tutela dell'ambiente costiero.

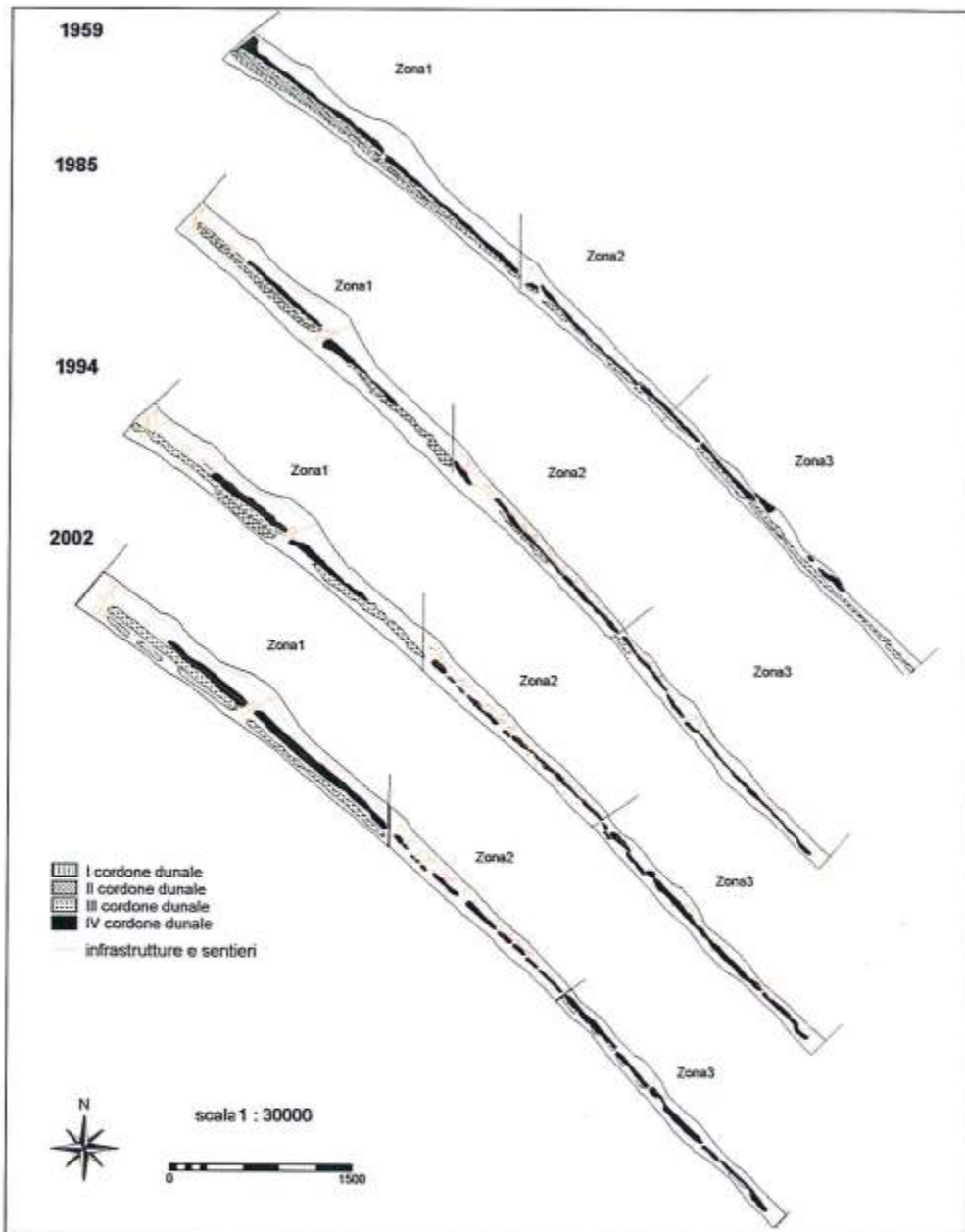


Figura 2 - Evoluzione dei cordoni dunali derivata da fotointerpretazione e dall'elaborazione dell'immagine Quickbird.

A partire dagli anni '90 con una maggiore sensibilizzazione riguardo alle problematiche connesse alla conservazione degli habitat naturali, sono state prese misure di protezione della duna che hanno favorito il mantenimento o il recupero da parte della prima fascia di vegetazione, ossia quella che determina il consolidamento della duna.

I tipi vegetazionali che hanno subito le maggiori variazioni, nell'arco di tempo compreso tra il 1959 e il 2002, sono la macchia bassa e la macchia alta, con un decremento avvenuto in tutte e tre le zone, particolarmente critico per la macchia alta, che risulta quasi scomparsa nelle zone 2 e 3.

L'integrità di tali consorzi è molto importante in quanto, svolgendo un'azione di protezione dai venti marini, determinano la sopravvivenza delle comunità boschive retrodunali [Acosta et al., 2000], le quali, se distrutte, hanno tempi di recupero molto più lunghi delle antistanti formazioni arbustive a più alta resilienza.

## Conclusioni

L'indagine multitemporale condotta ha permesso di valutare le variazioni temporali dell'area costiera intercorse dal 1959 al 2002, utilizzando dati di natura profondamente diversa.

Lo studio si è focalizzato sul riconoscimento e sull'analisi della distribuzione dei cordoni dunali e delle comunità vegetazionali che si sviluppano sulle dune, e sulla presenza di infrastrutture legate alla fruizione della spiaggia. Le comunità vegetazionali degli ambienti costieri mediterranei, in assenza di disturbo, si sviluppano secondo una zonazione spaziale strettamente legata a fattori geomorfologici, edifici e microclimatici [Acosta et al., 2000] e ciò crea popolamenti molto diversi anche a distanze limitate. In situazioni di erosione delle coste si osserva un arretramento delle associazioni della serie psammofila verso terra con una elevata compenetrazione tra le specie appartenenti ai diversi sintaxa [Lucchese e Pignatti, 1990]. A ciò si aggiunge che il disturbo antropico rende frammentari gli ambienti originari, determinando un forte impatto sulla distribuzione della vegetazione.

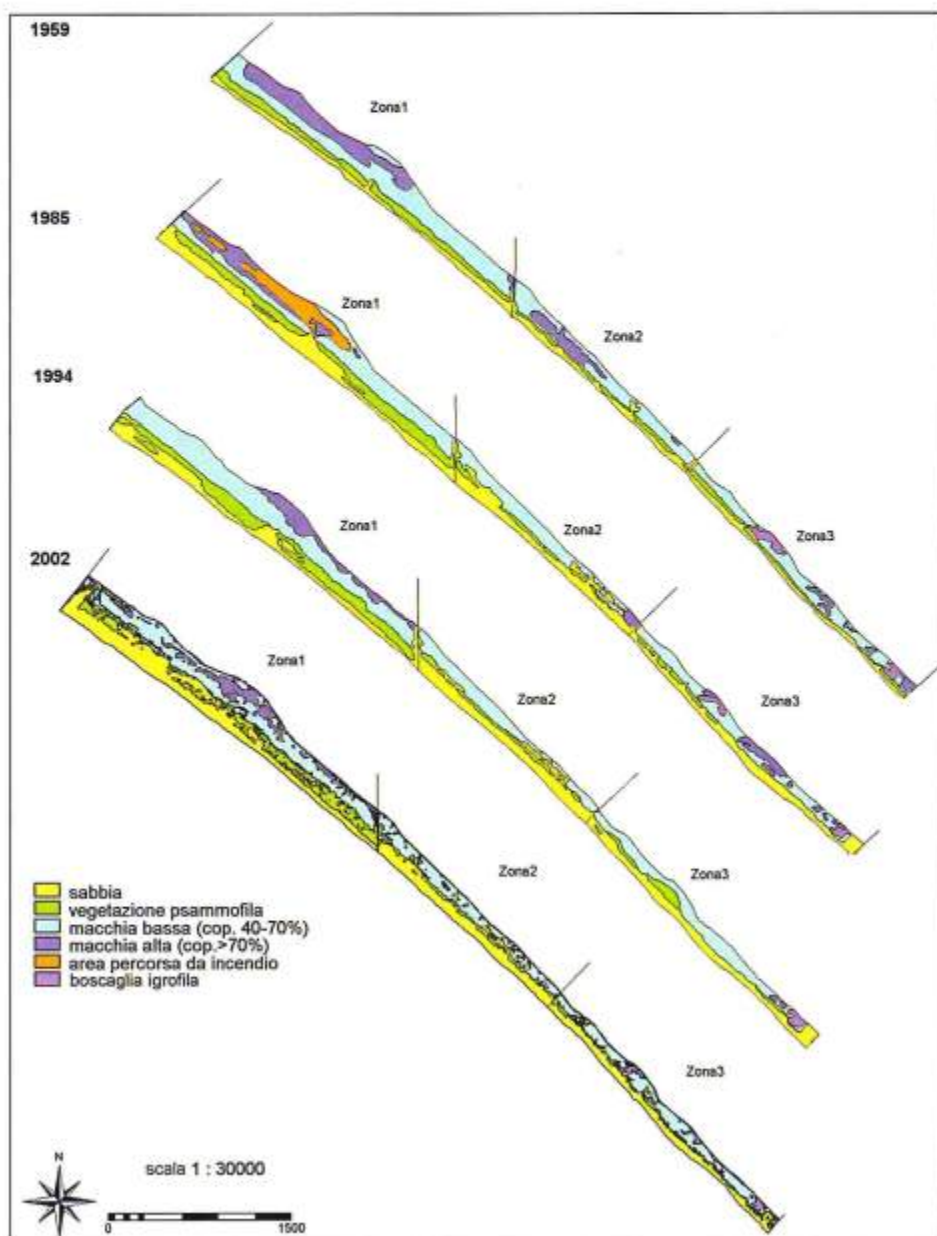


Figura 3 - Evoluzione della vegetazione dunale derivata da fotointerpretazione e dall'elaborazione dell'immagine Quickbird.

Dall'analisi dei risultati tra il 1959 ed il 1985 è emerso che l'aumento nel tempo delle strutture balneari ha determinato un deterioramento della serie di dune con un costante assottigliamento dei cordoni dunali e progressiva scomparsa di quelli prossimi alla riva. Gli anni compresi tra il 1959 ed il 1985 sono stati anche quelli in cui le variazioni della fascia di vegetazione delle prime dune mobili sono state più consistenti. Le zone pubbliche (zona 2 e 3) sono quelle che hanno subito maggiori variazioni rispetto all'area protetta di Castelporziano (zona 1), in quanto sono sottoposte annualmente a lavori di manutenzione della spiaggia, prima della stagione estiva. A partire dagli anni '90 si assiste ad un recupero da parte della vegetazione psammofila dovuto ad interventi di tutela dei cordoni dunali, le percentuali di superficie relative alle formazioni di macchia bassa e, soprattutto di macchia alta, hanno subito un forte decremento fino alla totale scomparsa della macchia alta in zona 2.

L'uso integrato di immagini satellitari di nuova generazione e di fotoaeree storiche, si è inoltre rivelato uno strumento particolarmente utile per il monitoraggio del sistema dunale. I risultati ottenuti dall'elaborazione delle immagini del 1995 e 2002 mostrano che le strutture dunali sono ampiamente confrontabili con quelle che derivano dalla fotointerpretazione degli anni precedenti; le estensioni percentuali dei consorzi vegetazionali dal 1995 al 2002 confermano l'evoluzione evidenziata dall'analisi multitemporale.

Tuttavia le leggere variazioni riscontrate nella zona 1 per la macchia bassa e la macchia alta tra il 1994 ed il 1995, possono essere ricondotte ad una differente tecnica di campionamento delle diverse formazioni e al grado di accuratezza delle immagini classificate, che pur essendo elevato (circa 97%) ha messo in evidenza una erronea attribuzione di pixel tra i consorzi di macchia bassa ed alta.

La possibilità di ricostruire le tendenze evolutive del sistema dunale permette di valutare la vulnerabilità ed il rischio di degrado del litorale e può fornire utili informazioni nel definire interventi futuri di protezione e di tutela dell'ecosistema dunale.

#### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito della Convenzione tra il Comune di Roma Dipartimento X ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, maggio 2003.

#### Bibliografia

- Acosta A., Blasi C., Esposito S., Stanisci A., (2000) - *Analisi della vegetazione delle dune costiere del Lazio centro-meridionale*. *Informatore Botanico Italiano*, 32, Suppl. 1: 5-10.
- Acosta A., Stanisci A., Ercole S., Blasi C. (2003) - *Sandy coastal landscape of the Lazio region (Central Italy)*. *Phytocoenologia*, 33 (4) : 715-726.
- Baily B., Nowell D. (1996) - *Techniques for monitoring coastal change : a review and case study*. *Ocean & Coastal Management*, 32 (7) : 85-95.
- Blasi C., Anzellotti I., Acosta A., Stanisci A., Di Marzio P., 1999 - *Vegetazione e disturbo antropico nella duna costiera del Parco Nazionale del Circeo*. *Suppl. Boll. Museo Civ. Sc. Nat. Venezia*, 49 (1998) : 173-178.
- Bianco P.M., Costanzo L., De Lillis M., Tinelli A. (2001) - *Evoluzione floristica e vegetazionale nella riqualificazione delle dune costiere*. In: *Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*, Vol.II, Acc. Naz. delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 826-834.
- Boccardo P. (2000) - *I sensori del 2000: nuove frontiere della Geomatica*. Atti della IV Conferenza ASITA "Informazione Geografica: innovazione e formazione", Genova. pp. XLVII-LXVI.
- Busuoli G., Bucci M., Grillino M. (2001) - *Studi geologici, geomorfologici ed idrogeologici sulla Tenuta Presidenziale di Castelporziano*. In: *Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*, Vol.II, Acc. Naz. delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 123-155.
- Caputo C., Chiocci F., Ferrante A., La Monica G.B., Landini B., Pugliese F. (1990) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*. *La Difesa dei Litorali in Italia*. pp. 121-151.
- Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B., Lupia Palmieri E. (1991). *Present erosion and dynamics of Italian beaches*. *Zeitschrift Geomorphology*, Suppl. 81: 31-39.
- Casacchia R., Grignetti A., Salvatori R. (2002) - *Analisi multitemporale di un sistema dunale con foto aeree e dati MIVIS*. Atti VI Conferenza ASITA, "Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale", Perugia. pp. 685-690.



- Chavez P.S., Bauer B. (1982) - *An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement*. Remote Sensing of Environment, 12 : 23-38.
- Congalton R. G. (1991) - *A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- Fierro G. (2004) - *Il degrado dei litorali*. Atti Convegni Lincei , XXI Giornata dell'Ambiente, Aree Costiere , Roma, vol. 205 : 37-50.
- Iannantuono E., Roskopf C.M., Stanisci A., Acosta A., Augelli P.P.C. (2004) - *Effetti della dinamica costiera sull'evoluzione dei sistemi dunali presenti lungo la costa molisana*. Atti Convegni Lincei , XXI Giornata dell'Ambiente, Aree Costiere , Roma, vol. 205 : 321-331.
- Lucchese F., Pignatti S. (1990) - *Sguardo sulla vegetazione del Lazio marittimo. II Ricerche ecologiche floristiche e faunistiche sulla fascia costiera mediotirrenica italiana*. Quad. Acc. Naz. Lincei, 264. pp. 5-48.
- Marino C.M. (2001) - *L'evoluzione, obiettivi e i ruoli del laboratorio del LARA del CNR nell'ambito del telerilevamento iperspettrale*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 30/31, settembre 2000 - gennaio 2001: 7-10.
- Moran M.S., Bryant R., Thome K., Ni W., Nouvellon Y., Gonzalez-Dugo M.P., Qi J., Clarke T.R. (2001) - *A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from Landsat5 TM and Landsat7 ETM*. Remote Sensing of Environment, 78 : 71-82.
- Peccol E., De Luca A., Sigura M., Bonfanti P. (2003) - *Caratterizzazione del paesaggio rurale con immagini satellitari ad altissima risoluzione*. Atti VII Conferenza ASITA. Verona. pp. 575-1580.
- Pignatti S., Bianco P.M., Tescarollo P., Scarascia Mugnozza G.T. (2001) - *La vegetazione della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*. In : Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano, Vol.II, Acc. Naz. Delle Scienze detta dei Quaranta. pp. 468-692.
- Phinn S.R., Menges C., Hill G.J.E., Standford M. (2000) - *Optimizing remotely sensed solutions for monitoring, modeling, and managing coastal environments*. Remote Sensing of Environment, 73 : 117-132.
- Ramsey III E.W., Nelson G.A., Sapkota S.K. (2001) - *Coastal change analysis program implemented in Louisiana*. Journal of Coastal Research, 17: 53-71.
- Torres-Pulliza D., Brock J., Lea C., Duffy M. (2001) - *Classification of barrier island land-cover using aerial photography and lidar airborne remote sensing*. Fifth International Airborne Remote Sensing Conference. California. San Francisco. CD.
- Troumbis A., Trabaud L. (1986) - *Comparison of reproductive biological attributes of two Cistus species*. Oecol. Plant., 7:235-250.

Manoscritto ricevuto il 22/02/2005, accettato il 10/04/2005.

## Minerali di origine industriale nei sedimenti del litorale di Taranto

Antonio De Marco <sup>1</sup>, Luca Antonio Di Muccio <sup>2</sup>, Giuseppe Mastronuzzi <sup>3</sup>,  
Michelina Mazzarella <sup>4</sup>, Amalia Sergio <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento Geomineralogico, Università degli Studi di Bari, Italia.  
Email: a.demarco@geomin.uniba.it.

<sup>2</sup> Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Portugal.

<sup>3</sup> Dipartimento di Geologia e Geofisica, Università degli Studi di Bari, Italia.

<sup>4</sup> Collaboratore esterno Dipartimento Geomineralogico, Università degli Studi di Bari, Italia.

### Riassunto

Lungo il litorale nord-orientale del Golfo di Taranto la linea di costa disegna due profonde baie, il Mar Grande e il Mar Piccolo. Nella seconda metà del XX sec. l'area costiera ha subito estese trasformazioni con la realizzazione di un polo siderurgico e di una raffineria in un'area in cui già dalla fine del XIX sec. era stato realizzato un grande arsenale militare. Sedimenti di spiaggia, materiali di origine industriale versati a mare per il colmamento di aree destinate a strutture portuali, e materiali depositatisi dopo trasporto aereo sono stati sottoposti ad analisi mineralogiche. La loro composizione è stata confrontata con quella dei litotipi delle falesie in rapido arretramento delle due baie. Le sabbie delle spiagge sono alimentate dai crolli delle falesie e da bioclasti, e sono arricchite di clasti psammitici di origine industriale, quali scorie, loppe, scaglie carboniose e metalliche. Particolarmente alta è la concentrazione di tali materiali nei due seni del Mar Piccolo e nelle aree prossime agli stabilimenti industriali. Nell'area urbana scaglie di materiale carbonioso e metallico, sferulette di magnetite e particelle di loppe rappresentano l'indiscutibile apporto di polvere proveniente dal centro siderurgico. Tali materiali sono probabilmente i principali veicolanti nell'ambiente dei metalli tossici presenti nelle acque costiere.

**Parole chiave:** dinamica costiera, sedimenti di spiaggia, inquinamento marino, Taranto, Italia.

### Abstract

*The mineralogical study of coastal sediments in Taranto area permits the assessment of its pollution as consequence of the growth of the industrial area in the last century. An hydrodynamic study was performed to identify the source of the heavy minerals recognized in the littoral sediments. They come from direct discharge in to the sea by industrial buildings or by merchant ships, or sent out from the chimneys of industrial area as dust. The results of this study are: the coast sands still show an aspect which is characteristic of the terrigenous supply sediments which once derived from the long shore currents direct from west to east; at present, this provenance is hindered by structural changes produced in the harbour area; all examined sands are full of industrial psammitic clasts as well, such as scoriae, chaffs and carbonaceous and metallic shards; the pollution level from carbonaceous and metallic shards, magnetite spherules and chaffs particles is particularly high in Mar Piccolo and in the urbanized area of Tamburi district, which is very close to the ironworks areas and Military Arsenal. These industrial pollutants are probably the main cause of the pollution due to metals in littoral waters.*

**Key words:** coastal dynamic, marine sediments, marine pollution, Taranto, Italy.

## Introduzione

Negli ultimi cento anni la zona costiera di Taranto ha subito profonde modificazioni del suo assetto naturale con l'incremento demografico connesso alla crescente industrializzazione dell'area. La realizzazione alla fine del XIX secolo di un arsenale militare e, nella seconda metà del XX secolo, di uno stabilimento siderurgico, di una raffineria e di altre realtà industriali minori, hanno contribuito a far definire ad elevato rischio ambientale buona parte della provincia ionica (Ministero dell'Ambiente, 1992). Oltre all'ovvio impatto visivo, gli insediamenti industriali rappresentano fonte di inquinamento per tutto l'ambiente, con gravi ripercussioni sulla qualità di vita della popolazione. Lo studio della contaminazione da metalli tossici, anche in aree destinate alla mitilicoltura, ha inoltre rivelato preoccupanti anomalie nei livelli di concentrazione di mercurio e stagno nei sedimenti marini con concentrazioni di questo ultimo sino a 1,53 mg/Kg di peso umido (pe.: Cardellicchio et al., 1989; Cardellicchio et al., 2004; Calacela et al., 2005). Nei mitili coltivati nella stessa area i livelli di concentrazione di stagno sono superiori a quelli dei sedimenti, confermandone la contaminazione da composti metallici potenzialmente dannosi (Cardellicchio et al., 1989a; 2004; Paterno et al., 1991). Diffusa è inoltre la presenza di idrocarburi policiclici aromatico legati alle attività navali e di raffineria (Cardellicchio et al., 1989 b; 1991; Lerario et al., 2003). Le analisi chimiche che periodicamente sono eseguite sulle acque costiere dell'area, se da un lato vi confermano la presenza di concentrazioni notevoli di metalli pesanti, dall'altro non forniscono alcuna indicazione sui possibili materiali veicolanti tali elementi chimici. Il presente lavoro ha l'obiettivo di individuare attraverso lo studio geoambientale dell'area e l'analisi mineralogica dei sedimenti di spiaggia, dei riporti antropici e delle polveri provenienti dai centri industriali, i materiali probabili veicolo di trasporto degli elementi chimici contaminanti le acque.

## L'ambiente costiero

L'area di Taranto (Fig. 1) è caratterizzata da un substrato mesozoico di natura calcareo-dolomitica strutturalmente disposto a gradinata digradante verso mare (Pagliarulo e Bruno, 1990); su di esso sono in contatto trasgressivo calcareniti ed, eteropiche ad esse, argille plio-pleistoceniche. Le unità carbonatiche ospitano una consistente falda carsica di acqua dolce in pressione. Unità trasgressive biocalcarenitiche dei terrazzi marini del Pleistocene superiore chiudono la successione locale (pe. Belluomini et al., 2002). Depositi più recenti, olocenici, costituiscono verso Ovest la piana costiera metapontina.

I loro caratteri sedimentologici e litologici mostrano una prevalente origine appenninica della componente terrigena e indicano paleocorrenti cui imputare una deriva diretta da Ovest verso Est che trovano conferma nell'attuale regime costiero (Parea et al., 1980; Amore et al., 1988; AA.VV., 1995). Le condizioni locali di

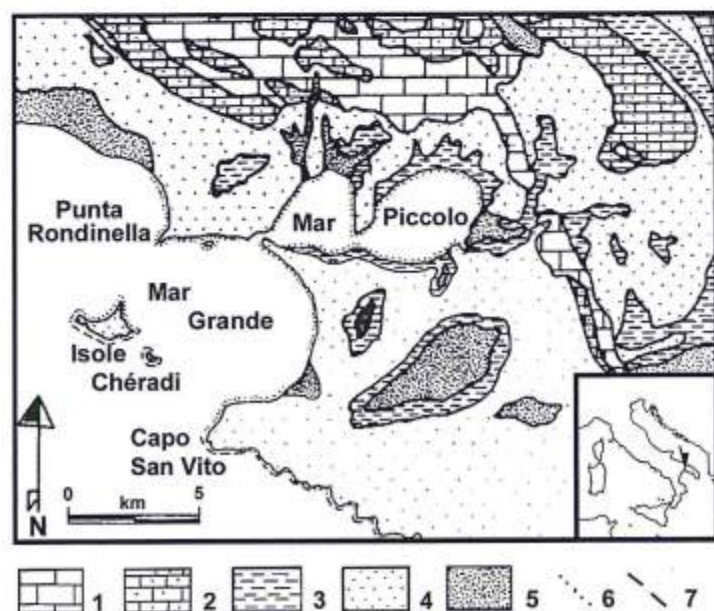


Figura 1 - Ubicazione geografica e carta geologica schematica: 1) Calcare di Altamura (Cretaceo sup.); 2) Calcarenite di Gravina (Pliocene medio-Pleistocene inf.); 3) Argille Subappennine (Pliocene sup. - Pleistocene inf.); 4) Depositi tipo *panchina* dei Terrazzi Marini (Pleistocene medio-Pleistocene sup.); 5) Depositi alluvionali e di spiaggia (Pleistocene sup. - Olocene); 6) falesie con spiaggia al piede; 7) coste rocciose digradanti piane (da Mastronuzzi e Sansò, 1998, modif.).

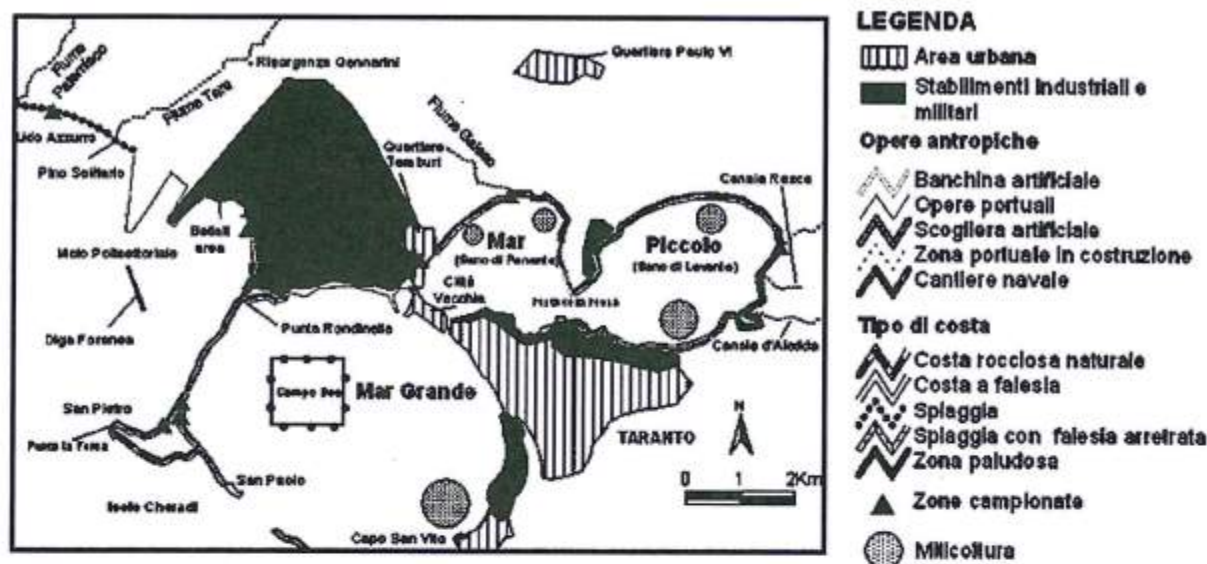


Figura 2 - Caratteristiche morfologiche della costa e distribuzione delle aree industriali.

forte permeabilità dei terreni e quelle climatiche caratterizzate da scarse precipitazioni e forte evapotraspirazione (Zito et al., 1988) negano al reticolo idrografico rilevanti portate, e i corsi d'acqua locali hanno carattere di risorgiva (Fiume Tara, Fiume Galeso e - in parte - il Canale D'Aiedda).

La costa di Taranto, frastagliata dalle profonde insenature del Mar Grande e del Mar Piccolo, è caratterizzata dall'alternanza di più morfotipi costieri (Figg. 1 e 2) (Mastronuzzi e Sansò, 1998; Mastronuzzi, 2001): ad Ovest di Punta Rondinella la costa è bassa e sabbiosa; da Punta Rondinella, tutto intorno alle Isole Chèradi e al perimetro del Mar Piccolo e nel Mar Grande, si osservano falesie modellate su argille ricoperte da spessori variabili di calcareniti dei terrazzi marini; al piede delle falesie sono spiagge stagionali poco estese ed alimentate dai materiali provenienti dal disfacimento delle falesie stesse e da consistenti contributi bioclastici delle biocenosi presenti (Caldara et al., 1998; Costantino et al., 1999); da Capo San Vito verso Sud la costa rocciosa digradante è segnata dai depositi ben cementati e bioclastici dei terrazzi marini posti a carapace sulle sottostanti argille; nelle insenature, corrispondenti a incisioni torrentizie relitte, si osservano piccole falesie in rapida evoluzione e spiagge alimentate dalle biocenosi sub-litorali e dalle falesie stesse. Due poco estesi sistemi deltizi sono nelle aree più orientali del Mar Piccolo - delta del Canale D'Aiedda - e del Mar Grande.

### Antropizzazione e industrializzazione

Prima che, con l'Unità d'Italia, il Mar Grande e il Mar Piccolo fossero scelti per la costruzione di quella che diverrà la principale base navale della Marina Militare Italiana, i pochi abitanti della città erano concentrati nell'Isola della Città Vecchia (Fig. 2) in condizioni igienico-sanitarie considerate precarie (De Salis Marcschlins, 1789). Alla fine del XIX sec., la costruzione della base navale nel Mar Piccolo con l'apertura del Canale Navigabile e la costruzione della barriera foranea che limita il Mar Grande, segnano la prima fase di urbanizzazione e di condizionamento della dinamica costiera (Fig. 2). Il vero boom demografico si ha alla fine degli anni '50 del XX secolo con la costruzione di un imponente impianto siderurgico a ridosso delle aree residenziali, di una raffineria di petrolio, di un cementificio e di industrie minori e con l'espansione del porto. Negli stessi anni vengono costruiti nuovi comprensori residenziali senza soluzione di continuità rispetto alla zona industriale in realizzazione. Negli anni '80 si completa il raddoppio dell'area industriale e si dà avvio alla costruzione di una nuova area portuale oltre Punta Rondinella, fuori dal Mar Grande. Oggi, con una popolazione di circa 220 mila abitanti, parte degli scarichi urbani è riversata direttamente in mare, quasi come nel '700, quando la popolazione era fra i 12 mila e i 18 mila abitanti.

Nel tempo gli interventi antropici hanno interessato tutta la costa del Mar Grande con la costruzione dell'area portuale - mercantile e militare - e l'estensione dell'area residenziale tanto che il litorale che vi si affaccia non presenta più caratteri naturali. La fascia costiera del Mar Piccolo è quasi completamente urbanizzata nel Seno di Ponente - dove, fermi ormai i Cantieri Navali Tosi, insistono le attività dell'Arsenale Militare

-, mentre quella del Seno di Levante è ancora abbastanza naturale. Il Mar Piccolo comunica con il Mar Grande attraverso due stretti canali: il Canale di Porta Napoli, naturale, e il Canale Navigabile, artificiale. A causa dell'interrimento antropico del Canale di Porta Napoli, non più profondo di 3 m, si ha ricambio d'acqua significativo solo attraverso il Canale Navigabile; esso, quindi, è assicurato dal Fiume Galeso e dalle polle sorgive sottomarine (Cotecchia et al., 1989).

Nell'area industriale depositi di composti di  $Fe_2O_3$ ,  $MgSiO_4$ ,  $CoAl$ , e Coke per la produzione di acciaio occupano circa 600 ha; essi sono stoccati, allo stato semitriturato, all'aperto in cumuli ad alta pendenza separati dall'area residenziale da "collinette ecologiche", alimentati da nastri trasportatori spesso a cielo aperto, esposti al vento. Nell'area urbana più prossima alle aree di stoccaggio sono stati registrati sino a 300/600  $mg/m^2/giorno$  di deposizione a fronte del limite di sicurezza valutato in  $4g/m^2/mese$ . I reflui dell'industria siderurgica contengono classi di inquinanti come fenoli, idrocarburi policiclici aromatici e metalli (Fe, Ni, Cd, Hg, As, Mn, Pb, V) potenzialmente tossici per gli ecosistemi litoranei (Cardellicchio, 1992). Per i circuiti di raffreddamento il centro siderurgico preleva circa  $17 \times 10^4$   $mc^3/h$  di acqua nel Seno di Ponente modificando l'originaria idrodinamica del bacino già condizionata dalla realizzazione del Canale Navigabile; nell'area portuale ad Ovest di Punta Rondinella da esso sono rilasciati circa  $15 \times 10^4$   $m^3/h$  di acqua. Lo stabilimento produce, in media, 170.000 t/anno di rifiuti solidi, in parte tossici e nocivi; essi sono riutilizzati da cementifici o avviati in discariche, interne o esterne allo stabilimento, anche a cielo aperto esposte a processi meteorici che dilavano e disperdono il materiale stoccato. Residui di produzione sono stati utilizzati per la colmata del tratto di mare ad Ovest di Punta Rondinella dove sorge il nuovo complesso portuale.

Il traffico marittimo interessa soprattutto il Mar Grande, essendo il Mar Piccolo limitato al traffico della flotta peschereccia e delle unità militari. Il movimento merci riguarda per il 48% minerali metallici destinati all'area siderurgica, per il 27% petrolio e suoi derivati, per il 24% combustibili solidi e per l'1% bitume. La continua presenza di navi nel Mar Grande (Fig. 2), ha come effetto anche il rilascio dagli scafi di componenti di vernici nonché lo sversamento accidentale di materiali e carburanti trasportati (Cardellicchio et al., 1991).

### I caratteri meteomarini

I dati anemologici delle stazioni meteorologiche di San Vito Pugliese (TA) e di Ginosa Marina (TA) indicano quali venti dominanti e regnanti quelli del II e del IV quadrante (Fig. 3). In qualsiasi condizione di regime anemologico, il moto ondoso sviluppato contribuisce ad una deriva lungo la costa, ad Ovest della città, diretta verso NE e quindi verso E-SE fino a Punta Rondinella dove appare bloccata dalle opere portuali di nuova costruzione (anni '80-'90 del XX sec.). Nonostante piccole fluttuazioni stagionali nella direzione di propagazione della

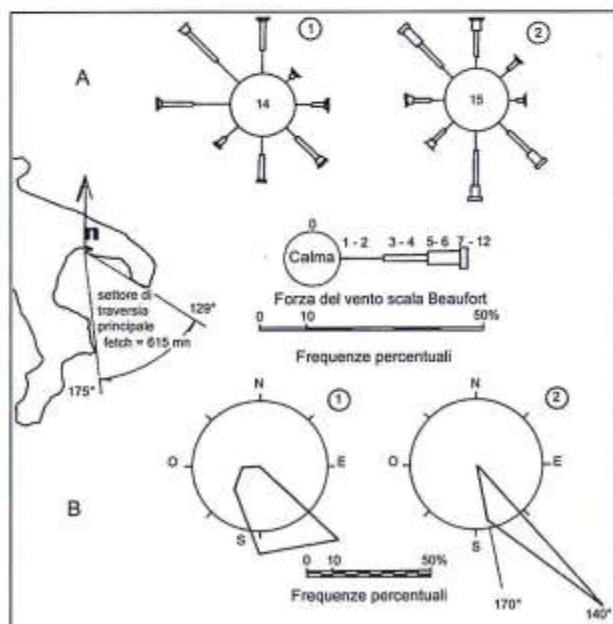


Figura 3 - Caratteristiche meteomarine del paraggio di Taranto: A) frequenze medie annuali percentuali del vento; B) direzione di provenienza delle mareggiate più intense ① Stazione di Capo San Vito; ② Stazione di Ginosa Marina. (da: Mastronuzzi e Sansò, 1998).

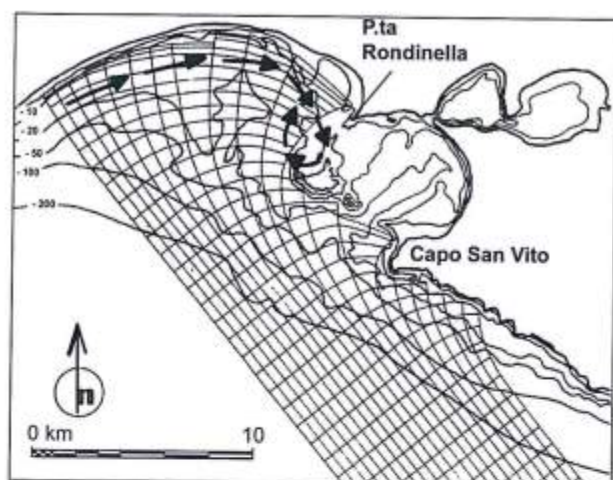


Figura 4 - Studio della rifrazione del moto ondoso con direzione N140°E e periodo 13.55 secondi  $c$ , in grassetto, direzione della deriva prevalente lungo costa (da: Pensaresi e Longo, 1989 - modificata).

corrente (trascurabile rispetto ai valori assoluti di velocità), può affermarsi la sua continuità lungo tutto il litorale settentrionale del Golfo di Taranto, con minimi intorno ai 10 km/d e massimi di 130 km/d durante le mareggiate. Questi valori si sommano alla normale corrente di deriva litoranea prodotta dalla circolazione ionica; essa risulta abbastanza veloce da agosto a marzo, in quanto in accordo con il movimento anticiclonico regnante ( $v_{max}$  tra novembre e dicembre, pari a 35 km/d), mentre risulta notevolmente ridotta da aprile a luglio, perché contrastata dalla circolazione ciclonica che si stabilisce in questi mesi nell'Alto Ionio e dalla penetrazione di acque adriatiche, che ne ostacolano il movimento verso SE (ossia verso le Isole Chéradi e il Mar Grande). Il movimento orario di deriva si spegne nel tratto di mare tra Lido Azzurro e Punta Rondinella. I venti occidentali possono imporre alle correnti di deriva, sempre dirette in senso orario, di superare le strutture portuali del molo polisettoriale; queste dopo aver costeggiato la diga foranea, instaurano un circuito di ordine inferiore a Nord dell'Isola di San Pietro. Infatti, alla forte opposizione della deriva da parte degli stessi venti di Ponente e di Libeccio si somma l'effetto dello Scirocco che proprio in questa zona risulta deviato per rifrazione verso Est.

Il ramo discendente della corrente, diretto verso SO viene dunque bloccato e respinto verso il Molo Polisettoriale e Punta Rondinella a causa della netta dominanza dei moti ondosi SSO e SSE su quelli orientali (Fig. 4).

Nel Mar Grande, a causa del ridotto *fetch* è trascurabile l'effetto dei venti che direttamente vi insistono; la circolazione è influenzata dai treni d'onda provenienti dal II quadrante che a causa di un marcato fenomeno di diffrazione fra Capo San Vito e l'Isola di San Paolo, si dispongono concentrici accumulando sedimenti nelle aree sottoflutto (Mastronuzzi e Sansò, 1998).

Lo studio della deriva litoranea nel Mar Piccolo non è stato eseguito sulla base delle analisi dei piani d'onda; infatti i venti del IV quadrante, seppure con caratteri anemometrici importanti, inducono moto ondoso con ruolo idrodinamico ridotto, in quanto hanno carattere instabile per *fetch* limitante ( $< 2$  mn), per cui le onde raggiungono nel Mar Piccolo altezze di 1 metro (minimo significativo per la produzione di una corrente lungo riva) solo per venti superiori a 8 gradi Beaufort, ossia solo in casi eccezionali. Nel Mar Piccolo la circolazione idrica, condizionata essenzialmente dalle maree e da correnti di compensazione, ha poca capacità di trasporto e il materiale, non in grado di galleggiare, tende a concentrarsi nelle aree di provenienza.

### Analisi mineralogiche

Il prelievo dei materiali da analizzare ha interessato sedimenti delle spiagge attuali, pulviscolo e materiali di riporto del vicino centro siderurgico (Fig. 2). Il campionamento dei sedimenti di spiaggia è stato effettuato in tratti di litorale differenti utilizzando un carotiere a mano con cui poter fissare lo spessore del campione al fine di prelevare il deposito più recente. Il materiale di riporto è stato prelevato nelle aree di interramento del Molo polisettoriale. Il pulviscolo industriale è stato prelevato dalle strade del quartiere Tamburi in estate, in area immediatamente prossima allo stabilimento siderurgico e nel centro cittadino (Tabb. 1, 2). Con tali accorgimenti si suppone minima nel campione l'aliquota dovuta al riscaldamento domestico e al traffico veicolare. Per confronto, e a costituire il bianco per i depositi di spiaggia, sono stati campionati i litotipi esposti sulle falesie in erosione presso Punta Rondinella e sull'Isola di San Pietro.

Tabella 1 - Granulometria delle sabbie di battigia esaminate (% in peso).

Tratti di litorale	Classi di diametro ( $\phi$ )						Parametri Folk e Ward (1957) ( $\phi$ )			
	<0	0-1	1-2	2-3	3-4	>4	Mean	Sorting	Skewness	Kurtosis
Lido Azzurro	0,6	10,1	35,2	47,5	6,2	0,4	2,01	0,76	-0,14	1
Area Belleli	1,2	2,8	44,3	49,4	1,6	0,7	1,99	0,54	-0,11	1,04
Punta Rondinella	4,8	18,7	21,9	52,8	1,7	0,1	1,75	0,87	-0,48	0,9
Isola San Pietro	0,3	2,1	28,9	60,8	5,3	2,6	2,24	0,63	-0,02	1,28
Fiume Galeso	4,1	6,4	19,3	26,3	12,5	31,4	---	---	---	---
Canale D'Aiedda	---	2,5	4,9	10,3	3,5	78,8	---	---	---	---

I materiali incoerenti sono stati sottoposti a suddivisione granulometrica (Tab. 1), a separazione dei minerali magnetici, a riconoscimento per via ottica e diffrattometrica ed a stima semi-quantitativa. I campioni coerenti, sia naturali che industriali, sono stati esaminati in sezione sottile e sottoposti ad indagini diffrattometriche. L'esame dei minerali magnetici dei materiali incoerenti è stato eseguito su tutte le frazioni granulometriche, e in maniera più accurata sulla frazione 125-63  $\mu$ m. Su quest'ultima la separazione delle frazioni magnetiche è stata eseguita mediante l'elettromagnete isodinamico Frantz (condizioni di lavoro: I=1 Ampère; inclinazione della doccia in avanti di 20° e lateralmente di 15°). Le indagini microscopiche sono state eseguite al microscopio binoculare per i campioni incoerenti, e a quello polarizzatore su sezioni sottili per quelli coerenti; le riprese diffrattometriche su polveri sono state eseguite con un diffrattometro Philips PW 1710.

Tabella 2 - Aree di campionamento e risultati delle analisi con indicazione della frazione magnetica dei materiali analizzati, e loro stima semiquantitativa.

Tratto di litorale	Punti di prelievo	Litologia	Frazione Magnetica (%)	Rv	Mag	Cpx	Amph	Gr	Ilm	Tur	Mi	Glau	Tit	Sc
Lido Azzurro	battigia	sabbie fini	7,1	A	R	R	d	d	d	-	-	-	-	d
Area Belleli	battigia	sabbie medie	7,2	I	I	I	-	-	-	-	-	-	-	C
"	materiale di riporto	detriti scuri	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	T
"	materiale di riporto	detriti chiari	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	T
Punta Rondinella	battigia	sabbie medie	2,7	F	I	H	I	I	R	d	d	-	-	I
"	falesia	calcarenite tenera	0,8	-	B	I	D	d	-	-	I	-	-	-
"	falesia	conglom.	1,2	D	H	I	-	-	-	I	-	-	-	-
"	falesia	sabbie fini	1,4	D	I	I	I	I	-	-	-	-	-	-
"	falesia	suolo	0,2	C	H	I	-	-	-	-	-	-	-	-
Isola San Pietro	falesia	suolo	2,4	H	S	H	-	I	-	-	-	-	-	-
"	falesia	calcarenite tenera	0,7	I	G	G	I	I	-	-	I	-	-	-
"	battigia	sabbie fini	4,7	I	H	G	I	H	-	-	-	-	-	I
"	falesia	sabbie limose	0,2	-	C	H	R	R	-	-	d	-	-	-
Fiume Galeso	battigia	sabbie molto fini	3,2	-	R	R	R	-	-	-	-	-	-	B
Canale D'Aiedda	battigia	sabbie limose	1,9	R	d	R	-	-	-	-	d	-	-	B
Quartiere Tamburi	cimitero	pulviscolo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	G

Rv=Rocce verdi; Mag=Magnetiti; Cpx=Pirosseni; Amph=Anfiboli; Gr=Granati; Tur=Tormaline; Ilm=Ilmeniti; Mi=Miche; Glau=Glaucioni; Tit=Titaniti; Sc=Loppe e Scorie; T = >95%; A = 95-85%; B = 85-75%; C = 75-65%; D = 65-55%; E = 55-45%; F = 45-35%; G = 35-25%; H = 25-15%; I = 15-5%; R = 5-1%; d = <1%; - = assente o irrilevante.



Foto 1 - Falesia nei materiali di riporto in Zona Belleli.



Foto 2 - Area di campionamento presso la Palude La Vela nel secondo seno dal Mar Piccolo.

### *I minerali dei materiali di riporto*

Il materiale di riporto studiato è di due tipi differenziabili a scala macroscopica in funzione del colore. L'osservazione del materiale chiaro (Foto 3a) indica che esso è costituito da granuli di colore bianco lattiginoso, ricoperti per la maggior parte da uno strato di colore bianco opaco, resinoso e con

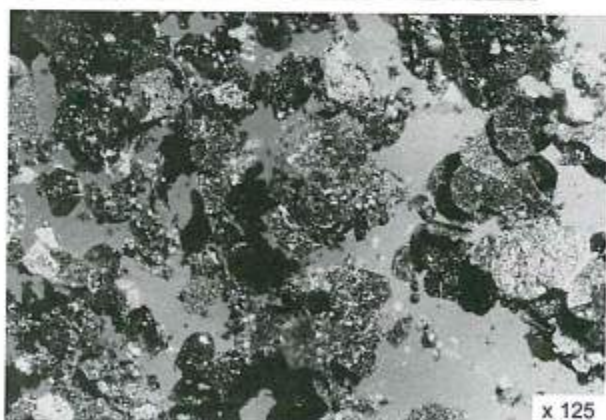


Foto 3 - Materiale di riporto campionato ad ovest di Punta Rondinella in Zona Belleli. Da sx a dx, dall'alto in basso: a - microfotografia del materiale di riporto chiaro della Zona Belleli costituito da loppe e scaglie resinose di chiara origine industriale, quarzo e feldspati; b - particolare delle loppe del materiale di riporto chiaro della Zona Belleli; c - microfotografia del materiale di riporto scuro della Zona Belleli i cui costituenti maggiori sono delle scaglie di ossidi e/o idrossidi di chiara origine industriale; d - microfotografia di una sezione sottile del materiale di riporto scuro della Zona Belleli (a nicol incrociati) in cui è ben evidente l'habitus aciculare dei cristalli.



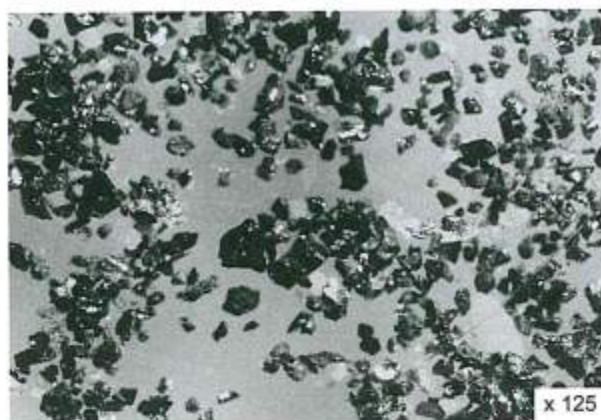


Foto 4 - Microfotografia della frazione magnetica delle polveri industriali con feldspati, ossidi e/o idrossidi di ferro, quarzo e calcite.



Foto 5 - Microfotografia della frazione magnetica del suolo della falesia di San Pietro con frammenti di rocce verdi, magnetite, pirosseni, anfiboli, granati e biotite; in piccolissime quantità si osserva olivina alterata in serpentino.

inclusioni grigie e rosse. I componenti del materiale chiaro hanno forma irregolare, con qualche granulo perfettamente sferico. Vi si trovano anche granuli e aggregati di colore grigio, di aspetto resinoso e di elevata suscettività magnetica (Foto 3b). L'analisi diffrattometrica ha rivelato che questo materiale è formato da un miscuglio di: calcite, quarzo, feldspati (microclino) e fillosilicati del gruppo del serpentino (Fig. 5A).

Il materiale scuro (Foto 3c) è costituito prevalentemente da aggregati di colore grigio, dall'aspetto resinoso e dalla superficie ricoperta di granulazioni di colore bianco opaco o da una patina di colore rosso-bruno; hanno per lo più elevata suscettività magnetica. Oltre agli aggregati sono presenti anche granuli di colore bianco vitreo, con abito irregolare o globulare e con inclusioni di colore rosso-bruno o grigio. In sezione sottile il materiale di riporto scuro (Foto 3d) risulta costituito da un insieme di cristalli aciculari, informi e sub-arrotondati. I cristalli aciculari presentano, a nicols incrociati, colori di rifrangenza bassi (bianco grigio-verde), mentre quelli irregolari e sub arrotondati presentano colori di rifrangenza alti (giallo-celeste-rosa-rosso). L'analisi diffrattometrica indica un miscuglio di calcite, quarzo, minerali del gruppo del serpentino, huntite [ $Mg_3Ca(CO_3)_4$ ], rodocrosite ( $MnCO_3$ ), siderite, maghemite, magnetite, northupite [ $Na_3M_6(CO_3)_2Cl$ ] e wustite (FeO) (Fig. 5B).

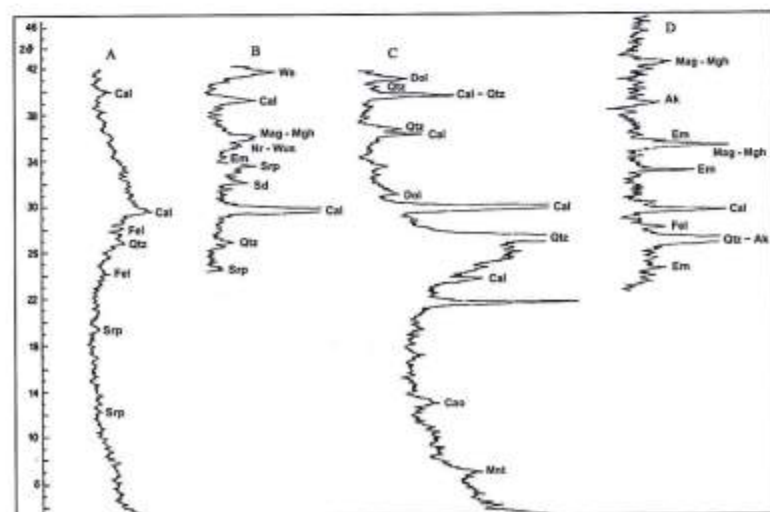


Figura 5 - Spettri DRX dei materiali di riporto dell'Area Belleli e delle polveri industriali del Quartiere Tamburi: A - materiale chiaro; B - materiale scuro; C - frazione non magnetica del pulviscolo; D - frazione magnetica del pulviscolo.

### *I minerali delle polveri industriali*

Per quanto riguarda il campione di polveri, l'osservazione al microscopio binoculare (Foto 4) ha evidenziato che la frazione magnetica è costituita prevalentemente da magnetite di aspetto vario (sferule, scaglie e granuli irregolari). Le sferule sono cave, con aspetto bolloso, e riempite da altri granuli più piccoli e dello stesso tipo; le scaglie sono per lo più frammenti di magnetite pseudomorfa su ematite (legata a processi di riduzione dell'ematite in magnetite); i granuli irregolari sono costituiti da feldspati compenetrati a magnetite. La frazione non magnetica è costituita soprattutto da scaglie appiattite di colore grigio lucente o grigio resinoso, tappezzate da granulazioni di colore rossastro o lattescente (tipo loppe), il più delle volte riunite a forma di aggregati tondeggianti. Infine si trovano anche lamelle intrecciate, sempre di colore grigio, con superfici resinose. Dall'analisi diffrattometrica risulta che la parte magnetica della polvere è un miscuglio di ossidi e idrossidi di ferro mal cristallizzati (magnetite, ematite, maghemite, ecc.), con quarzo, feldspati e calcite (Fig. 5D); la parte non magnetica è un miscuglio di quarzo, calcite, dolomite, feldspati alcalini, grafite, maghemite e minerali argillosi del tipo caolinite e montmorillonite (Fig. 5C).

### *Il materiale magnetico delle sabbie di spiaggia*

La frazione magnetica delle sabbie di battigia, campionate nei vari tratti considerati, è costituita da granuli di rocce verdi e di minerali pesanti, ma arricchita, talora in tenori notevoli, anche di materiali di origine industriale, riferibili a scorie, loppe e scaglie carboniose.

I rapporti di abbondanza tra i vari componenti sono molto variabili da luogo a luogo; i frammenti di rocce verdi sono presenti in percentuali che vanno da meno dell'1% nel Seno di Levante del Mar Piccolo ad un massimo dell'85% nella zona occidentale dello stesso; i minerali pesanti sono particolarmente abbondanti a Punta Rondinella (Foto 6a) e all'Isola di San Pietro (Foto 6b) e appena in tracce nel Mar Piccolo. I materiali di origine industriale sono diffusi in tutta l'area esaminata, compresa l'Isola di San Pietro e i due seni del Mar Piccolo (Foto 7a, b).

Le tipologie dei minerali pesanti sono ovunque le stesse (Tab. 2) e riferibili, in ordine di abbondanza a: pirosseni, vitrei, con abito prismatico o informe, di colore verde/verde-chiaro, il più delle volte alterati e con inclusioni di magnetite; magnetite, rappresentata da più granulazioni inserite nei pirosseni e nelle rocce scistose, e da pochi granuli isolati, per lo più arrotondati o con abito cubo-ottaedrico, dalla tipica lucentezza metallica; anfibioli bruni e blu, tabulari e fratturati; granati in granuli vitrei, rosati e bruni; tracce di ilmenite, rappresentata da frammenti tabulari e lucentezza metallica; tormalina, presente in prismi perfetti, pleocroica, con riflessi rossicci; tracce di biotite in lamine brune e alterate. I materiali industriali sono rappresentati da: loppe, in granuli globulari bianchi o lattiginosi, con inclusioni brune; residui carboniosi, in scaglie appiattite di colore grigio e dall'aspetto resinoso; scorie, in masse informi e rugose.

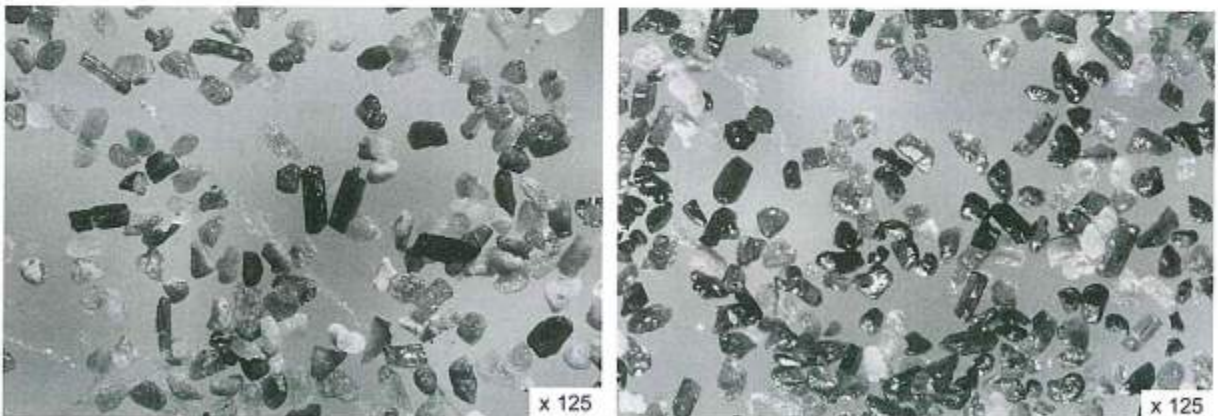


Foto 6 - Sabbie di battigia campionate nella baia a nord delle Isole Chéradi: a - microfotografia della frazione magnetica delle sabbie di battigia di Punta Rondinella con frammenti di rocce verdi, pirosseni, magnetite, anfibioli, granati, ilmenite, tormalina, biotite e scorie, loppe, materiale carbonioso di chiara origine industriale; b - microfotografia della frazione magnetica delle sabbie di battigia di San Pietro con frammenti di rocce verdi, pirosseni, magnetite, anfibioli, granati, ilmenite, tormalina, biotite e scorie, loppe, materiale carbonioso di chiara origine industriale.

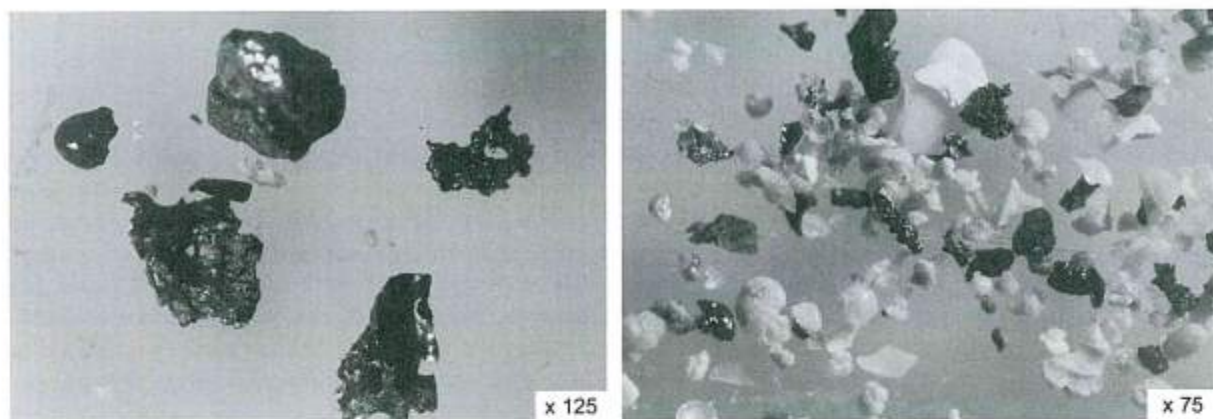


Foto 7 - Sabbie di battigia campionate nel Mar Piccolo: a- microfotografia della frazione magnetica delle sabbie di battigia presso il Fiume Galeso con scorie e loppe industriali frammiste a magnetite e biotite; b - microfotografia della frazione magnetica delle scorie industriali, con magnetite, nelle sabbie di battigia presso il Canale D'Aiedda.

### *I minerali magnetici delle falesie*

I depositi sabbiosi campionati sul fronte della falesia di Punta Rondinella hanno un tenore di frazione magnetica non superiore all'1%, che scompare quasi del tutto verso l'alto della successione stratigrafica. Nello strato calcarenitico tenero di base, essa è costituita prevalentemente da magnetite e in subordine da biotite e pirosseni verdi; nello strato di conglomerato essa è costituita in prevalenza da frammenti di rocce verdi, da magnetite in granuli scheggiati, da pirosseni di colore verde chiaro e verde scuro con abito prismatico perfetto o scheggiato e da tormalina arrotondata. Nello strato di sabbia fina la frazione magnetica, rispetto a quella dello strato conglomeratico, è arricchita di anfiboli e di granati, ma manca la tormalina. I granati sono vitrei e di colore rosa chiaro (piralspiti), mentre gli anfiboli sono tabulari, resinosi e di colore bruno. Nello strato di suolo la frazione magnetica è costituita prevalentemente da frammenti di rocce verdi e in subordine da magnetite e da pirosseni.

Lungo la falesia di San Pietro i diversi litotipi affioranti sono meno ricchi di frazione magnetica rispetto a quelli di Punta Rondinella, ma il suolo al contrario ne risulta arricchito (Foto 5). I materiali magnetici sono rappresentati prevalentemente da magnetite, a lucentezza metallica e con abito cubico o cubo-ottaedrico, da frammenti di rocce verdi, da pirosseni prismatici, interi o fratturati di colore verde chiaro e verde scuro, da anfiboli tabulari bruni e con superficie resinosa, da granati bruni di tipo ugranditico, rosati di tipo piralspítico e da biotite lamellare e alterata. In tracce è presente anche olivina di colore variegato, con abito spesso prismatico e a superficie resinosa, alterata in serpentino.

### **Discussione**

Le sabbie di battigia campionate all'esterno del Mar Grande hanno composizione essenzialmente terrigena legata agli apporti dei fiumi della vicina Basilicata, ridistribuiti da una corrente di deriva diretta da SO a NE; secondaria è la componente bioclastica (Dell'Anna e De Marco, 1977; Caldara et al., 1998). Le sabbie della battigia del Mar Grande e del Mar Piccolo sono invece costituite da materiali provenienti dalla demolizione delle falesie e da materiali bioclastici.

Le sabbie dell'area a Nord dell'Isola di San Pietro contengono pirosseni che hanno ruolo importante nella definizione degli apporti, sia per quanto riguarda la loro abbondanza che per i caratteri morfoscopici. Prevalgono i cristalli di colore verde oliva, in prismi perfetti e in schegge trasparenti e vitree, insieme a cristalli di colore giallo verdastro, vitrei, trasparenti e con punteggiature nere e bolle lattiginose. Questi pirosseni sono in parte di origine vulcanica, presi in carico e recapitati a mare dai fiumi che incidono il versante ionico dell'Appennino e i depositi del ciclo bradanico (De Marco, 1990), e in parte di origine industriale. Fra quelli naturali parte proviene dai livelli cineritici presenti a Punta Rondinella e sull'Isola di San Pietro, caratterizzati da minerali vulcanici, quali sanidino, pirosseni verde-oliva, magnetite e granati ugranditici che possono essere messi in relazione con quelli dei livelli cineritici presenti nei depositi pleistocenici. I pirosseni di colore giallo verdolino sono invece di origine industriale, parte delle loppe e delle scorie che si formano durante le fasi di raffreddamento dei prodotti siderurgici.

Il confronto mineralogico dei materiali di battigia con quelli provenienti direttamente dagli interrimenti del costruendo molo polisettoriale, indica che il tratto fra la Foce Tara, Punta Rondinella e San Pietro, corrispondente alla zona in cui sono avvenute le maggiori modificazioni strutturali, è quello più soggetto all'inquinamento antropico. La deriva litorale e il suo andamento annuale fa sì che il materiale derivante dalle scorie e dalle loppe d'altoforno, immesse in mare o perché utilizzate per la realizzazione di nuovi moli, o tramite gli scarichi industriali, si concentrino in questa area arricchendone la sabbia di componenti antropogenici: scaglie di magnetite e carbone, schegge di minerali di colore bianco lattiginoso e aspetto resinoso, contenenti inclusioni nerastre, e lamelle intrecciate di colore grigio, tutti di chiara provenienza industriale. Nella stessa area è possibile che si concentrino le precipitazioni dei materiali di inquinamento atmosferica che costituiscono il *fall-out* diretto condizionato dai venti, secondari, del I quadrante. La presenza della diga foranea impedisce, o riduce al minimo, che il materiale che la raggiunge per deriva litoranea entri, quindi, nel Mar Grande. Qui e nel Mar Piccolo, il materiale rappresentato da scaglie di carbone e di particellato delle scorie e delle loppe d'altoforno è in frazione principale poco rimaneggiato dal trasporto in mare; esso è pulviscolo di ricaduta meteorica distribuito dai venti del IV quadrante e in parte legato alle attività navali. Data la limitata circolazione delle acque in questi bacini essi sono in alte concentrazione.

In definitiva le sabbie delle spiagge attuali dell'area prospiciente la Città di Taranto sono il risultato di una alimentazione mista naturale (C, D in Fig. 5) ed antropica (A, B in Fig. 5). I componenti granulometricamente più fini dello stesso materiale sono diffusi nell'area urbana più prossima agli stabilimenti industriali e nel centro di Taranto, sottesa ai venti dominanti e regnanti del IV quadrante. Le polveri presenti nell'area urbana, campionate in agosto quindi nel periodo di minor uso dei riscaldamenti domestici e di minor traffico veicolare, rappresentano pertanto, almeno in parte, il materiale di ricaduta dei gas di scarico immessi in atmosfera dalle ciminiere degli alto forni.

	Naturali	Industriali	
	<i>Falesie</i>	<i>Polveri</i>	<i>Riporto</i>
Minerali scuri	magnetite	magnetite	serpentinite
	biotite	ematite	untite
	pirosseni	maghemite	rodocrosite
	rocce verdi	grafite	siderite
	tormalina	caolinite	maghemite
	anfibioli	montmorillonite	northupite
	granati	-	wustite
	olivina	-	-

Tabella 3 - Tipologia di apporti sedimentari alle spiagge attuali.

## Conclusioni

Le spiagge dei mari di Taranto ricevono, o hanno ricevuto, minerali di origine industriale sia in modo diretto che indiretto (Tab. 3). Direttamente, attraverso l'immissione in mare di detriti solidi dello stabilimento siderurgico per la costruzione delle aree portuali ad Ovest di Punta Rondinella; indirettamente attraverso la circolazione atmosferica, che disperde le polveri delle ciminiere sotto il dominio dei venti. Durante le manovre di attracco e carico/scarico delle navi, avvengono fenomeni usuali in aree portuali: sversamenti accidentali di carburante o di prodotti industriali ferrosi e rilascio di vernici antifouling dagli scafi. Non trascurabile è la diffusione in atmosfera di materiale esposto agli agenti meteorici durante il trasporto su nastri trasportatori e lo stoccaggio in aree scoperte. I risultati dell'analisi del regime anemometrico e delle correnti litoranee e quello delle analisi mineralogiche hanno consentito di riconoscere la presenza e il tracciato di dispersione di alcuni dei materiali solidi di origine industriale presenti nelle spiagge attuali dell'area compresa fra Lido Azzurro e Capo San Vito, discriminandoli dai sedimenti naturali. In particolare è stato possibile valutare, nell'ambito della contaminazione marina costiera, la presenza ed il tipo di dispersione nei vari tratti considerati dei materiali solidi inquinanti, sia come detriti di riporto che come polveri disperse nell'atmosfera.

Le sabbie delle spiagge esterne al Mar Grande conservano tuttora il carattere di materiale detritico essenzialmente terrigeno, ereditato dal passato regime di alimentazione da correnti litorali provenienti da Ovest. In esse sono presenti minerali di origine vulcanica ottimi traccianti della deriva costiera. Anche nelle insenature del Mar Grande e del Mar Piccolo, dove prevalgono coste a falesia che incidono depositi argillosi e calcarenitici, in arretramento per scalzamento al piede, le sabbie risultano arricchite di minerali vulcanici (sanidino, pirosseni, granati, magnetite) provenienti dai livelli cineritici presenti nelle suddette formazioni. Tutte le spiagge esaminate hanno sabbie arricchite di clasti psammitici di origine industriale, quali scorie, loppe e scaglie carboniose e metalliche che per caratteri strutturali possono contenere quantità significative di metalli pesanti quali As, Cd, Cr, Hg, Sn, Pb, estremamente pericolosi per l'ambiente tanto se immessi nella catena alimentare, ad esempio attraverso i prodotti dell'acquacoltura, tanto se inalati direttamente. I materiali solidi di origine industriale presenti nei sedimenti dell'area tarantina, così, considerate la loro diffusione e abbondanza, sono almeno in parte fonte di diffusione dei metalli tossici riscontrati nelle acque marine costiere.

Analisi di tipo geochimico sui materiali solidi industriali rinvenuti nei sedimenti delle spiagge attuali e dei fondali potrebbero permettere di riconoscere e quantificare i metalli pesanti da loro veicolati e di distinguerli da quelli eventualmente immessi nell'ecosistema marino da attività portuali ed urbane.

### Ringraziamenti

Gli Autori esprimono gratitudine ai due anonimi referee per i preziosi suggerimenti forniti in fase di revisione. Si ringrazia quindi il Prof. Umberto Simeoni del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Ferrara per la lettura critica del manoscritto e per i suggerimenti forniti.

Lavoro realizzato e pubblicato con contributi di Ateneo del Prof. A. De Marco e del Dott. G. Mastronuzzi.

### Bibliografia

- AA.VV. (1995). *Atlante delle spiagge*. CNR.
- Amore C., D'alexandro L., Di Geronimo S., Giuffrida E., Lo Iudice A. e Zanini A. (1988) - *Dinamica litorale del Golfo di Taranto tra Capo Spulico e Punta Rondinella*. Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat., 21: 39-74.
- Belluomini G., Caldara M., Casini C., Cerasoli M., Manfra L., Mastronuzzi G., Palmentola G., Sanso' P., Tuccimei P. e Vesica P.L. (2002) - *Isoleucine epimerization ages and Th/U analyses on raised quaternary marine deposits in the Chèradi Islands and in the Taranto area (Apulia - Southern Italy)* - Quaternary Science Revue.
- Calacela N., Giardullo S., Petronio B. M., Pietrantonio M., Abbondanzi F., Campisi T. e Cardellicchio N. (2005) - *Influence of chemical parameters (heavy metals, organic matter, sulphur and nitrogen) on toxicity of sediments from the Mar Piccolo (Taranto, Ionian Sea, Italy)*. Microchemical Journal, 79: 243 - 248.
- Caldara M., Centenaro E., Mastronuzzi G., Sanso' P. e Sergio A. (1998) - *Features and present evolution of Apulian Coast (Southern Italy)*. ICS'98, Palm Beach, Florida 5/1998, Journal of Coastal Research, SI (26): 55-64.
- Cardellicchio N. (1992) - *Monitoraggio in continuo dei fenoli in acque di scarico di cokeria*. Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Taranto. Atti del Congresso: Il monitoraggio automatico dell'Inquinamento Marino.
- Cardellicchio N., Annicchiarico C., Leone G., Marra C., Paterno P., Piraino S. e Ragone P. (1991) - *I mari di Taranto: problematiche di impatto ambientale*. Istituto Talassografico, CNR, di Taranto.
- Cardellicchio N., Annicchiarico C., Di Leo A. e Giandomenico S. (2004) - *Mercury in marine sediments and mussels from Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy)*. Atti 7th International Conference on Mercury as a Global Pollutant. Lubiana (June 27- July 2, 2004).
- Cardellicchio N., Paterno P. e Marra C. (1989a) - *Accumulo di mercurio e stagno in sedimenti e mitili del Golfo di Taranto*. Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Taranto.
- Cardellicchio N., Ragone P., Annicchiarico C. e Rochira M. (1989b) - *Inquinamento da idrocarburi policiclici aromatici nell'area costiera tarantina*. Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Taranto. Atti del Convegno Nazionale I.S.T.
- Cotecchia V., Lollino G., Pagliarulo R., Stefanon A., Tadolini T. e Trizzino R. (1989) - *Studi e controlli in situ per la captazione della sorgente sottomarina Galeso, Mar Piccolo di Taranto*. Conv. Int. Geoling. SUO-LOSOTTOSUOLO, Torino, 27-30 Settembre 1989, pp. 475-484.

- Costantino G., Mastrototaro F., Mattarrese A. e Tursi A. (1999) - *I fondali delle Isole Chèradi: aspetti bioecologici*. In: Mastronuzzi G., Marzo P. (eds.). *Le Isole Chèradi fra natura, leggenda e storia*. Fondazione Ammiraglio Michelagnoli - Università degli Studi di Bari, Stampasud, Mottola (Ta), pp.171-180.
- Dell'Anna L. e De Marco A. (1977) - *Ulteriori dati sulla composizione mineralogica e granulometrica delle sabbie del litorale ionico tra Metaponto e Taranto*. Boll. Soc. Geol. Ital., 96: 569-585.
- De Marco A. (1990) - *Rapporti tra geodinamica e sedimentazione nella Fossa Bradanica durante il Pleistocene: testimonianze mineralogiche*. Boll. Soc. Geol. Ital., 109: 313-324.
- De Salis Marschlins C.U. (1789) - *Nel Regno di Napoli: viaggi attraverso varie provincie nel 1789*. Trani, pp. 73.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journ. Sed. Petrol., 27: 3-26.
- Lerario V.L., Giandomenico S., Lopez L. e Cardellicchio N. (2003) - *Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from the Mar Piccolo of Taranto, Ionian Sea, Southern Italy*. Annali di Chimica, 93: 397-406.
- Mastronuzzi G. (2001) - *Indagine conoscitiva geologico ambientale del sistema del Mar Piccolo (Taranto): caratteri evoluzione, dinamica, valore e pericolosità di un potenziale geosito*. In: Atelier Taranto, Comune di Taranto. Progetto Posidonia, Unione Europea, Commissione Europea - DG XVI, Art. 10 FESR, Azioni Innovatrici, Programma Terra, Progetto n. 55 Posidonia, Comune di Taranto, VII Settore Governo del Territorio, CD rom, <http://www.comune.taranto.it>.
- Mastronuzzi G. e Sansò P. (1998) - *Morfologia e genesi delle Isole Chèradi e del Mar Grande (Taranto, Puglia, Italia)*. Geogr. Fis. Din. Quat., 21: 131-138.
- Ministero dell'Ambiente (1992) - *Relazione sullo stato dell'ambiente*. Ist. Pol. Zecca dello Stato, Roma. 490 pp.
- Pagliarulo R. e Bruno G. (1990) - *Implicazioni tettonico-strutturali nella circolazione idrica profonda nell'area del Mar Piccolo di Taranto (Puglia)*. Boll. Soc. Geol. It., 109: 307-312.
- Paterno P., Cardellicchio N., Marra C. e Leone G. (1991) - *Distribuzione di elementi metallici in Posidonia oceanica (L.) Delile del Golfo di Taranto*. Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Taranto.
- Parea G.C., Fontana D., Valloni R. e Vinci A. (1980) - *Dispersione dei sedimenti ed evoluzione della costa fra Capo Spulico e Taranto durante il Quaternario*. Geogr. Fis. Din. Quat., 3: 3-15.
- Pesaresi P. e Longo S., (1989) - *Nuova stazione navale a Taranto*. Edilizia Militare, 10: 25-26, Geniodife, Roma.
- Piraino S., Fanelli G., Alabiso G., Brandini E., Buia M.C., Petrocelli A., Prato E., Saracino O. D. e Pastore M. (1997) - *Ecologia del settore marino antistante il Polo Industriale di Taranto*. Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Taranto. Atti del Congresso Nazionale di Chimica Ambientale.
- Zito G., Ruggiero L. e Zuanni F. (1988) - *Zone climatiche omogenee in Puglia*. Atti del II Colloquio "Approcci metodologici per la definizione dell'ambiente fisico e biologico Mediterraneo", pp. 15-40.

**Manoscritto ricevuto il 03/03/2004, accettato il 18/05/2005.**

## Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze  
Borgo Albizi 28, 50122 Firenze - epranzini@unifi.it

### Riassunto

Le spiagge della Versilia costituiscono, nel quadro regionale e nazionale, un raro esempio di litorale sabbioso in continua progradazione senza che questo processo sia dovuto allo sbarramento del trasporto litoraneo o alla costruzione di difese costiere. Questa condizione è garantita dalla posizione del tratto in esame rispetto al sistema di cellule litoranee responsabili del flusso sedimentario lungo la costa della Toscana settentrionale. In Versilia si colloca infatti la convergenza fra un flusso proveniente da nord, che trasporta i sedimenti immessi nel sistema costiero dal F. Magra, ed uno proveniente da sud, che porta in quest'area i sedimenti dell'Arno e del Serchio. Con la riduzione dell'apporto sedimentario di questi fiumi, l'alimentazione delle spiagge della Versilia avviene di fatto, oggi, grazie all'erosione dei litorali adiacenti alle foci fluviali.

Nel presente lavoro si analizzano gli studi che in passato hanno portato all'identificazione di questa zona di convergenza e si definisce con maggiore precisione la sua posizione attraverso lo studio dell'evoluzione della linea di riva dal 1938 al 1998 e delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa. La zona di convergenza risulta essere quella in cui massima è stata la progradazione della linea di riva; qui si ritrovano anche le sabbie più fini e meglio classate di tutto il litorale. I vettori di trasporto tracciati con il metodo di Gao e Collins (1992) mettono in evidenza una circolazione assai più complessa dove, comunque, appare un flusso *offshore* che è possibile mettere in relazione con la zona di convergenza.

**Parole chiave:** trasporto litoraneo, cellule litoranee, granulometria, Toscana.

### Abstract

*The beaches in Versilia represent, at regional and national levels, an uncommon case of shoreline accretion without artificial interception of littoral transport or construction of shore protection structures. Such favourable condition is produced by the location of this coastal sector within the system of littoral cells in Northern Tuscany. In Versilia, we have the convergence of a flux from the north, transporting sediments from the Magra River, and another one from the south, carrying to this area inputs from Arno and Serchio rivers. Due to the reduction in sediment input from the Tuscan rivers, these beaches are now actually fed by sand eroded from the sectors adjacent to the river mouths.*

*Previous papers in which this converge is discussed are here analysed, and a more accurate location is provided for the boundary of the littoral cells, through shoreline evolution analysis from 1938 to 1998, as well as studies on nearshore sediments. The cell boundary is located where shoreline accretion reaches its maximum; this is also where the finest and best sorted sands from this littoral system are found. Gao and Collins (1992) transport vectors map highlights a more complex cell pattern with an offshore flux possibly related to the convergence area.*

**Keywords:** longshore transport, littoral cell, grain-size, Tuscany.

## Introduzione

L'identificazione del sistema di cellule secondo le quali si svolge il trasporto litoraneo in ciascuna unità fisiografica costituisce un momento fondamentale nell'analisi di un ambiente costiero, in particolare quando essa è finalizzata alla stima del suo bilancio sedimentario (Bowen e Inman, 1966) o alla impostazione di strategie di difesa costiera (Cooper et al., 2001).

Le cellule litoranee possono essere delimitate sia da margini fissi, elementi morfologici naturali o artificiali, che da margini liberi, associati a variazioni di direzione o di intensità del trasporto litoraneo (Lowry e Carter, 1982).

I margini fissi sono facilmente identificabili, anche se non sempre è possibile stabilire se essi siano completamente impermeabili al flusso sedimentario, o non consentano invece uno scambio limitato con le cellule adiacenti (*subcells*; in Tanner, 1982); al contrario, i margini liberi sono di difficile individuazione, dato che in genere non hanno chiare evidenze morfologiche ed anche perché la loro posizione lungo costa può subire spostamenti in entrambi i sensi (Carter, 1988).

L'individuazione delle cellule libere e dei loro margini può essere perseguita in più modi: analizzando la morfologia della linea di riva e dei fondali (Kunte, 1994), calcolando il tasso di variazione della linea di riva nei vari settori (King, 1972), studiando la composizione petrografica delle sabbie (Trask, 1952), confrontando le caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa (Pettijhon, 1972; Mc Laren, 1981; Gao e Collins, 1991), con traccianti artificiali (Schwartz, 1966; Bartolini e Pranzini, 1977) e, infine, calcolando l'energia del moto ondoso nelle sue componenti lungo riva (Carter, 1988).

Nel presente lavoro vengono messi a confronto i risultati ottenuti utilizzando tutte queste metodologie, sia facendo riferimento a studi precedenti che le hanno adottate, sia sviluppando una ricerca originale sull'evoluzione della linea di riva e sulle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa.

L'area di studio è costituita dal litorale della Versilia, che si colloca nella parte centro-settentrionale dell'unità fisiografica che si estende dalla foce del Fiume Magra, a nord, al porto di Livorno, a sud (Fig. 1). È questo uno dei pochi tratti della costa toscana non colpiti dall'erosione delle spiagge (Cipriani e Pranzini, 1998) proprio per la presenza di una zona di convergenza nella quale confluiscono i sedimenti provenienti dalle foci dei fiumi che sfociano in questa unità fisiografica. Questo tratto di litorale potrà risentire in un prossimo futuro degli interventi di difesa che verranno realizzati lungo la costa della Toscana settentrionale e una migliore conoscenza del sistema di cellule litoranee che lo caratterizza costituisce un punto essenziale sul quale impostare la progettazione degli interventi di riequilibrio dei tratti in erosione ad esso limitrofi, poiché la stabilizzazione di questi implicherà la riduzione dell'input sedimentario sulle spiagge poste sottoflutto. Inoltre, una delle possibili strategie di difesa si basa sul refluito artificiale di sedimenti da una cellula all'altra, indipendentemente dalla loro adiacenza, alterando l'attuale bilancio sedimentario dei vari tratti costieri, nella speranza di ottimizzare l'utilizzazione della sabbia disponibile.

## Inquadramento geografico

Il litorale della Versilia, compreso fra Cinquale, a nord, e Viareggio, a sud, si pone nel tratto centro-settentrionale dell'unità fisiografica compresa fra Livorno e Bocca di Magra, e, avendo una disposizione SE - NW è esposto direttamente ai mari di Libeccio.

In questo tratto di costa non sono presenti opere a mare di nessun tipo, e, fatta eccezione per quelli presenti alla foce del Cinquale, i corsi d'acqua hanno uno sbocco al mare libero non confinato da moli guardiani. L'arenile ha un'ampiezza di circa 200 metri (calcolata fra la linea di riva e la strada litoranea), spazio occupato quasi per metà dagli stabilimenti balneari. Il sistema dunare è stato quasi completamente smantellato per fare spazio alla viabilità costiera e al tessuto urbano, che conserva al suo interno sporadiche tracce di questa antica morfologia.

I fondali antistanti hanno una debole pendenza, con valori di circa 1.2% fra la battigia e l'isobata dei 10 metri, ed un profilo caratterizzato da un sistema multiplo di barre e truogoli (Chiabrera et al., 1980).

La spiaggia emersa è costituita da *sabbia fine* (secondo la classificazione di Krumbein, 1934), che passa gradualmente a *sabbia molto fine* procedendo dalla battigia verso i fondali antistanti.

Il moto ondoso al largo è stato ricostruito sulla base dei dati KNMI relativi al periodo 1961 + 1990 ed è caratterizzato da una direzione di provenienza delle mareggiate maggiori da 240° + 270°, mentre gli eventi estremi ( $H_s > 6$  m) provengono da un settore limitato centrato sui 245° (Cipriani et al., 2001).



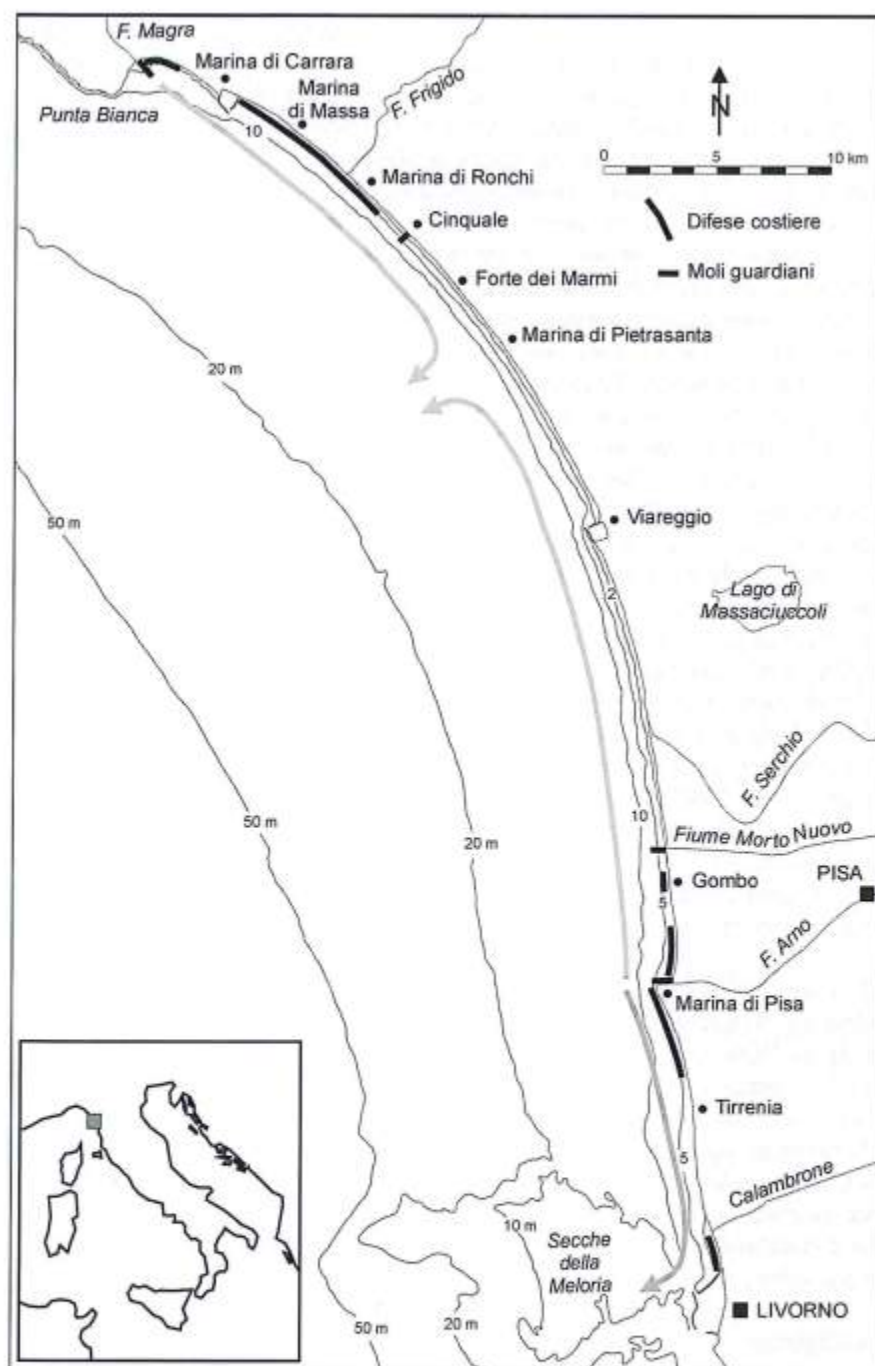


Figura 1 - L'unità fisiografica della costa toscana settentrionale, con indicate le direzioni di trasporto dei sedimenti associate alle cellule di primo ordine. L'area oggetto di studio si colloca fra Marina di Ronchi e Viareggio.

### Studi precedenti

Le spiagge della Versilia non sono mai state oggetto di uno studio specifico e ciò dipende certamente dal fatto che qui non si presentano quei problemi di erosione che interessano gran parte del litorale toscano, ma anzi questo tratto è stato interessato da un avanzamento della linea di riva che, pur con tassi diversi, prosegue da circa 2500 anni (Mazzanti e Pasquinucci, 1983).

Le prime informazioni sulle tendenze evolutive recenti di questo tratto di costa si trovano in Toniolo (1927) ed in Albani (1940), ma è Saggini (1967) che per primo dà una spiegazione dei processi dinamici che ne giustificano la costante progradazione, riconoscendo proprio su questo litorale una con-

vergenza dei flussi sedimentari, uno proveniente da sud, che trasporta i materiali immessi in mare dall'Arno e dal Serchio, ed uno proveniente da nord, che ridistribuisce i materiali portati alla foce dal Magra e, subordinatamente, dagli altri corsi d'acqua minori che scendono dalle Alpi Apuane. Questa convergenza, che Saggini identificò sulla base dell'insabbiamento delle opere a mare (porti ed armature di foce) e sulla direzione delle barre di foce dei fiumi, venne confermata da Fanucci et al. (1976) sempre su base morfologica, nell'ambito delle ricerche promosse dal CNR con il Programma Speciale Conservazione del Suolo - Settore Regime e conservazione dei Litorali.

Questo aspetto fu successivamente approfondito dagli stessi Autori in Aiello et al. (1976) che estesero la "zona neutra" al tratto di litorale compreso fra la foce del Cinquale e Lido di Camaiore (Fig. 1), che si caratterizza per una *morfologia subacquea irregolare, interpretabile come zona di attenuazione del drift*. In quel lavoro si identifica inoltre la presenza di due diversi *drift*, uno prossimale, che interessa la *surf zone* e la *swash zone*, ed uno distale che interessa la *breaker zone* e i fondali esterni ad essa. Nel tratto qui considerato il *drift* prossimale, identificato sulla base della vergenza delle foci dei piccoli corsi d'acqua, avrebbe una direzione nord-sud e sarebbe responsabile della ridistribuzione dei sedimenti accumulati dalla convergenza del ben più efficace *drift* distale.

Gandolfi e Paganelli (1975), analizzando la composizione delle sabbie di spiaggia e dei fiumi che insistono in questo tratto di costa, hanno fornito elementi oggettivi per la definizione delle province petrografiche del litorale della Toscana settentrionale e confermato l'esistenza, in questo tratto, della convergenza del *drift* litoraneo. I campioni prelevati a Forte dei Marmi ed alla foce del Fosso Motrone mostrano differenze composizionali significative, il primo con elementi caratteristici del bacino del Fiume Magra, il secondo con quelli dei fiumi Arno e Serchio. Le differenze sono particolarmente evidenti se si prendono in considerazione i frammenti di rocce (serpentiniti in primo luogo) ed i minerali pesanti (enstatite ed augite in particolare). L'analisi si basa però su campioni prelevati a circa 5 km di distanza l'uno dall'altro e non consente di definire con precisione l'ubicazione della *zona neutra*.

Recentemente altri Autori (Garzanti et al., 2001) hanno affrontato nuovamente il problema della dispersione dei sedimenti lungo riva in quest'area, sebbene nell'ambito di una più vasta problematica di tipo petrografico. Lo studio, che ha interessato il fronte appenninico dell'arco ligure-tirrenico, ha avuto un dettaglio inferiore a quello che caratterizzava il lavoro di Gandolfi e Paganelli (1975), ma ha portato ad una conferma della dispersione dei sedimenti del Magra, del Frigido e del Versilia verso sud, almeno fino a Forte dei Marmi.

Aminti et al. (1998), utilizzando i dati KNMI relativi al periodo 1961 - 1990, hanno calcolato il flusso di energia associata al moto ondoso per valutare il trasporto potenziale di sabbia lungo questa costa, mettendo in evidenza come si passi da un flusso potenziale netto di 300.000 m<sup>3</sup>/anno verso sud a Marina di Carrara ad un valore di 0 m<sup>3</sup>/anno a Marina di Pietrasanta, per assistere poi ad un incremento del trasporto in senso opposto, verso nord, che arriva a 100.000 m<sup>3</sup>/anno all'altezza del porto di Viareggio.

Pur ricordando che i dati KNMI derivano da *stime* del moto ondoso al largo e che la lunghezza del periodo di tempo considerato, 30 anni, ha una limitata rilevanza statistica per definire un processo in atto da lungo tempo, questa identificazione della zona neutra con il litorale di Marina di Pietrasanta acquisisce un particolare significato perché è stata ottenuta con metodi completamente indipendenti da quelli utilizzati negli studi precedentemente citati.

## Indicatori morfologici della convergenza

### *Evoluzione della linea di riva*

Una zona di convergenza è costituita da un margine di tipo *e/e* del modello di Lowry e Carter (1982) e l'incontro dei due flussi può determinare la formazione di una protuberanza nella linea di riva, fino allo sviluppo di una *cusped foreland* (Gulliver, 1896), morfologia non certo presente lungo la costa della Versilia, dove la linea di riva disegna una falcatura regolare fra il porto di Viareggio e quello di Marina di Carrara. Ciò può dimostrare che la convergenza non è data dalla permanenza di due *drift* opposti che agiscono nello stesso tempo (Jennings, 1955), ma dalla risultante uguale a zero di due flussi che agiscono in tempi diversi e che hanno valori assoluti elevati; inoltre, questo punto neutro deve oscillare lungo costa.

Per la sua identificazione si è quindi fatto ricorso all'analisi dell'evoluzione della linea di riva, nell'ipotesi che essa sia associata ad una zona di continua progredazione.

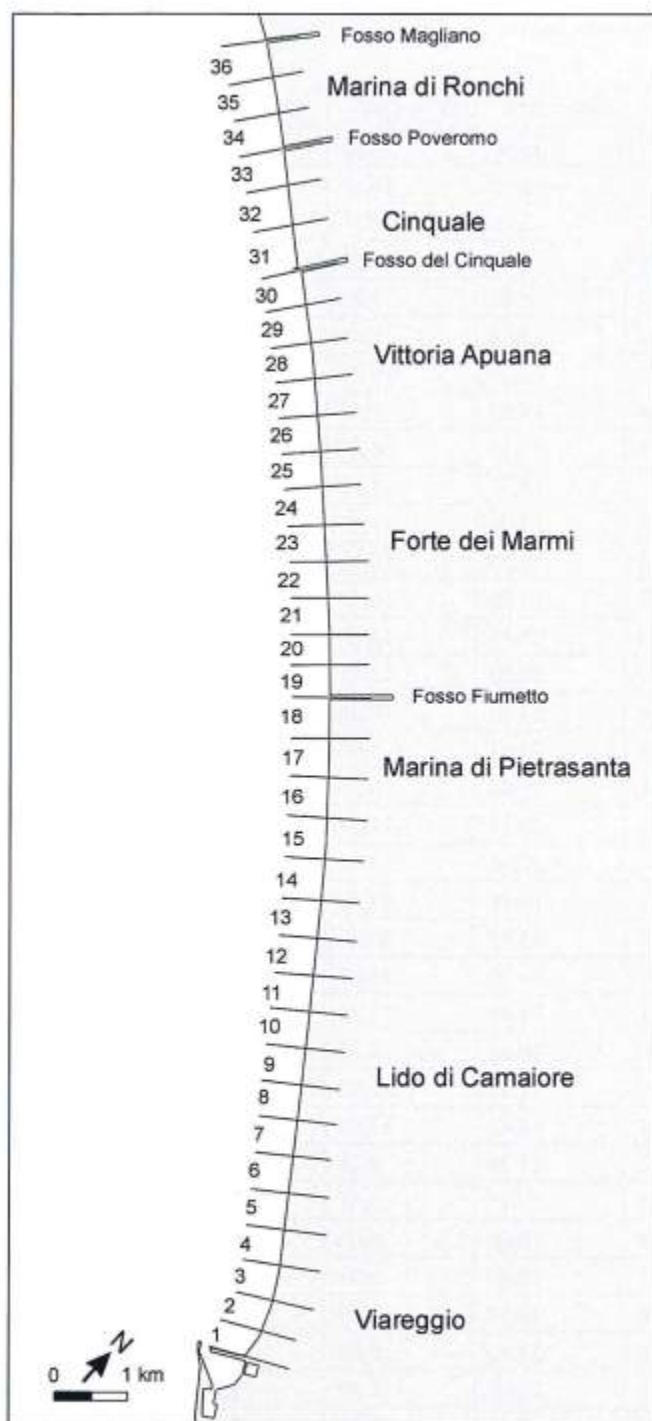


Figura 2 - Delimitazione dei 36 settori nei quali è stato diviso il litorale per lo studio dell'evoluzione della linea di riva.

cessivo (1978 - 1985) per diventare drammatico negli ultimi anni, quando fra il 1985 e il 1998 si perdono quasi 60 metri di spiaggia.

La spiaggia nei settori centrali continua ad accrescersi in tutti gli intervalli di tempo considerati, anche se non sempre si registrano qui i massimi avanzamenti.

Lo studio si basa sulle linee di riva degli anni 1938, 1954, 1967, 1978, 1985 e 1998 disponibili in scala 1:5.000 grazie a precedenti studi effettuati presso il Dipartimento di Scienza della Terra dell'Università di Firenze.

Il tratto di litorale compreso fra la foce del Fosso Magliano e il Porto di Viareggio è stato suddiviso in 36 settori (Fig. 2) lunghi approssimativamente 500 metri, e delimitati, ove presenti, da opere a mare o da foci fluviali. Per questi settori sono state calcolate le variazioni lineari (Tab. 1) ed i tassi di variazione annuale (Tab. 2) per ciascun intervallo di tempo considerato. In Figura 3 sono riportati graficamente gli spostamenti medi della linea di riva dei vari anni per il tratto di costa analizzato.

Fra il 1938 ed il 1954, questo tratto di costa è stato interessato da un consistente avanzamento della linea di riva, che ha superato localmente anche i 40 metri, come ad esempio nel settore n. 16 che corrisponde alla spiaggia di Marina di Pietrasanta.

Avanzamenti simili si sono registrati anche all'estremità settentrionale, dal Cinquale a Marina di Ronchi, e a nord del porto di Viareggio, in un tratto sul quale vennero refluiti i materiali dragati per l'ampliamento dell'area portuale (Milano e Di Martino, 1981).

Il rilievo del 1967 venne eseguito dal Genio Civile OO.MM. di Genova per valutare i danni delle mareggiate del Novembre 1966 e registra tassi di avanzamento assai minori e, addirittura, fenomeni erosivi in aree che erano sempre state in progradazione. I settori centrali del tratto considerato non subiscono processi erosivi, ma il tasso di avanzamento si riduce sensibilmente.

Nel periodo successivo, fra il 1967 e il 1978, il litorale riprende la propria tendenza all'avanzamento, fatta eccezione per i settori settentrionali, in cui inizia a farsi sentire l'erosione che procede da nord, originata dalla riduzione dell'input sedimentario del Magra ed incentivata, prima dalla costruzione del porto di Marina di Carrara, e successivamente dalle opere di difesa del litorale di Massa (Aminti et al., 1999; Cipriani et al., 2001).

Questo processo si aggrava nel periodo successivo, quando fra il 1985 e il 1998 si

Tabella 1 - Variazione lineare media della ampiezza della spiaggia emersa (m) nei vari intervalli di tempo per i 36 settori considerati.

N.Settore	Lunghezza	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1998	1938-1998
1	403	16,03	-23,07	35,90	28,42	18,63	75,90
2	422	45,50	-26,06	16,45	16,47	18,66	71,02
3	502	41,68	-13,92	-2,60	22,90	17,55	65,61
4	500	27,83	0,74	-7,93	27,66	13,66	61,97
5	501	22,06	5,35	6,03	11,00	12,27	56,72
6	539	10,01	12,68	12,64	6,61	14,00	55,93
7	440	18,64	9,09	16,39	9,29	14,14	67,55
8	503	13,46	9,48	14,62	7,87	8,44	53,87
9	493	18,33	4,92	14,30	6,26	18,23	62,05
10	511	19,78	3,41	18,53	-1,82	31,74	71,64
11	506	23,72	-1,53	25,93	4,45	24,06	76,61
12	500	23,44	8,53	21,20	10,70	21,03	84,90
13	503	28,35	8,77	23,50	16,37	16,13	93,12
14	585	39,88	11,20	23,87	14,88	9,57	99,40
15	572	31,30	6,81	28,20	13,81	9,11	89,23
16	500	40,64	4,09	27,32	12,08	15,10	99,23
17	540	28,21	0,83	25,41	5,95	13,04	73,45
18	565	34,51	1,61	26,00	3,85	6,71	72,68
19	434	20,86	13,84	20,35	11,79	12,28	79,12
20	420	28,94	5,92	27,56	4,53	14,42	81,37
21	497	24,69	10,97	16,41	13,56	11,25	76,88
22	505	23,76	13,08	15,73	20,53	6,57	79,66
23	500	22,35	9,10	26,90	13,07	5,59	77,01
24	508	18,40	16,31	11,59	17,38	4,26	67,94
25	497	17,38	10,30	20,41	9,40	-3,76	53,73
26	503	31,13	1,49	11,59	11,90	0,10	56,21
27	506	27,77	-0,71	14,02	11,40	-3,77	48,71
28	500	27,18	2,32	15,78	5,31	-0,45	50,14
29	514	33,96	-4,23	21,17	6,51	-10,67	46,75
30	500	35,37	-0,79	18,66	6,05	-2,70	56,58
31	603	40,13	11,77	18,80	5,53	3,65	79,89
32	550	38,26	7,86	20,39	-1,89	-9,39	55,24
33	504	43,69	-0,98	22,99	-0,73	-45,03	19,93
34	495	47,84	-2,78	13,03	-5,40	-52,43	0,27
35	500	37,54	6,90	-8,49	-9,90	-59,40	-33,36
36	497	21,63	1,24	-1,60	-34,05	-53,32	-66,10

Il confronto fra la linea di riva del 1938 e quella del 1998 (Fig. 4) mostra come il tratto compreso nei settori 13 + 16 si sia accresciuto di circa 100 metri, il valore massimo registrato in tutto l'arco costiero analizzato. Effettuando un'interpolazione secondo una funzione di secondo grado si vede che essa raggiunge il valore massimo nel settore n. 15, ossia sulla spiaggia di Marina di Pietrasanta.

L'evoluzione degli altri settori ben si inquadra nella dinamica costiera che si va delineando: quelli più meri-

Tabella 2 - Variazione lineare media annua della ampiezza della spiaggia emersa (m) nei vari intervalli di tempo per i 36 settori considerati.

N.Settori	Lunghezza	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1998	1938-1998
1	403	1,00	-1,77	3,26	4,06	1,43	1,27
2	422	2,84	-2,00	1,50	2,35	1,44	1,18
3	502	2,61	-1,07	-0,24	3,27	1,35	1,09
4	500	1,74	0,06	-0,72	3,95	1,05	1,03
5	501	1,38	0,41	0,55	1,57	0,94	0,95
6	539	0,63	0,98	1,15	0,94	1,08	0,93
7	440	1,16	0,70	1,49	1,33	1,09	1,13
8	503	0,84	0,73	1,33	1,12	0,65	0,90
9	493	1,15	0,38	1,30	0,89	1,40	1,03
10	511	1,24	0,26	1,68	-0,26	2,44	1,19
11	506	1,48	-0,12	2,36	0,64	1,85	1,28
12	500	1,47	0,66	1,93	1,53	1,62	1,42
13	503	1,77	0,67	2,14	2,34	1,24	1,55
14	585	2,49	0,86	2,17	2,13	0,74	1,66
15	572	1,96	0,52	2,56	1,97	0,70	1,49
16	500	2,54	0,31	2,48	1,73	1,16	1,65
17	540	1,76	0,06	2,31	0,85	1,00	1,22
18	565	2,16	0,12	2,36	0,55	0,52	1,21
19	434	1,30	1,06	1,85	1,68	0,94	1,32
20	420	1,81	0,46	2,51	0,65	1,11	1,36
21	497	1,54	0,84	1,49	1,94	0,87	1,28
22	505	1,48	1,01	1,43	2,93	0,51	1,33
23	500	1,40	0,70	2,45	1,87	0,43	1,28
24	508	1,15	1,25	1,05	2,48	0,33	1,13
25	497	1,09	0,79	1,86	1,34	-0,29	0,90
26	503	1,95	0,11	1,05	1,70	0,01	0,94
27	506	1,74	-0,05	1,27	1,63	-0,29	0,81
28	500	1,70	0,18	1,43	0,76	-0,03	0,84
29	514	2,12	-0,33	1,92	0,93	-0,82	0,78
30	500	2,21	-0,06	1,70	0,86	-0,21	0,94
31	603	2,51	0,91	1,71	0,79	0,28	1,33
32	550	2,39	0,60	1,85	-0,27	-0,72	0,92
33	504	2,73	-0,08	2,09	-0,10	-3,75	0,34
34	495	2,99	-0,21	1,18	-0,77	-4,37	0,00
35	500	2,35	0,53	-0,77	-1,41	-4,95	-0,57
36	497	1,35	0,10	-0,15	-4,86	-4,44	-1,12

dionali mostrano una forte tendenza all'avanzamento per la messa in opera di un sistema di *by-pass* che refluisce la sabbia dalla spiaggia sopraflutto a quella sottoflutto del porto e per la protezione fornita dalla diga foranea che ora si presenta aggettante, tanto che la diffrazione delle onde induce un flusso opposto che penalizza i settori posti immediatamente più a nord.

Oltre Marina di Pietrasanta la progradazione della spiaggia si riduce gradualmente, salvo un picco in

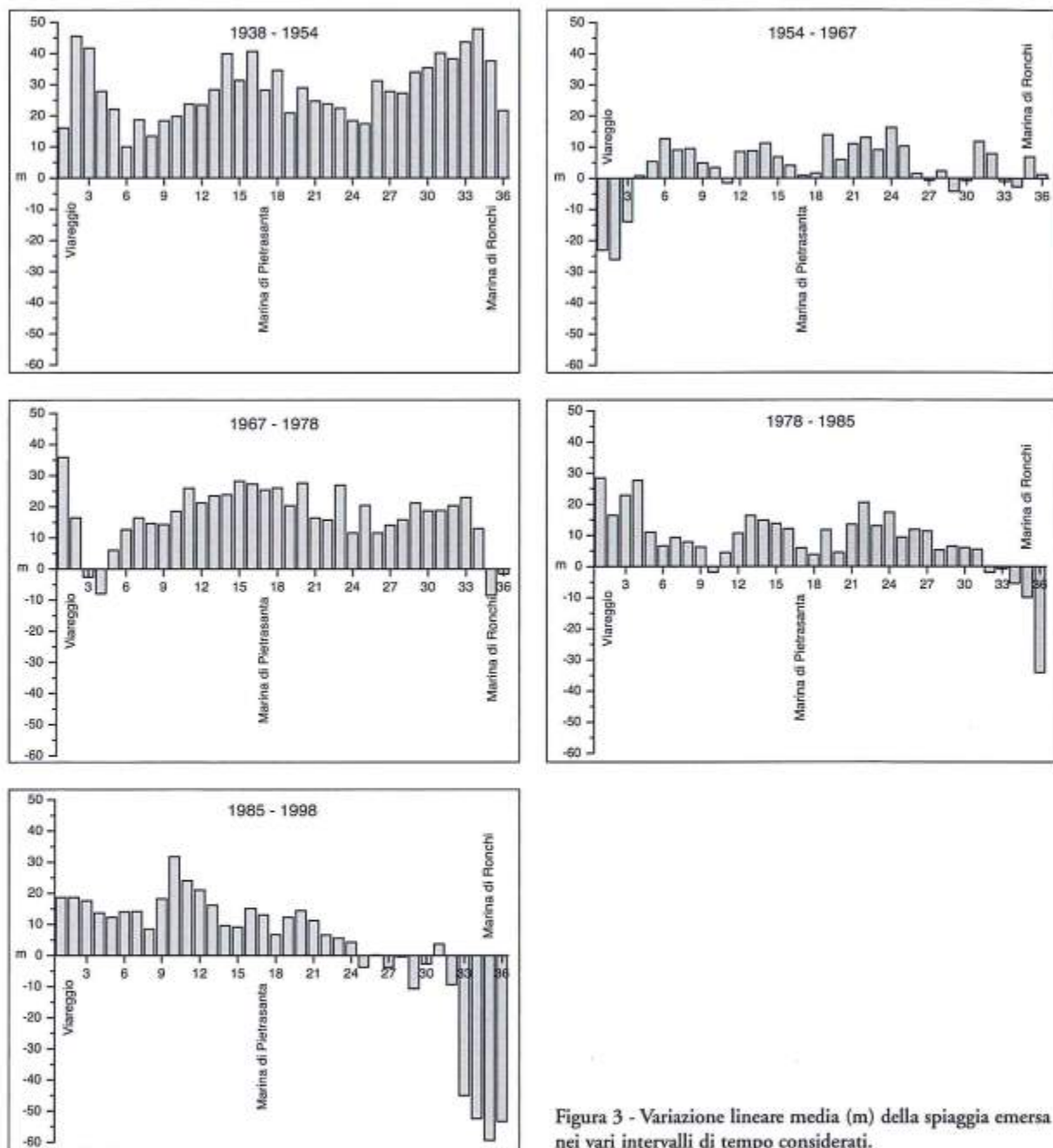


Figura 3 - Variazione lineare media (m) della spiaggia emersa nei vari intervalli di tempo considerati.

corrispondenza della spiaggia posta a nord della foce del Cinquale (settorio 31), che si avvantaggia della presenza dell'armatura di foce. Avvicinandosi al limite settentrionale della zona qui analizzata, si vede come gli ultimi processi erosivi abbiano annullato gli avanzamenti dei periodi precedenti tanto che il bilancio complessivo degli ultimi due settori risulta negativo per 33 e 66 metri.

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva consente di avvalorare l'ipotesi che proprio in corrispondenza della spiaggia di Marina di Pietrasanta si collochi preferenzialmente la convergenza dei due drift opposti. Qui non si ha la formazione di un saliente, e tanto meno di un *cusate foreland*, ma l'analisi dello sviluppo costiero consente di evidenziare che in questo tratto la costa ha il suo raggio di curvatura maggiore.

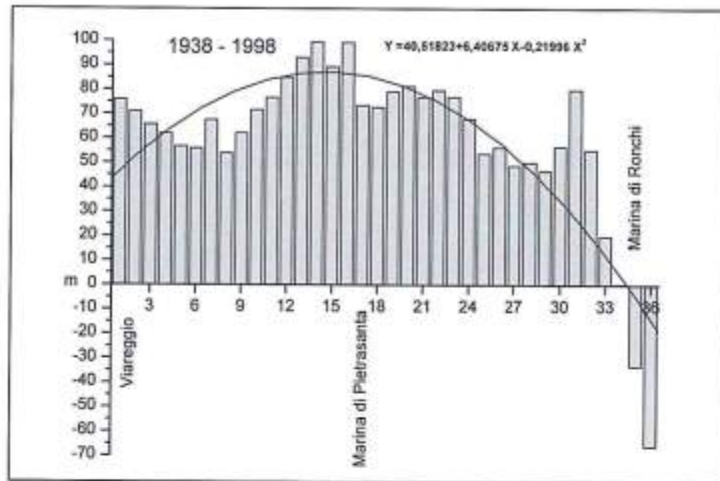


Figura 4 - Variazione lineare media (m) della spiaggia emersa fra il 1938 e il 1998 con funzione interpolante di 2°. In ascissa sono indicati i 36 settori la cui lunghezza è compresa tra i 403 ed i 603 m.

### Morfologia dei fondali

Lo studio della morfologia della *nearshore* si basa sui dati ottenuti con un rilievo batimetrico effettuato nel gennaio del 1998 su profili eseguiti ogni 250 metri di litorale ed estesi dalla spiaggia alta (base della duna o limite di manufatti) fino alla batimetrica dei 10 metri.

Il grafico che mostra la pendenza media dei fondali entro l'isobata dei 10 m (Fig. 5) indica che nella parte centrale del tratto studiato il profilo di spiaggia è più ripido, con valori che sfiorano l'1,3%.

Questa può essere la conseguenza della rapida espansione della spiaggia emersa dovuta al forte afflusso di sedimenti, espansione che non sarebbe bilanciata da una identica migrazione verso il largo delle isobate maggiori, dato che in questa fascia il flusso sedimentario è modesto, essendo la profondità di chiusura con tempo di ritorno di un anno pari a circa 7,5 m (D'Eliso, com. pers.). L'espansione della spiaggia emersa e della *nearshore* si tradurrebbe quindi in un profilo più ripido, come avviene in

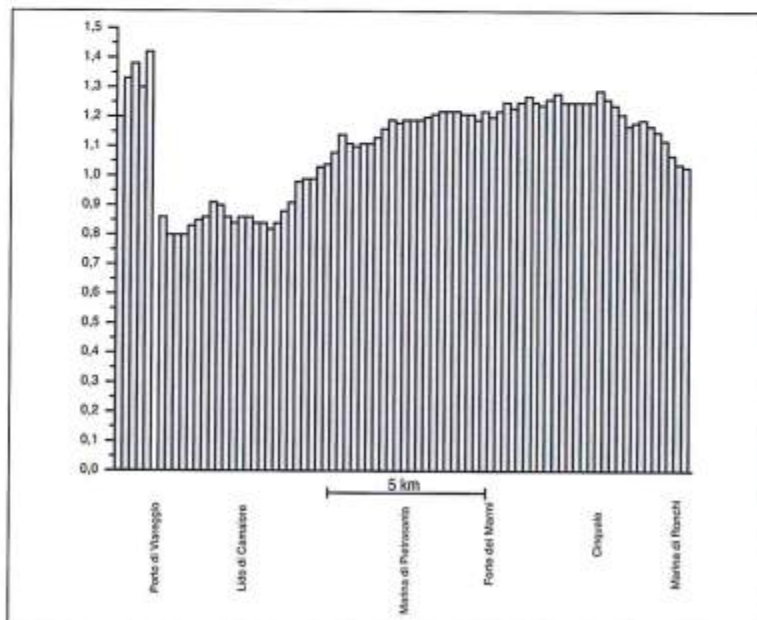


Figura 5 - Pendenza media dei fondali entro l'isobata dei 10 metri nel tratto di costa compreso fra Viareggio e Marina dei Ronchi secondo le 80 sezioni batimetriche rilevate.

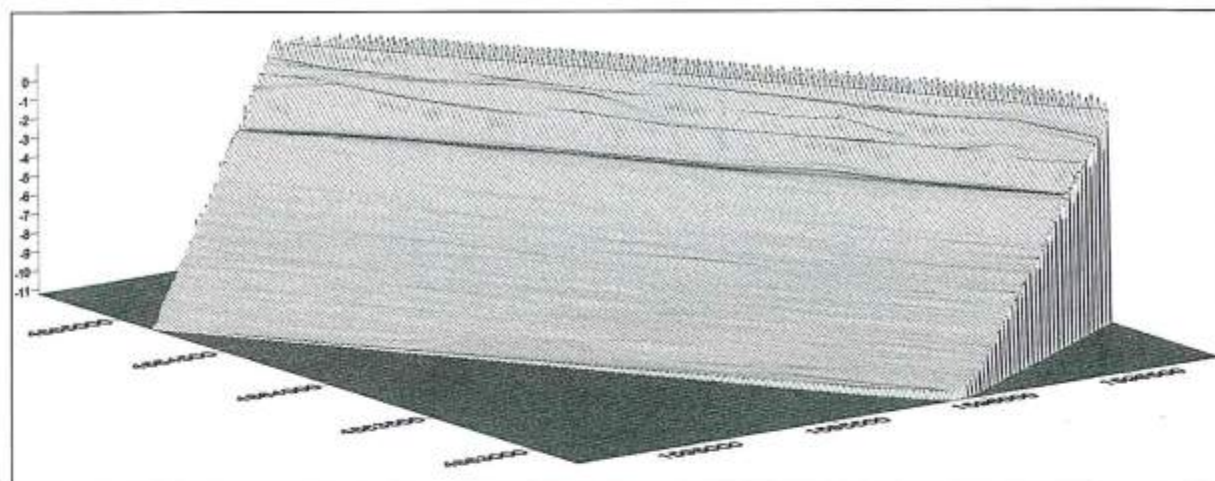


Figura 6 - Modello digitale del fondale del tratto di mare antistante Marina di Pietrasanta.

modo parossistico a sud del porto di Viareggio, dove la linea di riva è avanzata di ben 300 m dal 1938 ad oggi e dove i fondali maggiori non hanno potuto evolversi in modo analogo: qui la pendenza dei fondali supera l'1,4%.

D'altra parte, l'erosione di un litorale, con l'arretramento della linea di riva e la stabilità dei fondali oltre la profondità di chiusura, determina una riduzione della pendenza media del profilo di spiaggia, come si verifica procedendo verso il limite settentrionale della zona studiata.

La modesta pendenza dei fondali del tratto posto sottoflutto al porto di Viareggio (0,8%) è dovuta all'arretramento subito dalla linea di riva dopo la costruzione della diga foranea ed al fatto che oggi i sedimenti la superano contribuendo all'innalzamento dei fondali al largo.

Tutto il settore è caratterizzato da un sistema di barre, già descritto da Chiabrera et al. (1980), che occupa la fascia delimitata dall'isobata dei 5 m, indicando che questa è la zona dinamicamente più attiva del litorale.

In Figura 6 è rappresentato un modello digitale del terreno relativo alla spiaggia di Marina di Pietrasanta, nel quale si può osservare una barra esterna, longitudinale, parallela e continua, e due barre interne assai più discontinue. La prima è formata dal frangimento delle onde generate dalle mareggiate più intense provenienti da Libeccio, mentre quelle più interne sono da riferire ad eventi meteomarini più deboli e con componente obliqua rispetto alla costa.

#### *Caratteristiche granulometriche delle sabbie*

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la spiaggia emersa e sommersa possono dare indicazioni sulle direzioni di trasporto e descrivere la dinamica dei sistemi di cellule.

Per il presente studio sono stati analizzati 200 campioni prelevati nel corso della campagna di rilievi del gennaio 1998 su profili distanziati 500 l'uno dall'altro ed alle profondità di 0, 2, 4, 6 e 8 metri. Per essi, sono state analizzate prima le variazioni lungo riva delle caratteristiche granulometriche poi quelle di tutti i materiali costituenti la spiaggia sommersa.

In Figura 7 sono riportati i valori delle dimensioni medie (Media di Folk e Ward, 1957) di tutti i campioni di battigia. Si vede chiaramente che muovendosi da nord verso sud si ha una diminuzione delle dimensioni medie (valori di  $Mz$  maggiori) fino a circa 6 km dal porto di Viareggio, quando le sabbie iniziano ad assumere dimensioni maggiori. Interpolando i valori con una funzione di secondo grado si ha una migliore descrizione di questo fenomeno e si può calcolare che il valore massimo della funzione viene raggiunto a 6044 m dal porto.

Si può pensare che in questo settore di costa prevalga un processo di *downdrift fining* (McCave, 1978), ossia di una riduzione delle dimensioni dei sedimenti nel senso del trasporto litoraneo per progressivo abbandono delle frazioni più grossolane delle distribuzioni granulometriche. Ciò avverrebbe sia nel tratto settentrionale, dove prevale un flusso diretto verso sud, che in quello meridiona-



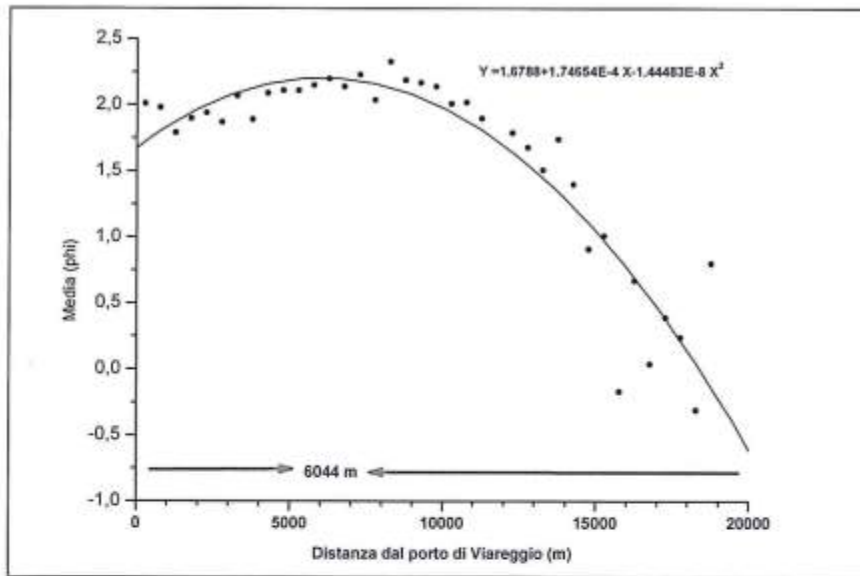


Figura 7 - Variazione del valore delle dimensioni medie dei sedimenti lungo riva. Il valore massimo della funzione interpolante si ha a 6044 m dal porto di Viareggio.

le in cui è ancora attivo il flusso diretto verso nord. La zona di convergenza dei due flussi viene quindi ad essere definita dal punto in cui si ritrovano le dimensioni minori dei materiali.

Analizzando i dati relativi alle dimensioni del 1° percentile, ossia degli elementi più grossolani presenti nella distribuzione granulometrica, ed interpolando i punti sempre con una curva di secondo ordine (Fig. 8) si osserva, pur nella maggiore dispersione dei punti, una concordanza di risultati, con le dimensioni maggiori raggiunte a 5774 m dal porto di Viareggio.

In questo processo di trasporto, con la graduale perdita degli elementi più grossolani che si muovono a velocità minore, e quella delle frazioni più fini che vengono disperse verso il largo, si ha una riduzione del range dimensionale delle sabbie che si ripercuote sui valori della Classazione ( $\sigma_1$ ). La distribuzione dei punti nella Figura 9, ed in particolare la funzione interpolante di secondo grado,

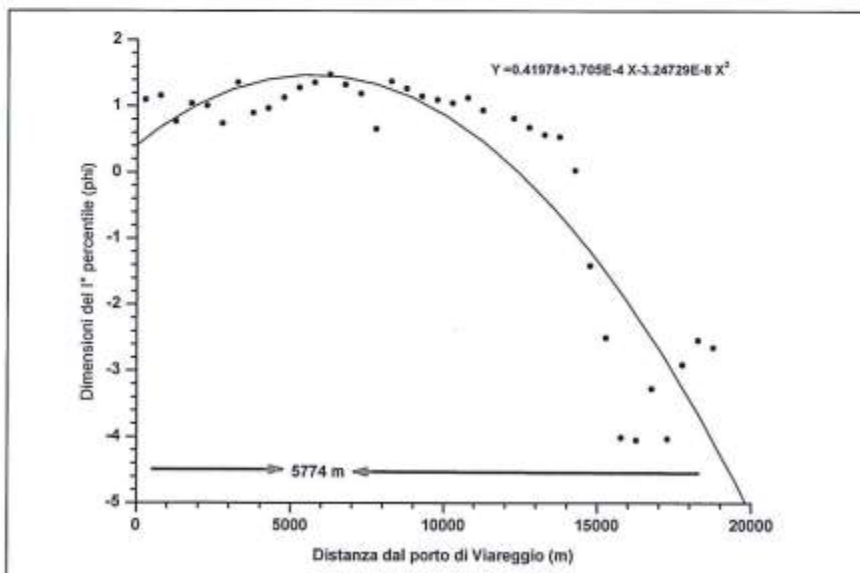


Figura 8 - Variazione delle dimensioni del 1° percentile dei sedimenti lungo riva. Il valore massimo della funzione interpolante si ha a 5774 m dal porto di Viareggio.

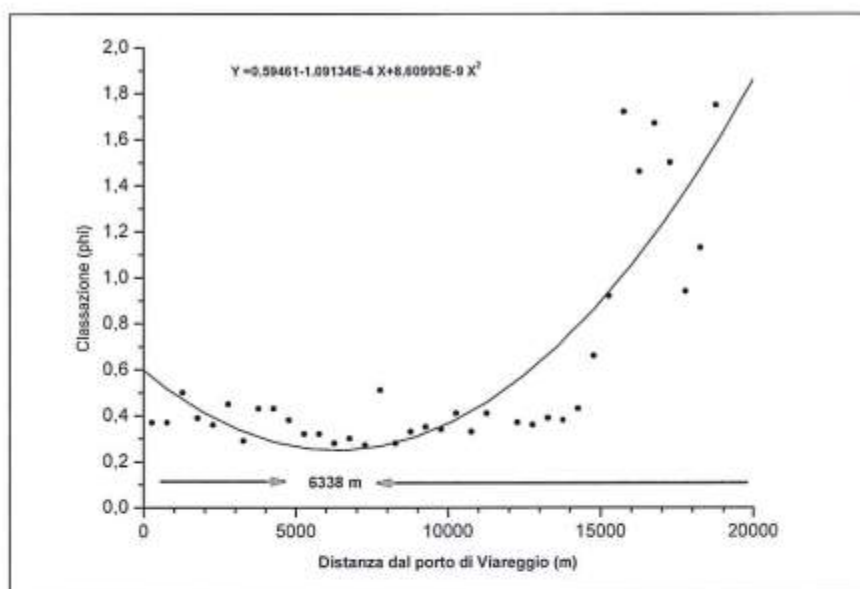


Figura 9 - Variazione del valore della Classazione ( $\sigma$ ) dei sedimenti lungo riva. Il valore minimo della funzione interpolante si ha a 6338 m dal porto di Viareggio.

mostra infatti un trend inverso, con il valore minimo (Classazione massima) a 6338 metri dal porto di Viareggio.

Questi dati confermano la presenza di una zona di convergenza e la pongono fra la foce del Fosso Motrone e quella del Fosso Fiumetto, ossia in corrispondenza della spiaggia di Marina di Pietrasanta. Analizzando i dati granulometrici della spiaggia sommersa il quadro appare meno chiaro, in quanto si sovrappongono tendenze *cross-shore* indipendenti dalle direzioni di flusso, come quella che porta ad avere sedimenti più fini procedendo in profondità.

L'analisi viene qui effettuata per i singoli parametri confrontandone il valore fra campioni adiacenti per ottenere direzioni di riduzione delle dimensioni medie ( $Mz$ ) e di quelle del Primo percentile, nonché di un miglioramento della Classazione (valori di  $\sigma$  minori) ed applicando poi ai vettori risultanti un filtro "passa-basso" per eliminare il rumore ed evidenziare le tendenze a scala regionale.

La carta dei vettori relativi alle dimensioni medie ( $Mz$ ) dei sedimenti mostra un prevalente flusso *cross-shore* che tende a mascherare ogni altra direzione; è comunque possibile percepire una componente meridionale da Marina di Ronchi a Forte dei Marmi ed una opposta nel tratto successivo, con una evidente convergenza fra il Lido di Camaiore e la Foce del Fosso Fiumetto.

Più complessa è la carta relativa alle dimensioni del I° percentile, anche se sono visibili simili tendenze; in questa elaborazione è evidente il flusso di sedimenti che supera il porto di Viareggio per alimentare le spiagge della Versilia.

La carta dei vettori relativa alla Classazione ( $\sigma$ ) è meno condizionata dagli apparenti flussi ortogonali a riva, ma mostra condizioni estremamente differenziate, nelle quali rimane comunque visibile una tendenza dei vettori a confluire, in questo caso, fra Focette e il Fosso Fiumetto.

Le direzioni del flusso di sedimenti possono essere identificate anche attraverso il confronto contemporaneo dei parametri granulometrici Media ( $Mz$ ), Classazione ( $\sigma$ ) ed Asimmetria ( $Sk$ ) di ciascun campione con quelli dei campioni limitrofi. Il metodo qui utilizzato è quello proposto da Gao e Collins (1992), ed anche in questo caso è stato applicato un filtro passa-basso ai vettori risultanti.

I vettori di trasporto (Figura 10) mostrano un sistema di micro-cellule, alcune delle quali molto ben definite, che si succedono lungo la costa ogni 2 - 3 km. Una cellula particolarmente sviluppata è presente fra la foce del Fosso dell'Abate e Lido di Camaiore, con un flusso *offshore* assai marcato, ma la cui associazione alla zona di convergenza può non essere certa.

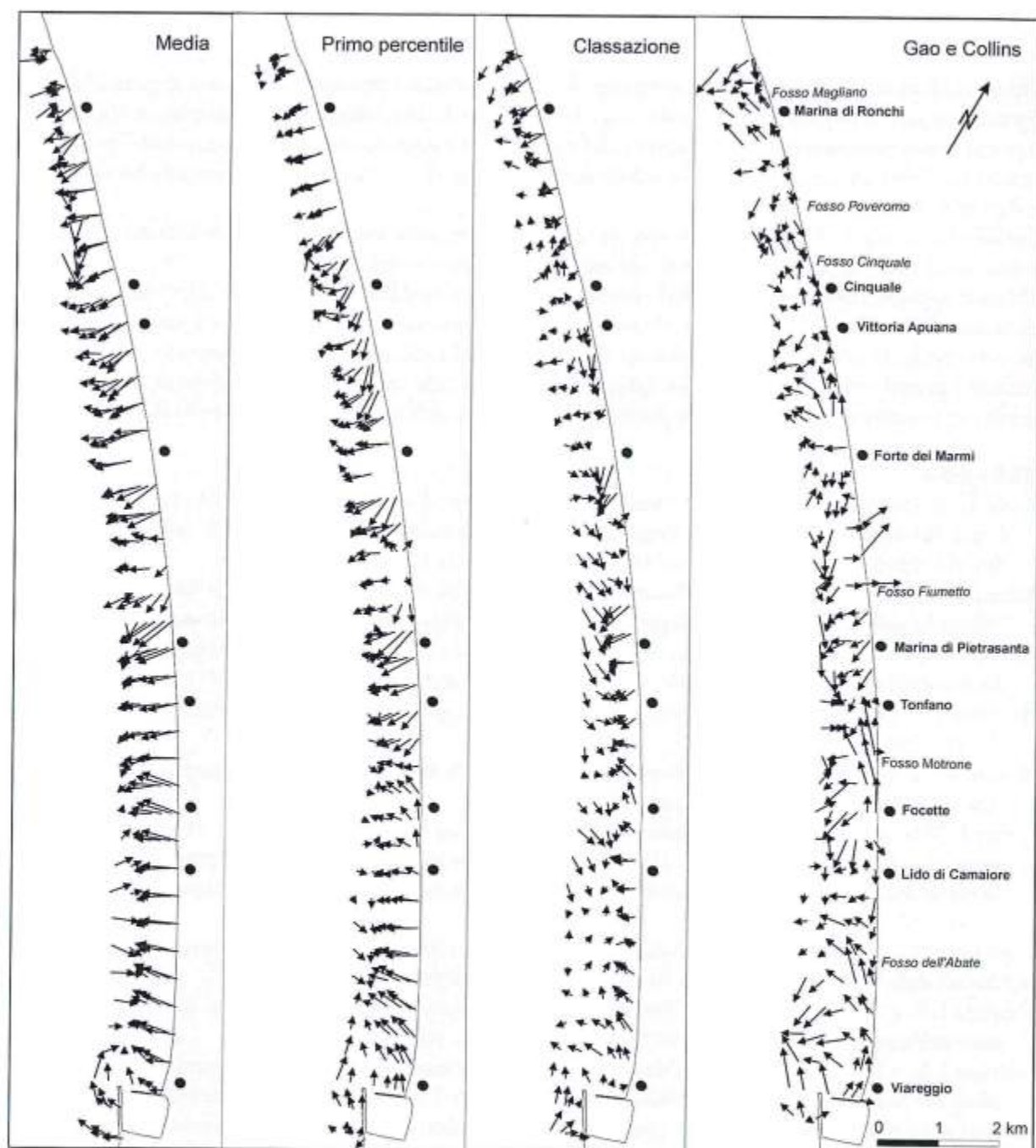


Figura 10 - Vettori di flusso tracciati sulla base del confronto fra i parametri tessiturali di campioni adiacenti e successivamente oggetto di filtraggio "passa basso" per evidenziare le tendenze regionali.

### Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva, della morfologia dei fondali e delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa consente di identificare una convergenza dei flussi sedimentari in prossimità di Marina di Pietrasanta, dove si registra la massima progradazione della costa dal 1938 al 1998, una forte pendenza dei fondali, un minimo nelle dimensioni medie ( $Mz$ ) dei sedimenti e delle dimensioni del 1° percentile ed un massimo della Classazione (valori di  $\sigma_1$  minimi).

Questi risultati concordano con quanto emerge dall'analisi dei flussi potenziali lungo riva derivati dall'analisi dell'energia del moto ondoso (Aminti et al., 1999), che indicano nella spiaggia di Marina di Pietrasanta il punto di azzeramento dei flussi risultanti e definiscono con maggiore dettaglio la "zona neutra" precedentemente individuata con osservazioni morfologiche (Fanucci et al., 1976) ed analisi petrografiche (Gandolfi e Paganelli, 1975).

L'analisi tessiturale si dimostra quindi uno strumento efficace nello studio delle cellule litoranee, in particolare in un tratto di costa esposto in modo omogeneo al moto ondoso.

Qui non appaiono processi di *downdrift coarsening* che altrove rendono problematica l'interpretazione delle variazioni della Classazione (Cipriani e Stone, 2001); nel nostro caso l'aumento di  $\sigma$  nel senso del trasporto in entrambe le cellule litoranee è dovuto alla selezione dei sedimenti durante il trasporto e consente di scartare l'ipotesi che l'espansione della spiaggia sia dovuta anche ad un input di sedimenti esterni, quali quelli che possono essere migrati sulla piattaforma per effetto dell'innalzamento del livello del mare.

### Bibliografia

- Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1976) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1519-1571.
- Albani D. (1940) - *Le spiagge della Toscana settentrionale dalla foce del fiume Magra ai Monti Livornesi*. In "Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane. II - Le spiagge toscane", C.N.R., Roma, pp. 11-86.
- Aminti P., Iannotta P. e Pranzini E. (1999) - *Morfodinamica di un sistema costiero intensamente protetto: il litorale di Marina di Massa* - Atti dei Conv. Lincei, 154: 263-270.
- Bartolini C. e Pranzini E. (1977) - *Tracing nearshore bottom currents with sea-bed drifters*. Marine Geology, 23: 275-284.
- Bowen A.J. e Inman D.L. (1966) - *Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California*. US Army CERC Tech. Memo, n. 19, pp 56.
- Carter R.W.G. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, Londra, pp.,617.
- Chiabrera G., Corradi N. e Fierro G. (1980) - *Le barre della spiaggia sottomarina del litorale toscano (classificazione morfogenetica su base aerofotografica e rilievi batimetrici)*. Atti dell'Accademia di Scienze e Lettere, 37: 3-17.
- Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi costieri, 4: 119-156.
- Cipriani L.E. e Pranzini E. (1998) - *Erosione costiera ed evoluzione recente delle spiagge*. In "Rapporto sullo stato dell'ambiente in Toscana - 1997". Regione Toscana - ARPAT. pp. 177-183.
- Cipriani L.E. e Stone G.W. (2001) - *Net longshore sediment transport and textural changes in beach sediments along the Southwest Alabama and Mississippi Barrier Island, USA*. Journ. Coastal Research, 17: 443-458.
- Cooper N.J., Hooke J.M. e Bray M.J. (2001) - *Predicting coastal evolution using a sediment budget approach: a case study from southern England*. Ocean & Coastal Management, 44: 711-728.
- Fanucci F., Fierro G. e Piccazzo M. (1976) - *Caratteri geomorfologici e sedimentologici del litorale*. In : Programma Speciale per la Conservazione del Suolo - Ricerche sul Regime e la Conservazione dei Litorali, Rapporto 1976. A cura di L. Versino. CNR, Quaderni de La Ricerca Scientifica, 92: 80-88.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journ. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale pisano-versiliese (Area campione Alto Tirreno)*. Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1273-1295.

- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedim. Geol., 81: 47-60.
- Garzanti E., Canclini S., Moretti Foggia F., Petrella N. (2001) - *Upraveling magmatic and orogenic provenances in modern sands: the back-arc side of the Apennine thrust-belt (Italy)*. Journ. Sedim. Petrol. 72: 2-17.
- Gulliver F.P. (1896) - *Cuspate forelands*. Geol. Soc. America Bull., 7: 399-422.
- Jennings J.N. (1955) - *The influence of wave action on coastal outline in plan*. Australian Geogr., 6: 36-44.
- King C.A.M. (1972) - *Beaches and coasts*. Edward Arnold, Londra, pp.570.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. Journ. Sedim. Petrol., 4: 65-77.
- Kunte P.D. (1994) - *Sediment transport along the Goa-Nort Karnataka coast, Western India*. Marine Geology, 118: 207-216.
- Lowry P. e Carter R.W.G. (1982) - *Computer simulation and delimitation of littoral power cells on the barrier coast of Southern Wexford, Ireland*. Journ. Earth Sci. R. Dubl. Soc., 4: 121-132.
- Mazzanti R. e Pasquinucci M. (1983) - *The evolution of the Luni-Pisa coastline (II cent. B.C. - second half of the XIX cent.)*. In: Coastal problems in the Mediterranean Sea, E.C.F. Bird and P. Fabbri Eds, IGU, Commission on Coastal Environment, Bologna 10-14 May 1982.
- McCave I.N. (1978) - *Grain-size trends and transport along beaches: examples from Eastern England*. Marine Geology, 28: M43-M51.
- McLaren P. (1981) - *An interpretation of trends in grain size measures*. Journ. Sediment. Petrol., 51: 611-624
- Milano V. e Di Martino F. (1981) - *Erosione della spiaggia di Viareggio: proposta di intervento*. Porti Mare Territorio, 2: 57-71.
- Saggini F. (1967) - *Morfologia costiera e trasporto detritico marino sul litorale della Provincia di Livorno*. Atti Conv. Difesa del litorale toscano. Amm. Prov. Pisa. Pp. 59-69.
- Schwartz M.L. (1966) - *Fluorescent tracers: transport in distance and depth in beach sands*. Science, 151: 701-702.
- Tanner W.F. (1982) - *Beach in plan view*. In Encyclopedia of beaches and coastal environments; a cura di M.L. Schwartz, Hutchinson Ross Publ. Co., Stroudsburg, Pennsylvania, pp. 150-153.
- Trask P.D. (1952) - *Sources of beach sand at Santa Barbara, California, as indicated by mineral grain studies*. US Army Corps of Engineers, Beach erosion Board Tech. Memo, pp. 28.

Manoscritto ricevuto il 30/4/2004, accettato il 29/7/2004.

**Tesi di laurea**



## Sviluppo di un modello numerico di tipo parabolico per la propagazione di moto ondoso in presenza di correnti

*Tesi di laurea di:* Claudia D'Eliso

*Relatore:* Pierluigi Aminti

*Correlatori:* Luigi Montefusco e Lorenzo Cappiotti

Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Civile,  
Anno Accademico 2002-2003.

Tradizionalmente, negli interventi di gestione della costa di piccola e media entità, l'altezza d'onda di progetto viene stimata valutando separatamente la rifrazione e la diffrazione, supponendo dominante uno dei due fenomeni e trascurando l'altro. Anche la riflessione, quando presente, viene valutata senza tenere conto degli altri fenomeni. Inoltre, non si descrive l'andamento dell'altezza d'onda nella zona dei frangenti, ma si determina solamente il valore massimo di altezza (punto di frangimento) e si trascurano tutte le altre forme di dissipazione dell'energia e la presenza di correnti.

Nei casi reali, la valutazione dell'altezza d'onda sottocosta, dove spesso si collocano le strutture di protezione e di utilizzo a fini ricreativi e commerciali, non dovrebbe prescindere da una descrizione precisa del campo d'onda, né dalla presenza di correnti.

Da diversi anni ormai è possibile tenere conto di questi fenomeni in modo agevole e senza particolari oneri computazionali, mediante modellazione numerica.

Il modello proposto, noto il moto ondoso a largo (altezza, periodo e angolo di incidenza), descrive il campo d'onda su un'assegnata batimetria; sulla base di una descrizione lineare del moto ondoso, riproduce la rifrazione-diffrazione combinata, il frangimento e la dissipazione di energia per attrito al fondo. La riflessione dovuta alla presenza di strutture non trasparenti non può essere riprodotta, per la natura parabolica delle equazioni.

Il modello si basa sulla risoluzione dell'equazione proposta da Kirby (1986). Questa equazione deriva dalla *Mild Slope Equation* ricavata da Berkhoff (1972) e successivamente modificata da Booij (1981), per tenere conto delle correnti, e da Kirby (1983), per tenere conto della dissipazione di energia. La *Mild Slope Equation* descrive la propagazione di un treno di onde sulla base della teoria lineare e sotto le ipotesi di *mild slope* e *large-scale currents* (fondale e campo di correnti debolmente variabili entro una lunghezza d'onda). L'equazione di Kirby (1986) rappresenta una approssimazione parabolica della *Mild Slope Equation* che viene ridotta ad un'equazione differenziale di tipo parabolico sfruttando la derivazione proposta da Booij (1981). Per ottenere l'approssimazione parabolica si suppone di poter trascurare la riflessione. La dissipazione viene valutata introducendo una opportuna funzione che dipende dall'energia dissipata. Il frangimento viene valutato con il criterio di Battjes et Janssen (1978), mentre l'attrito al fondo con la relazione di Putnam et Jonsson (1949).

I coefficienti dell'equazione si determinano risolvendo la relazione di dispersione su tutta la batimetria assegnata. L'equazione viene risolta per via numerica con metodi alle differenze finite. In particolare per l'equazione di Kirby (1986) è stato sfruttato lo schema di Crank-Nicolson, adatto a equazioni differenziali di tipo parabolico. Il dominio di calcolo è rettangolare. Le strutture emergenti, la linea di riva e l'eventuale zona di spiaggia emersa sono modellate con la tecnica del *Thin Film* (Kirby



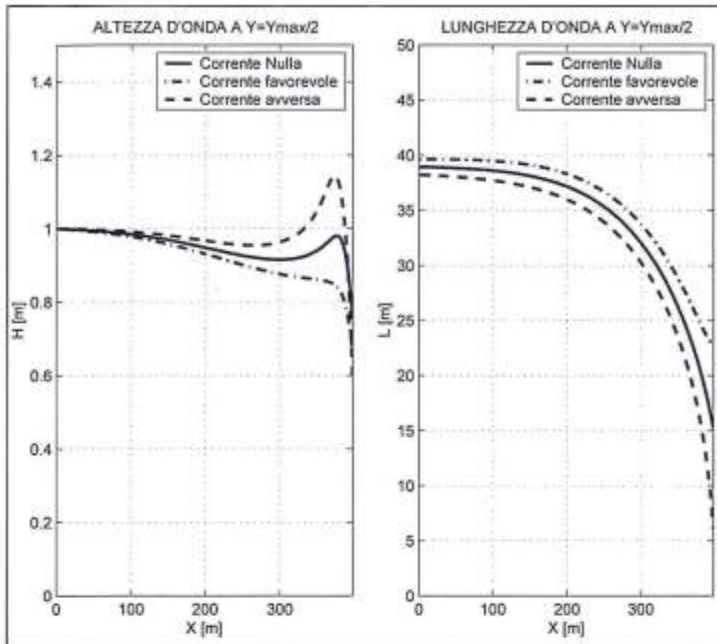


Figura 1 - Influenza della corrente sull'altezza e la lunghezza d'onda.

I risultati concordano pienamente con quanto noto dalla teoria lineare; una corrente favorevole riduce la ripidità dell'onda, una corrente avversa incrementa la ripidità dell'onda, talvolta fino al frangimento e al *wave blocking*.

Un modello di questo tipo, basato su equazioni ormai ben note e studiate, presenta ancora margini di miglioramento; da un lato la ricerca di nuove forme di approssimazione parabolica che migliorino la soluzione e riducano il rumore indotto da alcune configurazioni del fondale (Kirby, 1986), dall'altro lo studio dell'implementazione della funzione di dissipazione per affinare la descrizione della zona dei frangenti. In effetti, Mordane et al. (2004) hanno ricavato recentemente una nuova forma di approssimazione parabolica della *Mild Slope Equation* di Berkhoff (1972).

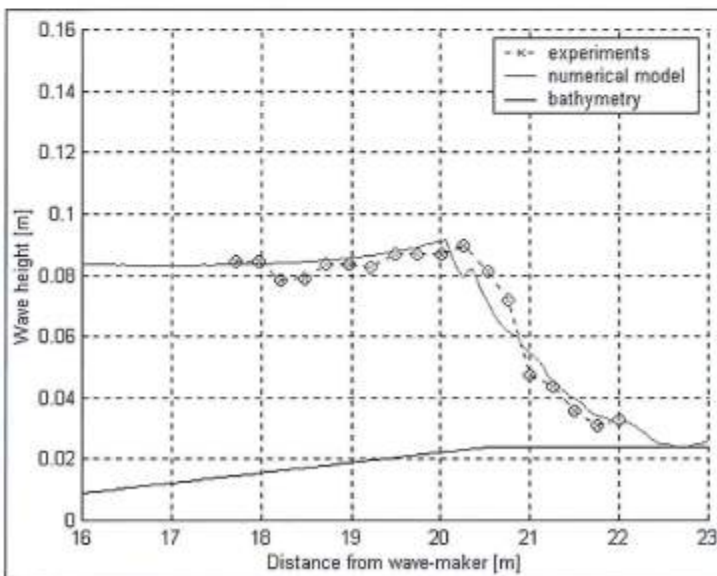


Figura 2 - Confronto tra i risultati numerici e sperimentale.

et Darlymple, 1986): si assegna a queste zone una profondità d'acqua simbolica e arbitraria, dell'ordine del cm. La dissipazione viene inserita a posteriori. L'equazione fornisce i valori di ampiezza d'onda su tutta la batimetria assegnata. L'ampiezza è espressa in forma complessa e contiene informazioni che riguardano anche la fase dell'onda. Il modello non è applicabile all'interno di bacini portuali o baie naturali dove la riflessione diventa preponderante. Nelle altre configurazioni batimetriche è possibile riprodurre correttamente la propagazione di moto ondoso e l'interazione tra onde e correnti. In particolare sono stati valutati gli effetti della corrente sulla rifrazione e sul frangimento dell'onda. In Figura 1 il modello riproduce gli effetti della corrente sulla ripidità dell'onda.

Nell'ambito di questo lavoro, invece, l'output del modello è stato confrontato con i risultati di esperimenti condotti da Cappietti (2003) nel canale del Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze. Nel canale, a fondo fisso, le onde sono propagate in presenza di correnti avverse. I risultati mostrano che si raggiunge un buon accordo tra modello numerico e andamento sperimentale solo se si calibrano i parametri del criterio di frangimento implementato (Fig. 2) e che l'implementazione della funzione di dissipazione è uno dei punti più delicati della modellazione.

## Pericolosità e Rischio Ambientale nella Baia di Torre San Leonardo - Torre Canne (Brindisi)

*Tesi di laurea di:* Cosimo Pignatelli

*Relatore:* Giuseppe Mastronuzzi

Università degli Studi di Bari - Sede Decentrata di Taranto, Corso di Laurea in Scienze Ambientali  
Anno Accademico 2001-2002

Il presente lavoro di tesi è rivolto alla valutazione del rischio ambientale indotto dall'impatto di mareggiate e tsunami in un'area test della costa adriatica pugliese, fra le località di Torre Canne e Torre San Leonardo (Brindisi). Tale scelta è stata dettata dalla concomitante presenza di aree ad alto valore naturalistico e dalla concentrazione di attività turistico-economiche rese possibili proprio dalla bellezza dei luoghi e dalle caratteristiche naturali degli stessi. La dinamica di questo tratto di costa è attualmente caratterizzata da elevata instabilità del sistema spiaggia dovuta sia alla alta concentrazione di attività antropiche che alle condizioni meteomarine. Lo studio è stato condotto in varie fasi nell'ambito delle quali sono stati analizzati i diversi elementi che contribuiscono a definire la dinamica costiera, quali le componenti geomorfologiche, quelle meteomarine e, non secondarie, quelle antropiche. La baia di Torre Canne, ampia circa 6 km, situata ai piedi della scarpata murgiana fra Ostuni e Fasano, è modellata sulla *Calcarenite di Gravina*. Su questa, lungo costa, poggiano sottili spessori di depositi marini bioclastici pleistocenici a costituire il più basso dei terrazzi disposti lungo il versante adriatico delle Murge secondo una gradinata fra la quota 120 m circa e il mare, risposta dell'interazione fra il sollevamento generale della regione e le variazioni glacioeustatiche. La spiaggia è bordata verso l'interno da un cordone dunare, alto sino a 9 m, risultato della sovrapposizione di più fasi eoliche nel corso dell'Olocene. Morfologicamente la baia è definita dai due promontori rocciosi; essi hanno avuto un ruolo determinante nella formazione dell'intera spiaggia, sia definendo una trappola per il sedimento, sia contribuendo al ripascimento della stessa con la loro demolizione da parte del moto ondoso. Della spiaggia e dei primi fondali sono stati rilevati i caratteri morfologici e morfobatimetrici; particolare accento è stato posto nella valutazione dello stato di conservazione del corpo dunare la cui originale continuità è ormai interrotta dall'apertura di varchi artificiali. Le analisi dei caratteri meteomarini (regime anemometrico, mareggiate, propagazione del moto ondoso, etc.) sono state effettuate utilizzando come base le registrazioni sinottiche triorarie fornite dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (ITAV) della stazione di Brindisi-Casale, relative al periodo 1951-1998. La fase di elaborazione ha richiesto la realizzazione di un foglio elettronico che ha permesso di trattare i dati (medie, frequenze percentuali, etc.); per sintetizzare il quadro della situazione anemometrica del paraggio sono stati realizzati diagrammi a siringa. I venti che condizionano la dinamica costiera del basso adriatico sono essenzialmente quelli da Nord; fatta eccezione per i periodi di calma, che presentano una frequenza del 17,2 %, il Maestrale è il vento più frequente, seguito dallo Scirocco con il 15,2 %, dalla Tramontana con il 14,8 %. Seguono, con percentuali inferiori, tutti gli altri venti. Per ognuna delle classi della scala Beaufort (0 = calma; 12 = Uragano) sono state analizzate le registrazioni corrispondenti all'intensità di vento relativa per ciascun anno limitatamente alle sole classi da 4 (corrispondente a Vento Moderato) a 12; sono queste quelle che inducono sensibili variazioni della linea di riva. Dall'analisi è emerso che le mareggiate più

pericolose negli ultimi venti anni (classi Beaufort 6-10) sono diminuite. La redazione della carta dell'uso del suolo e del territorio ha permesso di individuare, nell'area retrodunare, una serie di zone fra loro contigue e adiacenti allo stesso corpo dunare, con definiti caratteri di uso: agricolo, residenziale (annuale, stagionale e turistico), ricreativo. Ciascuna di queste aree ha diverso peso nel bilancio complessivo del rischio, tanto per il suo valore quanto per la differente esposizione agli agenti esogeni. Il litorale esaminato è sottoposto a diverse manifestazioni morfodinamiche potenzialmente pericolose (erosione delle spiagge, alluvioni convogliate dal reticolo idrografico, mareggiate consistenti dovute a particolari caratteristiche meteomarine, etc.). Il litorale è stato suddiviso in lotti o *patches* omogenei individuando aree turistiche - camping, spiagge attrezzate -, nuclei urbani, aree naturali (laghi costieri, zone umide, macchia mediterranea), aree agricole (colture specializzate, graminacee, orti, vivai). Per quantificare il rischio è stato necessario effettuare delle stime quantitative e/o qualitative dei fattori che lo definiscono: Vulnerabilità, Pericolosità e Valore del territorio. Ognuno di questi fattori è il bilancio di più valutazioni specifiche (il numero di vite umane, di aree civili, di siti produttivi esposti al pericolo) prima di poterne esprimere numericamente il valore. Per tanto è stato adoperato un metodo di previsione con l'utilizzazione di matrici bidimensionali, ognuna delle quali ha fornito un valore ponderale per l'identificazione del rischio. La prima di queste è la matrice Valore del Territorio (V) che è stata rappresentata su quattro componenti: 1) n. di vite umane: le persone che potenzialmente possono essere presenti in un lotto; il valore è calcolato per il periodo primaverile/estivo in quanto si prevede che in questo periodo si abbia il maggior afflusso turistico; 2) opere di edilizia civile e strutture turistiche: indica la presenza o l'assenza di edifici civili e turistici. Poiché ciascun edificio ha un valore economico-paesaggistico e/o storico, a questa colonna viene attribuito un valore che stima il numero di edifici esposti al rischio; 3) aree naturali: valore espresso in ettari; 4) aree agricole ad uso produttivo anch'esse espresse in ettari. Si è quindi individuata la matrice relativa alla Vulnerabilità del territorio (U), anch'essa suddivisa in colonne. In questa matrice è stata correlata la percentuale di territorio perdibile in funzione del manifestarsi parossistico di un evento morfogenetico con gli elementi del paesaggio naturale o antropico che costituiscono ostacolo o vie preferenziali al suo impatto. La prima colonna esprime le caratteristiche medie (lunghezza, altezza e larghezza) del sistema dunare che costituisce protezione esprimibile in funzione delle dimensioni. Quindi è stata stimata la presenza di discontinuità nel corpo dunare; esse possono diventare significative, nel caso di mareggiate eccezionali, quali vie preferenziali di *overwash* verso l'interno, oppure quali fattori di erosione per la perdita di sabbia verso la zona retrodunare. Per questo fattore di vulnerabilità sono stati indicati, per ciascun lotto, il numero di varchi esistenti e la loro ampiezza in metri. La quarta colonna "distanza dall'area esposta al pericolo" descrive, in termini quantitativi, la distanza della linea di riva attuale dalle aree retrodunali. Essendo la linea di riva suscettibile a variazioni istantanee dovute alla marea e/o al moto ondoso, questo valore è stato stimato utilizzando profili rilevati nell'arco di un anno, corretti della marea. La quinta colonna, denominata "opere di protezione artificiali" individua l'assenza o la presenza di strutture artificiali che proteggono la costa dalle mareggiate. Nella valutazione della pericolosità è stato attribuito un valore ponderale ad ognuno dei principali fattori marini di pericolo cui è sottoposto il litorale: le mareggiate e gli *tsunami*. Il pericolo da *tsunami* nella zona studiata, ha una percentuale bassa, ma non trascurabile in quanto esistono evidenze morfologiche della loro ricorrenza in tempi storici ed attuali. L'ultimo evento di maremoto registrato lungo la costa adriatica della Puglia risale, infatti, solo all'estate del 1978. In questa occasione le cronache riportano un brusco abbassamento del livello del mare ed una successiva onda anomala che provocò solo danni materiali ad imbarcazioni da diporto lungo costa. Per quanto riguarda le mareggiate eccezionali, avendo a disposizione dati anemometrici degli ultimi 50 anni circa, si è potuto calcolare il numero di eventi pericolosi, intesi come mareggiate con velocità del vento maggiore di 11 nodi marini, per ciascun anno. Lo studio delle durate medie ha permesso di individuare tre diversi gradi di pericolosità. Lo studio dei caratteri geomorfologici, meteomarine e paesistici ha permesso di stimare il valore del rischio ambientale rispetto alle componenti meteomarine in maniera piuttosto ben definita.

## Norme per gli Autori

**Studi costieri** pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

**Studi costieri** pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

**Titolo** - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Titolo corrente** - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Autore/i** - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

**Riassunto** - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Parole chiave** - Inserire 5 - 8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

**Abstract** - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

**Key-words** - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

**Stile** - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi. Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

**Formule** - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (copro 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figure o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

**Tabelle** - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 11. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

**Figure (fotografie, schemi, diagrammi)** - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

---

**Note a piè di pagina** - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

**Riferimenti bibliografici** - Nell'articolo le citazioni sono racchiuse fra ( ) con il seguente formato: (Verdi, 1990) o (Rossi e Verdi, 1989); (Verdi et al, 1987) qualora il numero degli Autori sia maggiore di due. Se citato nell'ambito di una frase il nome di un Autore (1995) è seguito dall'anno della pubblicazione a cui si fa riferimento.

**Bibliografia** - Tutti e solo i lavori citati nel testo devono comparire in Bibliografia. La Bibliografia deve essere in ordine alfabetico per cognome; es.:

Bianchi A., Rossi V. e Verdi T. (1999) - *Nuovi metodi di difesa dei litorali*. Studi costieri, 19: 153-157. (19 è il numero del fascicolo, 153-157 le pagine).

Neri A. e Rossi C. (1978) - *Elementi di geomorfologia costiera*. Nessuno Ed., Roma. pp.324.

Violi K. (1998) - *Il ripascimento dei litorali in Italia*. Atti XXI Congr. Soc. Ital. Geomorfologia. Bari. pp. 34-76.

Evitare di usare AA.VV., anche se il numero degli Autori è elevato.

**Versione definitiva** - Il file contenente la versione definitiva dell'articolo, in Word per Windows, deve essere inviato dopo la comunicazione di accettazione del manoscritto. Il testo non deve essere giustificato e, fatta eccezione per le formule scritte con l'editore specifico, può essere scritto con qualsiasi carattere.

Le didascalie delle figure (grafici e foto) dovranno essere inserite nel testo nel punto più opportuno.

Le figure dovranno essere inviate in file separati (.tif o .jpg a 300 DPI) e salvate con il nome del primo Autore seguito da Fig n (es. Rossi Fig 1.tif). Figure costituite da più parti devono essere montate dagli Autori in un file unico.

**Altre informazioni** - Nella preparazione degli articoli si tenga conto del fatto che una buona impaginazione necessita di un elevato rapporto testo/figure. Anche se gli Autori non devono procedere all'impaginazione dell'articolo, è bene che operino in modo tale da facilitare l'inserimento di ciascuna Figura dopo il rispettivo richiamo. Analogo discorso vale per le Tabelle.

**Diritti d'autore** - Nella lettera di accompagnamento del manoscritto gli autori, o anche uno solo di essi, devono dichiarare che quanto contenuto nell'articolo è di loro proprietà e che autorizzano l'Editore a pubblicare tutto il materiale da loro inviato. Nel caso di utilizzazione di figure tratte da altra pubblicazione gli Autori dovranno inviare l'autorizzazione alla stampa dell'Editore proprietario dei diritti. Analogamente deve essere fatto per riprese aeree e per la cartografia.

Il Direttore della collana si ritiene autorizzato ad utilizzare gli articoli per eventuali ristampe o per l'edizione di volumi tematici. Di ciò verrà comunque data notizia agli Autori.

**Estratti:** È prevista la stampa di 100 estratti per ciascun articolo. Agli Autori è richiesto un contributo di 26 +IVA per pagina pubblicata sulla Rivista. Gli Autori sono pregati di inviare, insieme alle bozze corrette, le indicazioni necessarie per l'intestazione della nota di debito.

I manoscritti devono essere inviati alla

**Redazione di Studi costieri**  
c/o Dipartimento di Scienze della Terra  
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze  
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2479741  
E-mail: epranzini@unifi.it

**Segreteria del Comitato scientifico di Studi costieri**  
c/o Dipartimento di Ingegneria civile  
Via Santa Marta, 4 - 50139 Firenze  
Tel. 055 4796224 Fax 055 495333  
E-mail aminti@dicea.unifi.it