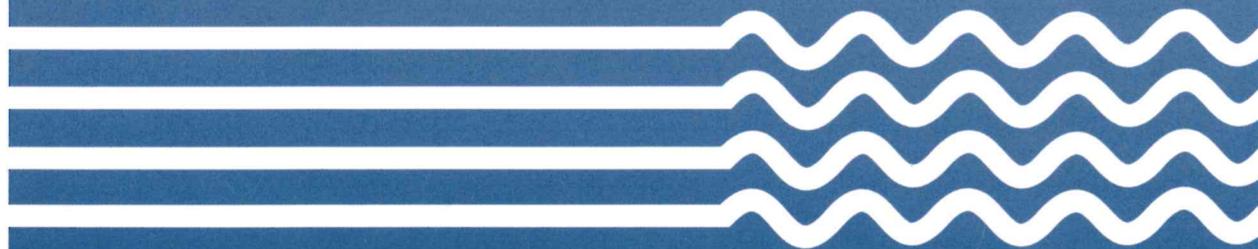


Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 7
2003



Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra

Via J. Nardi 2 - 50132 Firenze

Tel. 055 243486 - Fax 055 241595

E-mail epranzini@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

Paolo Boccotti - Reggio Calabria

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

IGP INDUSTRIE GRAFICHE PACINI

Via Gherardesca

56121 Ospedaletto (Pisa)

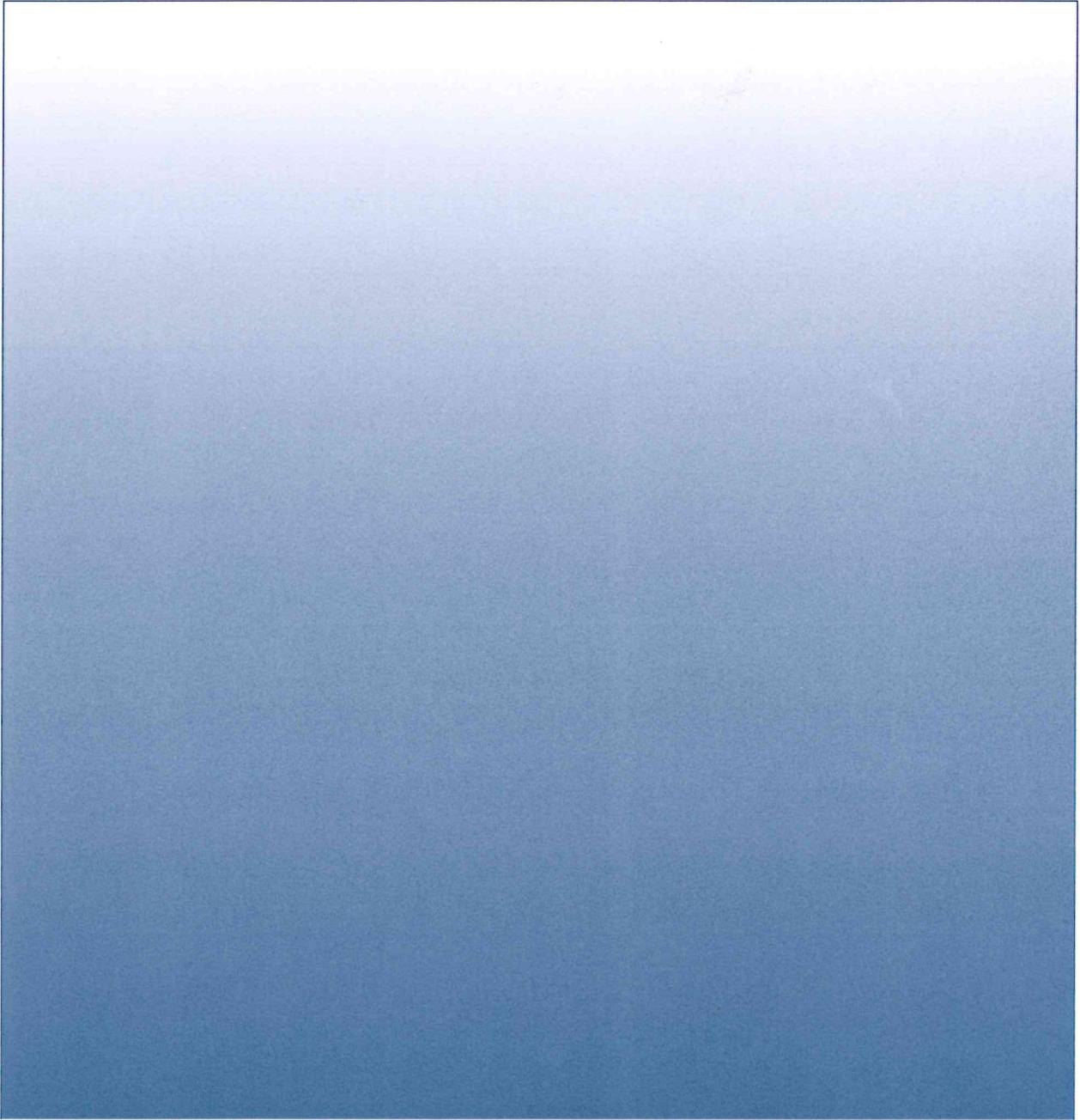
Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 7

Indice

Caratteri morfo-sedimentologici dei fondali della baia di Torre Canne (Brindisi, Puglia)	pag.	3-19
Raffaele Annese, Antonio De Marco, Francesco Gianfreda, Giuseppe Mastronuzzi e Paolo Sansò		
Caratterizzazione geochimica ambientale di alcuni litorali della Sardegna sud-orientale	pag.	21-39
Concetta Ferrara, Anna Maria Caredda, Alessandro Cristini e Guido Alberti		
Prove sperimentali sul comportamento di una scogliera a cresta bassa e sul fenomeno del piling-up a tergo di essa	pag.	41-59
Piero Ruol, Alberto Faedo e Alessandro Paris		
Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna	pag.	61-80
Andrea Atzeni		
Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo	pag.	81-93
Umberto Simeoni, Carlo Del Grande e Giovanni Gabbianelli		
Approccio gestionale dell'area costiera del Parco del Delta del Po Emiliano-Romagnolo	pag.	95-105
Simona Gragnaniello e Lucilla Previati		
Tesi	pag.	107-112
Norme per gli Autori	pag.	113-114



ISSN 1129-8588

Caratteri morfo-sedimentologici dei fondali della baia di Torre Canne (Brindisi, Puglia)

Raffaele Annese¹, Antonio De Marco², Francesco Gianfreda³,
Giuseppe Mastronuzzi¹ e Paolo Sansò⁴

¹ Dipartimento di Geologia e Geofisica, Università degli Studi, Bari (Italy);

² Dipartimento Geomineralogico, Università degli Studi, Bari (Italy);

³ Geo Data Service s.r.l., Via Schilardi, 16, Maglie (Lecce) (Italy);

⁴ Dipartimento di Scienze dei Materiali, Università degli Studi, Lecce (Italy).

Riassunto

Lo studio dei fondali della baia compresa fra Torre Canne e Torre San Leonardo, lungo la costa adriatica della Puglia, in provincia di Brindisi, ha permesso di riconoscerne le caratteristiche morfo-sedimentarie principali. Esso è stato condotto in tre fasi distinte: il rilevamento subacqueo indiretto mediante strumentazione a bordo di mezzo nautico leggero; rilevamento subacqueo diretto mediante immersioni A.R.A.; analisi dei sedimenti. I fondali mostrano caratteristiche omogenee evidenziate da un'estesa e continua superficie fra il livello del mare e l'isobata 35 m e da un'altra a profondità maggiori di 45 m. L'andamento delle isobate è subparallelo alla linea di riva attuale e la monotonia dei fondali è interrotta da canali orientati verso il largo, proseguimento subacqueo del sistema di *sapping valleys* - localmente dette lame - riconosciuto sulla terraferma.

Vi si riconoscono tre fasce subparallele: la prima, sino alla profondità di 8/12 m, segnata da sabbie medie grossolane e da estesi affioramenti di calcareniti con biocenosi delle alghe fotofile (AP); la seconda, fra gli 8/12 e i 15/17 m di profondità, caratterizzata da prateria di *Posidonia oceanica* (HP) in evidente stato di erosione; la terza, oltre i 16/18 m di profondità, caratterizzata da banchi coralligeni (C).

I sedimenti presenti sui fondali oltre i 5/6 m di profondità mostrano prevalenza delle frazioni di chiara origine biogenica. I sedimenti presenti a profondità minori mostrano il prevalere di materiale proveniente dalla demolizione delle calcareniti in affioramento lungo la costa e di minerali pesanti. La distribuzione dei sedimenti e di alcuni elementi traccianti, rappresentati da sabbie eoliche riconosciute lungo lo *shoreface*, messa in relazione con la diffusa erosione del corpo dunare nelle aree settentrionali della baia, indica una deriva generale diretta da NO verso SE.

Il porto di Torre Canne appare in evidente fase di interrimento ad opera di sedimenti fini lì interpolati a seguito della rifrazione del moto ondoso proveniente dai quadranti settentrionali e della deriva secondaria da SE.

Parole chiave: rilevamento subacqueo, morfologia costiera, dinamica costiera, Puglia, Italia.

Abstract

This paper represents the results of a survey performed in the Torre Canne – Torre San Leonardo Bay (Brindisi) with the aim to reconstruct its present features and dynamics. Batimetric, morphological and sedimentological surveys have been performed by light motor boat, scuba divers and sedimentary analyses.

The bottom of the bay is characterised by isobathes running about parallel to the shoreline. Two flat surfaces, between 0 and 35 meters depth and more 45 meters depth, are recognisable. Some channels cut the first one; they represent the submarine continuation of a continental network of "sapping valleys" which locally are named "lame".

The bottom is characterised by biocoenosis of the photophilic algae (AP) on calcarenitic substrata and by medium – coarse sands between 0 and 8/12 m depth; by biocoenosis of *Posidonia oceanica* (HP) between 8/12 and 15/17 meters depth; by rich coralligenous biocoenosis (C) over the 16/18 meters depth. At more than 5/6 meters depth sediments are represented by medium – coarse sands which show a biological source predominance; on the shoreface there are fine sands – rich in heavy mineral – coming from calcarenitic outcropping and dune belt erosion. The presence along the shoreface of aeolian sands coming from dune belt in strong erosion (in the NW area of the bay) suggests drifting from NW to SE. The Torre Canne harbour is filling with fine sands; the phenomena is due to the refraction and to the decreasing in energy of N/NW waves and to the local drifting from SE.

Keywords: submarine survey, coastal morphology, coastal dynamic, Apulia, Italy

Introduzione

La baia fra Torre Canne e Torre San Leonardo, a cavallo dei territori di Ostuni e di Fasano, in provincia di Brindisi, conserva caratteristiche naturali anomale in un quadro regionale caratterizzato da aree costiere oggetto di pressione antropica articolata esercitata da centri urbani, industriali e turistici, spesso non controllati da strumenti pianificatori adeguati. Nonostante la S.S.379 la tagli in tutta la sua lunghezza, le aree non ancora urbanizzate in tutta la baia fra Torre Canne e Torre San Leonardo definiscono ambienti costieri di elevato interesse naturalistico e paesaggistico. Il valore che rappresenta è tale che essa è stata definita: "area avente preminente interesse naturalistico, nonché ambientale e paesaggistico" (Legge Regionale n.19 del 24/07/1997, Boll. Uff. della Regione Puglia del 30/07/1997).

Il complesso sistema rappresentato dalla spiaggia, dalle dune e dall'apparato retrodunare è, però, in evidente fase di stress. Buona parte del cordone dunare è in erosione, anche a causa della forte pressione antropica, diretta ed indiretta, esercitata nell'ultimo cinquantennio tanto nell'ambiente emerso che in quello sommerso (Simeoni 1992; Simeoni e Bondesan, 1997; Sansò et al., 2000; Mastronuzzi et al., 2002).

Scarse sono, in letteratura, le informazioni derivanti dallo studio relativo alla dinamica di questa spiaggia sommersa e all'azione marina lungo la costa (Dal Cin e Simeoni, 1995).

Questo lavoro si propone di: a) descrivere la morfologia dei fondali prospicienti l'ampia baia fra Torre San Leonardo e Torre Canne; b) caratterizzarne i sedimenti; c) definire la dinamica morfosedimentaria dei fondali e il trasporto litorale.

Inquadramento geologico e morfologico

Il tratto di costa in esame è caratterizzato da un'ampia baia che ospita una spiaggia sabbiosa, limitata verso terra da cordoni dunari; essa si prolunga per circa 6 km a cavallo dei territori di Fasano e di Ostuni, lungo la fascia costiera modellata ai piedi dell'Altopiano delle Murge. La baia è compresa tra le punte rocciose su cui sorgono Torre San Leonardo, a SE, e l'abitato di Torre Canne, a NO, ed è caratterizzata da depositi marini del Pleistocene superiore e dell'Olocene, poggiati sulla calcarenite di Gravina, qui del Pleistocene inferiore (Fig.1).

Dal punto di vista morfologico la spiaggia presenta i caratteri di una *stationary barrier* (Mastronuzzi e Sansò, 2002a). Dal punto di vista morfodinamico essa è una *pocket beach*, priva di significativi apporti sedimentari diretti dall'entroterra (Di Muccio e Mastronuzzi, 2000). Essa deve la sua conformazione a più fasi morfogenetiche che hanno prodotto la sovrapposizione di più depositi eolici e marini nel corso dell'Olocene (Mastronuzzi et al., 2001; Mastronuzzi e Sansò, 2002a).

La sovrapposizione dei depositi eolici di differenti generazioni definisce un cordone allungato in direzione NO-SE, grossomodo parallelo alla linea di costa; esso raggiunge la massima quota di circa 10 metri nella parte centro-meridionale della baia. La fascia retrostante le dune è colmata da depositi sabbioso-limosi colluviali retrodunari di spessore massimo di una decina di metri. In essi è ospitata la falda superficiale di acqua dolce sospesa sull'acqua di intrusione marina, il cui affioramento definisce la presenza di stagni retrodunari. Questi fanno parte di tre importanti zone umide di alto valore ecologico. Il deposito della spiaggia attuale ha uno spessore che si assottiglia da Nord verso Sud da un massimo di 8 metri sino a permettere l'affioramento dei depositi olocenici e pleistocenici sulla battigia; sui fondali, verso il largo, esso diviene esiguo e consente alle calcareniti di affiorare in più punti (Schinaia, 2001).

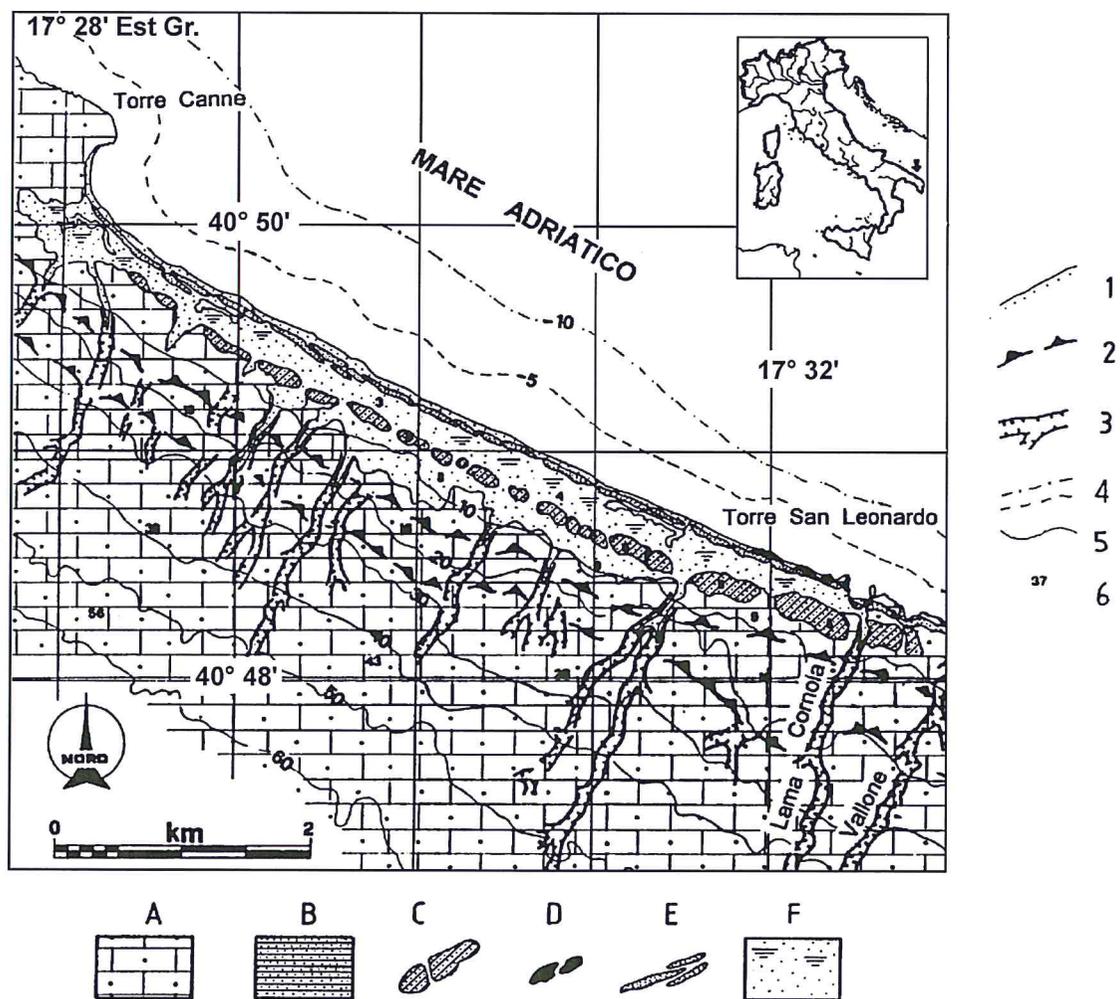


Figura 1 - Schizzo geomorfologico della baia di Torre Canne e dell'immediato entroterra. A) *Calcareniti di Gravina*; B) *panchina Tirreniana*; C) cordone dunare Tirreniano; D) cordone dunare medio olocenico; E) cordone dunare greco-romano; F) depositi di retrospiaggia e di laguna; 1) spiaggia sabbiosa; 2) falesia abbandonata; 3) *sapping valleys (lame)*; 4) isobate; 5) isoipse; 6) quote (da Mastronuzzi et al., 2001; mod.).

Materiali e metodi

Il rilevamento indiretto dei fondali è stato effettuato utilizzando un gommone NOVAMARINE HD ONE allestito con sistema di navigazione/GPS SIMRAD CE 32, integrato con computer Panasonic CF27, ecoscandaglio tridimensionale Humminbird, sistema VHF in collegamento con stazione GPS fissa a terra. Il rilevamento GPS è stato condotto in modalità cinematica “continua” (Ciavola et al., 2000); con questa tecnica sono stati tracciati a mare dei transetti secondo rotte perpendicolari e parallele alla linea di riva. In tal modo si è assicurata la copertura e il rilevamento in dettaglio dell'intera area in esame, dalla linea di riva fino all'isobata 20 m. Con la stessa apparecchiatura sono stati eseguiti tre profili batimetrici, lunghi circa 7 km, fino all'isobata 70 m. I dati numerici rilevati con apposito software Nmea Logger e sono stati gestiti mediante un progetto sviluppato in ambiente GIS; al fine di elaborare una carta delle isobate è stato necessario utilizzare un appropriato software della ESRI (ArcViewGIS ®). La caratterizzazione morfologica dei fondali è stata completata per mezzo di un rilevamento subacqueo diretto condotto durante campagne di immersioni puntuali e per transetti. La squadra, composta da tre operatori subacquei, ha effettuato una serie di 23 immersioni con A.R.A. (19 punti e 4 transetti). Il rilevamento è stato svolto modificando la tecnica a “schema circolare” utilizzata dal reparto O.S.S.A.L.C. - Operatori del Servizio di Sicurezza Abilitati al Lavoro in Carena - delle unità navali della Marina Militare Italiana per la ricerca e il recupero (Abbo, 1997) (Fig. 2).

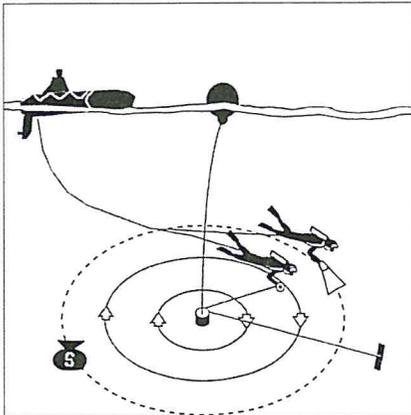


Figura 2 - Tecnica di rilevamento subacqueo adottata sul modello O.S.S.A.L.C. (da Abbo, 1997; modif.).

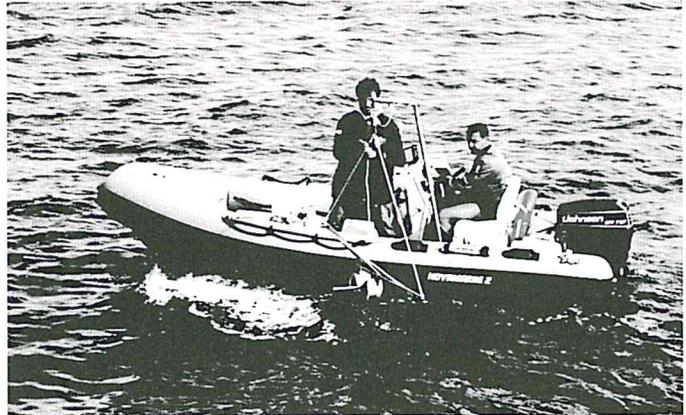


Figura 3 - Il gommone allestito per il campionamento dei sedimenti.

I quattro transetti, invece, sono stati rilevati secondo rotte lineari utilizzando un sistema di navigazione subacquea asservibile a computer subacqueo secondo il metodo dell' I.S.S.D. – International School for Scientific Diving (Abbiati, 1991). La campagna di campionamento dei sedimenti dei fondali prospicienti la baia tra Torre San Leonardo e Torre Canne è stata effettuata utilizzando il gommone allestito con il sistema di navigazione/GPS, sistema VHF, bigo di carico, benna Van Wen, box corer, carotiere a gravità, carotiere a mano, contimetri digitale (Fig. 3). I campionamenti sono stati effettuati secondo rotte perpendicolari alla linea di riva e in siti equidistanti preventivamente identificati ed impostati sul sistema di navigazione. Sono stati raccolti complessivamente 110 campioni di sedimento, dalla linea di riva fino all'isobata 20 m: fra la linea di riva e l'isobata 2 m è stato utilizzato un box corer, mentre fra -2 e -20 metri è stata utilizzata la benna tipo Van Wen.

Entrambi i sistemi di campionamento, pur comportando la perdita di una parte della componente più minuta del sedimento, mostrano il vantaggio di disporre di una quantità significativa e quindi più rappresentativa nella fase di quartatura.

La carta morfobatimetrica

La carta morfobatimetrica dei fondali (Fig. 4) mostra che la conformazione della linea di costa attuale si riflette nella morfologia dei fondali, in quanto le isobate presentano nel complesso un andamento regolare, sub-parallelo all'attuale linea di riva. Nei fondali prospicienti Torre San Leonardo le isobate sono più ravvicinate e indicano una maggiore pendenza relativa del profilo di spiaggia sommersa, rispetto ai fondali antistanti l'abitato di Torre Canne. In alcuni tratti le isobate mostrano un andamento frastagliato che indica solchi, a fianchi poco acclivi, allungati verso il largo: il sistema più marcato è situato a SE del porto di Torre Canne, con asse principale diretto EO. Questi solchi, affogati dal sedimento, sono ciò che resta e la diretta prosecuzione delle *sapping valleys* - localmente dette lame - che scendono a mare dall'Altopiano delle Murge (Mastronuzzi e Sansò, 2002b).

I transetti batimetrici condotti sino all'isobata 70 m mostrano con chiarezza la presenza di un'ampia superficie fra il livello medio del mare e l'isobata 35 m. Ad una piccola scarpata segue quindi un'altra superficie che da circa 45 metri di profondità si spinge con pendenza circa costante sin'oltre il limite del rilievo (Fig. 4).

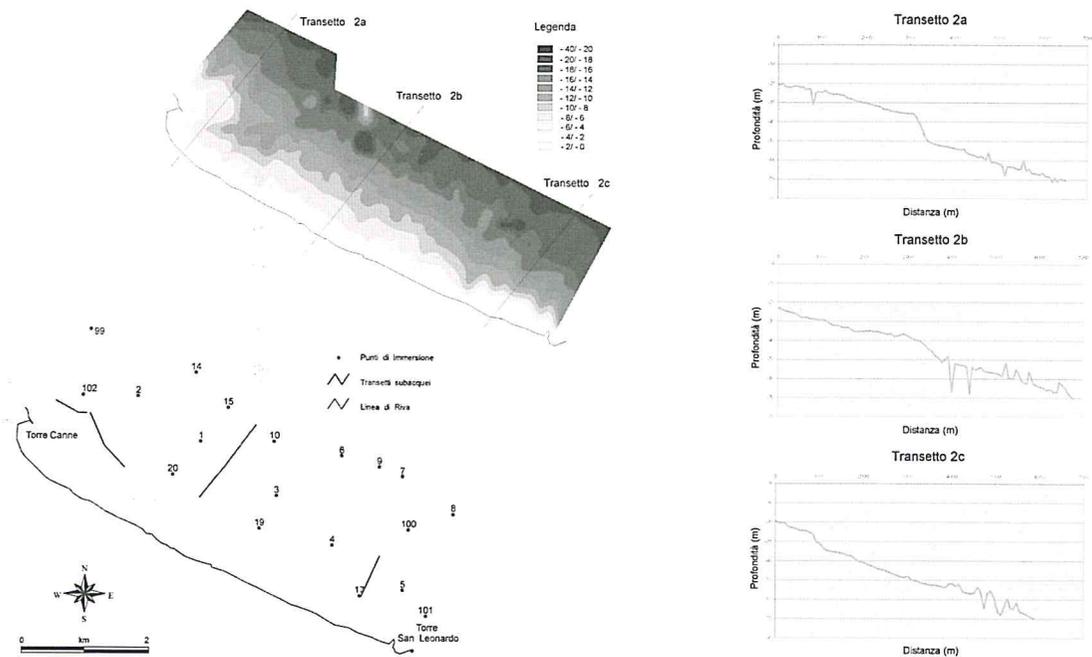


Figura 4 – Carta morfobatimetrica e transetti dei fondali della baia di Torre Canne - Torre San Leonardo. In basso a sinistra sono riportati i punti di immersione e i transetti subacquei.

Il rilevamento diretto, in immersione, dei fondali prospicienti la baia di Torre San Leonardo - Torre Canne ha permesso di implementare il rilievo indiretto con il dettaglio dei caratteri morfologici dei fondali, la distribuzione dei sedimenti e degli affioramenti rocciosi, la mappatura di massima delle comunità bentoniche e delle strutture biogene che hanno colonizzato il fondale (come la *mattes* di *Posidonia* e il coralligeno), tutte possibili fonti di rifornimento di materiale bioclastico.

Dalla linea di riva fino alla massima profondità di 35 metri è possibile riconoscere tre zone, caratterizzate da differenti biocenosi (Pérès e Picard, 1964; Pérès, 1997), le quali seguono un andamento regolare, subparallelo alla linea di costa (Fig.5):

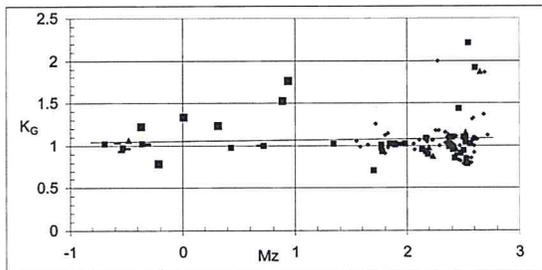
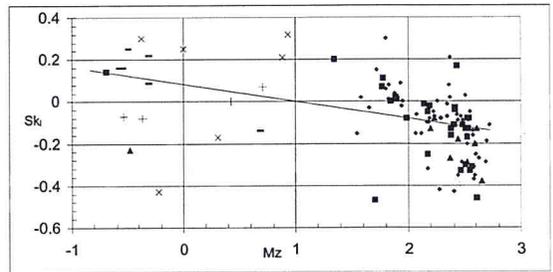
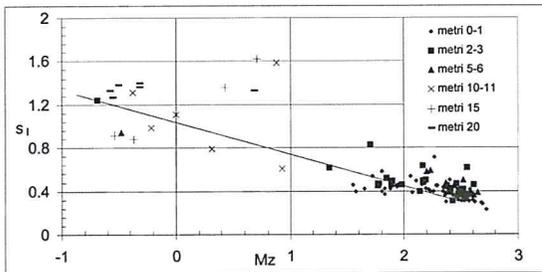
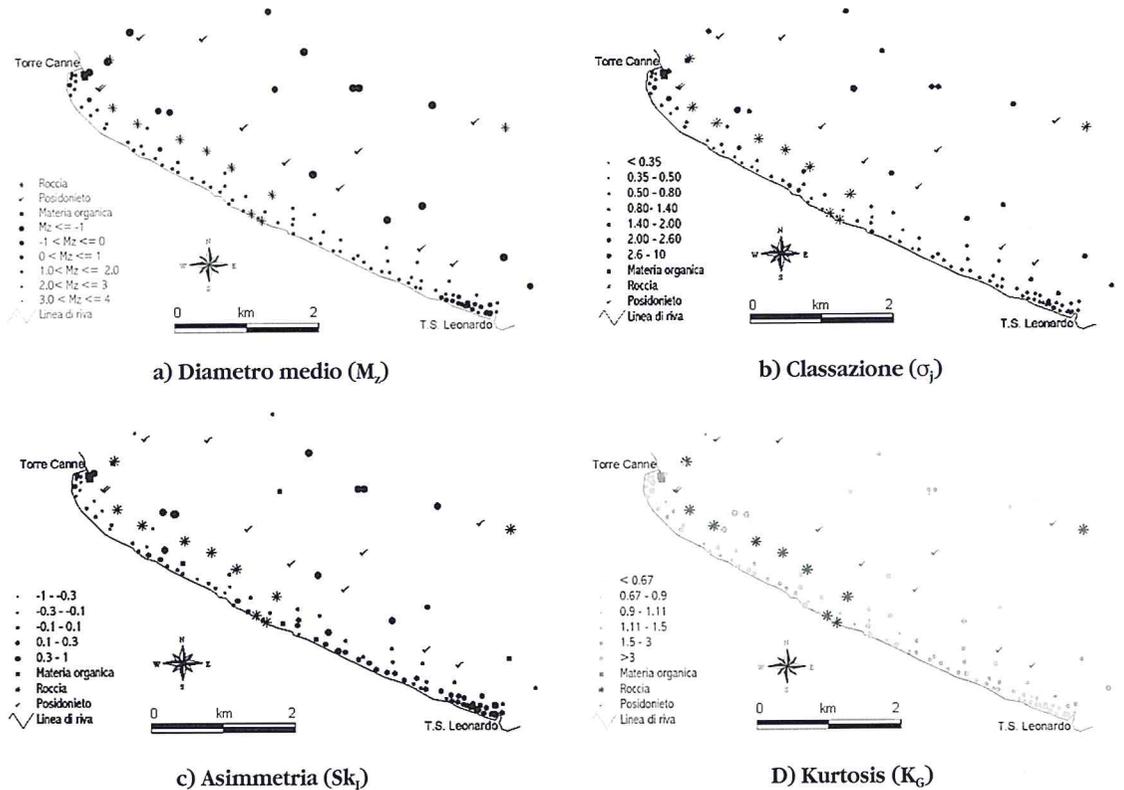


Figura 5 - Carte della distribuzione dei caratteri granulometrici dei sedimenti (a,b,c,d) e diagrammi di relazione tra diametro medio dei sedimenti e classazione, asimmetria e kurtosis con riferimento alle profondità dei campioni.

- fra il livello del mare e una fascia compresa fra -8 e -12 m, fondo a sabbia nuda medio-fine ben classata, direttamente esposta all'azione del moto ondoso, nel complesso priva di copertura algale (rade coperture a *Padina pavonica* (L.) THIVY, *Acetabularia acetabulum* (L.) SILVA e *Cymodocea nodosa* (UCARIA) ARESHOUG), con discontinui affioramenti calcarenitici estesi sino 500 m² coperti dalla comunità della biocenosi delle alghe fotofile (AP);
- fra gli 8 e i 12 m di profondità e il limite inferiore a circa -15/ -17 m, fondo con biocenosi della *Posidonia oceanica* (L.) DELILE - HP -, *mattes* morte e sabbia bioclastica medio-grossolana moderatamente classata concentrata nei canali intramattes e nelle radure del posidonieto. In alcuni siti di immersione si è proceduto ad un'analisi speditiva della densità fogliare: i dati ottenuti nei rilevamenti pongono la prateria studiata nello Stadio IV - prateria molto rada - della classificazione di Giraud (1977). Considerando che in più punti si riconoscono estese terrazzette di *mattes* morta spesse sino a 50/70 cm, canali intramattes e radure, si è potuto constatare che nel complesso il posidonieto si presenta in una fase di forte stress (Fig.6a);
- fra i -16 e -18 sino oltre -30 m<, formazioni della biocenosi del coralligeno (C) con fondo a sabbia bioclastica grossolana poco classata verso il largo arricchita di componente siltosa. Organizzati in formazioni tabulari, fortemente frastagliate ed irregolari, i banchi di coralligeno si innalzano per circa un metro dal fondale e sono caratterizzati dalla diffusa presenza di colonie globulari di *Cladocora coespitosa* (L.). Sul fondale si depositano detriti organogeni attuali e sub-fossili che derivano dal disfacimento dei banchi di coralligeno ad opera delle correnti di compensazione (Fig. 5b).

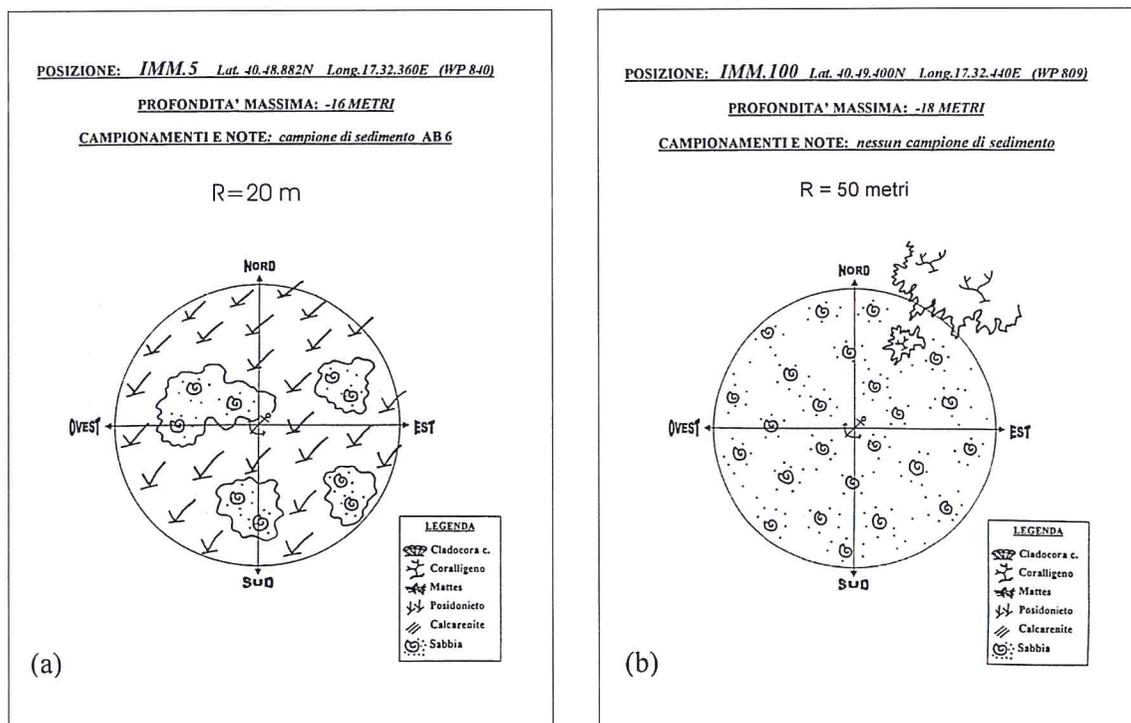


Figura 6 – Esempio di scheda di rilevamento diretto in immersione sul posidonieto (a: IMM.5: -16m) e sul coralligeno (b: IMM.6: -18m).

I sedimenti dei fondali

I caratteri tessiturali del sedimento sono stati determinati attraverso analisi granulometrica per setacciamento in undici classi intervallate di 1/4 φ. I dati ottenuti sono stati poi sintetizzati con il calcolo di quattro parametri grafici, Mz, σ₁, Sk₁ e K_G, utilizzando le formule di Folk e Ward (1957) (Tab.1). Le percentuali in peso delle otto classi dimensionali, insieme ai parametri grafici e al valore della pro-

fondità di prelievo, sono state poi sottoposte ad un trattamento statistico generale e settoriale calcolando i coefficienti di *correlazione lineare semplice* r di Pearson e Hartley (1969) riportati in matrici triangolari (Tab. 2). I campioni analizzati sono rappresentati da *sabbie da molto grossolane a fini*,

Tabella 1 – Tabella complessiva dei campioni esaminati.

Campio- ne	Prof. (m)	Mz	σ_1	Sk ₁	K _G	Campio- ne	Prof. (m)	Mz	σ_1	Sk ₁	K _G
TK1	2.4	2.14	0.40	-0.01	0.95	TK55	0.8	2.16	0.46	-0.10	1.08
TK2	2	1.90	0.49	0.01	1.01	TK56	0.9	2.18	0.47	-0.10	1.04
TK3	2	1.78	0.47	0.11	0.93	TK57	0.9	2.19	0.42	-0.08	1.10
TK4	2	1.77	0.47	0.07	1.01	TK58	0.9	2.28	0.45	-0.08	1.18
TK5	2.2	1.98	0.46	-0.08	1.02	TK59	0.9	2.37	0.38	0.02	1.07
TK6	2.2	1.89	0.46	0.02	1.02	TK60	0.7	2.23	0.40	-0.07	1.07
TK7	2.2	1.85	0.52	0.00	1.02	TK61	0.9	2.29	0.45	-0.08	1.00
TK8	2.2	1.77	0.45	0.07	0.98	TK62	0.6	2.34	0.40	-0.01	1.03
TK9	2.4	2.19	0.50	-0.02	0.90	TK63	0.8	2.36	0.36	0.08	1.10
TK10	2.4	2.17	0.49	-0.05	0.93	TK64	0.9	2.37	0.30	0.21	0.98
TK11	2.4	2.41	0.41	-0.04	0.99	TK65	0.9	2.26	0.40	0.00	1.18
TK12	2	2.38	0.45	-0.13	0.99	TK66	0.9	2.48	0.32	-0.09	0.82
TK13	1.8	2.41	0.39	-0.03	0.95	TK67	0.8	2.27	0.71	-0.42	1.99
TK14	2.2	2.48	0.37	-0.11	0.91	TK68	0.9	2.34	0.43	-0.07	1.15
TK15	2.1	2.50	0.36	-0.13	0.94	TK69	0.8	2.44	0.36	-0.09	0.90
TK16	2.1	2.38	0.44	-0.16	1.02	TK70	0.7	2.57	0.31	-0.14	0.85
TK17	2.2	2.43	0.31	0.17	0.85	TK71	0.9	2.50	0.31	0.03	0.79
TK18	2.1	2.54	0.33	-0.08	0.79	TK72	1.0	2.69	0.28	-0.19	1.86
TK19	1.8	2.53	0.35	-0.13	0.84	TKN72	0.4	2.51	0.35	-0.16	0.93
TK20	2.2	2.40	0.42	-0.11	1.10	TK73	0.8	2.46	0.34	-0.07	0.83
TK21	2.2	2.46	0.47	-0.33	1.43	TK74	0.9	2.17	0.63	-0.32	0.92
TK22	1.8	2.17	0.63	-0.25	1.09	TK75	1.1	2.06	0.54	-0.15	1.02
TK23	2	2.52	0.39	-0.08	1.04	TK76	0.9	2.11	0.49	-0.15	1.07
TK24	1.9	1.34	0.62	0.20	1.02	TK77	1.0	2.40	0.50	-0.43	1.03
TK25	2.1	2.56	0.37	-0.31	1.02	TK78	1.0	2.68	0.29	-0.29	1.37
TK26	2.3	2.52	0.41	-0.17	1.10	TK79	1.1	2.72	0.23	-0.11	1.12
TK27	2.1	2.50	0.41	-0.30	1.10	TK80	1.1	2.60	0.32	-0.25	1.00
TK28	2.2	1.70	0.83	-0.47	0.71	RA1	0.1	2.43	0.36	-0.06	0.87
TK29	2.1	2.55	0.62	-0.33	2.21	RA2	0.1	2.57	0.35	-0.16	0.80
TK30	2	2.61	0.46	-0.46	1.92	TK81	0.7	2.55	0.33	-0.05	0.81
TK31	3	-0.69	1.24	0.14	1.02	TK82	0.2	2.53	0.31	-0.09	0.86
TK32	5.5	-0.48	0.94	-0.23	1.06	TK83	1.0	2.62	0.30	-0.27	1.08

Campio- ne	Prof. (m)	Mz	σ_1	Sk_1	K_G	Campio- ne	Prof. (m)	Mz	σ_1	Sk_1	K_G
TK33	4.9	2.65	0.39	-0.38	1.87	TK84	1.0	2.52	0.33	-0.20	0.86
TK34	4.6	2.61	0.36	-0.13	1.09	TK85	1.0	2.58	0.41	-0.37	1.31
TK35	4.9	2.37	0.48	-0.27	1.12	TK86	1.0	2.60	0.32	-0.20	0.92
TK36	5.5	2.59	0.38	-0.20	1.09	TK87	1.0	2.47	0.41	-0.29	1.00
TK37	5.5	2.52	0.50	-0.29	1.15	TK88	1.0	2.59	0.39	-0.35	1.32
TK38	5.2	2.20	0.58	-0.13	0.97	TK89	1.0	1.65	0.42	-0.03	1.01
TK39	5.1	2.23	0.59	-0.08	0.88	TK90	1.0	2.58	0.36	-0.31	1.05
TK40	5.2	2.44	0.45	-0.18	0.96	TK91	11.0	0.31	0.79	-0.17	1.25
TK41	0.9	1.58	0.40	0.02	0.99	TK93	10.4	0.00	1.11	0.25	1.34
TK42	0.15	1.88	0.42	0.04	1.02	TK96	10.2	0.93	0.61	0.32	1.77
TK43	0.9	1.80	0.40	0.06	1.12	TKN69	10.0	-0.22	0.99	-0.43	0.80
TK44	1	2.07	0.39	-0.06	0.95	TKN70	10.0	-0.38	1.31	0.30	1.23
TK45	1	1.72	0.54	0.15	1.26	TKN71	10.0	0.88	1.59	0.21	1.54
TK46	1	1.94	0.44	-0.02	1.01	AB 0	20.0	-0.32	1.37	0.22	1.02
TK47	0.8	1.89	0.47	0.01	1.01	AB1	20.0	0.68	1.33	-0.14	1.00
TK48	0.8	1.83	0.42	0.01	0.98	AB2	20.0	-0.50	1.38	0.25	0.96
TK49	0.8	1.83	0.37	0.08	1.14	AB3	20.0	-0.55	1.27	0.16	0.93
TK50	0.8	1.95	0.46	0.00	1.02	AB4	20.0	-0.32	1.40	0.09	1.01
TK51	1.2	1.93	0.45	0.09	1.02	AB5	20.0	-0.58	1.33	0.16	1.03
TK52	0.15	1.55	0.46	-0.15	1.05	AB6	15.0	-0.37	0.88	-0.08	1.03
TK53	0.9	2.44	0.46	-0.35	1.11	AB7	15.0	-0.54	0.92	-0.07	0.99
TK53B	1.1	1.80	0.58	0.30	0.91	AB9	15.0	0.71	1.62	0.07	1.01
TK54	1	2.22	0.41	-0.05	1.07	AB11	15.0	0.43	1.36	0.00	0.99

eccezionalmente ben lavate, ovvero sostanzialmente prive nel complesso della componente siltos-argillosa, non solo in prossimità della linea di riva, ma anche alle batimetrie maggiori fino a 20 metri di profondità. Le sabbie presentano valori di classazione molto variabili, da molto *ben classate a poco classate*; le curve di frequenza sono essenzialmente unimodali, mostrano perfetta simmetria o asimmetria negativa, e kurtosis con valori *mesocurtici* o *platocurtici*.

La distribuzione del diametro medio (Mz) dei campioni (Fig.5a) mostra che l'aumento delle dimensioni medie dei granuli avviene in relazione alla profondità, ma anche lungo costa. E' possibile, infatti, notare nel complesso una concentrazione di valori mediamente alti nella zona sud, verso Torre San Leonardo, mentre i tratti di costa della zona centrale della baia e in prossimità di Torre Canne presentano valori medio-bassi. Le relazioni tra il diametro medio e gli altri parametri grafici, tenendo conto della batimetria, mostrano una tendenza delle sabbie a raggiungere un cattivo grado di classazione all'aumentare della granulometria e della profondità, evidenza testimoniata dalla pendenza negativa della retta di regressione.

Si è ottenuta quindi una matrice di correlazione complessiva che ha messo in evidenza l'esistenza di tre gruppi fortemente in antitesi tra loro:

- il primo gruppo comprende le frazioni $-3 \div 1 \varphi$;
- il secondo gruppo è costituito dalla frazione $1 \div 2 \varphi$;
- il terzo gruppo comprende le frazioni $2 \div 4 \varphi$.

Tabella 2 - Matrici di correlazione calcolate nelle tre zone.

		ZONA I (NORD-OVEST)												(a)
		N=36 campioni												
1	Mz	1.00												
2	1	-0.86	1.00											
3	SkI	-0.47	0.42	1.00										
4	Kg	0.12	0.02	-0.06	1.00									
5	Depth	-0.72	0.82	0.39	0.09	1.00								
6	%-3/-2	-0.77	0.61	0.36	-0.11	0.41	1.00							
7	%-2/-1	-0.68	0.78	0.55	0.03	0.58	0.68	1.00						
8	%-1/0	-0.74	0.60	0.31	-0.12	0.51	0.87	0.61	1.00					
9	%0/1	-0.56	0.60	0.31	0.20	0.53	0.28	0.51	0.51	1.00				
10	%1/2	-0.17	0.60	0.60	-0.10	0.07	-0.12	-0.14	-0.09	0.21	1.00			
11	%2/3	0.78	0.10	-0.65	-0.03	-0.61	-0.60	-0.68	-0.72	-0.85	-0.43	1.00		
12	%3/4	0.61	-0.52	-0.69	0.30	-0.38	-0.41	-0.46	-0.45	-0.54	-0.53	0.72	1.00	
13	%>4	-0.21	0.13	0.10	-0.21	0.22	0.10	0.32	0.30	0.24	-0.16	-0.24	-0.02	1.00
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

* i valori in grassetto rappresentano un errore dell'1% (>0,52)

		ZONA II (CENTRO)												(b)
		N=36 campioni												
1	Mz	1.00												
2	1	-0.86	1.00											
3	SK1	-0.53	0.55	1.00										
4	Kg	-0.06	0.16	0.19	1.00									
5	Prof.	-0.96	0.90	0.63	0.09	1.00								
6	%-3/-2	-0.82	0.74	0.53	-0.10	0.90	1.00							
7	%-2/-1	-0.75	0.83	0.60	0.17	0.79	0.95	1.00						
8	%-1/0	-0.78	0.64	0.46	-0.09	0.81	0.98	0.96	1.00					
9	%0/1	-0.52	0.60	0.63	0.55	0.54	0.89	0.95	0.94	1.00				
10	%1/2	-0.10	0.03	0.16	0.17	-0.02	0.87	0.91	0.91	0.96	1.00			
11	%2/3	0.79	-0.77	-0.68	-0.32	-0.78	0.85	0.89	0.89	0.94	1.00	1.00		
12	%3/4	0.64	-0.53	-0.68	-0.04	-0.59	0.85	0.90	0.90	0.95	0.89	1.00	1.00	
13	%>4	-0.06	0.09	-0.11	-0.21	-0.01	0.78	0.83	0.86	0.90	0.88	0.89	0.90	1.00
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

* i valori in grassetto rappresentano un errore dell'1% (>0,52)

		ZONA III (SUD-EST)												(c)
		N=38 campioni												
1	Mz	1.00												
2	1	-0.89	1.00											
3	SK1	-0.50	0.37	1.00										
4	Kg	0.07	0.09	-0.53	1.00									
5	Prof.	-0.95	0.91	0.46	-0.12	1.00								
6	%-3/-2	-0.98	0.90	0.54	-0.11	0.97	1.00							
7	%-2/-1	-0.95	0.84	0.40	0.09	0.90	0.98	1.00						
8	%-1/0	-0.98	0.84	0.45	-0.11	0.93	0.98	0.99	1.00					
9	%0/1	-0.89	0.92	0.37	-0.07	0.89	0.93	0.97	0.96	1.00				
10	%1/2	0.12	0.03	-0.14	0.26	-0.21	0.87	0.94	0.92	0.99	1.00			
11	%2/3	0.98	-0.94	-0.41	0.00	-0.95	0.85	0.92	0.90	0.98	0.99	1.00		
12	%3/4	0.38	-0.23	-0.29	-0.06	-0.12	0.86	0.93	0.91	0.98	0.99	0.99	1.00	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

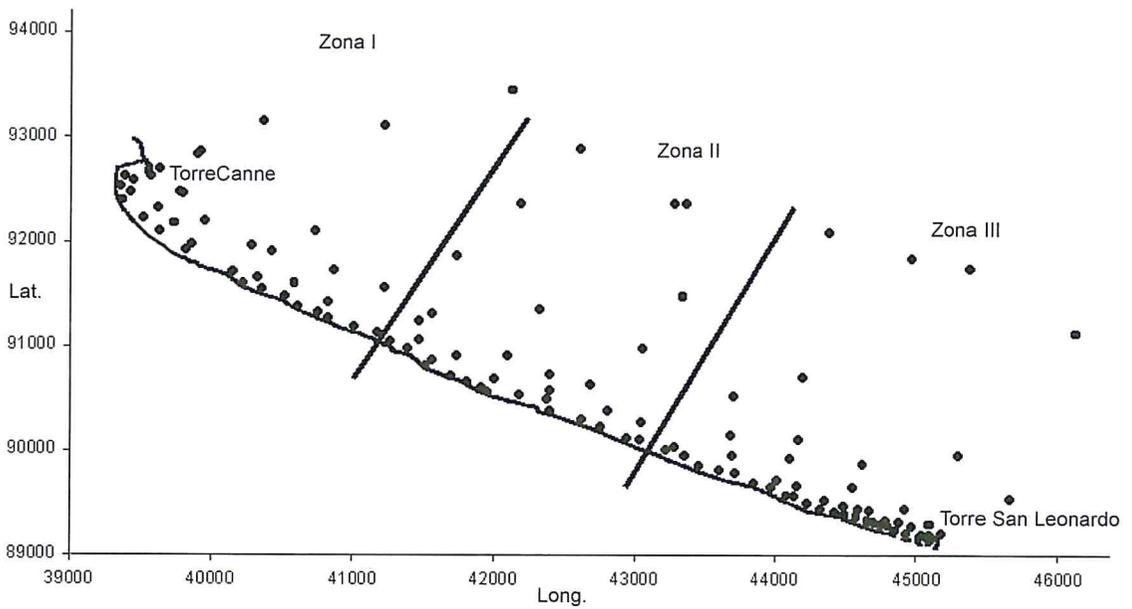
Tabella 3 - Matrice di correlazione complessiva.

* i valori in grassetto rappresentano un errore dell'1% (>0,51)

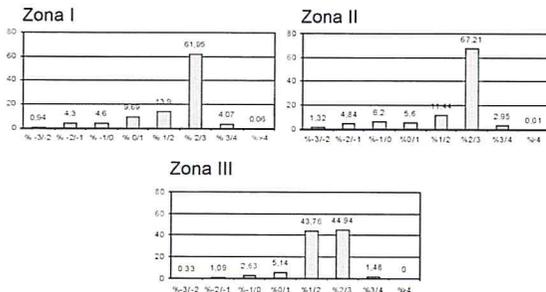
Matrice di correlazione complessiva - N=110 campioni (a)

1	Mz	1.00																
2	1	-0.9	1.00															
3	SK1	-0.5	0.30	1.00														
4	Kg	0.08	0.00	-0.29	1.00													
5	Depth	-0.80	0.87	0.31	-0.01	1.00												
6	%-3/-2	-0.8	0.82	0.32	-0.09	0.74	1.00											
7	%-2/-1	-0.9	0.81	0.33	-0.01	0.78	0.90	1.00										
8	%-1/0	-0.9	0.81	0.29	-0.02	0.80	0.81	0.82	1.00									
9	%0/1	-0.8	0.70	0.3	0.14	0.69	0.48	0.50	0.72	1.00								
10	%1/2	-0.05	-0.10	0.37	-0.15	-0.23	-0.23	-0.25	-0.26	-0.05	1.00							
11	%2/3	0.88	-0.7	-0.5	0.05	-0.6	-0.6	-0.60	-0.7	-0.7	-0.5	1.00						
12	%3/4	0.48	-0.26	-0.6	0.29	-0.12	-0.23	-0.25	-0.26	-0.28	-0.6	0.58	1.00					
13	%>4	-0.21	0.38	0.22	0.12	-0.23	0.07	0.21	0.25	-0.25	-0.13	-0.18	0.04	1.00				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				

* i valori in corsivo rappresentano un errore dell'1% (>0,31)



PERCENTUALI DELLE FRAZIONI



PERCENTUALI COMPLESSIVE DELLE FRAZIONI

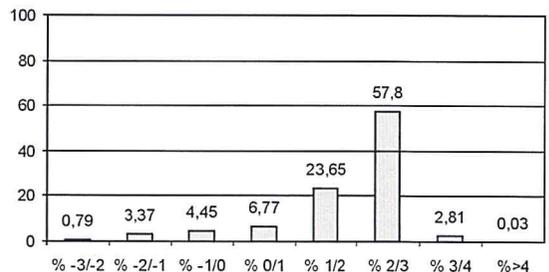


Figura 7 - Zonazione geografica utilizzata per il calcolo delle matrici di correlazione, tra dati granulometrici e batimetrici, con diagrammi di distribuzione granulometrica media dei tre settori.

Questi tre gruppi possono costituire tre popolazioni elementari distinte e indicare i differenti tipi di sabbie di cui è costituita oggi la spiaggia sommersa di Torre Canne - Torre San Leonardo: le singole popolazioni sono state indicate nel grafico delle percentuali complessive (Fig.7).

La distribuzione areale e batimetrica dei caratteri granulometrici ha altresì permesso di individuare tre zone, ognuna delle quali è stata oggetto di studio statistico settoriale: zona I (NO) compresa fra il porto di Torre Canne e Lido Bizzarro, zona II (Centro) compresa fra Lido Bizzarro e Lido Morelli, e zona III (SE) compresa fra Lido Morelli e Torre San Leonardo.

Nelle zone NO e SE si possono riconoscere tre popolazioni di sabbie distinte tra loro, le stesse desunte dalla matrice complessiva. Il diametro medio delle sabbie campionate aumenta nel complesso verso Torre San Leonardo, perché in questo settore la percentuale in peso della frazione $1\div 2 \phi$ aumenta notevolmente a scapito della frazione $2\div 4 \phi$. I sedimenti raccolti nella zona più settentrionale della baia, nel porto di Torre Canne, sono quelli che mostrano diametro medio minore.

L'analisi composizionale dei sedimenti è stata eseguita su 20 campioni (Fig.8) rappresentativi di tutti i tipi di sabbie analizzati dal punto di vista granulometrico, mediante stereomicroscopio e attacchi mirati con una soluzione di HCl 5%. Le sabbie studiate sono essenzialmente carbonatiche; in tutti gli intervalli, dal più grossolano al più fine, è presente un'alta percentuale di bioclasti e litoclasti calcarei e calcarenitici. Le frazioni di maggiori dimensioni sono costituite totalmente da bioclasti interi o frammentati, rappresentati da gusci di molluschi, brachiopodi, briozoi, radioli di echinidi, alghe calcaree, spugne e tritume organico di difficile riconoscimento. Nelle frazioni fini prevalgono, date le dimensioni ridotte, foraminiferi, spicole e bioclasti frammentati non ben identificabili. La frazione silicoclastica compare prevalentemente nelle frazioni fini e finissime, ed è costituita in prevalenza da quarzo e feldspati, e in misura ridotta da minerali femici; fra questi, nelle sabbie raccolte nella parte più alta della shoreface, sono abbondanti minerali come il pirosseno e il granato (melanitico e pirlaspitico). Sono presenti inoltre tracce di altri minerali, quali lamelle e pacchetti di biotite, nelle frazioni medio-fini, e magnetite, anfiboli e ilmenite, nelle frazioni fini e finissime.

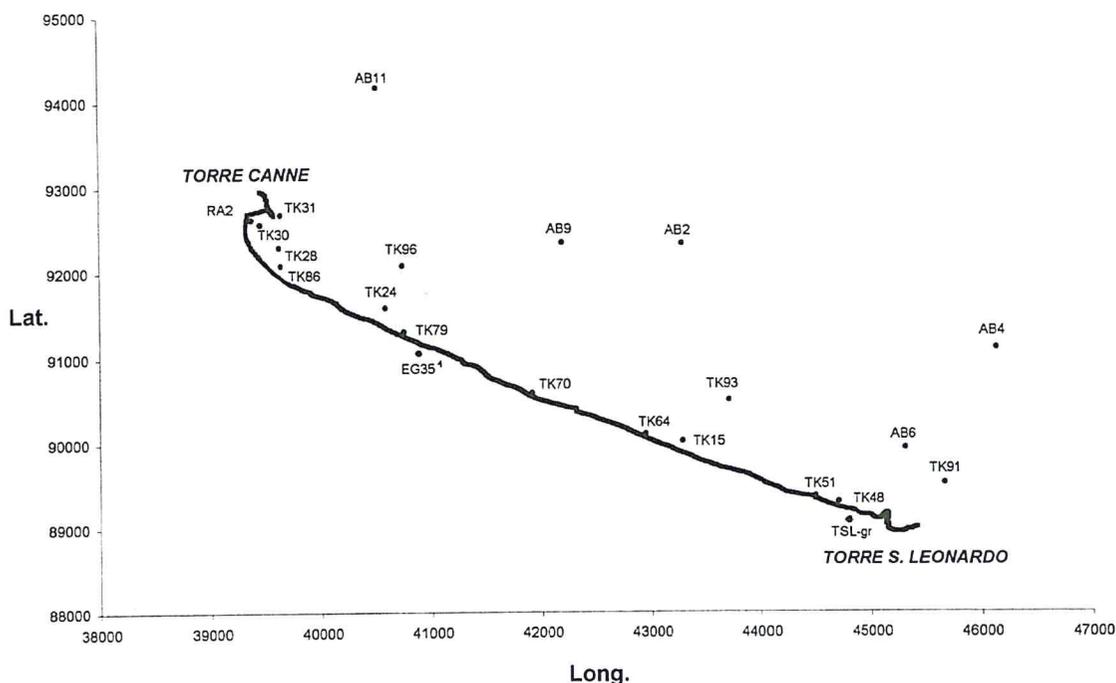


Figura 8 – Ubicazione dei campioni della spiaggia sommersa e delle dune su cui è stata effettuata l'analisi mineralogica e composizionale.

Circa la natura delle tre popolazioni di sabbia individuate, si è accertato che la prima popolazione è costituita in gran parte da apporti recenti organogeni e calcarenitici: i bioclasti e i clasti carbonatici provengono dalle batimetrie maggiori e in particolare dalla biocenosi delle alghe fotofile e dal posidonieto; i clasti calcarenitici provengono invece dall'erosione delle rocce affioranti al largo e sulla battigia. La seconda popolazione ha una moda nell'intervallo $1\div 2 \varphi$ ed è in parte costituita dal materiale proveniente dalla erosione delle dune, riconoscibile dal marcato arrotondamento dei granuli, e tra questi quelli di quarzo, i quali presentano una superficie "picchiettata", testimonianza inequivocabile di trasporto eolico; la terza popolazione è costituita da sedimento terrigeno, ereditato dal passato, rappresentato in prevalenza da quarzo, feldspati e minerali pesanti non arrotondati, trasportati dalla deriva litorale verso SE.

Discussione

I rilievi morfobatimetrici e i campionamenti hanno rivelato che i fondali in esame sono costituiti da sabbie appartenenti a facies deposizionali distinte.

Le sabbie grossolane e molto grossolane, presenti oltre i 5-6 metri di profondità, sono costituite per oltre il 90% da bioclasti e questa grossolanità dipende dal basso grado di frammentazione delle spoglie organogene. Esse rivelano, quindi, un ambiente in cui l'energia e la stessa capacità di trasporto è scarsa. L'alto grado di frammentazione dei bioclasti nelle sabbie fini e medie è, invece, responsabile degli alti valori relativi di M_z (in φ) e indica che sotto costa l'energia è molto elevata.

L'andamento del diametro medio con la profondità di campionamento è anomala. In genere la dimensione media dei sedimenti (M_z) diminuisce progressivamente andando da terra verso il largo, da zone ad alta energia a zone a bassa energia (Dal Cin e Simeoni, 1987). Qui però l'incremento della taglia dei sedimenti, la cattiva classazione delle sabbie e le asimmetrie fortemente negative, riscontrate particolarmente in alcune zone, oltre la batimetrica 5, vanno imputate alla presenza di bioclasti, derivanti dalle biocenosi delle alghe fotofile e del posidonieto e alle profondità maggiori dal diretto disfaccimento dei banchi coralligeni.

L'aumento delle dimensioni medie dei granuli verso Torre San Leonardo contrasterebbe con l'andamento generale della deriva da NO verso SE (Dal Cin e Simeoni, 1993; 1995; Mastronuzzi e Sansò, 1993). Le dimensioni dei clasti aumentano in relazione alla diminuzione della componente fine; contemporaneamente aumenta la percentuale di sabbia media. A questo proposito, le composizioni mineralogiche, la granulometria e la morfologia dei granuli di 3 campioni rappresentativi delle sabbie prelevate fino a 6 metri di profondità (TK86, zona NO; TK70, zona centro; TK51, zona SE) sono state confrontate con gli stessi parametri analizzati su campioni di duna, prelevati in due punti differenti della costa: il campione TSL-gr in prossimità di Torre San Leonardo e il campione EG35¹ dalla duna presso Lido Bizzarro, nella zona centrale (Fig. 8). Il confronto eseguito al microscopio tra il campione EG35¹ e il campione TK51 ha mostrato che le sabbie analizzate presentano un diametro medio e caratteri mineralogici e morfologici dei granuli molto simili: la forte erosione della duna nel tratto centrale e settentrionale della baia, trascurabile in quello meridionale, rifornisce i fondali di nuovo sedimento che viene poi allontanato dalla deriva verso SE.

Gli effetti della deriva litoranea si complicano a causa dalle possibili perdite di sedimento verso il largo, lungo i solchi riconosciuti sui fondali, trasversali alla linea di riva. In effetti, lungo il tratto di costa in esame, l'incisione esistente a ESE del porto di Torre Canne può favorire la dispersione delle sabbie verso il largo e, di conseguenza, essere una delle cause del diffuso fenomeno di arretramento della spiaggia.

Il rilevamento morfologico diretto dei fondali ha consentito di constatare lo stato della prateria di *P. oceanica*; essa gioca un ruolo chiave nel ripascimento naturale delle spiagge grazie al detrito bioclastico lì prodotto e attenuando il moto ondoso. Tale ruolo è ancora più importante oggi, dato il ridotto apporto di sedimenti ad opera dei principali fiumi (Caldara et al, 1998). La diffusione di *mattes* morta fa ipotizzare che nella baia di Torre Canne la prateria sia in fase di forte stress e regressione, che può essere messa in relazione con l'arretramento della spiaggia. Ricerche condotte

in questo senso, in aree assunte rappresentative per il bacino del Mediterraneo, hanno permesso di stimare l'arretramento di 15-18 m di spiaggia, conseguente alla regressione di 1 m di prateria (Mazzella et al., 1986). La *P. oceanica* regredisce per varie cause tra le quali un certo tipo di pesca, gli ancoraggi turistici e commerciali incontrollati, i supposti cambiamenti delle condizioni meteorologiche e l'inquinamento. Molte delle forme riconosciute nel posidonieto possono essere ricondotte all'attività antropica, espletata mediante natanti ad uso ricreativo o economico (sistemi di ancoraggio e tecniche di pesca fortemente impattanti, localmente diffusi, quali la pesca a strascico e l'uso di esplosivi). La presenza diffusa di canali di erosione, marmite e radure nella prateria indicano quindi un significativo impatto antropico. In questo quadro di degrado della prateria si inserisce la colonizzazione di *Caulerpa racemosa* (FORSSKAL) AGARDH, che sta occupando velocemente gli spazi lasciati vuoti dalla *P. oceanica* senza però essere in grado di esercitarne la stessa funzione ecologica e morfodinamica (Fig. 9).

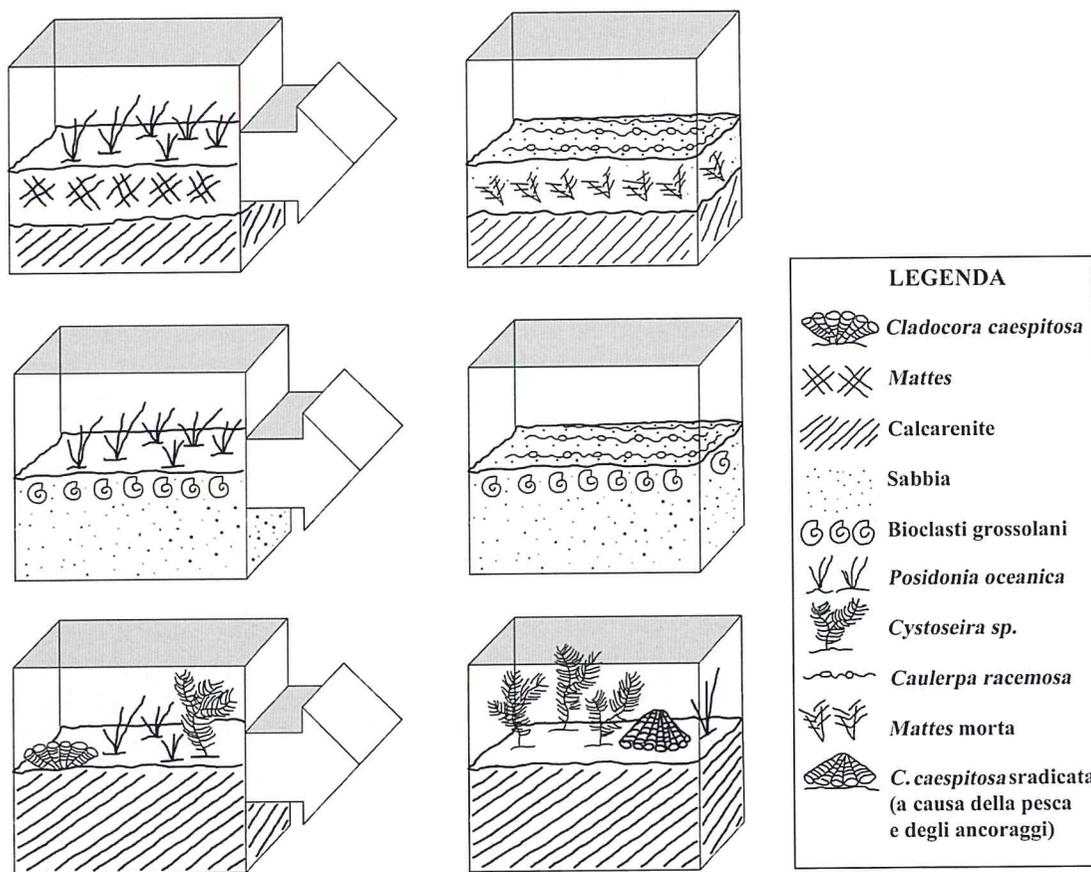


Figura 9 - Substrati su cui cresce la *P. oceanica* ed evoluzione delle biocenosi desunta nel rilevamento diretto in immersione.

Conclusioni

L'esame integrato dei parametri morfosedimentologici e biocenotici ha permesso di ottenere informazioni sulla dinamica del sistema sommerso costiero della baia compresa tra Torre San Leonardo e Torre Canne. Il rilevamento batimetrico ha consentito di individuare, fra 0 e 35 e oltre 45 m di profondità, due superfici definite da pendenza costante verso il largo e separate da una piccola scarpata, corrispondenti a due terrazzi. Quello a minore batimetria è disseccato da incisioni fluviali relitte, dirette prosecuzioni a mare delle lame che discendono dall'Altopiano delle Murge.

Il rilevamento dei fondali prospicienti la baia entro i 20 metri ha permesso, quindi, di caratterizzare in dettaglio i fondali della spiaggia sommersa e di riconoscere le principali biocenosi bentoniche rappresentate dalle alghe fotofile (AP) fra 0 e 8/12 m di profondità; dalla prateria di *P. oceanica* (HP) fra 8/12 e 15/17 m di profondità; e dal coralligeno (C) fra i 16/18 sino oltre i 30 m di profondità.

L'analisi speditiva della *P. oceanica* in loco ha permesso di individuare le strutture di erosione e di desumere l'evoluzione delle biocenosi presenti sui fondali, con particolare riferimento alla presenza di terrazzi di *mattes* morta e alla colonizzazione di *C. racemosa*; nel complesso essa ha permesso di riconoscere la fase di marcata regressione che attualmente sta interessando il posidonieto.

Lo studio granulometrico dei campioni ha consentito di caratterizzare i sedimenti della spiaggia sommersa: le sabbie campionate sotto costa, dalla linea di riva fino ai 5-6 metri di profondità, sono medio-fini e ben selezionate; le sabbie prelevate fino ai -20 metri sono medio-grossolane e presentano un assortimento maggiore. I campioni sono complessivamente privi della frazione siltoso-argillosa, dispersa al largo per effetto della particolare conformazione batimetrica dei fondali che presentano canali e scarpate. L'analisi statistica dei dati granulometrici ha permesso di ricostruire l'andamento della deriva litorale verso SE. L'aumento percentuale della popolazione di sabbie avente la moda nell'intervallo $1 \div 2 \phi$ pare suggerire il rifornimento dei fondali ad opera del sedimento proveniente dal cordone dunare; esso è attualmente in forte erosione proprio nella zona settentrionale della baia (Fig. 10a,b). Il trasporto di materiale proveniente dall'erosione dei cordoni dunari definisce la direzione generale del trasporto litorale prevalente da NO verso SE in accordo con le caratteristiche meteomarine del paraggio caratterizzato da venti regnanti e dominanti dai quadranti settentrionali (Schinaia, 2001). La rifrazione del moto ondoso dai quadranti settentrionali ad opera delle strutture del porto di Torre Canne e la deriva secondaria indotta dai venti provenienti da SE è invece la causa dell'accumulo di sedimento nel porto di Torre Canne, in lento e costante interrimento ad opera di sabbie fini.



Figura 10 - Due aspetti dello stato attuale della duna costiera nella baia di Torre Canne: nella zona più nordoccidentale, presso i centri alberghieri e l'abitato di Torre Canne, essa è stata totalmente demolita e sostituita da un terrapieno artificiale (a sinistra); nella zona centrale presso Lido Morelli essa raggiunge ancora i circa 10 m di quota ma in più punti mostra evidenti segni di dissesti in atto (a destra).

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano in particolare il Professor Giovanni Palmentola, responsabile del progetto Cofin 1999-2000, per aver reso possibile i lavori qui sintetizzati. Sentiti ringraziamenti vanno al Prof. Nicola Walsh ed al Dott. Gianfranco Andriani del Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Geologia e Geofisica dell'Università degli Studi di Bari, nonché al Prof. Piero Dellino e al Prof. Michele Di Piero del Dipartimento Geomineralogico per i suggerimenti e la disponibilità prestata durante la ricerca.

Un marinaresco ringraziamento al Signor Marco Carani e a tutto il personale dell'approdo di Dimensione Mare nel Porto di Villanova (Ostuni) per la continua e competente assistenza tecnica prestata in fase di messa a punto del sistema di rilevamento e durante le operazioni in mare.

Il presente lavoro è un contributo all'IGCP Project 437 UNESCO-IUGS (Resp. Prof. Colin Murray-Wallace)

Lavoro eseguito nell'ambito del progetto M.U.R.S.T., Cofin 1999-2000 (ex 40%), "Bilancio sedimentario dei sistemi costieri italiani. Processi naturali ed influenze antropiche" (Resp. Naz.: Prof. Giuliano Fierro; Resp. U.O.L.: Prof. Giovanni Palmentola) e pubblicato con Fondi di Ateneo (anno 2001) "Variazioni parossistiche del livello del mare e morfogenesi dunare: ciclicità storica della pericolosità lungo la fascia costiera" (Resp. Dott. Giuseppe Mastronuzzi).

Bibliografia

- Abbiati M. (ed) (1991) - *Lezioni del Corso Formativo per Ricercatore Scientifico Subacqueo*. International School for Scientific Diving, Università degli Studi, Pisa, 240 pp.
- Abbo D. (1997) - *Il reparto OSSALC delle unità navali*. Rivista Marittima, CXXX, 3: 29-34.
- Caldara M., Centenaro E., Mastronuzzi G., Sansò P. e Sergio A. (1998) *Features and present evolution of Apulian coast (Southern Italy)*. Journal of Coastal Research, SI 26: 55-64.
- Ciavola P., Gatti M., Tessari U., Zamariolo A. e Del Grande C. (2000) - *Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici*. Studi Costieri, 2: 175-188.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1987) - *L'analisi multivariata applicata alla caratterizzazione ambientale dei litorali nord-abruzzesi (medio Adriatico)*. Mem. Soc. Geol. It., 37: 379-389.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1993) - *The distribution of sediments and the identification of residual materials on the sea bottom of Southern Marches (Italy)*. Marine Geology, 113: 273-281.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1995) *Foglio 191, Ostuni*. Atlante delle spiagge italiane. CNR-MURST.
- Di Muccio L. A. e Mastronuzzi G. (2000) - *Le pocket beach di Vulcano (Isole Eolie, Sicilia): analisi morfo-sedimentologica*. Studi Costieri, 3: 41-55.
- 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.
- Giraud G. (1977) - *Essai de classement des herbiers de Posidonia oceanica (Linnè) Delile*, Botanica Marina, 20: 487-491.
- Mastronuzzi G. e Sansò P. (1993) - *Caratteri ed evoluzione attuale del litorale tra le foci del fiume Fortore e del fiume Ofanto*. Bonifica, 8: 83-90.
- Mastronuzzi G., Palmentola G. e Sansò P. (2001) - *Evoluzione morfologica della fascia costiera di Torre Canne (costa adriatica, Puglia)*. Studi Costieri, 4: 19-31.
- Mastronuzzi G., Palmentola G., Sansò P. (2002) - *Lineamenti e dinamica della costa pugliese*. Studi Costieri, 5: 9-22.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2002a) - *Holocene coastal dune development and environmental changes in apulia (southern italy)*. Sedimentary Geology, 150: 139-152.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2002b) - *Pleistocene sea level changes, sapping processes and development of valleys network in Apulia region (southern Italy)*. Geomorphology, 46: 19-34
- Mazzella L., Scipione M.B., Gambi C.M., Fresi E., Buia M.C., Russo F., De Maio R., Lorenti M. e Rando A. (1986) - *Le praterie sommerse del Mediterraneo*. Lab. Ecologia del Benthos, Ischia, pp.61.
- Pearson E.S. e Hartley H.O. (1969) - *Biometrika tables for statisticians*. Cambridge University Press, Cambridge, 202.
- Pérès J.M. (1967) - *The Mediterranean Benthos*. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 5: 449-553.
- Peres J.M. e Picard J. (1964) - *Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée*, Rec. Trav. Stat. Mar. d'Endoume, 31: 449-533.
- Sansò P., Mastronuzzi G. e Gianfreda F. (2000) - *Torre Canne, spiaggia ad alto rischio ambientale*. L'Osservatorio, 12, 35-43.
- Schinaia S. A. (2001) - *Dinamica morfologica ed analisi dei sedimenti della spiaggia di Torre San*

Leonardo – Torre Canne (Brindisi). Tesi di Laurea, Dip. Geol. e Geof., Università degli Studi, Bari, 124 pp, inedita.

Simeoni U. (1992) - *I litorali tra Manfredonia e Barletta (basso Adriatico): dissesti, sedimenti, problematiche ambientali*. Boll. Soc. Geol. It., 111, 367-398.

Simeoni U. e Bondesan M. (1997) - *The role and responsibility of man in the evolution of the Italian Adriatic coast*. Bull. Inst. Oceanogr. Monaco, 18: 11-132.

Manoscritto ricevuto l'11/2/2002, accettato il 21/8/2002.

Caratterizzazione geochimica ambientale di alcuni litorali della Sardegna orientale

Concetta Ferrara¹, Anna Maria Caredda¹, Alessandro Cristini¹ e Guido Alberti²

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Cagliari, via Trentino 51, 09127 Cagliari.

²Dipartimento di Scienze Chimiche, Università di Cagliari, Complesso Universitario, 09042 Monserrato.

Riassunto

Questo lavoro ha come obiettivo lo studio di base delle caratteristiche ambientali di alcune spiagge della Sardegna orientale dominate dal moto ondoso. Sono state analizzate le caratteristiche granulometriche e composizionali di 64 campioni prelevati sulla battigia di questi litorali, parzialmente antropizzati, della costa orientale. Sono stati determinati in particolare i tenori dei metalli pesanti ed in tracce più significativi (Rb, Sr, Ba, Co, Zn, Pb) dato che la loro presenza potrebbe essere indice di inquinamento ambientale.

Particolarmente utile, a tale scopo, è stato il confronto con analoghi sedimenti provenienti da alcune spiagge della costa occidentale già caratterizzate, dal punto di vista ambientale, con gli stessi parametri geochimici. Da tale confronto è stato riscontrato che la litologia è uno dei principali fattori (litologie, modalità di trasporto dei corsi d'acqua e processi sedimentari legati all'azione del moto ondoso) che possono controllare la distribuzione dei metalli nelle spiagge della costa orientale, a differenza di quanto accade nel settore occidentale e in altre aree dove i tenori di metalli tossici sono in relazione alla presenza di siti minerari dismessi e di varie attività antropiche. Infine l'elaborazione statistica dei dati tramite l'analisi multivariata ha permesso una più completa definizione delle spiagge della costa orientale.

Parole chiave: sedimenti costieri, Sardegna orientale, chimica ambientale, geochimica, analisi multivariata.

Abstract

The aim of this research is the environmental characterization of some beaches in the eastern coast of Sardinia (Italy) by means of a textural and geochemical study of littoral sediments. The sands studied come from 64 sampling points. The main lithotypes outcropping in the coastal drainage areas are: granite, metamorphic and carbonate rocks, in addition to some volcanic rocks. The environmental quality of the analysed systems is correlated with the presence of heavy metals (Rb, Sr, Ba, Co, Zn, Pb). The results, compared with those of beach sediments from western Sardinian coast and from other coast systems, pointed out that the main factors controlling the heavy metal accumulation are the lithology, the streams and the sedimentary processes triggered by the wave movement. The multivariate analysis of sedimentological, mineralogical and geochemical data allowed a more complete characterization of the environments examined.

Keywords: coastal sediments, eastern Sardinia, environmental chemistry, geochemistry, multivariate analysis.

Introduzione

I sedimenti sono indicatori delle caratteristiche originarie delle rocce da cui derivano, ma per quanto riguarda la presenza di metalli pesanti e in tracce, questi ultimi possono provenire dalle litologie presenti nei bacini alimentatori oppure dalle attività antropiche e sono supportati da determinate granulometrie (Eyre e McConchie, 1993; Covelli e Fontolan, 1997; Dinelli et al., 2000).

Le piane costiere in esame della costa orientale sarda, sede di molteplici attività umane, sono gli ambienti maggiormente interessati dal mescolamento di sedimenti di diverse provenienze. In questa sede i corsi d'acqua trasportano e depositano materiali di granulometria superiore a 0.06 mm (Carboni et al., 1987), come carico di fondo. Questi materiali si arricchiscono ulteriormente di metalli pesanti, presenti nelle acque come ioni complessi (anioni inorganici) o come particolato, adsorbiti dalle frazioni granulometriche più fini in sospensione, o da particolari specie mineralogiche, oppure chelati da sostanze organiche in soluzione (Perdue, 2001; Luther, 1995). In altre piane della costa occidentale, il trasferimento dei sedimenti alluvionali nel retro spiaggia dei relativi ambienti di transizione causa un accumulo di frazione fine che diventa un sito di arricchimento di metalli (Careda et al., 1999). Il periodico trasporto del carico alluvionale negli adiacenti ambienti costieri dominati dal moto ondoso, caratterizzati da differenti condizioni energetiche e chimico-fisiche dell'acqua, ha come conseguenza la separazione delle varie popolazioni granulometriche. Ciascuna di esse si comporta come un gruppo a se stante di particelle che può contenere metalli dall'origine oppure se ne arricchisce adsorbendoli dall'ambiente circostante. La componente sabbiosa del carico di fondo si deposita velocemente con il proprio carico di metalli mentre i materiali più fini vengono portati al largo e sedimentati successivamente.

Questo lavoro ha come obiettivo la caratterizzazione geochemica ambientale, finora inesistente, di alcune spiagge della Sardegna orientale che in questi ultimi anni hanno subito una parziale antropizzazione (villaggi turistici, porticcioli turistici, ecc.). In tali litorali dominati dal moto ondoso, le litologie, in cui sono presenti numerose mineralizzazioni, variano da nord a sud dal carbonatico al metamorfico ed infine al magmatico. Le analisi sui sedimenti di due corsi d'acqua che si riversano su questa costa, Quirra e Corr'e Pruna i quali scorrono rispettivamente su litologie prevalentemente metamorfiche e granitiche, indicano quali elementi delle litologie sono contenuti nei sedimenti delle spiagge (Cristini et al., 1981; Carboni et al., 1987). Si è ritenuto opportuno confrontare i sedimenti di queste spiagge, che non risentono delle influenze antropiche apparenti, con quelli di alcune spiagge della costa sud occidentale della Sardegna, sulle quali insistono importanti discariche minerarie provenienti da miniere ormai in disuso da circa dieci anni: la spiaggia della piana alluvionale del Rio Piscinas, la spiaggia di Buggerru e quella della parte meridionale del Golfo di Oristano (Careda et al., 1999; Loi, 2000; Grosso, 1999; Pilia, 1999). I dati ottenuti vengono confrontati con quelli di altri sistemi costieri influenzati da insediamenti industriali (Voutsinou-Taliadouri e Varnavas, 1995) agricoli e urbani (Jones, 1973; Frascari et al., 1984; Establier et al., 1985; Menegazzo et al., 2001).

Caratteristiche geomorfologiche e geografiche generali delle coste

Il tratto costiero esaminato si estende per circa 125 km sulla costa orientale ed è compreso tra le località di Cala Gonone (Golfo di Orosei) a nord e Cala Sinzias a sud (Fig. 1). Le spiagge campionate sono ubicate nel Golfo di Orosei, nelle piane costiere dei fiumi Quirra e Flumendosa in cui è compresa la spiaggia di Porto Corallo, e nelle piane costiere del Rio Picocca e Rio Corr'e Pruna con annessa la spiaggia di Costa Rei. Queste piane, la cui attuale configurazione morfologica e sedimentaria è riconducibile a processi fluviali e litorali quaternari (Barca et al. 1981; Carboni et al. 1987) hanno una modesta estensione. Esse terminano sul mare con spiagge costituite da sedimenti ciottolosi, di dimensioni medio piccole, e sabbiosi a componente litologica varia che riflettono essenzialmente il tipo di basamento presente nei vari bacini. Le spiagge della parte meridionale del Golfo di Orosei sono delle "pocket beaches" ciottolose alimentate solo dalla scogliera carbonatica in cui si formano (Ferrara et al. 1997).

La costa orientale è dominata da venti con direzione E, NE, SE, l'escursione di marea è irrilevante

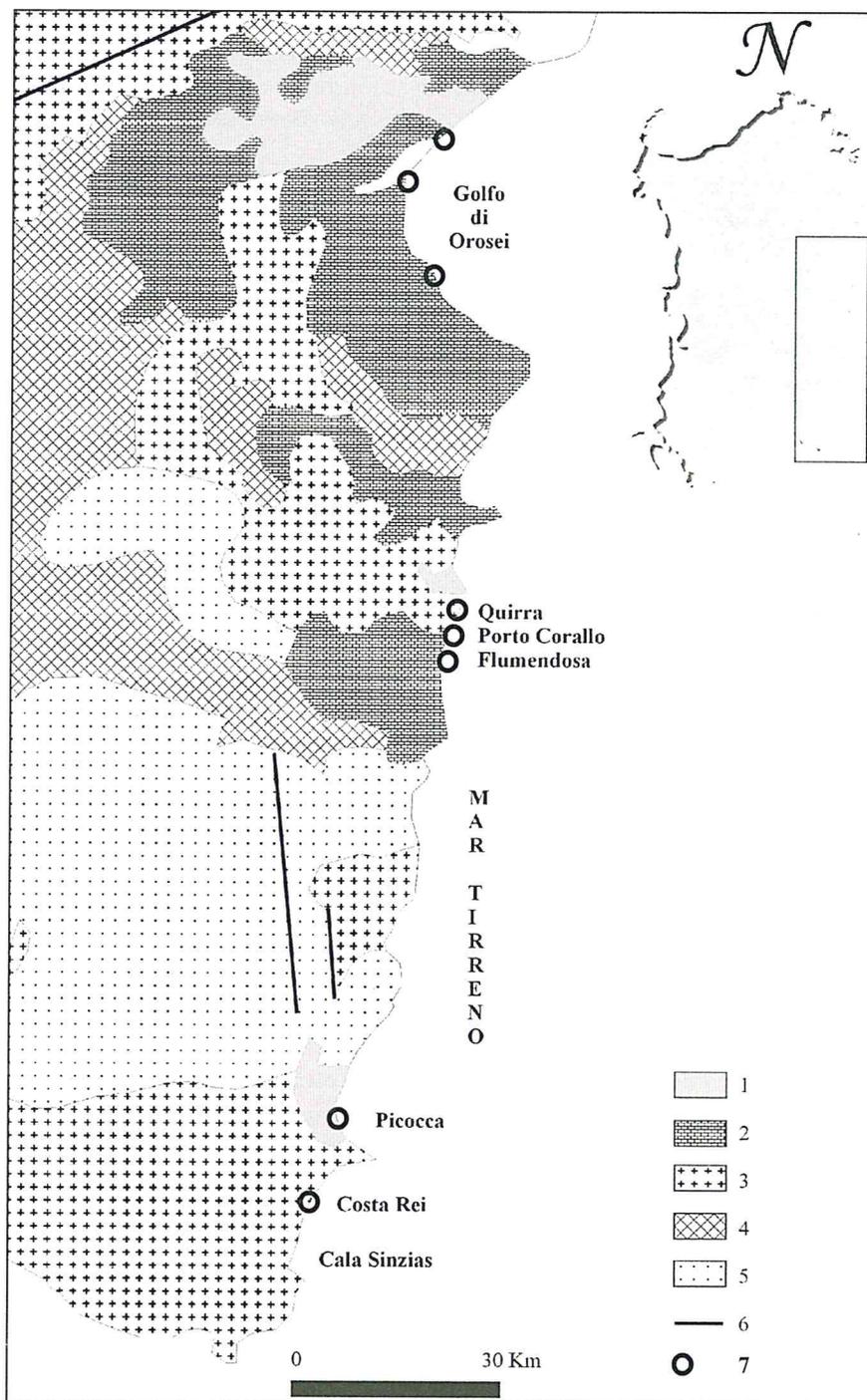


Figura 1 - Caratteristiche geologiche dell'area studiata: 1) ciclo vulcanico alcalino, transizionale e subalcalino plio-pleistocenico; 2) depositi di piattaforma carbonatica (successioni marine e transizionali del triassico medio p.p. - cretaceo inferiore); dolomie e calcari dolomitici, calcari bioclastici, calcari oolitici e a oncoidi, calcari selciferi, calcari micritici, calcari marnosi e marne; 3) basamento ercinico: complesso intrusivo (filoni e rocce plutoniche); 4) complesso metamorfico ercinico in facies a scisti verdi: falde interne (metarenarie, quarziti e filladi); 5) complesso metamorfico ercinico in facies a scisti verdi: falde esterne (metarenarie, quarziti, filladi, metacalcari nodulari, scisti neri e quarziti); 6) principali faglie regionali (da Carmignani et al., 1992; modificata); 7) punti di campionamento.

per il Tirreno centrale è di circa 22 cm), per cui tutte le spiagge di questa costa hanno caratteristiche morfosedimentarie di tipo “wave dominated system” con una battigia poco estesa dove si scarica la maggior parte della energia del moto ondoso i cui valori medi annui sono dell’ordine di 4×10^6 t/m/m (Atzeni e Ginesu, 1993); il movimento dei sedimenti avviene prevalentemente lungo la riva in direzione sud (Cristini et al, 1992; Ferrara et al., 1997).

Sulla costa occidentale i venti principali provengono da NO e SE, le caratteristiche deposizionali sono di tipo “wave dominated system” con valori dell’energia media annua del moto ondoso che arrivano fino a circa 13×10^6 tm/m (Atzeni e Ginesu 1993). Il movimento dei sedimenti è prevalentemente in direzione sud, lungo riva, e verso il largo, di tipo “onshore – offshore” e viceversa (Atlante delle Spiagge, 2000).

I corsi d’acqua considerati sono a regime spiccatamente torrentizio, con piene autunnali e primaverili e con portate estive insignificanti e limitate al subalveo, a causa del regime pluviometrico, della prevalente impermeabilità dei terreni e della scarsa copertura vegetale (Carboni et al., 1987).

Caratteristiche litologiche

I sedimenti derivano dall’erosione del basamento paleozoico e delle coperture mesozoiche, terziarie e plioquaternarie che costituiscono i rilievi delimitanti le piane (Fig. 1). I rilievi paleozoici sono costituiti da :

- successioni terrigene (metarenarie, quarziti e filladi) del Cambro-Ordoviciano inferiore nell’entroterra del Golfo di Orosei;
- complesso magmatico e vulcano-sedimentario costituito da metarenarie micacee, quarziti alternate a metapeliti e rari conglomerati dell’Ordoviciano (successione preordoviciano medio delle arenarie di San Vito e della formazione di Solanas) presente nelle piane del Quirra e del Flumendosa;
- marmi e calcescisti Silurico-Devoniani nel bacino del Quirra e del Flumendosa;
- complesso intrusivo filoniano (porfidi granitici, aplitici e pegmatitici) presente nel golfo di Orosei, e intrusivo plutonico (leucograniti equigranulari e granodioriti monzonitiche) del Carbonifero superiore-Permiano nel bacino del Quirra, nelle piane del Rio Picocca, nella spiaggia di Costa Rei e nell’entroterra del Golfo di Orosei.

I sedimenti di copertura sono costituiti da conglomerati e dolomie permotriassiche e giurassiche nelle piane del Quirra e del Flumendosa e da depositi carbonatici di piattaforma e dolomitici del Trias nel golfo di Orosei. Coperture effusive, trachi-basaltiche plio-pleistoceniche affiorano localmente a Capo Ferrato (settore settentrionale della spiaggia di Costa Rei) e nel Golfo di Orosei a nord. Le deboli coperture quaternarie sono formate da depositi di versante, sedimenti alluvionali e marini pleistocenici che costituiscono l’ossatura delle piane attuali e da sabbie costiere oloceniche (Beccaluva et al., 1977; Carmignani et al., 1982; Dieni e Massari, 1985; Barca et al., 1996). Numerose mineralizzazioni (Marcello et al., 1978) prevalentemente a scuri sono presenti nei bacini alimentatori delle spiagge di Quirra, del Flumendosa e del Picocca.

Campionamento e tecniche analitiche

Durante quattro campagne di campionatura sono stati prelevati 64 campioni rappresentativi della variabilità granulometrica dei tratti costieri esaminati. La campionatura, effettuata sulla battigia, ha interessato i primi 5 cm. I punti di campionatura sono indicati nella Figura 1. I risultati delle analisi chimiche sono riportati nelle Tabelle 1 e 2, mentre la Tabella 3 riporta i valori medi di alcune specie chimiche delle principali litologie da cui derivano i sedimenti studiati: delle quattro litologie indicate, i valori per le rocce metamorfiche (scisti) sono valori medi della crosta, non essendo conosciuti dati regionali.

I campioni sono stati preliminarmente essiccati in stufa a 40°C. Tutte le analisi sono state effettuate sul campione totale senza differenziare la frazione fine ($> 4\Phi$), essendo i sedimenti prevalentemente sabbiosi. Le analisi granulometriche sono state eseguite mediante setacciatura a secco a intervalli di 0.25Φ con maglie comprese tra -2.5 e $+4 \Phi$ utilizzando la scala di Krumbein (1934); nella Figura 2 sono rappresentate le curve di distribuzione granulometriche relative ai campioni più rappresentativi di ogni spiaggia. I sedimenti sono stati inoltre caratterizzati mediante i parametri di Folk e Ward

(1957): diametro medio (M_z), selezione (σ_1) e asimmetria (Sk_1). La composizione mineralogica è stata determinata su polveri per via diffrattometrica con un diffrattometro Philips PW 1710 usando la radiazione Cu-K α e un monocromatore di grafite; i dati ottenuti sono stati elaborati con il programma Philips PC-APD. Per le analisi chimiche il campione totale è stato vagliato a 2 mm, macinato, e circa 0.15 g sono stati trattati con H₂O₂ e solubilizzati in forno a microonde con una soluzione di "acqua regia" (HNO₃ e HCl (1:3)) e HF.

La concentrazione degli elementi chimici maggiori e minori è stata determinata usando diverse tecniche analitiche (Sturgeon et al., 1982; Macdonald e O'Brien, 1985; Milliward e Kluckner, 1989): gli elementi maggiori sono stati determinati in Fluorescenza X con uno Spettrometro Philips PW 1400, mentre Ba, Sr, Rb con il Plasma Ottico (ICP-OES) (ARL 3520 B) e Pb, Zn, Co sono stati analizzati con l'assorbimento atomico con fornetto a grafite Perkin Elmer 3030 Zeeman (GFAAS). L'accuratezza delle determinazioni chimiche è stata verificata usando l'International Marine Sediment Reference Standard BCSS-1 (National Research Council, Canada). Il confronto fra i dati certificati per lo standard e i dati ottenuti ha mostrato le seguenti variazioni: Al \pm 3.8%; Fe \pm 3.0%; Mn \pm 2.7%; Mg \pm 1.2%; Pb \pm 4.8%; Zn \pm 6.5%; Co \pm 6.0%.

Le elaborazioni statistiche sono state effettuate con il programma SPSS. E' stata utilizzata la "Cluster Analysis" e l'analisi Fattoriale con la "Varimax Rotation".

Analisi dei dati e discussione

Caratteristiche tessiturali

I valori dei parametri di Folk e Ward (1957) in generale indicano sedimenti a granulometria compresa tra i granuli e le sabbie medie (-1.70 e $+1.98 \Phi$), da ben selezionati a molto mal selezionati ($0.19 < \sigma_1 < 2.56 \Phi$), a maggioranza fortemente asimmetrico-negativi ($0.34 < Sk_1 < -0.57$). L'analisi delle curve granulometriche mostra che i sedimenti risultano essere prevalentemente unimodali; in alcune spiagge si riscontra tuttavia una variabilità granulometrica evidenziata dalla presenza di mode o code grossolane da correlare prevalentemente più con gli apporti locali che con la dinamica costiera (moto ondoso e correnti lungo costa) (Fig. 2).

Sulla base delle caratteristiche tessiturali i vari tratti costieri sono definiti da nord a sud come segue: nel Golfo di Orosei si distinguono due tipologie: a) spiagge con sabbie medio-grosse, quasi sempre unimodali ($0.25 < M_z < 1.57 \Phi$), da molto bene a moderatamente selezionate ($0.19 < \sigma_1 < 0.85 \Phi$) con curve granulometriche tendenti ad essere fortemente asimmetriche negative per la presenza di code di granuli ($0.04 < Sk_1 < -0.35$), a nord (Fig. 2a, camp.GO1, GO7); b) spiagge ciottolose costituite da sedimenti polimodali il cui diametro medio è compreso tra -1.70 e $+1.72 \Phi$ (granuli e sabbie medie) e curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico negativo ($0.16 < Sk_1 < -0.57$) a sud (Fig. 2 a, camp.GO8, GO10).

Nella spiaggia del Quirra i sedimenti sono costituiti da granuli, sabbie molto grosse e grosse ($-1.02 < M_z < 0.07 \Phi$) prevalentemente unimodali, con un grado di selezione moderato ($0.58 < \sigma_1 < 1.01 \Phi$) e curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico positivo ($0.32 < Sk_1 < -0.05$) (Fig. 2b).

Nella spiaggia di Porto Corallo i sedimenti sono costituiti da sabbie medio grosse ($0.63 < M_z < 1.57 \Phi$) la maggior parte unimodali, da molto ben a moderatamente selezionate ($0.31 < \sigma_1 < 1.08 \Phi$), con curve granulometriche tendenti al fortemente asimmetrico positivo e negativo ($0.27 < Sk_1 < -0.34$) (Fig. 2c).

Nella spiaggia alla foce del Flumendosa i sedimenti sono caratterizzati da sabbie medio grosse ($0.05 < M_z < 1.07 \Phi$), unimodali, da ben a molto ben classate ($0.19 < \sigma_1 < 0.55 \Phi$) con curve granulometriche prevalentemente asimmetrico negative ($0.17 < Sk_1 < -0.26$) (Fig. 2d).

Nella spiaggia alla foce del Picocca i sedimenti sono costituiti da sabbie medie ($1.08 < M_z < 1.98 \Phi$) unimodali, molto ben classate ($0.31 < \sigma_1 < 0.35 \Phi$) con curve quasi simmetriche ($0.10 < Sk_1 < -0.17$) (Fig. 2e).

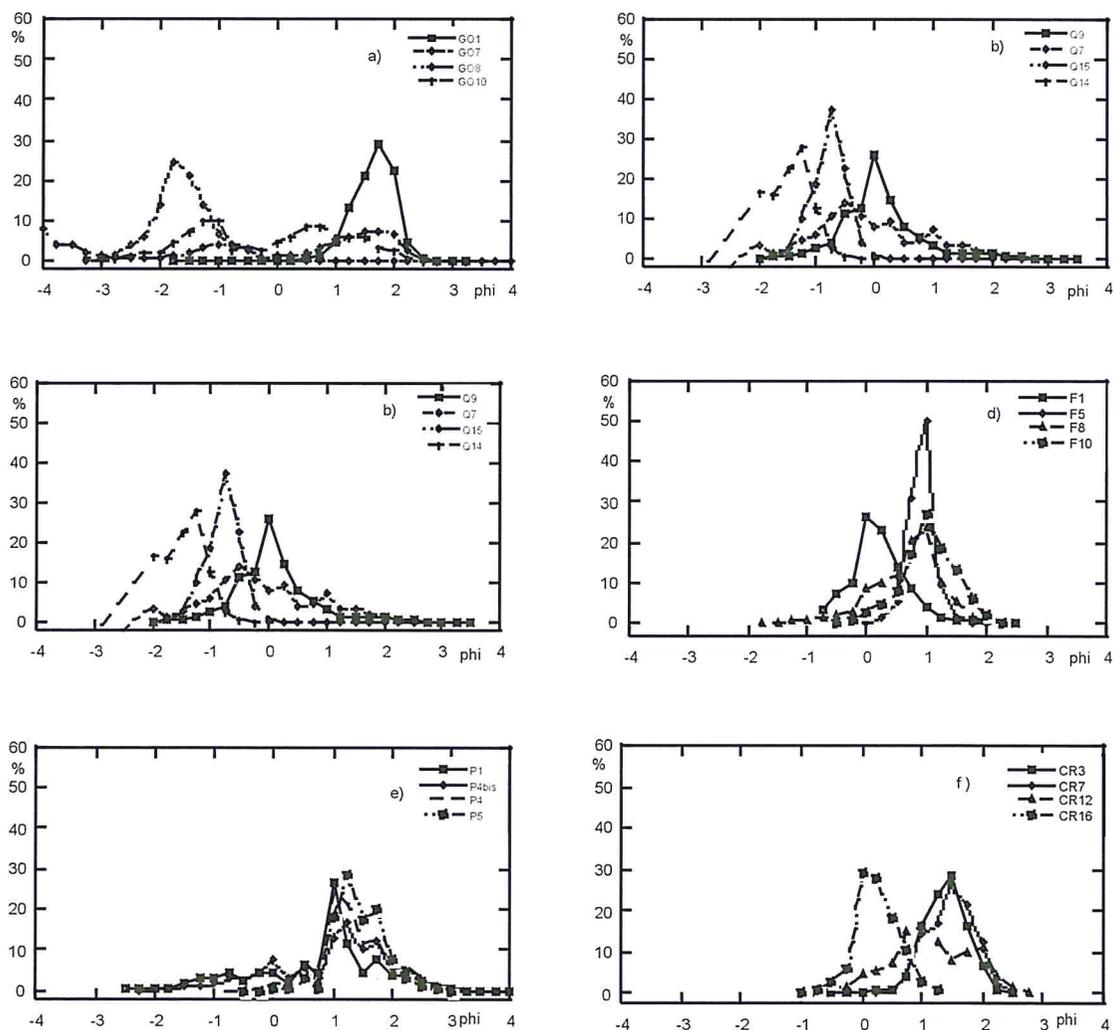


Figura 2 - Curve granulometriche dei vari tipi di di sedimenti nelle singole spiagge: a) Golfo di Orosei, b) Quirra, c) Porto Corallo, d) Flumendosa, e) Rio Piccocca, f) Costa Rei.

Nella spiaggia di Costa Rei i sedimenti sono costituiti da sabbie medio grosse ($-1.37 < Mz < 1.93 \Phi$) la maggior parte unimodali, da molto ben a moderatamente ben classate ($0.25 < \sigma_1 < 0.68 \Phi$) con curve granulometriche prevalentemente simmetriche ($0.21 < Sk_1 < 0.26$) (Fig. 2 f).

Sulla base di questi valori granulometrici, i sedimenti da nord verso sud si possono dividere in quattro classi: ghiaie, sabbie molto grosse, sabbie grosse e sabbie medie. Tali classi sono riconducibili ad una differente alterazione, prevalentemente fisica, delle rocce madri di provenienza. Dove sono presenti litologie metamorfiche e carbonatiche, i sedimenti sono costituiti da ghiaie (Golfo di Orosei a sud e Quirra), sabbie molto grosse e grosse (Quirra, Porto Corallo, Flumendosa, Picocca). Le litologie granitiche alimentano con sabbie medie e grosse le spiagge del Golfo di Orosei a nord (dove sono presenti anche componenti locali vulcaniche), di Picocca e di Costa Rei.

Composizione mineralogica

Le fasi mineralogiche principali presenti sono: quarzo, calcite, feldspati di sodio e potassio, mica, e clorite (intendendo con il termine mica oltre alle miche propriamente dette anche l'illite). Il quarzo è sempre presente in quantità rilevanti, mentre le altre fasi variano in funzione delle litologie interessate. I sedimenti studiati sulla base della composizione mineralogica possono essere suddivisi in 4 gruppi.

I campioni provenienti dalla parte meridionale del Golfo di Orosei costituiscono il primo gruppo, in cui il carbonato di calcio è la fase prevalente e quasi unica (GO9), solo in alcuni di essi sono state individuate tracce di aragonite e dolomite. Negli ultimi termini della serie (GO14), pur essendo sempre la calcite la fase prevalente, la componente quarzosa e feldspatica è presente in piccole quantità.

I campioni prelevati nella parte settentrionale del Golfo sono ascrivibili ad un secondo gruppo. In questi (GO2, GO4), la componente carbonatica è quasi assente ed i campioni sono costituiti principalmente da feldspati, quarzo, mica e piccole quantità di clorite. Caratteristiche simili, a parte la totale assenza della componente carbonatica e tenori inferiori in feldspati, presentano i campioni della spiaggia di Quirra (Q11).

Il terzo gruppo, in cui i fillosilicati, costituiti da mica (principalmente muscovite) e clorite, sono particolarmente abbondanti, comprende i campioni di Porto Corallo, quelli della spiaggia del Flumendosa e quelli del Picocca (PC14, F5, P5).

Nell'ultimo gruppo, rappresentato da campioni appartenenti alla zona di Costa Rei (CR16), la componente feldspatica è rilevante rispetto alle altre fasi mineralogiche; la mica è scarsamente rappresentata mentre la clorite è pressochè assente.

In Figura 3 sono riportati i diffrattogrammi più significativi dei gruppi individuati; per valutare i valori relativi delle fasi mineralogiche principali si sono prese come riferimento le intensità dei riflessi che le contraddistinguono, nell'intervallo angolare compreso tra 5 e 30° 2θ.

Per la calcite (CA) si è preso come riferimento il picco a 3.03 Å (29.48° 2θ), per la clorite (CL) quello a 7.03 Å (12.59° 2θ), per la mica (M) il picco a 10 Å (8.85° 2θ), per il quarzo (Q) il riflesso a 4.26 Å (20.85° 2θ), per il K-feldspato (KF) e per il plagioclasio NaF rispettivamente riflessi a 3.24 e 3.19 Å (27.53° e 27.97° 2θ).

Caratteristiche geochemiche

Lo studio delle diverse litologie è stato considerato un elemento importante da cui partire per stabilire eventuali apporti antropici che possano influenzare gli ambienti studiati.

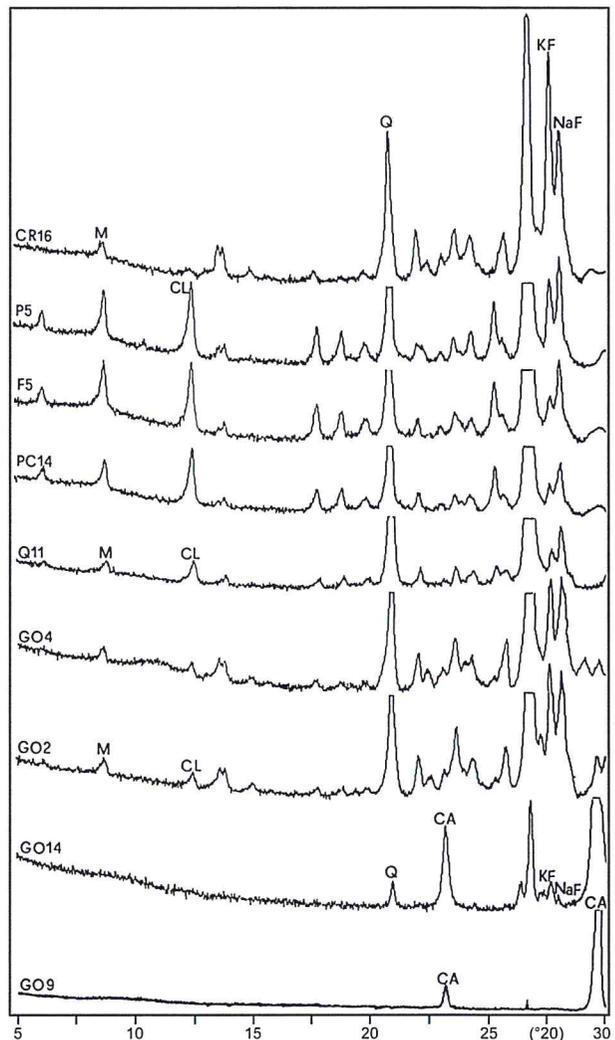


Figura 3 - Sequenza dei diffrattogrammi dei campioni più rappresentativi delle singole spiagge.

Tabella 1 - Concentrazioni e medie delle specie chimiche nei sedimenti delle spiagge in studio.

Campione	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	MnO %	Na ₂ O %	K ₂ O %
a) Golfo di Orosei: parte nord (GO1-GO8), parte sud (GO9-GO15)									
GO1	62.0	8.2	0.08	0.60	0.89	12.9	0.02	2.4	3.03
GO2	75.0	10.9	0.07	0.61	0.46	3.2	0.01	2.6	4.23
GO3	74.2	10.2	0.07	0.69	0.74	4.1	0.02	2.6	3.68
GO4	72.1	10.7	0.09	0.71	0.63	5.4	0.02	2.5	4.31
GO5	58.7	8.0	0.08	0.63	0.44	15.9	0.02	1.8	3.14
GO6	63.2	8.7	0.07	0.59	0.73	11.6	0.02	2.5	3.44
GO7	29.6	3.5	0.07	0.80	1.19	37.6	0.02	0.9	1.19
GO8	35.2	3.7	0.07	0.86	0.88	34.3	0.02	0.8	1.45
media	58.7	7.98	0.08	0.69	0.75	15.62	0.02	1.99	3.06
valor min.	29.6	3.53	0.07	0.59	0.44	3.15	0.01	0.78	1.19
valor max.	75.0	10.88	0.09	0.86	1.19	37.58	0.02	2.58	4.31
dev. st.	17.4	2.92	0.01	0.10	0.25	13.34	0.00	0.77	1.12
GO9	0.43	0.09	n.r.	0.03	0.41	55.3	0.01	0.13	0.02
GO10	1.67	0.24	n.r.	0.06	0.54	53.4	0.01	1.11	0.10
GO11	0.30	0.07	n.r.	0.02	0.40	55.2	0.01	0.14	0.01
GO12	2.88	0.30	n.r.	0.05	0.82	52.7	0.01	0.72	0.15
GO14	2.84	0.25	n.r.	0.03	0.50	53.7	0.01	0.38	0.11
GO15	0.20	0.05	n.r.	0.02	0.39	55.4	0.01	0.20	0.10
media	1.39	0.17		0.04	0.51	54.29	0.01	0.45	0.08
valor min.	0.20	0.05		0.02	0.39	52.67	0.01	0.13	0.01
valor max.	2.88	0.30		0.06	0.82	55.44	0.01	1.11	0.15
dev. st.	1.26	0.11		0.02	0.16	1.17	0.00	0.39	0.05
b) Quirra e Porto Corallo									
Q7a	74.4	12.2	0.69	0.92	0.04	0.2	0.01	0.5	0.93
Q8a	74.2	13.6	0.70	0.87	0.08	0.2	0.01	0.5	0.92
Q9a	74.5	13.1	0.65	1.12	0.36	0.4	0.02	0.6	0.98
Q11a	73.6	13.3	0.77	1.64	0.55	0.3	0.02	0.7	1.25
Q14a	73.8	13.7	0.75	1.05	0.34	0.2	0.01	0.6	1.00
Q16	75.1	13.2	0.74	1.24	0.39	0.3	0.02	0.6	0.93
PC1	82.3	8.45	0.31	0.30	0.79	0.4	0.04	1.36	1.72
PC2	80.6	9.42	0.40	0.73	0.83	0.4	0.04	1.36	1.91
PC2b	79.5	10.6	0.41	0.56	0.95	0.4	0.04	1.1	2.09
PC3	80.1	9.68	0.39	0.38	0.95	0.5	0.03	1.27	1.95
PC4	80.7	9.32	0.37	0.70	0.83	0.5	0.03	1.37	1.89
PC4B	81.0	9.55	0.34	0.48	0.84	0.3	0.04	1.03	1.83
PC5	79.6	10.09	0.38	0.57	0.95	0.4	0.03	1.36	2.13
PC6	78.7	10.56	0.42	0.51	0.83	0.4	0.04	1.36	2.18
PC6b	71.9	12.46	0.85	1.8	1.65	1.3	0.09	1.01	2.28
PC10	84.7	6.04	0.39	1.39	0.81	0.8	0.03	0.8	1.39
PC11	82.8	6.57	0.43	1.79	0.86	0.8	0.04	0.9	1.56
PC12	81.9	7.28	0.63	2.07	0.96	1.2	0.05	0.9	1.69
PC13	83.0	5.88	0.74	2.05	0.96	1.4	0.05	0.7	1.3
PC14	77.9	7.6	1.14	3.56	1.14	2.11	0.08	0.9	1.52

Campione	SiO₂ %	Al₂O₃ %	TiO₂ %	Fe₂O₃ %	MgO %	CaO %	MnO %	Na₂O %	K₂O %
PC15	87.9	4.85	0.23	0.79	0.61	0.6	0.03	0.8	1.35
PC16	84.9	5.93	0.42	1.38	0.81	0.8	0.03	0.8	1.44
PC17	82.9	6.52	0.48	1.86	0.89	0.8	0.04	0.9	1.61
media	79.4	13.18	0.55	0.79	0.74	0.53	0.04	0.73	1.00
valor min.	71.9	12.23	0.23	0.30	0.04	0.17	0.01	0.46	0.92
valor max.	87.9	13.65	1.14	1.64	1.65	1.29	0.09	0.92	1.25
dev. st.	4.3	0.51	0.22	0.36	0.35	0.30	0.02	0.16	0.13
c) Flumendosa									
F1	84.8	7.77	0.23	2.58	1.12	0.34	0.03	1.24	1.56
F2	88.5	5.74	0.16	1.84	0.77	0.32	0.03	1.04	1.27
F3	81.3	9.12	0.31	3.59	1.35	0.57	0.05	1.31	1.79
F5	81.8	9.35	0.29	3.15	1.37	0.37	0.05	1.34	1.86
F6	77.2	9.87	0.06	5.67	0.17	1.33	0.07	1.26	1.79
F7	77.9	9.55	0.38	3.98	1.59	0.67	0.06	1.58	1.79
F8	82.2	8.35	0.32	3.37	1.44	0.06	0.05	1.24	1.69
F9	82.2	8.63	0.29	3.18	1.42	0.49	0.05	1.46	1.69
F10	81.9	8.65	0.03	3.26	1.44	0.53	0.05	1.56	1.67
media	82.0	8.56	0.23	3.40	1.19	0.52	0.05	1.34	1.68
valor min.	77.2	5.74	0.03	1.84	0.17	0.06	0.03	1.04	1.27
valor max.	88.5	9.87	0.38	5.67	1.59	1.33	0.07	1.58	1.86
dev. st.	3.4	1.24	0.12	1.05	0.45	0.35	0.01	0.17	0.18
d) Picocca e Costa Rei									
P1	81.9	9.17	0.26	2.81	1.29	0.05	0.04	0.15	2.04
P4	81.2	9.54	0.26	2.73	1.34	0.49	0.04	1.73	2.17
P4bis	76.6	12.32	0.37	3.49	1.71	0.55	0.05	1.78	2.64
P5	77.9	11.48	0.31	3.01	0.15	0.56	0.04	2.03	0.03
CR2	83.9	8.6	0.02	0.28	0.16	1.2	0.01	2.2	3.25
CR3	84.4	8.4	0.02	0.27	0.14	1.3	0.01	2.3	3.11
CR4	84.8	8.3	0.02	0.24	0.14	0.9	n.r.	2.2	3.19
CR5	83.8	8.8	0.02	0.27	0.15	1.1	0.01	2.3	3.41
CR6	84.6	8.1	0.02	0.29	0.18	1.6	0.01	2.3	2.81
CR7	84.7	8.0	0.05	0.52	0.21	1.8	0.01	2.1	2.46
CR8	83.5	8.2	0.03	0.36	0.35	2.5	0.01	2.3	0.03
CR9	83.6	8.5	0.02	0.29	0.21	1.7	0.01	2.4	3.08
CR10	80.8	10.1	0.03	0.27	0.22	1.9	0.01	2.7	3.94
CR11	80.7	9.8	0.04	0.53	0.28	2.6	0.01	2.5	3.28
CR12	79.1	10.9	0.04	0.40	0.31	2.3	0.01	2.9	3.72
CR13	78.2	10.3	0.12	0.74	0.48	0.4	0.02	2.8	3.32
CR14	75.8	12.9	0.04	0.45	0.33	2.5	0.01	3.4	4.47
CR16	78.1	12.2	0.04	0.45	0.25	1.6	0.01	3.2	3.79
media	81.3	9.76	0.10	0.97	0.44	1.38	0.02	2.29	2.82
valor min.	75.8	7.99	0.02	0.24	0.14	0.05	0.01	0.15	0.03
valor max.	84.8	12.86	0.37	3.49	1.71	2.62	0.05	3.43	4.47
dev. st.	3.0	1.60	0.12	1.14	0.48	0.79	0.01	0.70	1.18

Tabella 2 - Concentrazioni e medie dei metalli nei sedimenti delle spiagge in studio.

Campione	Rb mg/kg	Sr mg/kg	Ba mg/kg	Co mg/kg	Zn mg/kg	Pb mg/kg
a) Golfo di Orosei: parte nord (GO1-GO8), parte sud (GO9-GO15)						
GO1	105.4	226	600	n.r.	10.4	12.5
GO2	141.1	126	627	n.r.	11.3	25.4
GO3	130.2	115	580	n.r.	13.8	20.1
GO4	147.7	116	529	n.r.	14.4	21.5
GO5	106.8	104	501	n.r.	13.1	21.3
GO6	116.7	194	550	n.r.	11.8	21.8
GO7	47.3	98	630	n.r.	21.7	8.9
GO8	50.9	160	222	1.3	20.1	7.8
media	105.8	142.3	529.9	1.3	14.6	17.4
valor min.	47.3	97.6	221.6	1.3	10.4	7.8
valor max.	147.7	225.7	629.9	1.3	21.7	25.4
dev. st.	38.1	46.6	132.6		4.1	6.7
GO9	2.2	162	46	n.r.	3.8	16.5
GO10	1.2	307	40	32.2	n.r.	6.1
GO11	1.0	124	38	n.r.	0.7	n.r.
GO12	7.0	571	50	n.r.	4.7	12.0
GO14	2.6	283	40	n.r.	2.4	n.r.
GO15	n.r.	138	25	n.r.	3.9	5.7
media	2.80	264.08	39.76	32.18	3.10	10.08
valor min.	1.00	123.60	25.00	32.18	0.70	5.70
valor max.	7.00	571.10	50.00	32.18	4.70	16.50
dev. st.	2.44	168.76	8.48		1.58	5.16
b) Quirra e Porto Corallo						
Q7a	15.1	48	195	2.1	24.0	11.0
Q8a	15.3	39	255	0.5	24.0	10.0
Q9a	22.6	47	339	n.r.	27.4	11.2
Q11a	32.7	47	319	1.0	37.5	14.9
Q14a	28.5	58	382	3.4	25.5	9.8
Q16	21.6	60	350	n.r.	24.4	9.6
PC1	79.0	70	245	33.0	67.0	24.0
PC2	85.0	71	250	22.0	74.0	22.0
PC2b	89.0	69	261	112.0	86.0	26.0
PC3	85.0	71	254	80.0	81.0	23.0
PC4	82.0	69	250	38.0	76.0	24.0
PC4B	84.0	66	247	61.0	80.0	24.0
PC5	92.0	71	259	75.0	80.0	26.0
PC6	91.0	74	248	41.0	86.0	27.0
PC6b	86.0	78	251	78.0	119.0	31.0
PC10	66.0	73	250	8.0	64.0	21.0
PC11	70.0	75	253	7.0	65.0	20.0
PC12	74.0	77	246	8.0	74.0	21.0
PC13	59.0	76	250	9.0	68.0	24.0
PC14	75.0	85	251	10.0	86.0	26.0

Campione	Rb mg/kg	Sr mg/kg	Ba mg/kg	Co mg/kg	Zn mg/kg	Pb mg/kg
PC15	65.0	68	245	5.0	49.0	15.0
PC16	66.0	71	252	7.0	70.0	20.0
PC17	69.0	74	250	6.0	69.0	22.0
media	63.2	66.9	265.3	28.9	63.3	20.1
valor min.	15.1	39.4	194.5	0.5	24.0	9.6
valor max.	92.0	85.0	381.8	112.0	119.0	31.0
dev. st.	26.3	11.6	41.6	33.2	25.4	6.3
c) Flumendosa						
F1	225.0	470.0	328.0	23.2	77.7	33.2
F2	235.0	300.0	350.0	n.r.	44.9	26.3
F3	16.3	67.1	675.2	6.1	50.0	30.0
F5	22.5	57.6	356.7	7.0	69.6	33.5
F6	24.1	77.3	352.3	12.4	140.0	57.0
F7	40.0	70.0	420.0	n.r.	85.2	46.0
F8	42.5	70.0	390.0	n.r.	50.0	31.3
F9	39.4	69.3	330.0	8.0	60.7	28.0
F10	39.8	60.0	350.0	n.r.	70.5	30.5
media	76.1	137.9	394.7	11.3	72.1	35.1
valor min.	16.3	57.6	328.0	6.1	44.9	26.3
valor max.	235.0	470.0	675.2	23.2	140.0	57.0
dev. st.	87.8	146.5	109.1	7.0	28.9	10.0
d) Picocca e Costa Rei						
P1	40.0	90.0	390.0	220.0	51.0	31.0
P4	40.0	90.0	410.0	250.0	49.8	36.0
P4bis	40.0	75.0	395.0	150.0	60.0	37.2
P5	45.0	80.0	392.0	195.0	55.2	37.4
CR2	45.0	120	460	249.0	5.0	8.2
CR3	50.0	116	524	253.0	7.0	7.0
CR4	50.0	121	540	287.0	3.0	4.0
CR5	90.0	106	717	285.0	4.0	5.0
CR6	60.0	120	610	279.0	10.0	5.0
CR7	50.0	130	550	283.0	8.0	5.0
CR8	45.0	164	469	270.0	7.0	6.0
CR9	78.0	120	722	272.0	3.0	7.0
CR10	70.0	128	655	256.0	3.0	3.0
CR11	60.0	150	540	163.0	4.0	13.0
CR12	60.0	200	560	210.0	4.0	8.0
CR13	50.0	205	579	195.0	7.0	9.0
CR14	90.0	177	1369	87.0	3.0	5.0
CR16	90.0	180	800	163.0	4.0	13.0
media	58.5	131.8	593.4	225.9	16.0	13.3
valor min.	40.0	75.0	390.0	87.0	3.0	3.0
valor max.	90.0	205.5	1368.8	287.0	60.0	37.4
dev. st.	17.8	39.6	227.7	57.0	21.1	12.5

	Graniti	Carbonati	Basalti	Scisti
SiO ₂ %	78.5	1.39	55.7	
Al ₂ O ₃ %	12	0.17	16.5	8.2
TiO ₂ %	n.r.		1.62	
Fe ₂ O ₃ %	0.48	0.04	2.8	0.67
MgO %	0.35	0.51	2.05	
CaO %	0.81	54.29	4.5	
MnO %	0.01	0.01	0.17	0.11
Na ₂ O %	3.5	0.45	4.1	
K ₂ O %	3.5	0.08	3.02	
Sr mg/kg	102	264.08	450	
Ba mg/kg	725	39.76	850	
Co mg/kg	0.95	32.18	n.d.	19
Zn mg/kg	30	3.10	115	95
Pb mg/kg	25	10.08	15	20

Tabella 3 - Valori medi di confronto per alcune specie chimiche: 1) in sedimenti sardi da graniti (Cristini et al, 2002) e rocce carbonatiche (questo lavoro); 2) in rocce basaltiche sarde (Cinus, 1996) e rocce scistose (Wedepohl, 1978)

Le Tabelle 1 e 2 mostrano i tenori degli elementi maggiori, dei metalli pesanti e in tracce nelle varie spiagge. Dalla sequenza dei valori del Si e Al è evidente che, a sud del Golfo di Orosei, le caratteristiche di base delle spiagge sono simili, ma le litologie di provenienza delle diverse spiagge differenziano gli andamenti dei valori di Rb, Ba, Sr (Fig. 4): infatti passando da un ambiente ad alimentazione prevalentemente metamorfica (spiaggia del Quirra; Fig. 4b) ad uno granitico (Costa Rei; Tab. 2) i valori di Ba e Sr tendono ad aumentare. La concentrazione del Ba raggiunge i valori massimi (mediamente 600 mg/kg) nelle spiagge a dominante alimentazione granitica (Tab. 2) e valori minimi nei sedimenti carbonatici (mediamente 40 mg/kg) (Fig. 4a); il Rb presenta concentrazioni simili nelle sabbie provenienti dalle litologie granitiche e metamorfiche mentre è assente in quelle di origine francamente carbonatica. Dalla Tabella 1 si osserva che nel golfo di Orosei, a litologia prevalentemente carbonatica, il tenore in calcio nei sedimenti aumenta da nord a sud; le alte concentrazioni di Ba (fino a 630 mg/kg) e Fe (fino a 0.86 %), riscontrate nella parte settentrionale derivano dalle locali litologie magmatiche e diminuiscono con l'aumentare del Ca e dello Sr.

Nella costa orientale sono presenti mineralizzazioni a solfuri, principalmente di Fe, Pb, Zn e Co (Marcello et al., 1978). La Figura 5 mostra l'andamento, lungo la costa, di Fe, Zn, Pb, contenuti nei sedimenti distribuiti sulle spiagge dai corsi d'acqua alimentatori. Nei sedimenti alluvionali di riferimento, provenienti dai fiumi Quirra e Cor'e' Pruna (Tab. 4), questi tre metalli sono presenti con tenori in genere elevati, perché sono correlati con le granulometrie medio-fini (Carboni et al., 1987) caratterizzanti tali ambienti di sedimentazione, mentre hanno tenori più bassi nei sedimenti di spiaggia. La loro natura chimica li porta ad essere adsorbiti dai fillosilicati (mica e clorite), provenienti dall'alterazione del basamento metamorfico nel Quirra, e di quello granitico nel Cor'e' Pruna, che compongono quelle granulometrie. Come già osservato da Temple e Cave (1992) i metalli pesanti in generale mostrano una correlazione positiva con la clorite. Lo Zn inoltre può far parte del reticolo strutturale della clorite sia in coordinazione tetraedrica che ottaedrica (Bailey, 1988).

Lo Zn, come noto, è più mobile del Pb, infatti nei sedimenti silicoclastici sardi; sono stati riscontrati tenori di Zn più alti di quelli del Pb (Cristini et al., 1983). Tuttavia si osserva una relazione inversa nella parte meridionale del Golfo di Orosei (Fig. 5d) (da GO9 a GO15), e in quella della spiaggia di Costa Rei dove il Pb è legato ad apporti carbonatici rispettivamente litologici e bioclastici (Ferrara et al., 1997; Cristini et al., 1992). La Figura 5a mostra inoltre come le concentrazioni maggiori di questi metalli si trovino nei sedimenti della parte settentrionale del golfo, alimentata da tutte la litologie, mentre nei sedimenti completamente carbonatici le concentrazioni sono molto basse perché presenti solo nel residuo insolubile delle rocce di provenienza.

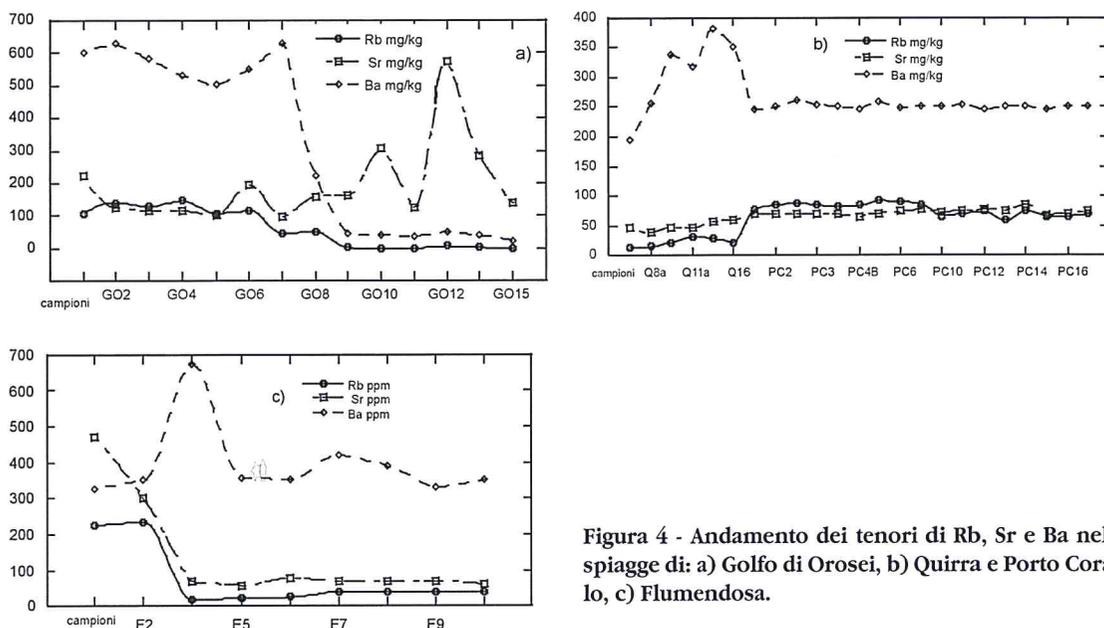


Figura 4 - Andamento dei tenori di Rb, Sr e Ba nelle spiagge di: a) Golfo di Orosei, b) Quirra e Porto Corallo, c) Flumendosa.

Tabella 4 - Confronto tra i tenori medi di alcuni metalli riscontrati nei sedimenti del presente lavoro con quelli osservati in diversi sistemi costieri e fluviali e i rispettivi valori del diametro medio (Mz).

Località costiera	Fe	Co	Zn	Pb	Mz
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	phi
1 Golfo di Thermaikos (mare Egeo)	35000	16.22	290	165	8
2 Baia di Cadiz (SW Spagna)	31733		217	57	
3 Delta del Nilo	55000	78	79		4
4 Laguna di Venezia	15000	8	350	20	3-4
5 Delta del fiume Po (Italia)		14	189	59	7
6 Baia di Cardigan (Wales-Gran Bretagna)			49	19	2
7 Piscinas, Sardegna W (Mare Mediterraneo)	10821	3.6	1707	444	1
8 Golfo di Oristano, Sardegna W	4300	0.93	226	32	3
9 Rio Sitzzerri, Golfo di Oristano a sud	6500	1.62	18	26	4
10 Buggerru, Sardegna SW (Mare Mediterraneo)	6134	0.91	36264	1468	1
11 Rio Bega, Buggerru	4000	0.63	5368	10	2
12 Rio Quirra, Sardegna sud orientale	4965	65	154	83	0.48
13 Rio Corr'e Pruna, Sardegna sud orientale	6295	49	30	n.r.	0.02
14 Questo lavoro (costa orientale sarda)	8462	94	36	19	1

1 - sedimenti-zona industriale: Voutsinou e Varnavas (1995). 2 - sedimenti costieri: Establier et al. (1985). 3 - sabbie costiere deltidie: Janusz Dominik et al.(1993). 4 - sabbie costiere lagunari: Angela et al. (1980). 5 - fanghi lagunari: Frascari et al.(1984). 6 - sabbie costiere: Jones (1973). 7 - sabbie costiere in zona mineraria: Caredda et al.(1999). 8 - sabbie costiere in zona peschiera: Pilia (1999). 9 - proveniente da zone minerarie: Pilia (1999). 10- sabbie costiere in zona mineraria: Loi (2000). 11 - alveo in zona mineraria: Loi (2000). 12 - sedimenti di fiume: Carboni et al.(1987). 13 - sedimenti di fiume: Cristini et al.(1981). 14 - sabbie costiere.

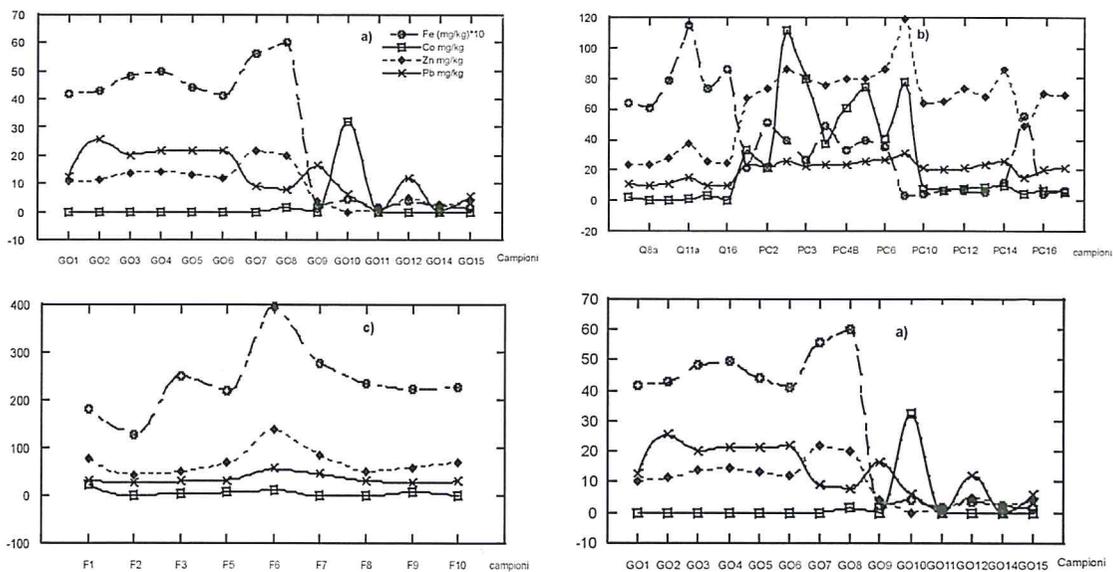


Figura 5 - Andamento dei tenori di Fe, Co, Zn e Pb nelle spiagge di: a) Golfo di Orosei, b) Quirra e Porto Corallo, c) Flumendosa, d) Picocca e Costa Rei.

Queste spiagge della costa orientale, pur essendo adiacenti a svariati insediamenti urbani ed agricoli hanno tenori di metalli che risentono, come già indicato, solo dei contributi delle mineralizzazioni e i sedimenti non presentano per Zn e Pb valori superiori ai “backgrounds” mediamente riscontrati in Sardegna (Tab. 3) (Zn 100 mg/kg circa, Pb 50 mg/kg circa, Cristini et al., 1981; Cristini and Ferrara, 1981; Cristini et al., 1983; Cristini et al., 1989). Per Fe e Co si osservano tenori superiori alle medie sarde, rispettivamente 8462 mg/kg e 94 mg/kg (Cristini et al., 2002). In particolare dalla Figura 5, si nota come l’andamento del Fe segua quello di Zn e Pb; in effetti, la matrice di correlazione indica che questi tre metalli sono correlati tra loro (coefficienti di correlazione: Fe-Zn 0.687; Pb-Fe 0.738; Pb-Zn 0.799). Le zone mineralizzate da cui essi provengono sono presenti nei rilievi adiacenti le spiagge tra Quirra e la foce del Rio Picocca, mentre non si trovano mineralizzazioni di Fe, Zn e Pb nei rilievi granitici da cui provengono i sedimenti della spiaggia di Costa Rei. In questa ultima, a nord (Capo Ferrato), si osservano elevate concentrazioni di Co (un massimo di 287 mg/kg) provenienti da una mineralizzazione a solfuri in matrice vulcanica (CR2, CR3) che passa proprio sotto la spiaggia e termina a poche centinaia di metri sul fondale; il Co non mostra alcuna correlazioni con Fe, Zn e Pb. Il Co, presente prevalentemente nei sedimenti a componente metamorfica, se pur con bassi valori (mediamente 5 mg/kg), è indipendente dalla tessitura e viene trasportato dalla componente fillosilicatica in cui è adsorbito.

Questi tenori sono stati messi a confronto con quelli di sedimenti provenienti dalla costa occidentale sarda (tratto costiero meridionale del Golfo di Oristano, spiagge di Piscinas e di Buggerru). I sedimenti del tratto costiero tra Piscinas e Buggerru provengono prevalentemente dal basamento paleozoico metamorfico e sono costituiti da sabbie grosse e medio grosse (Careda et al., 1999; Loi, 2000), mentre quelli del Golfo di Oristano provengono, oltre che dal basamento paleozoico, anche dalle coperture terziarie e sono costituiti da sabbie fini (Pilia, 1999). Nella Figura 6 sono riportati graficamente i tenori di Zn, Pb, Fe e Co delle spiagge indicate. Si può notare come i valori di Zn e Pb siano di diversi ordini di grandezza superiori a quelli riscontrati nei sedimenti della costa orientale, soprattutto per gli apporti dalle discariche delle miniere presenti nella costa. Queste miniere, che estraevano prevalentemente solfuri di Zn e Pb, da circa un ventennio sono dismesse. I valori di Fe e Co, riscontrati nei sedimenti

di entrambi le coste, sono invece confrontabili perché rispecchiano l'analogia tra le litologie di provenienza dei sedimenti. Un ulteriore confronto, effettuato con i dati di spiagge influenzati da altri apporti antropici, ha mostrato che i tenori di metalli, da noi riscontrati in questo lavoro, sono generalmente più bassi rispetto a quelli elencati nella Tabella 4 in quanto riflettono prevalentemente il contributo delle litologie di provenienza. Inoltre dal confronto delle granulometrie attraverso i valori del diametro medio, si osserva una correlazione positiva tra i valori in Φ del diametro medio e i tenori dei metalli pesanti, in particolare nelle spiagge indicate in Tabella 4 con i numeri da 1 a 5.

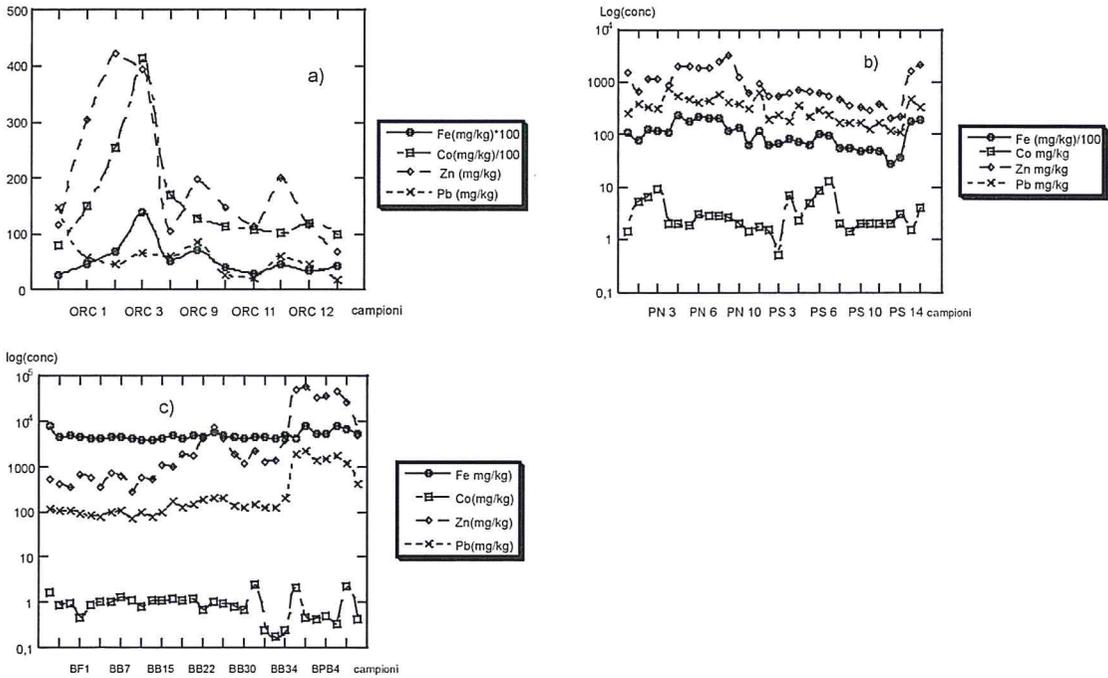


Figura 6 - Andamento dei tenori di Fe, Co, Zn e Pb nelle spiagge della costa occidentale: a) Oristano, b) Piscinas, c) Buggerru. La scala logaritmica è stata applicata per evidenziare le differenze tra i quattro metalli.

Nella correlazione fra la composizione mineralogica dei campioni e la distribuzione geochimica degli elementi, a parte le ovvie corrispondenze tra le fasi mineralogiche e gli elementi maggiori costituenti le stesse (K e Ba con i K-Feldspati, Na con l'albite, e Fe e Mg con i fillosilicati), viene confermata la relazione esistente tra alcuni metalli (Co, Pb e Zn) con i fillosilicati che, data la loro peculiare struttura, possono ospitarli per adsorbimento, oppure contenerli nel reticolo strutturale (Zn nella clorite).

Allo scopo di evidenziare le relazioni esistenti tra tessitura, componenti mineralogiche e concentrazioni di elementi maggiori, di metalli pesanti e in tracce, si è applicata una procedura di analisi statistica multivariata. Si è scelta l'analisi fattoriale (modo-R) che ha consentito di ridurre la dimensionalità dei dati e sottolineare le relazioni osservate nel loro insieme (Davis 1986; Rock 1988; Swan e Sandilands, 1995). La distribuzione delle variabili è stata analizzata con test non parametrici e i dati sono stati "rankizzati" allo scopo di ottenere unità comparabili per le variabili e per identificare gli "outliers" (Machek e Testa, 1991; Swan e Sandilands, 1995; Lebart e al., 1984; Korhonen e Siljamaki, 1998).

Dalla Figura 7 si osserva che due sono i fattori estratti: il primo di questi è caratterizzato dall'associazione di otto variabili e spiega il 57% della varianza della matrice iniziale, mostra perciò di avere il peso maggiore all'interno del modello: gli elementi significativi (Mg, Fe, Mn, Ti) sono associati ai minerali fessicci presenti nelle rocce. Nel fattore compaiono anche il Ca e lo Sr con il segno negativo che possono suggerire un cambiamento di litologia, ma sembra che il modello non riesca ad evidenziarli chiaramente.

Il secondo fattore spiega il 28% della varianza della matrice iniziale e raggruppa cinque variabili significative: Si, Al, Na, K come elementi maggiori e Rb come elemento in tracce; essi sono associati a minerali silicici ed anche in questo ambito il Ca e lo Sr sono in antitesi.

La R-Mode mette in evidenza due fasi mineralogiche silicatiche mentre la matrice carbonatica risulta solo dal diagramma nel quale si pone completamente staccata dalle altre due matrici (Fig. 7).

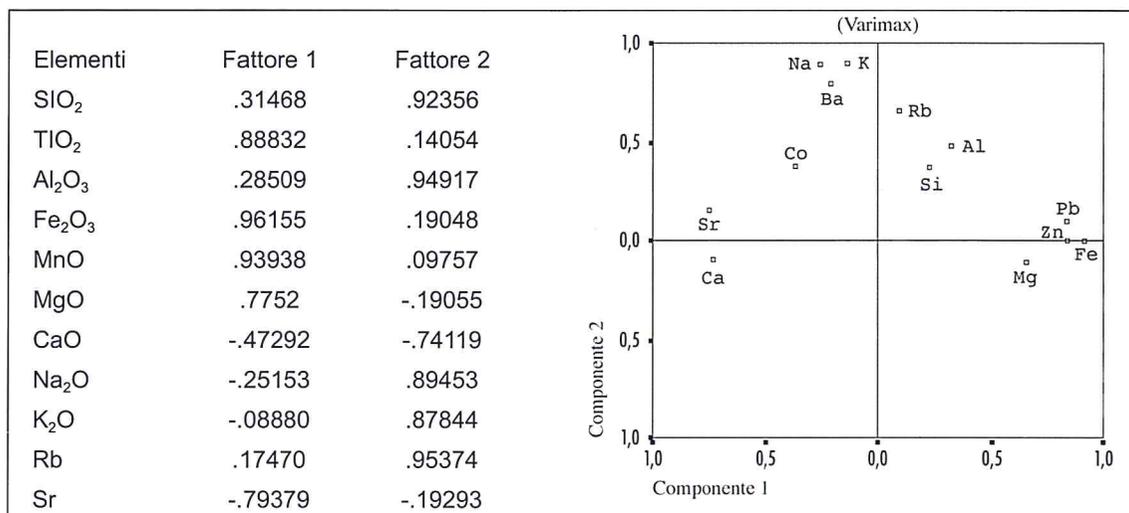


Figura 7 - Distribuzione del fattore 1 e 2 nella R-mode. Nella Tabella a sinistra sono riportati i loro valori.

Sui "factor scores" dei campioni per i due fattori significativi individuati da questa analisi si è poi applicato un procedimento gerarchico di "clustering agglomerativo", utilizzando così solo la parte più significativa della variabilità di tutto il set dei dati. Dalla classificazione dell'analisi dei "clusters" vengono individuati quattro gruppi di campioni caratterizzati da associazioni geochemiche (fattori) che indicano una provenienza da bacini di alimentazione comuni in buona corrispondenza con la mineralogia caratterizzante i gruppi stessi. Perciò, in accordo con le osservazioni tessiturali e composizionali, quattro sono i principali gruppi di campioni così evidenziati:

- Il primo gruppo, il più numeroso, (61% dei campioni), è suddiviso al suo interno in due sottogruppi. Il primo rappresentato dalle sabbie del Quirra, Flumendosa, Picocca e di Porto Corallo, ha come sua caratteristica una percentuale del primo fattore dell'analisi fattoriale (Ti, Fe, Mn, Mg, 54% della variabile della matrice iniziale) maggiore dell'83%, mentre per il secondo sottogruppo, che individua i campioni di Porto Corallo e i rimanenti campioni del Flumendosa e del Rio Picocca, si ha una variazione compresa tra il 67% al 72%. Quest'ultimo sottogruppo presenta anche un 22-28% del secondo fattore (K, Na, Si, Al, Rb: 30% di variabilità totale). La mineralogia predominante, come già osservato, è data da fillosilicati e tectosilicati di rocce metamorfiche (filladi e metarenarie). Per quanto riguarda il secondo sottogruppo, questo è costituito da campioni contenenti un tenore di feldspati alcalini tale da giustificare la percentuale del secondo fattore.
- Il secondo gruppo, caratterizzato dal secondo fattore (20% dei campioni), corrisponde alla zona di Costa Rei i cui campioni sono costituiti prevalentemente da feldspati alcalini, con predominanza di quelli potassici.
- Il terzo gruppo (8% dei campioni) individua la zona carbonatica del Golfo di Orosei; la presenza del terzo fattore (Ca, Sr, Mg) spiega il 14% della varianza della matrice iniziale.
- Il quarto gruppo individua la seconda parte dei campioni del Golfo di Orosei nei quali i tre fattori si distribuiscono in maniera quasi paritetica. Questa zona viene da noi indicata come avente una

matrice mista: femico-sialico-carbonatica. La composizione mineralogica dei campioni risulta essere costituita da feldspati, fillosilicati e carbonati.

Conclusioni

Lo studio effettuato su alcuni sistemi di spiaggia della costa orientale della Sardegna per definirne le caratteristiche geochimiche ambientali, ha mostrato che tra i principali fattori di controllo nell'accumulo dei metalli pesanti presenti nei sedimenti (litologie, corsi di acqua e processi sedimentari innescati dal moto ondoso) il primo ha un ruolo importante. Le litologie (metamorfiche, granitiche, carbonatiche e localmente vulcaniche) controllano l'abbondanza e la distribuzione degli elementi chimici attraverso la granulometria, la loro composizione mineralogica e chimica e la presenza di mineralizzazioni prevalentemente a solfuri. I corsi d'acqua trasportano i metalli pesanti con diverse modalità: (1) inseriti nella struttura dei sedimenti, (2) adsorbiti dal particolato in sospensione, o chelati dalla sostanza organica presente in soluzione, (3) complessati da anioni inorganici (S^- , HS). In questi litorali, il moto ondoso seleziona i materiali disperdendo le frazioni fini, che vengono allontanate dal sedimento originario. Tali frazioni sono generalmente responsabili di arricchimenti anomali di metalli dovuti ad apporti di svariata natura come evidenziato nella Tabella 4 che mostra l'aumento della concentrazione delle specie chimiche inquinanti nei sistemi caratterizzati da alte percentuali di frazioni fini ($Mz > 4\Phi$). Pertanto nelle spiagge in esame la composizione dei sedimenti è determinata esclusivamente dalla litologia. Nella costa orientale non esistono sorgenti inquinanti, mentre nella costa occidentale sono responsabili di inquinamento le discariche (Piscinas, Buggerru) e l'adsorbimento di metalli pesanti da parte delle frazioni fini (Golfo di Oristano).

Ringraziamenti

Si ringrazia Marilisa Loi per l'aiuto tecnico.

Lavoro eseguito nell'ambito delle ricerche MURST 60%, e INTERREG 2 (Resp. A. Cristini).

Bibliografia

- Angela G., Donazzolo R., Merlin Hieke O., Menegazzo Vitturi L., Orio A.A., Pavoni B., Perin G. E Rabitti S. (1980) - *Heavy metal contents in bottom sediments from the Gulf of Venice and comparisons on their nature*. Journ. Etud. Pollutions, *: 399-406. CIESM Cagliari.
- 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 P. Aminti e E. Pranzini, Edizioni delle Autonomie, Roma, pp. 215-231.
- Bailey S. W. (1988) - *Chlorites: structures and crystal chemistry*. In: Hydrous phyllosilicates (ed S.W. Bailey) Reviews in Mineralogy, 19: 347-403.
- Barca S., Di Gregorio F. e Palmerini V. (1981) - *Linea di costa pleistocenica sulla Piana di San Priamo (Sarrabus, Sardegna sud-orientale)*. Boll Soc. Geol. It., 100:71-74.
- Barca S., Carmignani L., Oggiano G., Pertusati P. C. e Salvadori I. (1996) - *Geological map of Sardinia: Northern and Southern sheets*. Comitato Regionale della Cartografia Geologica e Geotematica della Sardegna; co-ordinator L. Carmignani.
- Carboni S., Cristini A., Di Gregorio F. e Ferrara C. (1987) - *Trasporto solido di un corso d'acqua a carattere torrentizio e caratteristiche dei sedimenti della spiaggia alimentata. Il Rio di Quirra (Sardegna sud-orientale)*. CNR, Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche, 129: 103-114.
- Caredda A.M., Cristini A., Ferrara C., Lobina M. F., Baroli M. (1999) - *Distribution of heavy metals in the Piscinas beach sediments (S.W. Sardinia, Italy)*. Environmental Geology, 38: 91-100.
- Carmignani L., Barca S., Pertusati P. C., Carosi R., Di Pisa A., Gattiglio M., Musumeci G. e Oggiano G. (1992) - *Struttura della catena Ercinica in Sardegna*. Gruppo informale di Geologia strutturale Siena.

- Cinus D. (1996) - *Caratteri petrografici e geochimici delle serie eruttive plioceniche dei settori di Macomer (Sardegna centro-occidentale) e Capo Ferrato (Sardegna sud-orientale)*. Università degli Studi di Cagliari; Tesi di laurea.
- Covelli F. e Fontolan G. (1997) - *Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines*. Environmental Geology, 30: 34-45.
- Cristini A., Fais S. e Ferrara C. (1981) - *Sedimentologia e Geochimica della piattaforma continentale della Sardegna centro-orientale*. Rend. SIMP, 37: 73-89.
- Cristini A. e Ferrara C. (1981) - *Indagine geochimica su alcuni sedimenti di un sondaggio ubicato nell'istmo di Sant'Antioco (Sardegna sud-occidentale)*. Miner. Petrogr. Acta, 25: 117-125.
- Cristini A., Ferrara C. e Loy G. (1983) - *Studio sull'adsorbimento dello Zinco in alcuni suoli della Sardegna meridionale*. Atti Ist. Geoped. e Geol. Appl. Università di Sassari, IV: 115-130
- Cristini A., Ferrara C. e Zuddas P.P. (1989) - *Correlazione geochimica dei tenori totali in metalli pesanti nei sedimenti del Rio Quirra e di Porto Corallo, Sardegna orientale*. Atti Conv Intern di Geoingegneria, Torino, 1: 223-232
- Cristini A., Di Gregorio F. e Ferrara C. (1992) - *Sedimentological and geochemical characteristics of beaches on the southeastern coast of Sardinia (Italy) and their dependency on source*. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata, X: 211-223.
- Cristini A., Loi M., Caredda A. M., Ferrara C., Grosso A. e Pilia M. (2002) - *Valutazione delle caratteristiche ambientali di alcuni sistemi costieri della Sardegna: costa centro-sud occidentale, costa centro sud orientale e costa settentrionale (spiaggia del Liscia e Spargi)*. Una sintesi degli studi geochimico, mineralogico e sedimentologico. Università degli Studi di Cagliari-Interreg, Relazione finale, pp. 283-300.
- Davis J.C. (1986) - *Statistical and data analysis in Geology*. J Wiley & Sons New York.
- Di Gregorio F., Federici P R., Fierro G e Ginesu S. (2000) - *Atlante delle spiagge della Sardegna*. Eds Murst CNR, Regione Autonoma della Sardegna Selca, Firenze.
- Dinelli E., Gabbianelli G. e Tessari U. (2000) - *Caratteri geochimici dei depositi attuali della Sacca di Goro (Delta del Po)*. Studi costieri, 2: 189-198.
- Estabier R., Gomez-Parra A. e Blasco J. (1985) - *Superficial accumulation of heavy metals in near shore marine sediments: an objective index of environmental pollution*. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 35: 348-353.
- Eyre B. e McConchie D. (1993) - *Implications of sedimentological studies for environmental pollution assessment and management: examples from fluvial system in North Queensland and Western Australia*. Sedimentary Geology, 85: 235-252.
- Ferrara C., Cristini A. e Caredda A. M. (1997) - *Sedimentology and geochemistry of beaches sediments along Sardinian eastern coast: the Gulf of Orosei*. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata, 38: 149-160.
- Folk R. L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar, a study in the significance of grain-size parameters*. Journ. Sed. Petrol., 27: 3-27.
- Frasconi F., Frignani M., Giordani G., Guerzoni S. e Ravaioli M. (1984) - *Sedimentological and geochemical behavior of heavy metals in the area near the Po river delta*. Mem. Soc. Geol. It., 27: 469-481.
- Grosso A. (1999) - *Caratterizzazione geochimica e mineralogica dei sedimenti marini tra Capo San Marco e la foce del Tirso (Golfo di Oristano)*. Università di Cagliari, Tesi di laurea inedita.
- Korhonen P. e Siljamäki A. (1998) - *Ordinal principal component analysis. Theory and application*. Computational Statistics and Data Analysis, 26: 411-424.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distributions of sediments*. Journ. Sed. Petr. 4: 65-77.
- Janusz D. e Stanley D. J. (1993) - *Boron, Beryllium and Sulfur in Holocene sediments and peats of the Nile delta, Egypt: their use as indicators of salinity and climate*. Chem. Geol., 104: 203-216.
- Jones A. S. G. (1973) - *The concentration of copper, lead, zinc and cadmium in shallow marine sediments, Cardigan Bay (Wales)*. Mar. Geol., 14: M1-M9.

- Lebart L., Morineau A. e Warwick K. M. (1984) - *Multivariate descriptive statistical analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Loi M. (2000) - *L'ambiente della costa sud occidentale: il caso di Buggerru*. Università di Cagliari, Tesi di laurea inedita.
- Luther G.W. (1995) - *Trace metal chemistry in porewaters*. In: Metal contaminated aquatic sediments. Allen Ed.pp. 65-80.
- Macdonald R. e W. O'Brien N. C. (1985) - *Extending the use of certified reference sediments for assessment of accuracy in the determination of trace metals*. Anal. Chim. Acta, 177: 81-91.
- Machek P. e Testa B. (1991) - *Corso di geostatistica: statistica avanzata per geologi*. Milano 1991.
- Marcello A., Pretti S. e Salvadori I. (1978) - *Carta Metallogenica della Sardegna*. Servizio Geologico d'Italia.
- Millward C.G. e Klukner P.D. (1989) - *Microwave digestion technique for the extraction of minerals from environmental marine sediments for analysis by inductively coupled plasma, atomic emission spectrometry and atomic absorption spectrometry*. J. Anal. Atomic. Spectrom., 4: 709-713.
- Perdue M.E. (2001) - *Modeling concepts in metal-humic complexation*. In: *Humic substances and chemical contaminants*. Soil Science, Soc. Am. Inc. pp.: 305-316.
- Pilia M. (1999) - *L'ambiente marino del Golfo di Oristano: geochimica e mineralogia dei sedimenti tra lo stagno di S'Ena Arrubia e Capo della Frasca*. Università di Cagliari Tesi di laurea inedita.
- Rock N. M. S. (1988) - *Numerical geology*. Springer-Verlag Heidelberg.
- Sturgeon R. E., Desaulniers S. A. H., e Berman S. S. e Russel D. S. (1982) - *Determination of trace metals in estuarine sediments by graphite-furnace atomic absorption spectrometry*. Anal. Chem. Acta, 134: 283-291.
- Swan A. R. H. e Sandilands M. (1995) - *Introduction to geological data analysis*. Blackwell Science, Oxford.
- Temple J. T. e Cave R. (1992) - *Preliminary report on the geochemistry and mineralogy of the Nod Glas and related sediments (Ordovician) of Wales*. Geol. Mag., 129: 589-594.
- Voutsinou-Taliadouri F. e Soterios Varnavas P. (1995) - *Geochemical and sedimentological patterns in the Thermaikos Gulf, North-west Aegean Sea, formed from a multisource of elements*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 40: 295-320.
- Wedepohl K. H. (1978) - *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag

Manoscritto ricevuto il 18/3/2003, accettato il 20/6/2003.

Prove sperimentali sul comportamento di una scogliera a cresta bassa e sul fenomeno del piling-up a tergo di essa

Piero Ruol¹, Alberto Faedo² e Alessandro Paris²

¹Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica – Università di Padova, Via Ognissanti 39 - 35129 Padova Tel: +39-049-8277905 E-mail: piero.ruol@unipd.it

² Technital S.p.A., Via Cattaneo 20 - 37121 Verona Tel: +39-045-8053617 Fax: +39-045-8011558 E-mail: a.faedo@technital.it, a.paris@technital.it

Riassunto

Nel presente lavoro è descritta l'indagine sperimentale svolta nel canale ad onde dell'università di Padova per determinare il comportamento di una scogliera emersa a cresta bassa posta nella surf zone, con riferimento ai fenomeni di riflessione, trasmissione, tracimazione dell'onda ed incremento del livello idrico (piling-up) che si realizza a tergo dell'opera.

L'interazione onda-struttura è stata studiata riproducendo circa 60 attacchi ondosi irregolari. In una prima fase è stata analizzata una struttura permeabile, che ha permesso di stimare le portate di tracimazione (al netto delle portate di filtrazione dirette verso il largo), per diversi valori di piling-up, mentre nella seconda fase è stato posto un setto impermeabile sulla scarpata lato riva della stessa scogliera per quantificare separatamente le portate di overtopping oltre la sommità dell'opera e di trasmissione attraverso la porzione "emersa" della struttura e quindi per comprendere più nel dettaglio il complesso processo di filtrazione attraverso l'opera, legato anche al piling-up.

Parole chiave: scogliere a cresta bassa, tracimazione, trasmissione, filtrazione, piling-up, set-up.

Abstract

In this paper the experimental results obtained through the physical model investigation performed in the flume of Padova University on a typical low crested structure is presented. Aim of the investigation was the evaluation of the behaviour of such a structure in terms of reflection and transmission of incident waves, as well as the study of the wave overtopping phenomenon and the associated increase in the water levels behind the breakwater (piling-up).

The wave-structure interaction was examined by reproducing about 60 irregular wave attacks. In the first part of the study a rubble mound permeable breakwater was analysed, while in the second part of the research an impermeable plate was placed on the landward slope of the structure, in order to study in more details the complex phenomena of the wave overtopping over the structure and of the seepage through it, also related to the piling-up level at the back of the structure.

Keywords: low crested structures, wave overtopping, wave transmission, seepage, piling-up, set-up.

Premessa

Gli studi sperimentali su modello fisico relativi a scogliere tracimabili parallele alla linea di riva, utilizzate come sistemi di protezione e stabilizzazione dei litorali, sono diventati un tema di crescente interesse nell'Ingegneria Costiera. Infatti, nonostante l'impiego di simili strutture sia sempre più frequente nell'ambito degli interventi di protezione costiera, si sono talora addirittura incrementati i fenomeni erosivi degli arenili che ne avevano suggerito la realizzazione. Il motivo di tali insuccessi

va ricercato nelle modifiche indotte dalle opere alla circolazione idrodinamica nella zona compresa tra le strutture e la linea di battigia. Vista la complessità dei fenomeni in gioco, questa delicata indagine può essere efficacemente affrontata tramite la sperimentazione fisica in laboratorio.

Se da un lato l'effetto positivo delle barriere tracimabili è infatti quello di attenuare l'energia dell'onda scaricata lungo costa durante le mareggiate, dall'altro si crea un innalzamento del livello medio mare tra le scogliere e la spiaggia, definito come *piling-up* o talora *set-up*¹, che genera un flusso netto pressoché parallelo a riva nelle zone più centrali e diretto verso il largo attraverso i varchi tra le testate dei frangiflutti, causando talora un incremento del trasporto di sedimenti offshore (Fig. 1).

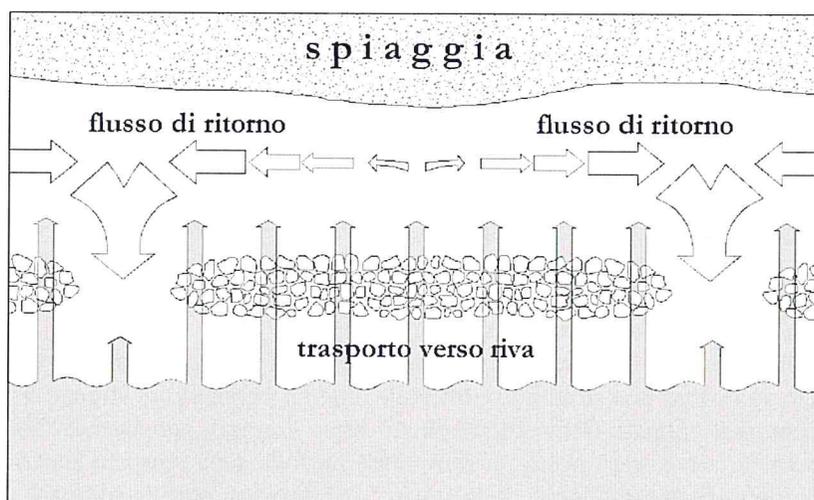


Figura 1 - Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera a cresta bassa.

La carenza di riferimenti bibliografici riguardanti il fenomeno del *piling-up* (o *set-up* dovuto alla tracimazione) dimostra come il tema dell'innalzamento del livello idrico dietro alle opere tracimabili non sia stato indagato finora con la necessaria attenzione, nonostante esso chiaramente influenzi il comportamento della struttura e la evoluzione morfologica dei litorali protetti.

Prove sperimentali

Le prove sperimentali descritte nel seguito hanno avuto lo scopo di valutare il comportamento delle "tradizionali" scogliere a cresta bassa con riferimento ai fenomeni di *riflessione e trasmissione* e riservando particolare attenzione al predetto fenomeno del *piling-up*. Il principale obiettivo delle prove sperimentali oggetto della presente indagine è consistito infatti nel tentativo di stabilire una correlazione tra le caratteristiche dell'onda incidente, le portate di tracimazione dell'onda e l'incremento del livello medio a tergo della scogliera.

A tale scopo sono stati condotti circa 60 test nel canale ad onde dell'Università di Padova, simulando attacchi ondosi irregolari caratterizzati da spettri JONSWAP. Il modello fisico bidimensionale è la riproduzione in similitudine di Froude, con una scala geometrica di 1:20, di una tipica sezione trasversale di un frangiflutti parallelo a riva, emergente ma a cresta bassa. L'opera è stata realizzata con il nucleo centrale in pietrame di pezzatura più minuta rispetto alla mantellata del rivestimento esterno; la scogliera può quindi essere ritenuta globalmente molto permeabile, non esistendo un nucleo di materiale a ridotta granulometria.

¹ La terminologia "set-up", frequentemente adottata per definire il fenomeno dell'innalzamento del livello a ridosso delle scogliere, non deve essere confusa con il "wave set-up", ossia con l'innalzamento del livello di propagazione del moto ondoso tipico della surf-zone, indotto dalla variazione di radiation stress dell'onda.

La struttura è stata ubicata nella zona dei frangenti, con un fondale al piede di 20 cm ed una quota in sommità pari a +5 cm rispetto al livello di riposo dell'acqua (valori in scala modello).

A parere degli autori, per comprendere in modo esauriente il concetto del piling-up è importante valutare le portate di tracimazione con buona accuratezza. Tuttavia, sembra che una stima diretta della portata tracimante su frangiflutti altamente permeabili sia stata raramente effettuata (Loveless et Al. 1998; Lamberti et Al. 2003). Per tale motivo è stato allestito un originale apparato sperimentale, con un sistema di pompaggio a ricircolo forzato, in modo da poter misurare le portate di tracimazione, tenendo in considerazione anche il flusso di ritorno attraverso la struttura.

Sono stati imposti diversi livelli dietro al frangiflutti, per simulare diverse condizioni di circolazione tridimensionale, riconducibili a diverse dimensioni dei varchi tra le scogliere.

Descrizione dell'apparato sperimentale

Le prove sperimentali sono state effettuate nella canaletta bidimensionale del laboratorio marittimo del *Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica* (IMAGE) dell'Università di Padova. Il canale ad onde utilizzato è lungo 36 m, largo 1.0 m, alto 1.2 m ed il fondale è stato realizzato con pendenza pari ad 1:50.

Le caratteristiche del moto ondoso sono state acquisite tramite 8 sonde di tipo resistivo con frequenza di campionamento di 20 Hz. La sezione longitudinale del canale utilizzato per le prove di laboratorio è rappresentata in modo schematico in Figura 2, in cui sono indicate anche le posizioni delle sonde adottate per determinare i livelli idrici istantanei e le caratteristiche puntuali delle onde. Il confronto tra i treni d'onda generati e riprodotti è stato affidato alla sonda n. 8, la più vicina al generatore. Il posizionamento delle sonde n. 5, 6 e 7 è stato poi opportunamente prescelto in modo tale da consentire la valutazione delle caratteristiche di riflessione della struttura di volta in volta analizzata. La sonda n. 3 ha permesso di valutare le caratteristiche dell'onda al piede dell'opera, mentre le sonde n. 1 e 2 sono state collocate a valle dell'opera ad una distanza dal piede pari a 6 volte la larghezza della berma, come consigliato in letteratura (Gironalla et Al. 2002, Gomez e Valdez 1990), per misurare correttamente l'altezza d'onda trasmessa.

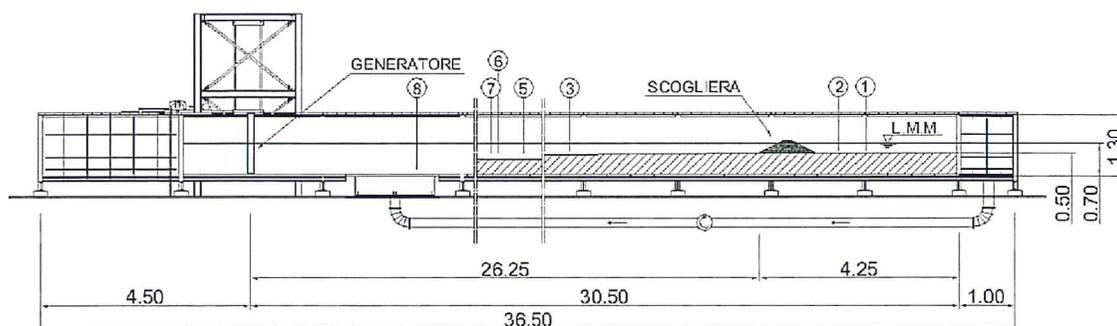


Figura 2 – Sezione longitudinale del canale sperimentale.

La geometria del modello fisico, che riproduce una sezione trasversale dell'opera in pietrame a cresta bassa in scala 1:20, è schematizzata in Figura 3, con le dimensioni riferite alla scala modello. Tale sezione può essere considerata rappresentativa di molte opere di difesa realizzate lungo i litorali italiani.

Nella realizzazione dell'opera in scala ridotta si sono adottate le seguenti categorie di "pietrame":

- elementi da 1.2÷3.4 g (corrispondenti a 10÷30 kg in prototipo) per lo strato di imbasamento;
- elementi da 110÷200 g (corrispondenti a pietrame da 1÷2 t in prototipo) per il nucleo centrale;
- massi da 280÷550 g (corrispondenti a massi di pezzatura compresa tra 2.5÷5 t in prototipo) per la mantellata esterna.

Nel calcolo dei pesi, ossia nella determinazione della scala di riduzione dei pesi, si è tenuto conto anche della differenza tra il peso specifico dell'acqua dolce del modello, e quello dell'acqua salata del prototipo.

Le proprietà dell'opera indagata, riferite sia al modello che al prototipo, sono sintetizzate nella Tabella 1, mentre una fotografia della struttura realizzata nel canale è proposta in Figura 4.

Per simulare il flusso di ritorno verso il largo tra i varchi delle scogliere, fenomeno tipicamente tridimensionale non riproducibile in un modello 2-D, è stato approntato un sistema di pompaggio dedicato, che permette di mantenere costante il livello medio dell'acqua (rispetto al livello "0", di riposo) a tergo della barriera durante un attacco ondoso.

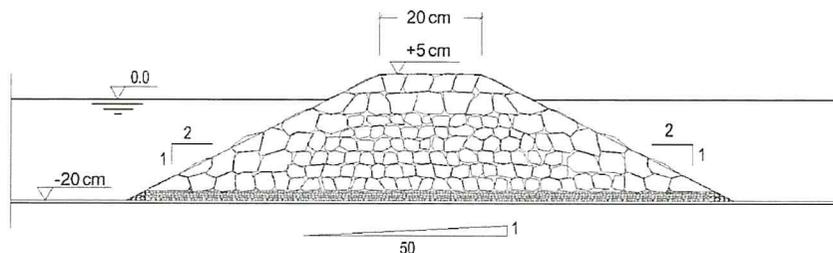


Figura 3 - Caratteristiche geometriche della sezione trasversale del modello analizzato.

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche e pesi del frangiflutti indagato.

Unità modello			Unità prototipo (scala 1:20)		
Fondale (cm)	Larghezza sommità (cm)	Quota sommità (cm)	Fondale (m)	Larghezza sommità (m)	Quota sommità (m)
-20	20	+5.0	-4.0	4.0	+1.0
pietrame per imbasamento (g)	massi nucleo (g)	massi mantellata (g)	pietrame per imbasamento (kg)	massi nucleo (t)	massi mantellata (t)
1.2÷3.4	110÷200	280÷550	10÷30	1÷2	2.5÷5

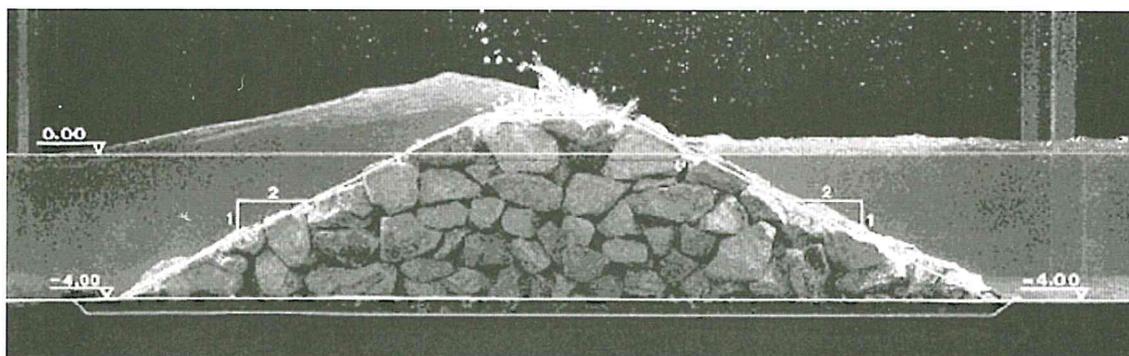


Figura 4 - Fotografia del modello fisico (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Il volume d'acqua che si accumula dietro all'opera per effetto del piling-up viene recapitato a mezzo di uno stramazzone rettangolare in una vasca di raccolta, sul fondo della quale è collegata una tubazione che riporta l'acqua verso il largo azionando un sistema di pompaggio a portata regolabile. In questo modo si realizza un circuito chiuso forzato che ricrea le condizioni di flusso prodotte dalle

aperture tra i frangiflutti (Fig. 5). Nella tubazione è inserito uno strumento per la misura della portata; pertanto è possibile stimare la portata di riflusso tra i varchi come la portata di ricircolo Q_R necessaria per mantenere costante il livello medio dell'acqua nella vasca di raccolta durante un attacco ondoso. La portata di ricircolo può essere variata dal valore nullo, rappresentativo della condizione di barriera infinitamente lunga, senza varchi, fino al valore massimo che comporta il ripristino del livello di riposo nello specchio acqueo retrostante alla scogliera. Quest'ultima condizione è rappresentativa di una barriera isolata, ossia di una barriera di lunghezza ridotta rispetto ai varchi che separano due opere contigue. Portate di ricircolo intermedie tra questi due estremi comportano diversi valori del piling-up, che sono rappresentativi di diversi rapporti tra lunghezza delle opere e dei varchi.

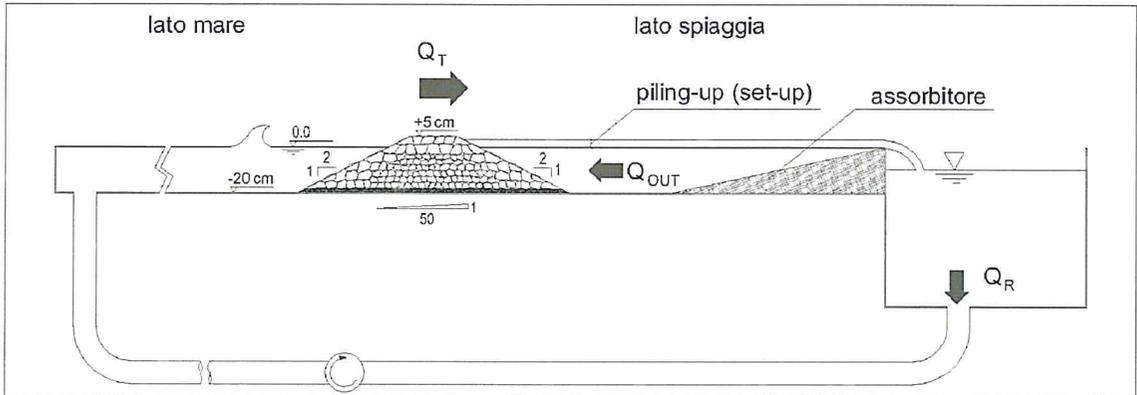


Figura 5 - Schema del sistema di ricircolo.

Tabella 2 - Caratteristiche delle onde riprodotte nel modello.

ONDE	VALORI IMPOSTATI				VALORI MISURATI (sonda 8)					
	MODELLO		PROTOTIPO		MODELLO			PROTOTIPO		
	$H_{1/3}$ (cm)	T_m (s)	$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	$H_{1/3}$ (cm)	T_m (s)	T_p (s)	$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	T_p (s)
1	2.50	0.89	0.50	4.00	2.68	0.89	0.97	0.54	3.98	4.34
2	5.00	1.01	1.00	4.50	5.05	1.01	1.09	1.01	4.52	4.87
3	10.00	1.34	2.00	6.00	10.24	1.33	1.46	2.05	5.95	6.53
4	15.00	1.68	3.00	7.50	14.89	1.59	1.77	2.98	7.11	7.92
5	20.00	2.01	4.00	9.00	18.74	2.04	2.44	3.75	9.12	10.91
6	15.00	1.34	3.00	6.00	14.78	1.35	1.46	2.96	6.04	6.53
7	15.00	1.45	3.00	6.50	14.74	1.45	1.55	2.95	6.48	6.93
8	15.00	1.57	3.00	7.00	15.18	1.52	1.65	3.04	6.80	7.38
9	15.00	1.68	3.00	7.50	14.89	1.59	1.77	2.98	7.11	7.92
10	15.00	1.79	3.00	8.00	14.73	1.75	1.90	2.95	7.83	8.50
11	15.00	1.90	3.00	8.50	14.91	1.87	2.23	2.98	8.36	9.97

Nel corso delle prove sperimentali sono stati generati 11 diversi spettri d'onda di tipo JONSWAP, caratterizzati dal fattore medio di amplificazione del picco $\gamma = 3.3$ e costante di Phillips $\alpha = 0.0081$. Le caratteristiche degli spettri ondosi sono riassunte in Tabella 2 dove sono riportati sia i valori impostati per la ricerca d'onda (altezza significativa $H_{1/3}$ e periodo medio T_m), sia i valori effettivamente misurati dalla sonda più al largo (altezza significativa $H_{1/3}$, periodo medio T_m e periodo di picco T_p). Si può notare che le differenze tra i valori impostati e quelli effettivamente misurati sono contenute,

ad eccezione dell'onda massima realizzata (onda 5), per la quale l'altezza risulta limitata superiormente dal fondale; infatti evidenti fenomeni di frangimento dell'onda si sono manifestati lungo il fondale acclive, anche a notevole distanza dall'opera in esame.

Le prime cinque onde sono caratterizzate da altezze significative e periodi crescenti, mentre le onde dalla 6 alla 11 sono state caratterizzate da altezza costante e periodo variabile, allo scopo di analizzare l'influenza della ripidità dell'onda sui fenomeni allo studio.

I risultati delle prove sperimentali inerenti ai fenomeni di *riflessione*, *trasmissione* e *tracimazione* ed al fenomeno del *piling-up* sono riportati nel seguito.

Fenomeni di riflessione e trasmissione

La prima serie di prove sperimentali è stata effettuata con riferimento all'opera sopra descritta posta su un fondale con pendenza 1:50, analizzando l'interazione onde-struttura in termini di riflessione e trasmissione dell'onda.

Di seguito sono presentati i risultati delle prove di laboratorio e le relative elaborazioni.

Risultati sperimentali relativi ai fenomeni di riflessione e trasmissione

I risultati dell'analisi di riflessione e di trasmissione sono stati elaborati soltanto per il caso di portata di ricircolo nulla, corrispondenti al caso di scogliera priva di varchi, in modo da ottenere una base di confronto omogenea con i risultati delle prove sperimentali condotte dagli scriventi su una simile scogliera posta su fondale con pendenza 1:100 (Ruol e Faedo, 2002), effettuate in condizioni analoghe a quelle qui considerate.

L'analisi di riflessione è stata realizzata con il collaudato metodo delle tre sonde di Goda, per il quale sono state impiegate le sonde n. 4, 5 e 6 opportunamente distanziate per non incorrere in casi di singolarità.

I risultati ottenuti, in termini di riflessione e trasmissione, sono riassunti in Tabella 4, in cui, oltre ai coefficienti di riflessione e trasmissione K_R e K_T , sono riportati anche i valori dell'altezza d'onda significativa incidente $H_{1/3, i}$, misurata (nella posizione del piede esterno dell'opera) in assenza della struttura per escludere la riflessione dovuta all'opera, ed i valori dell'altezza d'onda significativa trasmessa $H_{1/3, t}$ (valutata a una distanza dall'opera pari a $6B$, essendo B la larghezza della berma).

Tabella 3 - Risultati dei test di riflessione e trasmissione.

Onda	$H_{1/3, i}$ (cm)	$H_{1/3, t}$ (cm)	T_p (s)	$H_{1/3, i}/L_{op}$	K_R	K_T
1	2.45	0.52	0.97	0.0167	0.30	0.21
2	4.85	0.97	1.09	0.0261	0.26	0.20
3	11.08	2.88	1.46	0.0333	0.28	0.26
4	14.30	4.47	1.77	0.0292	0.26	0.31
5	14.42	5.35	2.44	0.0155	0.27	0.37
6	12.91	3.70	1.46	0.0388	0.24	0.29
7	13.48	3.81	1.55	0.0359	0.25	0.28
8	14.03	4.18	1.65	0.0330	0.26	0.30
9	14.30	4.47	1.77	0.0292	0.26	0.31
10	15.11	4.84	1.90	0.0268	0.29	0.32
11	15.52	5.00	2.23	0.0200	0.31	0.32

I risultati relativi ai test di riflessione effettuati con l'opera posizionata sul fondale con pendenza di 1:50 evidenziano valori di K_R in buon accordo con quelli ottenuti con la medesima struttura su pen-

denza 1:100 (vedi *configurazione F*, Ruol e Faedo, 2002), mantenendosi comunque più bassi dei K_R relativi a scarpate impermeabili (Allsop e Hettiarachi 1988, Seelig 1980). In particolare è emersa la tendenza di K_R a decrescere in funzione della ripidità dell'onda, come risulta dai risultati delle onde 6-11, evidenziati in neretto in Tabella 3 e graficamente in Figura 6. In conclusione, le onde incidenti con periodo più corto sperimentano una minor riflessione rispetto alle onde più lunghe.

L'andamento decrescente in funzione della ripidità dell'onda si è manifestato anche per quanto concerne il coefficiente di trasmissione, come appare chiaro dal grafico di Figura 6. In tal caso, essendo state prese in considerazione le onde (dalla 6 alla 11) con altezza al largo costante e periodo diverso, la dipendenza di K_T dalla ripidità dell'onda rispecchia pure la dipendenza dal periodo T_p . L'aumento di K_T in funzione di T_p trova giustificazione nell'incremento della portata di tracimazione per onde più lunghe. Tale fenomeno, chiaramente emerso da tutte le prove sperimentali svolte, conferma che la trasmissione dell'onda in strutture a cresta bassa è in primo luogo legata alla tracimazione dell'onda al di sopra del livello di riposo, piuttosto che alla trasmissione attraverso la porzione immersa dell'opera.

In Figura 7 è riportato un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti con l'opera posta su un fondale con pendenza 1:50 e quelli ricavati con la stessa opera collocata su una pendenza di 1:100.

Dal grafico si può osservare che la curva teorico-sperimentale ricavata dagli autori nel caso di pendenza 1:100 (Ruol-Faedo, 2002), utilizzando i parametri proposti da Davies e Kriebel (1992), approssima molto bene anche i punti sperimentali qui discussi e relativi alla pendenza 1:50, almeno nel caso di onde tracimabili, ovvero per $(F-R)/H_{si} < 0$ (dove F è la quota della sommità dell'opera e R è il run-up potenziale valutato secondo la formula proposta da Davies e Kriebel, 1992). Nel caso invece di onde non tracimanti ($(F-R)/H_{si} > 0$), la curva proposta appare sottostimare il coefficiente di trasmissione.

Il fenomeno della trasmissione ondosa nel caso delle scogliere a cresta bassa è ampiamente trattato in letteratura (Calabrese, Vicinanza e Buccino, 2002), per cui si è concentrata l'attenzione sui fenomeni di trasmissione e di piling up a tergo dell'opera.

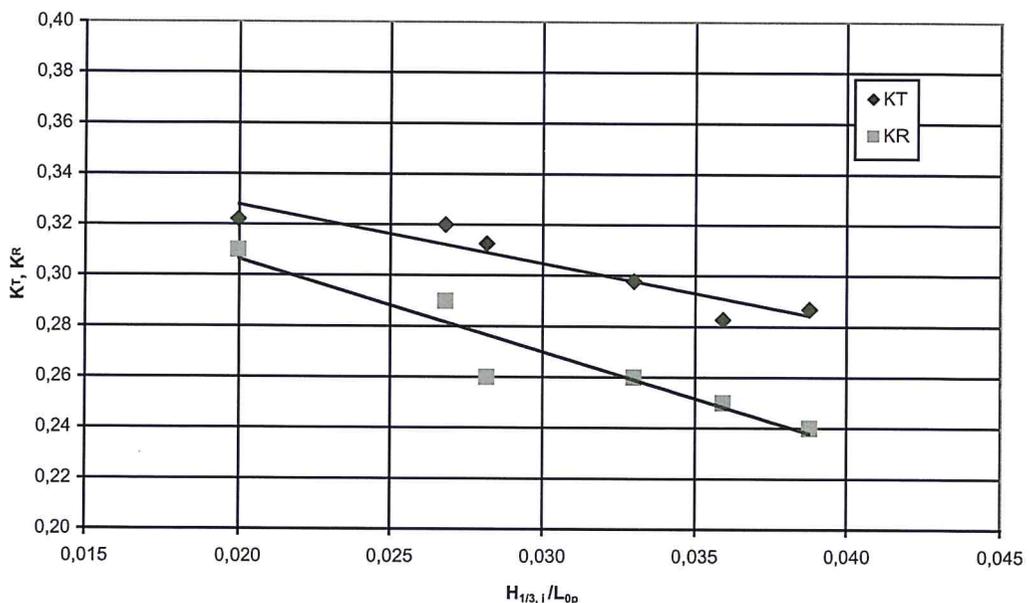


Figura 6 - Coefficienti di trasmissione e di riflessione in funzione della ripidità dell'onda: caso di barriera continua senza varchi (portata di ricircolo nulla).

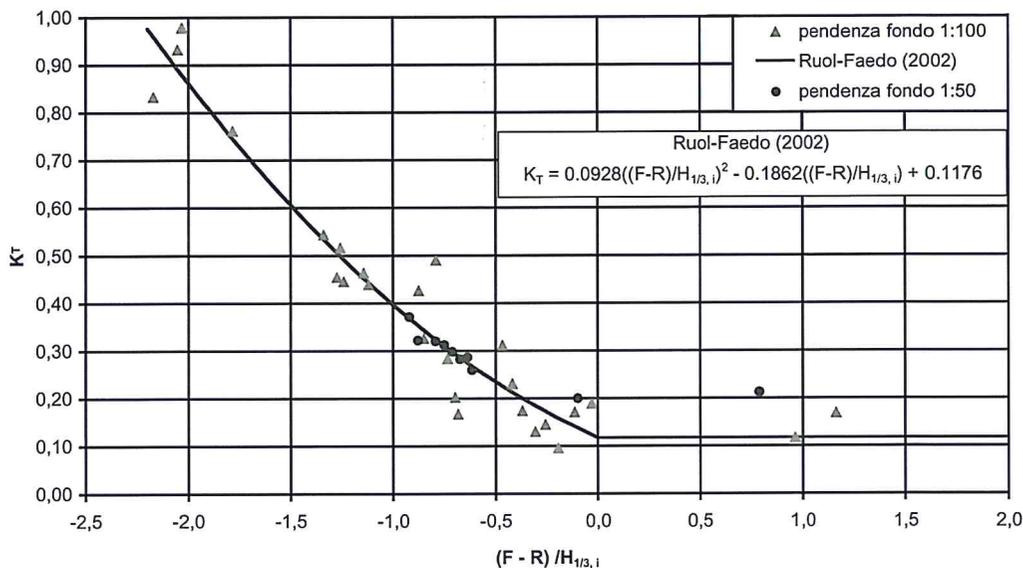


Figura 7 - Confronto tra i coefficienti di trasmissione sperimentali e la curva teorica (Ruol e Faedo, 2002).

Fenomeni di tracimazione dell'onda e di piling-up

Come premesso, l'obiettivo principale dello studio è stato quello di stimare in maniera diretta la portata di tracimazione dell'onda relativa a scogliere emerse a cresta bassa, e il conseguente fenomeno di sovrizzo idrico (o piling-up) che si realizza a tergo di tali strutture.

A tal fine, utilizzando l'apparato sperimentale descritto, si sono indagate tre diverse configurazioni di una scogliera in pietrame avente le caratteristiche geometriche precedentemente illustrate:

- 1) Configurazione I: scogliera permeabile;
- 2) Configurazione II: scogliera con totale impermeabilizzazione;
- 3) Configurazione III: scogliera con parziale impermeabilizzazione.

Configurazione I

La struttura in questione ha le medesime caratteristiche geometriche di quella utilizzata per lo studio dei fenomeni di riflessione e trasmissione (Fig. 8).

Sono stati effettuati complessivamente 58 attacchi ondosi. Per ciascuno spettro d'onda generato, sono stati realizzati diversi livelli di piling-up a tergo della struttura, imponendo diverse portate di ricircolo Q_R .

Per definire in maniera più chiara le portate in gioco, si può far riferimento alla seguente Figura 9. Le portate di ricircolo ricavate rappresentano dunque la portata di tracimazione "netta", ottenibile come somma algebrica dei due contributi:

$$Q_R = Q_T - Q_{OUT}$$

con:

$$Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$$

dove:

Q_R = portata realizzata mediante il sistema di pompaggio a ricircolo forzato;

Q_T = portata di tracimazione, somma della portata (Q_{OV}) che passa al di sopra della cresta della scogliera e della portata (Q_{IN}) che passa attraverso la struttura in direzione del litorale;

Q_{OUT} = portata di ritorno offshore filtrante attraverso l'opera per effetto del piling-up.

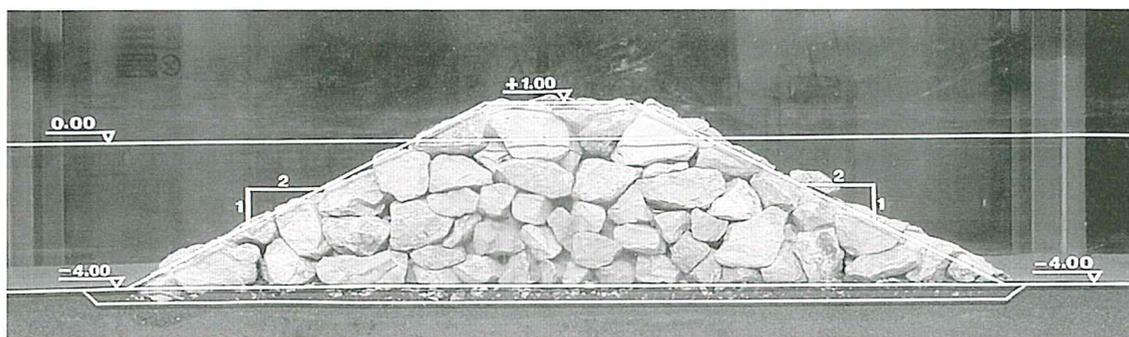


Figura 8 - Configurazione I (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

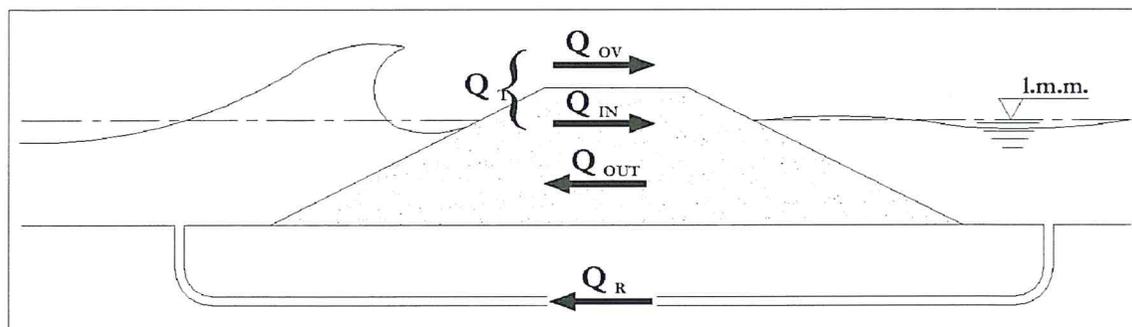


Figura 9 - Simbologia adottata per caratterizzare le portate.

Il massimo livello di piling-up si è logicamente ottenuto con il sistema di pompaggio non attivo ($Q_R = 0$), condizione che simula il caso di barriera infinitamente lunga.

Per contro, il caso di barriera posta tra varchi infinitamente estesi si è ottenuto imponendo la portata di ricircolo per la quale si realizza un sovrizzo idrico nullo. Si osservi a tal proposito che tale condizione è l'unica che consente di stimare con buona approssimazione la portata di tracimazione Q_T per un cero spettro d'onda, essendo verosimile ipotizzare che, in questo caso, non vi sia filtrazione verso il largo (ossia $Q_{OUT} \approx 0$).

Configurazione II

La struttura in questione è stata realizzata mediante l'applicazione di un setto impermeabile sulla scarpata interna di una scogliera a cresta bassa (Fig. 10), avente le medesime caratteristiche geometriche di quella illustrata nella configurazione precedente.

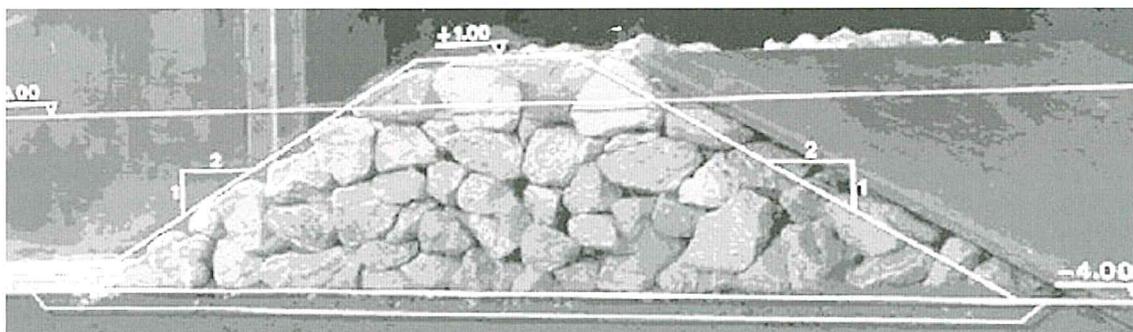


Figura 10 - Configurazione II (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Tale setto, realizzando la completa impermeabilizzazione dell'opera, e impedendo di conseguenza il moto di filtrazione attraverso il corpo della scogliera ($Q_{IN} = Q_{OUT} = 0$) ha permesso di valutare direttamente la portata (Q_{OV}) che transita al di sopra della cresta della scogliera.

Sono stati generati complessivamente 8 spettri d'onda. Imponendo la portata di ricircolo Q_R tale da consentire il mantenimento di un livello costante a tergo della struttura, si è determinata la portata di overtopping (Q_{OUT}) per ciascun attacco ondoso riprodotto.

Configurazione III

Quest'ultima configurazione è stata ottenuta mediante l'applicazione di un setto impermeabile, posto fino alla quota 0.0 m s.l.m., sulla scarpata interna di una scogliera avente le medesime caratteristiche geometriche di quelle relative alle configurazioni precedentemente illustrate (Fig. 11). Tale setto, lasciando "scoperta" la porzione emersa di scogliera, ha realizzato l'impermeabilizzazione della sola porzione immersa dell'opera.

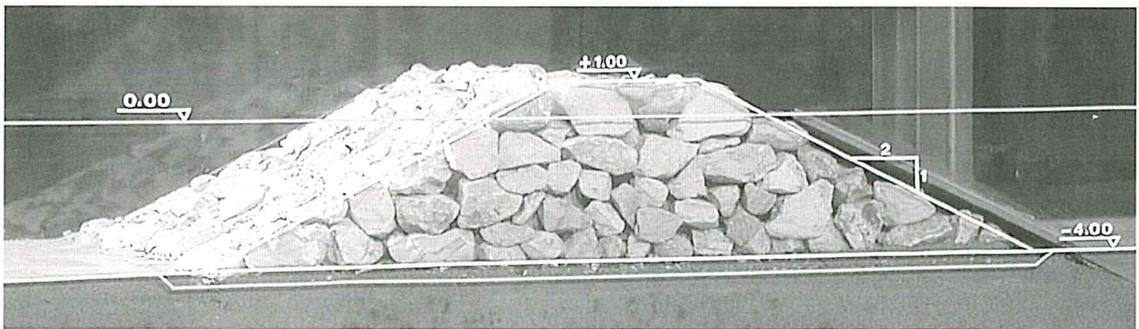


Figura 11 – Configurazione III (le dimensioni sono indicate in scala prototipo).

Complessivamente sono stati generati 5 spettri d'onda. L'impermeabilizzazione parziale della struttura è stata realizzata al fine di valutare quale porzione di struttura interagisca maggiormente con l'onda, relativamente al fenomeno di tracimazione e piling-up.

Risultati sperimentali relativi al fenomeno del piling-up

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali eseguite nel canale ad onde, relativi alle 3 configurazioni sopra illustrate, sono di seguito riportati.

Configurazione I: scogliera permeabile

In Tabella 4 sono riassunti i risultati sperimentali relativi alla portata unitaria di ricircolo q_R (per metro lineare di struttura), ossia alla portata di tracimazione netta, ed al piling-up δ_h (i valori sono riportati in scala modello).

I dati dell'onda 9 sono stati omessi in quanto essa presenta le stesse caratteristiche dell'onda 4. Inoltre le onde 1 e 2 presentano portate di ricircolo nulle perché non sormontano l'opera. Per ogni onda sono stati generati diversi valori di piling-up variando il grado di apertura della pompa del sistema di ricircolo, in modo da simulare diverse larghezze dei varchi tra i frangiflutti. I due estremi sono rappresentati da una portata di ricircolo nulla e sovrizzo δ_h massimo, corrispondente alla situazione di scogliera infinitamente lunga, e da un valore nullo del piling-up e portata di ricircolo massima, corrispondente a una scogliera isolata con varchi infinitamente estesi.

I valori delle portate di ricircolo che annullano il sovrizzo a tergo della struttura $Q_{R(\delta_h=0)}$ (evidenziati in neretto nella tabella) rappresentano, come già anticipato, le portate di tracimazione Q_T per l'opera allo studio, essendo in questo caso assumibile $Q_{OUT} = 0$.

Per portate di ricircolo diverse da questa, sottraendo le portate di ricircolo ricavate per ciascun livello di piling-up, dalla predetta portata $Q_{R(\delta_h=0)}$ corrispondente a sovrizzo nullo ($\delta_h = 0$), è stato possibile calcolare il valore delle portate di filtrazione Q_{OUT} . Nell'ultima colonna della Tabella 4 sono dunque riportati anche i valori della portata specifica q_{OUT} ottenuti dalla espressione:

$$Q_{OUT} = Q_{R(\delta_h=0)} - Q_R$$

per diversi valori della portata di ricircolo Q_R .

Si osservi, a tal proposito, che tale operazione è stata possibile assumendo l'ipotesi che, per ciascuno spettro d'onda, la portata di tracimazione Q_T sia unica, ossia sia indipendente dal livello del piling-up che si realizza a tergo dell'opera.

Alcuni ricercatori, nei pochi studi reperibili in letteratura sull'argomento, hanno tentato di definire un legame funzionale tra il piling-up e le caratteristiche dell'onda incidente, nel caso bidimensionale di scogliera infinitamente lunga ($Q_R = 0$). In particolare, Diskin et al. (1970) hanno proposto una formula basata su test condotti con onde monocromatiche, mentre Loveless et al. (1998) hanno ricavato un'espressione da dati sperimentali provenienti anche da prove con onde irregolari.

Dal confronto tra i risultati delle presenti prove di laboratorio e le relazioni proposte in letteratura, emerge che la formula di Diskin tende a sovrastimare del 30% circa i valori del piling-up; ciò è probabilmente imputabile al fatto che nel presente studio si sono generati esclusivamente spettri di onde irregolari, mentre Diskin ha considerato onde regolari. Per contro, la relazione elaborata da Loveless fornisce valori di previsione del piling-up nettamente al di sotto di quelli misurati nel corso delle prove sperimentali qui illustrate.

Nel diagramma di Figura 12 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali eseguite sulla configurazione I. Per ogni onda che sormonta l'opera, si sono diagrammati in ascissa i valori della portata di ricircolo (ossia della portata di tracimazione netta) ed in ordinata i valori del piling-up (valori in scala modello). Dall'evidenza sperimentale emerge che il piling-up ha un andamento decrescente in funzione della portata di ricircolo, secondo una legge con buona approssimazione lineare. Per completezza, e soprattutto per interesse "applicativo ingegneristico", in Figura 13, è presentato lo stesso diagramma con valori riferiti al prototipo.

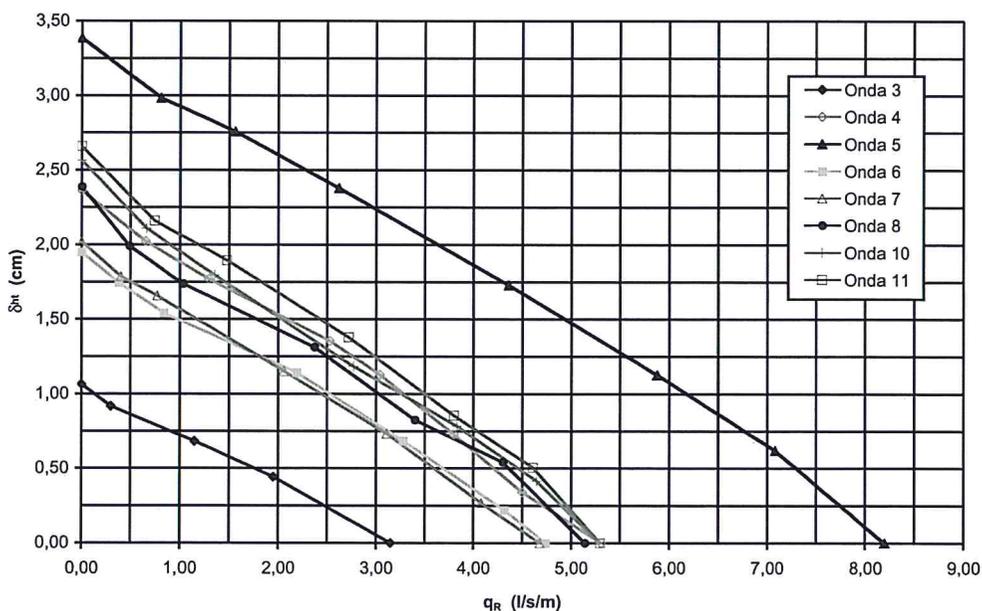


Figura 12 – Risultati sperimentali: piling-up δ_h dietro l'opera in funzione della portata di tracimazione netta q_R (valori in scala modello).

Tabella 4 – Principali risultati ottenuti dai test.

Onda	$H_{1/3,1}$ (cm)	f_p (Hz)	T_p (s)	η (cm)	q_R (l/s/m)	q_{OUT} (l/s/m)
1	2.45	1.031	0.97	-0.01	-	-
2	4.85	0.917	1.09	0.12	-	-
3	11.08	0.685	1.46	1.06	0.00	3.15
	11.08	0.685	1.46	0.92	0.30	2.85
	11.08	0.685	1.46	0.68	1.15	2.00
	11.08	0.685	1.46	0.00	3.15	0.00
4	14.30	0.565	1.77	2.36	0.00	5.31
	14.30	0.565	1.77	2.02	0.65	4.66
	14.30	0.565	1.77	1.77	1.29	4.02
	14.30	0.565	1.77	1.35	2.53	2.78
	14.30	0.565	1.77	1.13	3.04	2.27
	14.30	0.565	1.77	0.73	3.80	1.51
	14.30	0.565	1.77	0.34	4.50	0.81
5	14.30	0.565	1.77	0.00	5.31	0.00
	14.42	0.410	2.44	3.39	0.00	8.19
	14.42	0.410	2.44	2.98	0.81	7.38
	14.42	0.410	2.44	2.76	1.56	6.63
	14.42	0.410	2.44	2.38	2.62	5.57
	14.42	0.410	2.44	1.73	4.36	3.83
	14.42	0.410	2.44	1.13	5.88	2.31
6	14.42	0.410	2.44	0.62	7.08	1.11
	14.42	0.410	2.44	0.00	8.19	0.00
	12.91	0.685	1.46	1.95	0.00	4.74
	12.91	0.685	1.46	1.74	0.38	4.36
	12.91	0.685	1.46	1.54	0.84	3.90
	12.91	0.685	1.46	1.14	2.19	2.55
	12.91	0.685	1.46	0.69	3.28	1.46
7	12.91	0.685	1.46	0.22	4.32	0.42
	12.91	0.685	1.46	0.00	4.74	0.00
	13.48	0.645	1.55	2.02	0.00	4.68
	13.48	0.645	1.55	1.79	0.40	4.28
	13.48	0.645	1.55	1.66	0.77	3.91
	13.48	0.645	1.55	1.15	2.06	2.62
	13.48	0.645	1.55	0.73	3.11	1.57
8	13.48	0.645	1.55	0.27	4.08	0.60
	13.48	0.645	1.55	0.00	4.68	0.00
	14.03	0.606	1.65	2.39	0.00	5.14
	14.03	0.606	1.65	1.99	0.49	4.65
	14.03	0.606	1.65	1.74	1.03	4.11
	14.03	0.606	1.65	1.31	2.37	2.77
	14.03	0.606	1.65	0.82	3.40	1.74
10	14.03	0.606	1.65	0.54	4.30	0.84
	14.03	0.606	1.65	0.00	5.14	0.00
	15.11	0.526	1.90	2.57	0.00	5.29
	15.11	0.526	1.90	2.11	0.66	4.63
	15.11	0.526	1.90	1.79	1.35	3.94
	15.11	0.526	1.90	1.18	2.77	2.52
	15.11	0.526	1.90	0.78	3.83	1.46
11	15.11	0.526	1.90	0.42	4.65	0.64
	15.11	0.526	1.90	0.00	5.29	0.00
	15.52	0.448	2.23	2.66	0.00	5.30
	15.52	0.448	2.23	2.16	0.74	4.56
	15.52	0.448	2.23	1.89	1.48	3.82
	15.52	0.448	2.23	1.38	2.72	2.58
	15.52	0.448	2.23	0.86	3.80	1.50
11	15.52	0.448	2.23	0.51	4.61	0.69
	15.52	0.448	2.23	0.00	5.30	0.00

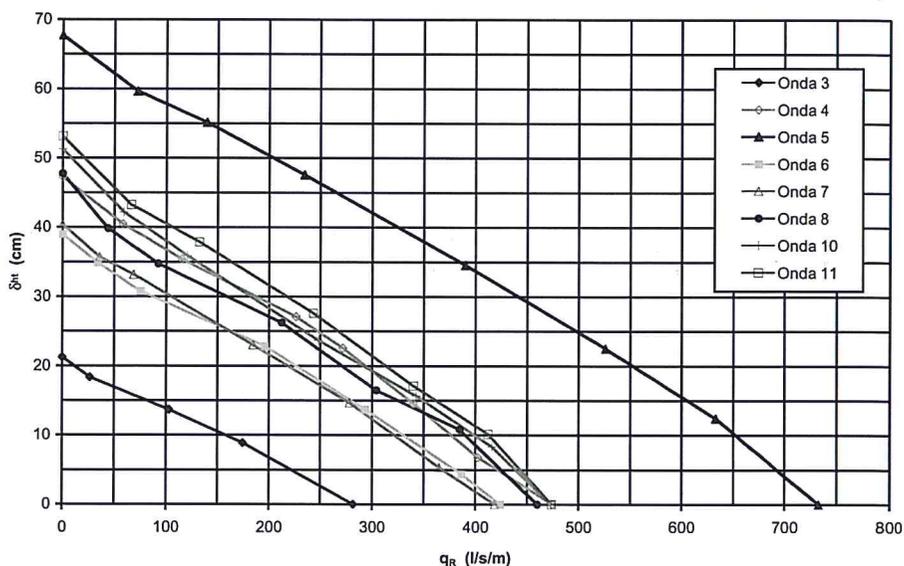


Figura 13 - Risultati sperimentali: piling-up δ_n dietro l'opera in funzione della portata di tracimazione netta q_R (valori in scala prototipo).

L'andamento della portata di tracimazione in funzione del periodo di picco dell'onda incidente è mostrato in Figura 14, dove sono riportati i dati sperimentali relativi alle onde 6-11, caratterizzate da altezza al largo $H_{1/3}$ costante e T_p variabile. Come già anticipato in merito al coefficiente di trasmissione, si può notare che la portata di tracimazione assume valori crescenti all'aumentare del periodo, a parità di altezza significativa. Questa tendenza è evidenziata dalla retta di regressione tratteggiata che approssima i dati sperimentali. Lo stesso andamento si osserva anche in Figura 15 dove i risultati sono presentati con riferimento a parametri adimensionali. Tale risultato è coerente con i dati reperibili in letteratura (Owen 1980, Aminti-Franco 1988, De Waal-Van der Meer 1992, Van der Meer-Janssen 1995).

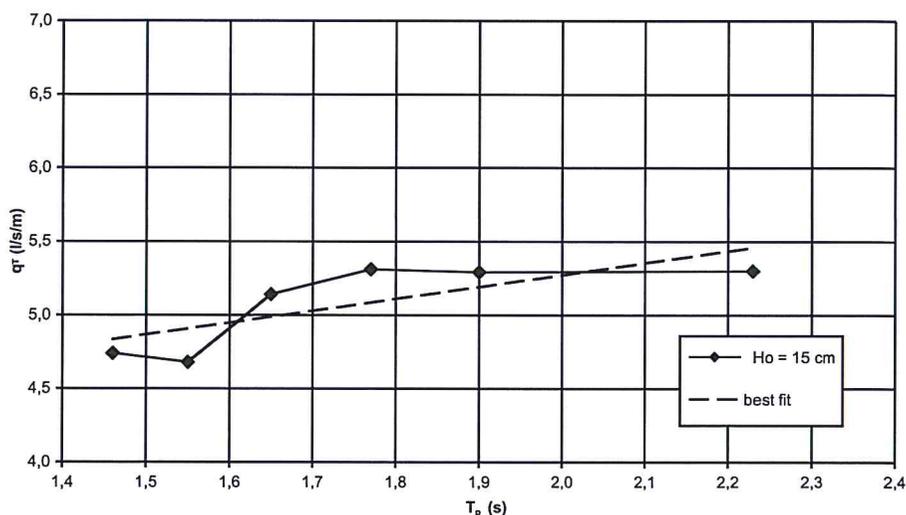


Figura 14 – Portata di tracimazione q_T in funzione del periodo di picco T_p (valori in scala modello).

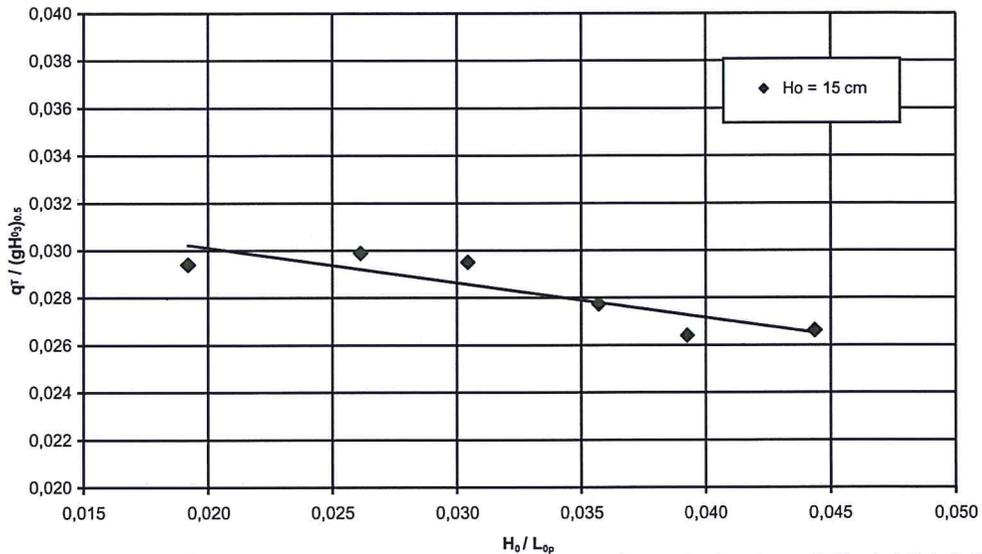


Figura 15 – Andamento della portata di tracimazione adimensionalizzata in funzione della ripidità dell'onda.

Sulla base dei valori di Q_{OUT} riportati in Tabella 4 è stato costruito il diagramma di Figura 16, in cui le grandezze sono riferite al modello. In essa è riportata la relazione che lega queste portate di filtrazione verso il largo con il livello di piling-up che si realizza nello specchio acqueo a tergo della barriera.

Nonostante la bibliografia specifica attribuisca a tale relazione (in realtà gli studi effettuati si sono basati sulla misura delle velocità puntuali nel corpo della scogliera e non sulla portata) un andamento di tipo parabolico (Loveless et Al. 1998, Lamberti et Al. 2003), l'evidenza sperimentale ha sottolineato, per il caso analizzato, una sensibile "affinità" dei due parametri (portate e livelli).

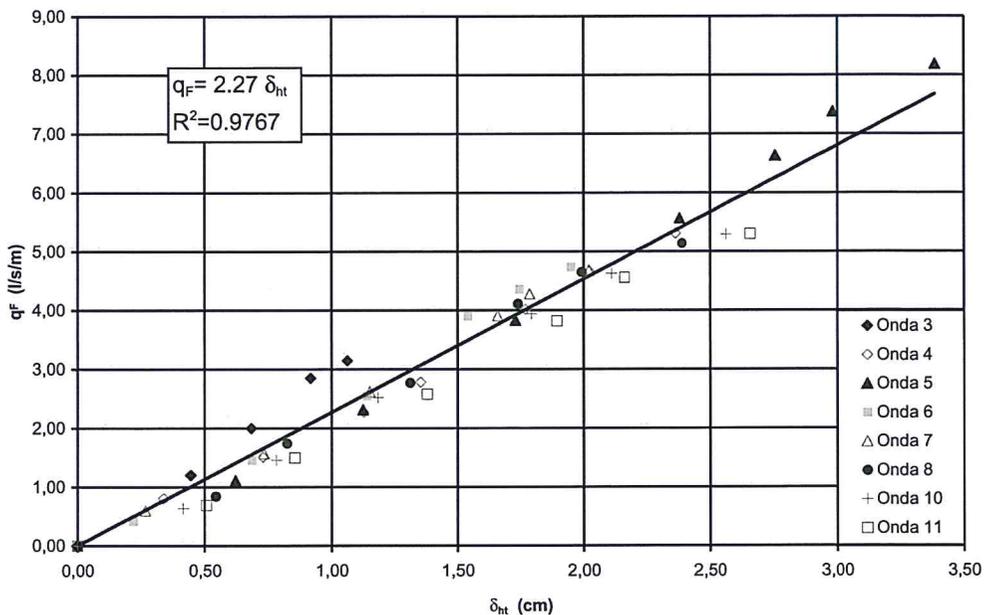


Figura 16 - Relazione tra portate di filtrazione verso il largo (q_{OUT}) e livelli di piling-up (δ_h).

Per avvalorare tale affinità sono state effettuate alcune prove di filtrazione in regime stazionario; tali test sono stati effettuati mantenendo costante il dislivello tra monte e valle dell'opera permeabile. I risultati ottenuti da queste prove hanno evidenziato che, per dislivelli (riferiti al modello) superiori ad 1 cm, la dipendenza con le portate di filtrazione sembra essere pressoché lineare.

Dal confronto dei risultati ottenuti in presenza di onde (Fig. 16) ed in moto stazionario (Fig. 17) emerge che, a parità di dislivello, le portate di filtrazione in presenza di moto ondoso sono inferiori a quelle in assenza di onde, e ciò è da ricondurre all'evidente differenza tra il campo di moto oscillante (dovuto alle onde) ed il moto stazionario.

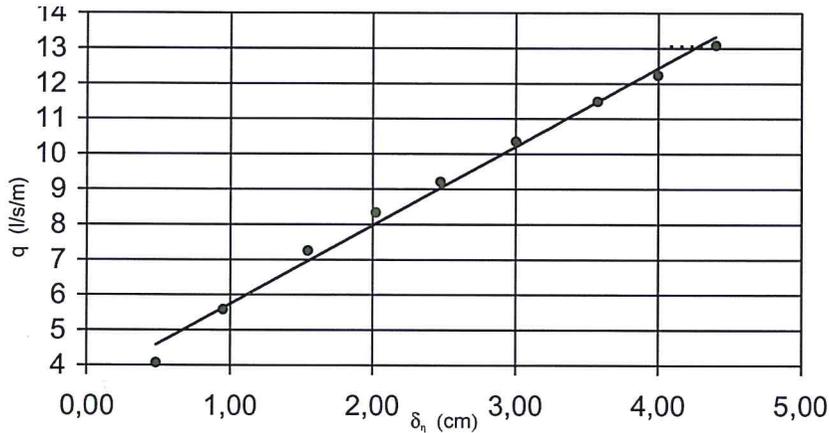


Figura 17 – Risultati dei test di filtrazione attraverso l'opera, in regime stazionario.

Configurazione II: scogliera con totale impermeabilizzazione

Nella Tabella 5 sono riportati gli attacchi ondosi realizzati con la *configurazione II* (Fig. 10) e le portate di ricircolo unitarie q_R imposte al fine di mantenere un livello costante a terno della barriera frangiflutti.

Tabella 5 – Portate di ricircolo relative alla configurazione II.

Onda	$H_{1/3, i}$ (cm)	q_R (l/s/m)
3	11.08	0.14
4	14.30	1.64
5	14.42	3.55
6	12.91	0.68
7	13.48	0.75
8	14.03	1.30
10	15.11	1.97
11	15.52	2.36

L'impermeabilizzazione della struttura rende indiscutibilmente nulli i contributi della portata Q_{IN} attraverso il corpo dell'opera e del flusso di ritorno offshore Q_{OUT} .

Per ciascuno spettro d'onda generato, è possibile pertanto considerare tali portate di ricircolo come rappresentative del solo contributo della portata di tracimazione Q_T , dovuto alla sola portata che oltrepassa la cresta dell'opera Q_{OV} .

I valori di tali portate di ricircolo risultano essere sensibilmente inferiori a quelli $Q_{R(\delta h=0)}$ ottenuti con la configurazione I, corrispondenti alla condizione di sovrizzo nullo. Ciò significa che la portata Q_{IN} che passa attraverso il corpo della scogliera rappresenta un contributo importante nell'espressione della portata di tracimazione Q_T .

Tali considerazioni hanno suggerito la opportunità di valutare quanto le caratteristiche del corpo della struttura influiscano sul fenomeno di tracimazione, inteso come somma del contributo di portata Q_{OV} che passa al di sopra della cresta della struttura, e della portata Q_{IN} che passa attraverso la scogliera. A tal fine si è realizzata la *configurazione III* di seguito illustrata.

Configurazione III: scogliera con parziale impermeabilizzazione

Come detto, il fatto che le portate che transitano al di sopra della struttura Q_{OV} (determinate mediante la precedente configurazione II) siano di gran lunga inferiori alle portate di tracimazione $Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$, determinate con la configurazione I, ha imposto di cercare di stimare il contributo alla portata di tracimazione Q_T , dato dal flusso idrico inshore Q_{IN} che si realizza attraverso la porzione "emersa" della scogliera. A tal fine è stata realizzata un'opera parzialmente impermeabile, mediante l'applicazione sulla scarpata interna del frangiflutti, di un setto impermeabile fino alla quota 0.0 m (livello di riposo) (Fig. 11).

A tale scopo sono stati effettuati 4 attacchi ondosi (Tab. 6), imponendo delle portate di ricircolo Q_R tali da mantenere livelli idrici costanti a tergo della struttura, leggermente al di sotto del livello di riposo. Tale artificio ha consentito di annullare il flusso di ritorno offshore Q_{OUT} , e valutare allo stesso tempo le portate di tracimazione Q_T . A differenza della configurazione I, analizzata in precedenza, tali portate sono somma di un contributo che oltrepassa la struttura Q_{OV} e di un contributo Q_{IN}^* che, passando attraverso la porzione di frangiflutti lasciata "scoperta" dal setto impermeabile, risulta essere una frazione dell'intera portata Q_{IN} che attraversa il corpo della scogliera in assenza di impermeabilizzazioni.

Tabella 6 - Portate di ricircolo relative alla configurazione III.

Onda	$H_{1/3, i}$ (cm)	q_R (l/s/m)
3	11.08	2.17
4	14.30	4.96
5	14.42	8.13
7	13.48	4.03

Nel diagramma riportato in Figura 18 sono riportate le portate di ricircolo ricavate per le tre diverse configurazioni descritte, in funzione delle altezze d'onda incidenti misurate al piede dell'opera.

Si ricorda che, per un determinato spettro d'onda, le portate di ricircolo riportate nel diagramma hanno un diverso significato a seconda della configurazione cui si riferiscono.

In particolare, riassumendo il significato delle portate di ricircolo ricavate per ciascuna configurazione, si ha che:

- per la configurazione I, essendo riportate le portate di ricircolo $Q_{R(\delta h=0)}$ ricavate nel caso di livello di piling-up nullo ($Q_{OUT} = 0$), si ha: $Q_R = Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$;
- per la configurazione II, essendo nulli i flussi in/off-shore ($Q_{IN} = Q_{OUT} = 0$) attraverso il corpo della scogliera, si ha: $Q_R = Q_{OV}$;
- per la configurazione III, essendo nullo il flusso di ritorno off-shore ($Q_{OUT} = 0$) attraverso il corpo del frangiflutti, si ha: $Q_R = Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}^*$, dove il termine con l'asterisco rappresenta la portata inshore che passa attraverso il corpo della struttura, nella porzione "emersa" dell'opera.

Il diagramma riportato in Figura 18 evidenzia come le curve relative alle configurazioni I e III presentino valori di portate di ricircolo simili, soprattutto per i valori più elevati dell'altezza d'onda incidente al piede dell'opera. La curva relativa alla configurazione II ha un pure un andamento simile a quello delle due curve precedenti, ma con valori di portate di ricircolo decisamente inferiori. Ricordando il significato delle portate di ricircolo ricavate per le tre diverse configurazioni, si può concludere che il contributo maggiore all'intera portata di tracimazione Q_T è dovuto al flusso idrico inshore Q_{IN} che si realizza attraverso il corpo della struttura. In particolare, la porzione di struttura che maggiormente interagisce con l'onda, in termini di portate di tracimazione Q_T , è quella che si trova al di sopra del livello di riposo; in tale zona si verifica il flusso inshore Q_{IN}^* che, sommato alla portata Q_{OV} che passa al di sopra della cresta della scogliera, restituisce approssimativamente i valori delle portate di tracimazione Q_T ricavate con la configurazione I nel caso di sovrizzo nullo ($Q_{R(\delta h=0)} = Q_T$). La differenza che si riscontra tra i valori di portata determinati con la configurazione I e quelli determinati con la configurazione III, sembra poter essere attribuita alla frazione del flusso inshore Q_{IN} dovuta al moto di filtrazione che si realizza nella porzione di scogliera situata al di sotto del medio mare.

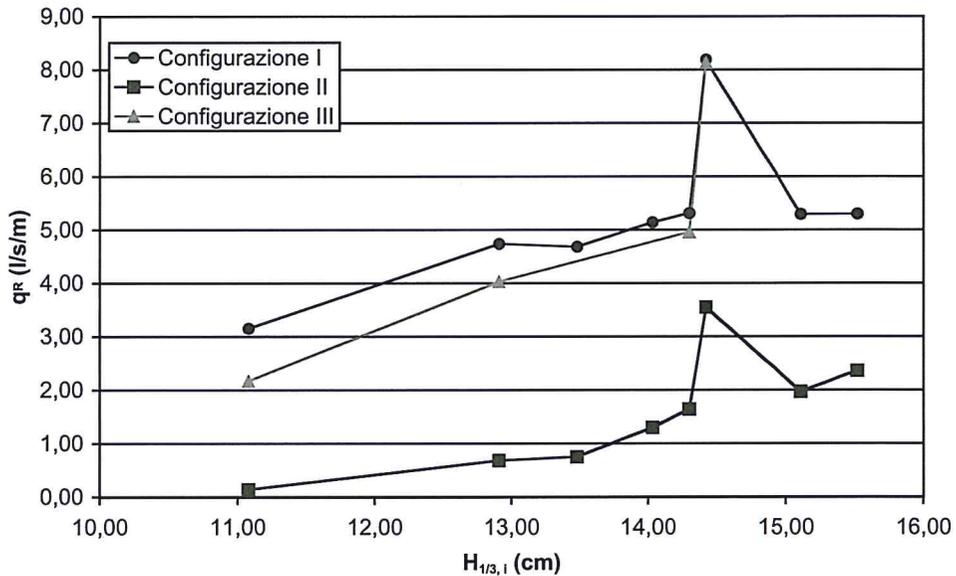


Figura 18 – Portate di tracimazione netta in funzione dell'altezza d'onda incidente al piede dell'opera.

Tutti e tre i grafici mostrano poi un comportamento singolare per l'onda 5 ($H_{1/3,1} = 14.42$ cm), manifestando un "picco anomalo" nelle portate di tracimazione rispetto agli altri dati. In effetti tale onda, come anticipato nel paragrafo della "descrizione dell'apparato sperimentale" (vedi Tab. 2), è la più alta in assoluto, in fase di generazione, ed è pure quella caratterizzata dal massimo periodo d'onda ($T_p = 2.44$ s), ma, proprio per queste caratteristiche, si riduce notevolmente in fase di propagazione verso la struttura fino a presentarsi, al piede dell'opera con altezza significativa inferiore ad onde più corte e basse in generazione. Sembra perciò logico pensare che, proprio l'elevato periodo e la condizione di evidente frangimento possano essere responsabili della descritta "anomalia" sperimentale.

Conclusioni

Nel presente lavoro è stato indagato il comportamento di una scogliera emersa a cresta bassa, posta nella *surf zone*, con riferimento ai fenomeni di riflessione, trasmissione, tracimazione dell'onda e piling-up che si realizza a tergo dell'opera. L'interazione onda-struttura è stata studiata riproducendo

circa 60 attacchi ondosi irregolari.

In una prima fase è stata analizzata una struttura permeabile, che ha permesso di stimare le portate di tracimazione (al netto delle portate di filtrazione dirette verso il largo), per diversi valori di piling-up, mentre nella seconda fase è stato posto un setto impermeabile sulla scarpata lato riva della stessa scogliera (dapprima fino alla quota sommitale della scogliera, poi solo fino alla quota 0.0) per quantificare separatamente le portate di overtopping Q_{OV} e di trasmissione attraverso la porzione “emersa” della struttura Q_{IN} e quindi per comprendere più nel dettaglio il complesso processo di filtrazione attraverso l’opera, legato anche all’incremento del livello idrico (piling-up) dietro al frangiflutti.

I test relativi ai fenomeni di *riflessione* e *trasmissione* hanno messo in luce i seguenti risultati:

- il coefficiente di riflessione K_R assume valori compresi tra 0.24 e 0.31 e presenta un andamento decrescente con la ripidità dell’onda;
- il coefficiente di trasmissione ha lo stesso andamento di K_R in funzione della ripidità ed è stimato con buona precisione dall’equazione di natura teorico-sperimentale ricavata da Ruol-Faedo (2002), nel caso di onde tracimanti.

Le prove sperimentali relative al fenomeno di *tracimazione* e *piling-up* per l’opera indagata hanno evidenziato i seguenti risultati:

- la portata di tracimazione Q_T risulta poco influenzata, ma comunque crescente col periodo dell’onda, a parità di altezza significativa;
- la relazione tra la portata di ricircolo Q_R (ossia la portata di tracimazione netta) e il piling-up δ_h è descritta con ottima approssimazione da una legge lineare;
- vi è una elevata “affinità” tra la portata di ritorno offshore Q_{OUT} e il livello di piling-up δ_h a tergo della barriera;
- il contributo maggiore alla portata di tracimazione Q_T è dato dal flusso inshore Q_{IN} che passa attraverso la porzione emersa (e più permeabile) della scogliera.

Bibliografia

- Allsop N. e Hettiarachi S. (1988) – *Reflection from coastal structures*. Proc. of the 21st ICCE, ASCE. Malaga, pp. 782-794.
- Aminti P. e Franco L. (1988) - *Wave overtopping on rubble mound breakwaters*. Proc. of the 21st ICCE, ASCE. Malaga, pp.770-781.
- Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M. (2002) - *Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa*. Studi costieri, 5: 83-96.
- Davies B. L., Kriebel D. L. (1992) - *Model testing on Wave Transmission past Low Crested Breakwaters*. Proc. of the 23rd ICCE, ASCE. Venice, pp. 1115-1128.
- De Waal, J.P. e Van der Meer, J.W. (1992) - *Wave runup and overtopping on coastal structures*. Proc. of the 23rd ICCE, ASCE. Venice, pp. 1758-1771.
- Diskin, M.H. et al. (1970) - *Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters*. Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE, pp. 359-371.
- Gironella X., et Al. (2002) - *Submerged detached breakwaters: towards a functional design*. Proc. of the 28th ICCE, ASCE. Cardiff, pp. 1768-1777.
- Gomez Pina, G. e Valdes, J.M. (1990) - *Experiments on coastal protection submerged breakwaters: a way to look at the results*. Proc. of the 22nd ICCE, ASCE. Delft, pp. 1592-1605.
- Loveless J.H., Debski D., MacLeod A.B. (1998) - *Sea level set-up behind detached breakwaters*. Proc. of the 26th ICCE, ASCE. Copenhagen, pp. 1665-1678.
- Lamberti A., Zanuttigh B., Tirindelli M. (2003) – *Evaluation of overtopping processes over low-crested structures*. Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment – MEDCOAST 03. Ravenna, pp. 1929-1940.
- Owen, M.W. (1980) - *Design of seawalls allowing for wave overtopping*. Report EX 924, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK.

- Ruol, P., Faedo, A. (2002) - *Physical Model Study on Low-Crested Structures under Breaking Wave Conditions*. Proc. of the Intern. MEDCOAST Workshop on Beaches of the Mediterranean & the Black Sea, Kusadasi, Turkey, pp. 83-96.
- Seelig W.N. (1980) – *Two dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters*. Technical Report n. 80-1, U.S. Army Corps of Eng., CERC.
- Van der Meer, J.W., Janssen, W. (1995) - *Wave Run-up and Wave Overtopping at dikes*. Wave Forces on Inclined and Vertical Structures, ASCE, pp. 1-27.

Manoscritto ricevuto il 30/10/2003, accettato il 27/11/2003.

Effetti idrodinamici sulle spiagge della costa occidentale della Sardegna

Andrea Atzeni

Facoltà di Ingegneria. D. I. T. Idraulica. Piazza d'Armi, Cagliari. aatzeni@unica.it

Riassunto

Con l'ausilio del fattore di flusso di energia netto medio annuo, ottenuto sulla base dei rilievi ondometrici della boa di Alghero, nella costa occidentale della Sardegna sono state individuate sei unità fisiografiche ed esaminate le morfologie di alcune delle più importanti spiagge di questa costa. I casi esaminati hanno messo in evidenza l'importanza del flusso netto medio annuo nello studio della morfologia delle spiagge ad arco simmetriche e asimmetriche e nello studio della evoluzione dei cordoni litoranei.

Parole chiave: Flusso netto annuo, moto ondoso persistente, spiagge simmetriche, spiagge asimmetriche, cordoni litoranei, stabilità delle linee di riva.

Abstract

By the net mean annual energy flux factor, calculated using of waves data base recorded at the Alghero buoy, six physiographic units are identified in the west Coast of Sardinia and the morphology of many of the most important beaches of this coast are examined. The importance of the longshore energy flux factor in studying the beaches morphology is evident, both in the case of curved beaches and barrier beaches.

Keywords: *energy flux factor, persistent wave motion, curved beaches, barrier beaches, shore line stability.*

Introduzione

Con lo scopo di meglio conoscere il regime dei litorali e acquisire elementi utili per una oculata scelta degli interventi di difesa e di riequilibrio dei litorali che continuamente si rendono necessari, da alcuni decenni anche l'ingegneria costiera ha dedicato la sua attenzione alla geomorfologia. Bird (1984) definisce la geomorfologia costiera come quella disciplina che studia la forma delle coste, la loro evoluzione ed i cambiamenti in atto. I geologi hanno fatto numerose classificazioni delle coste, basandosi fondamentalmente sulla ricerca della loro genesi e sugli effetti delle ingressioni e regressioni marine, ma il primo a riconoscere il fondamentale effetto dell'azione del moto ondoso sulla evoluzione delle coste è stato Shepard (1937). In seguito sono stati messi in evidenza i differenti effetti delle onde di mare vivo e di mare morto e della loro direzione di arrivo (Davies 1958, 1964). Attualmente risulta essere un fatto ormai acquisito il concetto che la forma della costa sia il frutto dell'equilibrio dinamico dipendente dalla sua litologia e dall'azione del moto ondoso che la sollecita. Le litologie più sensibili all'azione del moto ondoso sono quelle costituite da sedimenti sciolti siano essi ciottolosi, sabbiosi o limosi. Le rive dei corsi d'acqua e delle coste occupate da sedimenti sciolti sono comunemente note con il nome di spiagge che, dal punto di vista ingegneristico, possono

essere considerate alla stregua delle strutture flessibili, naturali o artificiali. Queste strutture hanno la capacità di assorbire l'energia delle correnti fluviali o delle onde marine adattando la loro forma alla sollecitazione idrodinamica.

Se le sollecitazioni del moto ondoso si ripetono incessantemente con la stessa intensità e direzione interessando esclusivamente sedimenti sciolti, prescindendo dalla modificazione e riduzione dei granuli, la spiaggia costiera evolve verso una forma di equilibrio stabile che, una volta raggiunto, si conserva nel tempo. I regimi di moto ondoso uniforme sono una astrazione, ma in natura esistono circostanze che si avvicinano a queste condizioni. Infatti il moto ondoso è prodotto dalle tempeste di vento dovute a perturbazioni cicloniche i cui percorsi si ripetono con una certa regolarità nel corso dell'anno e, quindi, tali da generare condizioni di moto ondoso che si dirige verso le coste secondo persistenti direzioni e intensità. Questo accade spesso negli oceani le cui tempeste producono condizioni di moto ondoso, che spesso raggiunge le coste più lontane sotto forma di mare morto, la cui direzione e intensità sono costanti, ma si verifica anche nella parte del Mediterraneo ove domina il regime dei venti del quarto quadrante (Maestrale) da cui ha origine un moto ondoso di forte intensità che produce sollecitazioni persistenti sulle coste occidentali dei continenti e delle isole.

A livello planetario, si stima che il regime dei venti e le correnti marine conservino le stesse caratteristiche da 800 milioni ad un miliardo di *anni* (Meyerhoff, 1970). Però, a fronte di questa regolarità delle sollecitazioni, modificate solo localmente dalla variazione del livello dei mari, nei tempi geologici si sono avute variazioni del convogliamento dei sedimenti verso le coste da parte dei fiumi e, nell'ultimo secolo, si sono verificate riduzioni dei rifornimenti per effetto delle opere di intercettazione dei corsi d'acqua e di quelle costruite nella fascia costiera. Queste ultime, interrompendo e deviando il percorso dei sedimenti, hanno modificato localmente il loro regime e, spesso, ridotto gli apporti verso le spiagge, favorendone l'arretramento.

Nello studio degli aspetti ingegneristici della geomorfologia costiera si possono distinguere le spiagge interessate da un moto ondoso persistente perpendicolare alla loro linea di riva da quelle interessate da un moto ondoso obliquo. Le prime presentano una linea di riva simmetrica rispetto ad un asse allineato con la direzione del moto ondoso persistente e possono definirsi spiagge ad arco simmetriche. Le seconde danno luogo essenzialmente a due forme planimetriche tipiche che prendono il nome di spiagge ad arco asimmetriche e di spiagge a freccia (*barrier beaches*).

Utilizzando i dati direzionali di moto ondoso registrati, a cura del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) italiano, dalla boa della Rete Ondametrica Nazionale RON-Alghero, ancorata su un fondale di circa 85 m, nel periodo compreso tra il 1990 ed il 2000, il presente studio, dopo la ricostruzione del flusso netto di energia che interessa la costa occidentale della Sardegna, esamina la morfologia di alcune delle sue spiagge e verifica che le tre forme planimetriche a cui si è fatto cenno sono conseguenza diretta delle sollecitazioni del moto ondoso.

Il regime ondametrico della costa occidentale della Sardegna

Come risulta dal diagramma della Figura 1, il moto ondoso registrato dalla boa RON-Alghero, presenta spiccate condizioni di persistenza. Peraltro, mettendo in conto il rapporto dei fetches geografici del terzo e quarto quadrante della boa di Alghero con quelli di due punti al largo del Golfo di Oristano e dell'Isola di S. Pietro e applicando le formule di proporzionalità della lunghezza del *fetch* efficace, fornite dallo SPM 84 per il calcolo dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco del moto ondoso di mare vivo, con buona approssimazione, risulta che i dati registrati alla boa di Alghero rappresentano il regime di tutta la costa occidentale della Sardegna.

La Figura 1 presenta due picchi di frequenza delle osservazioni: uno attorno alla direzione di 245 °N e uno attorno a 305 °N, ma quest'ultimo è di gran lunga più alto ed ha una intensità maggiore del primo. Se ne può concludere che le coste occidentali della Sardegna sono persistentemente battute dal moto ondoso del quarto quadrante con una direzione prevalente attorno ai 305 °N.

Flusso longitudinale di energia

Il trasporto solido litoraneo potenziale è direttamente proporzionale al flusso longitudinale dell'energia del moto ondoso (Komar e Inman, 1970) calcolato in corrispondenza del punto più distante dalla riva nel quale si verificano i frangenti condizionati dal fondale. Tale flusso è dato dalla relazione:

$$P_{lbs} = \frac{\rho g H_{bs}^2}{16} C_{Gb} \text{sen } 2\alpha_b, \quad (1)$$

ove H_{bs} è l'altezza dell'onda significativa al frangente, C_{Gb} la sua celerità di gruppo e α_b la direzione rispetto alla costa.

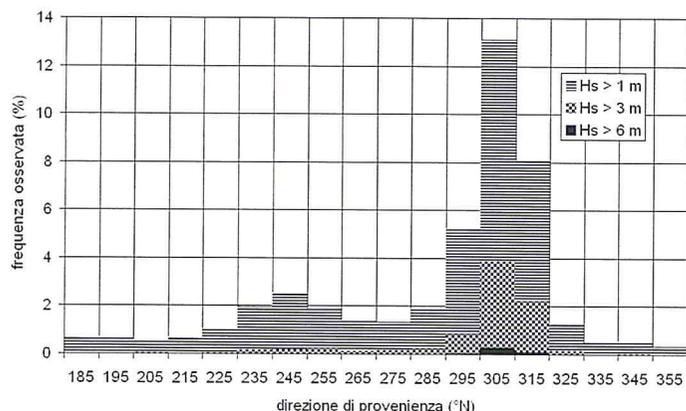


Figura 1 – Distribuzione delle frequenze delle onde osservate alla boa di Alghero in funzione della direzione.

Ricorrendo ad alcune ipotesi semplificative, che contemplano la rifrazione su un piano acclive, l'assunzione di un coefficiente di profondità (*shoaling*) costante pari a 1.07, la coincidenza al frangente della celerità di gruppo con la celerità di fase e l'adozione dello spettro JONSWAP medio, la (1) si può scrivere in funzione dei soli parametri ondometrici al largo:

$$P_{lbs} = 0.049\pi(1.07)^3 \frac{\rho g H_{0s}^2}{8} T_p \sqrt{\cos\alpha_0} \text{sen } 2\alpha_0, \quad (2)$$

essendo H_{0s} l'altezza dell'onda significativa, T_p il periodo di picco e α_0 l'angolo che la direzione principale del moto ondoso forma con la normale alla spiaggia.

La semplificazione assunta è indubbiamente eccessiva se si considera l'estensione di tutta la costa occidentale della Sardegna, ma lo è molto meno se si fa riferimento a tratti di costa relativamente rettilinei e si tiene conto del fatto che, rimanendo nel campo della teoria lineare, le trasformazioni del moto ondoso sono influenzate in maniera considerevole dai fondali solo per profondità relative inferiori al 10% della lunghezza dell'onda al largo. Quanto alla scelta del coefficiente di *shoaling* pari a 1.07 si fa osservare che, sempre nell'ambito della teoria lineare del moto ondoso, esso corrisponde alla profondità relativa pari a circa il 3.5% della lunghezza dell'onda al largo e che tale profondità rappresenta con buona approssimazione il valore medio dell'altezza delle onde frangenti di mare vivo, con ripidità al largo non inferiore al 2.5%, nell'ipotesi che la ripidità limite δ_b sia data dall'espressione:

$$\delta_b = 0.14 \text{th} \left(\frac{2\pi d_b}{L_b} \right), \quad (3)$$

essendo d_b ed L_b rispettivamente la profondità e la lunghezza d'onda al frangente.

Com'è ben noto, non tutta l'energia dell'onda al largo viene trasferita a costa, parte si perde per frangimento parziale, parte per resistenza tangenziale del fondo, parte per azioni tangenziali interne al fluido e parte per l'apertura del settore che delimita la propagazione delle onde verso la costa.

In considerazione del fatto che la maggior parte dell'energia che arriva al frangente più esterno è limitata dal settore di provenienza del moto ondoso, nel presente studio si sono trascurate le perdite per frangimento, la resistenza del fondo e quella interna al fluido. Il flusso di energia longitudinale dato dalla (2), ridotto del coefficiente $e < 1$ rappresentativo della quota parte dell'energia che arriva sulla costa, assume dunque la forma:

$$P_{lbes} = 0.049\pi (1.07)^3 \frac{\rho g H_{0s}^2 e}{8} T_p \sqrt{\cos\alpha_0 \sin 2\alpha_0}. \quad (4)$$

Nell'ottica dello spettro direzionale, detta ϑ_W la direzione principale di propagazione del moto ondoso e dette ϑ_1 e ϑ_2 le direzioni che delimitano il settore di mare aperto, il coefficiente e vale:

$$e = \frac{1}{m_0} \int_0^\infty df \int_{\vartheta_1 - \vartheta_W}^{\vartheta_2 - \vartheta_W} S(f, \vartheta) d\vartheta, \quad (5)$$

essendo m_0 l'energia al largo:

$$m_0 = \int_0^\infty df \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} S(f, \vartheta) d\vartheta. \quad (6)$$

Nella (6) la direzione principale del moto ondoso è stata posta uguale a zero. Per lo spettro direzionale si è assunta l'espressione:

$$S(f, \vartheta) = S(f)G(f, \vartheta), \quad (7)$$

essendo $S(f)$ lo spettro di frequenza, per il quale si è assunta la forma di Bretschneider (1968) con una modifica dei coefficienti suggerita da Mitsuyasu (1970), e la funzione di distribuzione direzionale $G(f, \vartheta)$ per la quale si è assunta l'espressione fornita da Mitsuyasu et al. (1975):

$$G(f, \vartheta) = G_0 \cos^{2s} [(\vartheta - \vartheta_W) / 2], \quad (8)$$

essendo G_0 una costante ed s una funzione della frequenza:

$$s = \begin{cases} s_{max} (f / f_p)^5; & f \leq f_p \\ s_{max} (f / f_p)^{-2.5}; & f \geq f_p \end{cases} \quad (9)$$

Per il parametro di dispersione direzionale s_{max} che compare nella (9) è stato assunto il valore:

$$s_{max} = 10, \quad (10)$$

corrispondente alla condizione di mare di vento (mare vivo) che rappresenta lo stato di mare prevalente nelle acque del Mediterraneo.

Dato l'orientamento della linea di riva di un rilievo appartenente al periodo di osservazione del moto ondoso, applicando la (4) ad ogni dato osservato alla boa RON-Alghero, si ottiene la serie storica dei flussi, la cui somma algebrica fornisce il flusso netto di energia che interessa la costa.

Morfologia delle spiagge

Raramente le spiagge presentano una forma planimetrica rettilinea. In generale, esse hanno una linea di riva curva e lo specchio di mare che delimitano viene detto cala, baia, golfo o mare a seconda dell'estensione di mare racchiuso e a seconda del grado di insenatura, inteso questo come il rapporto tra la distanza del punto più interno dalla corda che delimita lo specchio di mare e la corda stessa.

Focalizzando l'attenzione sulle spiagge curve, si possono distinguere quelle simmetriche da quelle asimmetriche. Le prime sono caratterizzate da una forma planimetrica che presenta un asse di simmetria orizzontale perpendicolare al centro della linea di riva, ove la curvatura è minima o nulla, e le zone laterali che alle estremità, solitamente appoggiate a promontori rocciosi, hanno curvatura massima. Le seconde hanno curvatura variabile da un valore massimo, nella zona che si appoggia ad un promontorio, ad un minimo, che in condizioni di equilibrio stabile diventa nullo, all'estremità opposta.

Un terzo tipo di spiagge è rappresentato dai cordoni litoranei o spiagge a freccia che, protendendosi in mare senza appoggiarsi alla costa, delimitano uno specchio protetto dal mare aperto, da cui il nome di *barrier beaches* con il quale esse sono anche note. Talvolta il cordone si salda con la riva racchiudendo una laguna o uno stagno.

Nelle verifiche morfologiche delle spiagge asimmetriche e dei cordoni litoranei assume importanza fondamentale la direzione dell'onda persistente. Con questo termine si intende la direzione del moto ondoso generato dai venti oceanici permanenti che arrivano sulle coste dei continenti sotto forma di mare morto (*swell*). Invece, nel presente lavoro, dedicato allo studio della morfologia delle spiagge della Sardegna occidentale, per direzione dell'onda persistente si è assunta quella che produce il flusso netto di energia nullo rispetto alla direzione della spiaggia. Il calcolo del flusso è eseguito sui dati della serie storica registrata dalla boa RON-Alghero, utilizzando la (4) e considerando la parte della serie di dati la cui direzione resta compresa nel settore rivolto verso il mare aperto, come è riportato nei seguenti sottoparagrafi per i tre tipi di spiaggia.

Spiagge simmetriche

Queste spiagge sono interessate da un moto ondoso dominante diretto secondo l'asse di simmetria. Conseguentemente il regime del trasporto solido dominante è caratterizzato da un movimento dei sedimenti prevalentemente diretto verso il largo nelle fasi di mare vivo e verso riva nelle fasi di mare morto, a cominciare dalle fasi finali delle tempeste, mentre il trasporto longitudinale, in termini di flusso netto annuo, è pressoché nullo. Il continuo ripetersi di queste sollecitazioni produce l'abrasione e la selezione dei granuli la cui frazione più fina, durante la fase di mare vivo, viene trasportata in sospensione verso i fondali più profondi e, nella fase di mare morto, verso la berma della spiaggia emersa. Gradualmente, queste frazioni si disperdono verso i fondali profondi, da dove il moto ondoso non è più in grado di rimuoverle, oppure, quelle accumulate sulla berma emersa, prese in carico dai venti di mare, vengono trasportate nella retrospiaggia. Entrambi i fenomeni costituiscono la prevalente causa di perdita di sedimenti per questo tipo di spiaggia.

Esistono spiagge simmetriche ampie ed esposte direttamente a tutto il ventaglio delle direzioni del moto ondoso dominante e spiagge simmetriche i cui promontori pronunciati limitano l'incidenza del moto ondoso a un settore ridotto. Se i promontori sono alti anche il vento di mare viene incanalato perpendicolarmente alla riva rendendo particolarmente efficace il trasporto verso l'entroterra dei sedimenti più fini. Nell'immediata retrospiaggia di queste baie si possono formare campi di dune più o meno estesi a seconda del grado di esposizione e dell'apertura della spiaggia alle direzioni del moto ondoso e del vento.

Nella parte dello studio che segue, il settore dei dati di moto ondoso utilizzato per il calcolo del flusso longitudinale è quello delimitato dai promontori che separano il mare aperto dalla costa e dagli specchi di mare costiero, come è riportato nelle Figure 5, 8, 9 e 10 che riguardano alcuni esempi di spiagge simmetriche della costa occidentale sarda.

Spiagge asimmetriche

Le spiagge asimmetriche sono interessate da un moto ondoso dominante obliquo, diretto perpendicolarmente alla linea di riva solo nella zona estrema di valle, ove la sua curvatura è minima o nulla. Le trasformazioni del moto ondoso all'interno della baie asimmetriche sono di pura diffrazione nella zona a massima curvatura, di pura rifrazione, o anche soltanto di *shoaling*, nella zona a curvatura nulla e di rifrazione e diffrazione nella zona intermedia, Figura 2. In letteratura queste spiagge sono

note con diversi nomi derivanti dalla loro forma. Sono state chiamate *baie a zeta* (zeta bays: Halligan, 1906; Silvester 1960), *baie a semi-cuore* (Silvester, 1960), *baie crenulate* (crenulated bays: Ho, 1971), *spiagge a spirale* (spiral beaches: Krumbain, 1944; Le Blond 1972), *spiagge uncinata* (hooked beaches: Rea e Komar, 1975), ecc.

Le spiagge asimmetriche soggette a moto ondoso persistente tendono ad una forma stabile di equilibrio che può conservarsi per lungo tempo. Questa forma è anche riassumibile con pochi parametri geometrici. Tra le forme geometriche proposte (spirale logaritmica, parabolica, polinomiale), al momento, quella polinomiale, verificata su molti prototipi e prove su modello, risulta rispondere meglio alla forma di equilibrio stabile. La polinomiale è data dalla relazione (Hsu ed Evans, 1989):

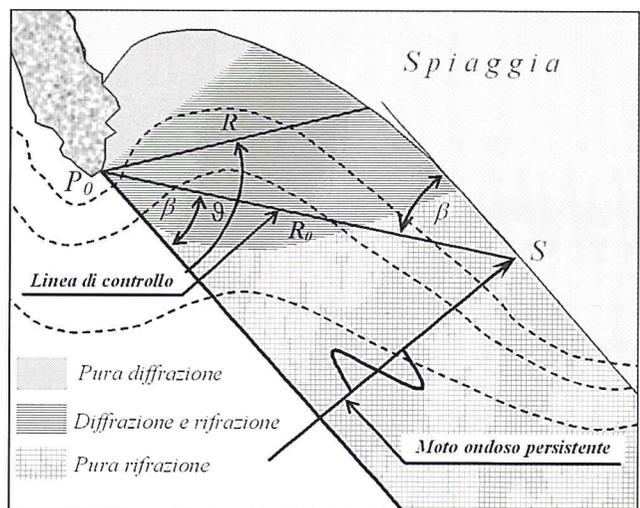
$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (11)$$

ove C_0 , C_1 e C_2 sono tre coefficienti adimensionali dipendenti da β ed R_0 è la lunghezza della *linea di controllo*. Il significato dei parametri β , θ , R e R_0 è riportato nella Figura 2.

Nel presente studio, il settore dei dati di moto ondoso utilizzato per il calcolo del flusso longitudinale è quello delimitato dalla linea di controllo e dalla tangente alla linea di riva nel punto di curvatura nulla. Nei casi in cui la direzione della linea di controllo e/o di quella della tangente alla linea di riva penetrano verso terra il settore è stato delimitato dalla costa, come riportato nelle figure 4, 6 e 7 che riguardano casi specifici di questo tipo di spiagge esaminati nel seguito.

L'applicazione della (11) è basata su una corretta assunzione del punto S (Fig. 2) sulla cui determinazione gli autori non forniscono precise indicazioni. Per sopperire a questo inconveniente è stato proposto un criterio (Gonzales e Medina, 2001) basato su un modello semiempirico che permette, noto il regime di moto ondoso ed il punto P_0 , di determinare in maniera obiettiva il punto S . Il modello è stato verificato su 26 spiagge della costa spagnola dell'Atlantico e del Mediterraneo.

Figura 2 - Definizione dei parametri di una linea di riva polinomiale di una baia in equilibrio stabile e zone di influenza della trasformazione del moto ondoso. Le delimitazioni dei tipi di trasformazione del moto ondoso sono qualitative.



Cordoni litoranei

Come risulta dall'osservazione, i cordoni litoranei sono presenti ove è abbondante la disponibilità di sedimenti ed il moto ondoso dominante ha una componente tangenziale considerevole rispetto a quella normale, con il flusso di energia netto sempre diretto nella stessa direzione. Risulta inoltre che la loro presenza è associata a brusche variazioni della direzione della linea di riva, in zone di costa bassa con bassi o bassissimi fondali. Di solito, il cordone ha origine dai punti di massima curvatura di quelle zone.

Si stima che i cordoni litoranei si siano formati a partire da meno di 6000 anni (Fairbridge, 1961), ossia da quando la crescita del livello del mare è rallentata in maniera considerevole. Inoltre, poiché essi si sviluppano per effetto del trasporto longitudinale dovuto al flusso netto di energia unidirezionale, un arresto del rifornimento di sedimenti ha come conseguenza un arresto del loro accre-

scimento. Anche la realizzazione di opere che intercettano il trasporto solido ha delle conseguenze immediate sulla loro evoluzione. Si tratta quindi di morfologie instabili che risentono immediatamente delle variazioni del regime di trasporto dei sedimenti a monte. Ma esistono situazioni limite, come si vedrà nel caso del cordone di Corru Mannu (Fig. 7), in cui il cordone è stabile e il flusso netto nullo.

Flusso netto del moto ondoso della costa occidentale della Sardegna

In generale, nella fascia costiera influenzata dal moto ondoso si accumulano considerevoli depositi di sedimenti la cui provenienza è quasi esclusivamente di origine continentale in quanto derivante dall'azione erosiva prodotta dagli eventi meteorici che hanno luogo esclusivamente sulle terre emerse e sulla costa. Da questa azione sono esclusi i fondali marini profondi, naturalmente protetti dagli spessi tiranti idrici. L'estensione della fascia litoranea, ove il moto ondoso esercita una continua azione di setacciatura, allontanando verso i fondali profondi i granuli più fini e verso riva quelli più grossolani, si spinge fino a un limite di profondità d_1 :

$$d_1 = \frac{g \overline{T_p}^2}{4\pi} \quad , \quad (12)$$

essendo $\overline{T_p}$ il periodo di picco medio degli spettri d'onda più energetici che interessano la costa. Solo i sedimenti sciolti più fini che viaggiano in sospensione si dirigono, per effetto del moto ondoso, verso i fondali più profondi del limite d_1 . Nella fascia litoranea compresa all'interno di questo limite si ha, superficialmente, la massima concentrazione di sedimenti. In generale, si stima che l'86,8% (Silvester, 1965) della superficie compresa nella fascia di cui si tratta sia ricoperta da sedimenti sciolti.

Dall'esame della serie storica registrata dalla boa RON-Alghero risulta che gli stati di mare con altezza d'onda significativa superiore a 6 m, che comprendono le massime altezze osservate lungo la costa occidentale sarda, hanno un periodo di picco medio $T_p \approx 12$ s, da cui, applicando la (12), si calcola che la fascia di piattaforma continentale influenzata dalle onde che attaccano questa costa si estenda fino alla profondità $d_1 \approx 110$ m. Dall'esame delle carte nautiche dell'Istituto Idrografico Italiano, alla scala 1:100.000, risulta che nella fascia di mare della costa occidentale sarda, compresa tra la linea di riva e la batimetrica - 100 m, i sedimenti sciolti prevalgono notevolmente rispetto alla roccia.

Ma sotto costa l'effetto del moto ondoso in grado di produrre, in maniera sensibile, il trasporto dei sedimenti si risente fino a una profondità molto inferiore al valore riportato sopra. L'ingegneria costiera distingue il trasporto solido dei sedimenti sommersi in longitudinale e trasversale rispetto alla linea di riva. Esistono due limiti di profondità che secondo il CUR (1987) sono esprimibili dalle relazioni:

$$d_1 = 1.75 H_{s,12} \quad , \quad (13)$$

$$d_i = 3.50 H_{s,12} \quad , \quad (14)$$

al di sopra dei quali i sedimenti sono soggetti rispettivamente a trasporto longitudinale e trasversale o a solo trasporto trasversale. Nelle (13) e (14) $H_{s,12}$ rappresenta l'altezza dell'onda significativa a costa che non viene superata per più di 12 ore/anno. Il tirante idrico d_i è la cosiddetta *profondità di chiusura*, al di sotto della quale il trasporto solido dovuto al moto ondoso, dal punto di vista ingegneristico, è irrilevante e ininfluenza sulla morfologia della spiaggia. Dai calcoli delle altezze delle onde $H_{s,12}$ che interessano le spiagge simmetriche esaminate, applicando la (14), risulta una profondità di chiusura compresa tra il valore massimo di - 23.0 m (spiaggia di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu, Fig. 8) e quello minimo di - 14,2 m (spiaggia di S. Nicolò, Fig. 9).

Il trasporto solido longitudinale è governato dal flusso netto di energia del moto ondoso che, come detto più sopra, può essere calcolato, noto il moto ondoso al largo, mediante la (4). Nel presente studio, per fare questo calcolo, la linea di riva è stata assimilata ad una successione di tratte rettilinee di cui è stato misurato l'orientamento. Inoltre, per ogni tratta, è stato individuato il settore di provenienza del moto ondoso e per ogni valore della serie storica è stato calcolato il flusso longitudinale. La somma algebrica dei flussi longitudinali ha fornito il flusso netto annuo e la media di questi flussi il flusso netto medio annuo. Il risultato è riportato nella Figura 3 ove, in adiacenza alla linea di costa, è indicato il verso del flusso e nel corrispondente istogramma la sua intensità media annua.

L'orientamento del flusso netto permette di delimitare le zone costiere appartenenti alla stessa *unità fisiografica*. Secondo la definizione adottata da Silvester (1962), l'unità fisiografica è rappresentata da quella tratta di fascia costiera interessata da un flusso netto unidirezionale o nullo.

Nel presente studio, per tenere conto dell'influenza che il flusso netto esercita nei confronti dell'apporto e della sottrazione di sedimenti dalle spiagge, l'unità fisiografica è stata definita come quella fascia costiera nella quale il flusso netto medio annuo è unidirezionale, nullo o convergente verso un punto della costa. Resta comunque fissato che una zona a flusso nullo costituisce l'estremità di valle di una unità fisiografica.

I confini dell'unità fisiografica sono quindi delimitati da punti ove il flusso diverge, solitamente coincidenti con promontori, oppure da zone costiere, caratterizzate da bassi fondali e ricoperte da sedimenti, ove il flusso confluisce. Seguendo rigorosamente questa definizione, lungo la costa occidentale della Sardegna si individuano nove campi di flusso netto diverso da zero. Tuttavia tre di queste delimitazioni, ossia quella dovuta al contro-flusso a Sud di Punta Scoglietti e quelle relative ai contro-flussi diretti verso Nord di Punta Gessiere e di Capo Altano (Fig. 3), per la loro limitata estensione rispetto agli estesi campi di flusso in cui sono inserite, non sono tali da condizionarne il verso dominante, ma solo di interromperlo temporaneamente. Per cui, nell'ottica del concetto di unità fisiografica introdotto sopra, appare ragionevole non tenere conto delle suddette interruzioni di flusso per la delimitazione delle unità fisiografiche. Si ritiene quindi di poter fare la suddivisione dei campi di flusso netto in unità fisiografiche e *sottounità*, con le prime che contengono le seconde.

Nella Figura 3 le unità fisiografiche della costa occidentale sarda sono indicate con un numero ordinale e le sottounità con le lettere a e b. Con questa precisazione le unità fisiografiche individuabili lungo la costa occidentale della Sardegna si riducono a sei, Figura 3:

- 1) unità fisiografica n° 1, contenente due sottounità, con flusso netto prevalente diretto verso Nord, compresa tra Capo Argentiera e Punta Scorno (Isola Asinara);
- 2) unità fisiografica n° 2, contenente due sottounità, compresa tra Capo Marargiu e Capo Argentiera, con flusso bidirezionale convergente nella Rada di Alghero;
- 3) unità fisiografica n° 3, compresa tra Capo Marargiu e Capo Sturraggia, con flusso netto convergente verso l'estremità settentrionale della spiaggia di Is Arenas del Sinis;
- 4) unità fisiografica n° 4, compresa tra Capo Sturraggia e Capo Frasca, con flusso netto diretto verso Sud;
- 5) unità fisiografica n° 5, compresa tra Capo Frasca e Buggerru, con flusso netto diretto verso Sud.
- 6) unità fisiografica n° 6, contenente due sottounità, compresa tra Buggerru e il Canale di S. Pietro, con flusso netto prevalente diretto verso Sud.

L'unità fisiografica n° 1, che non contiene vere e proprie spiagge, alimenta di sedimenti il Golfo dell'Asinara attraverso gli Stretti tra Capo Falcone e l'Isola dell'Asinara e con il superamento di Punta Scorno.

L'unità fisiografica n° 2 contiene tre spiagge di cui le prime due (Porto Ferro e Porto Conte) appartengono a zone molto riparate, assimilabili a vere e proprie trappole di sedimenti, che sono alimentate, o lo sono state in passato, da un flusso passante diretto verso Sud, mentre la terza (Rada di Alghero), ben protetta dal moto ondoso del quarto quadrante, è caratterizzata dalla convergenza dei flussi medi annui provenienti da Ovest e da Sud.

L'unità fisiografica n° 3 contiene quattro spiagge principali che saranno esaminate nel seguito: la spiaggia asimmetrica di Bosa Marina, interessata dal flusso netto passante diretto verso Sud, quella asimmetrica di Putzu Idu interessata da un flusso netto diretto verso Nord, quella asimmetrica di Sa Rocca Tunda interessata dal flusso diretto verso Est e, infine, la spiaggia di Is Arenas del Sinis interessata da un flusso netto medio annuo diretto verso Nord-Est.

L'unità fisiografica n° 4 contiene le piccole spiagge della penisola del Sinis, a Sud di Capo Sturraggia, e la vasta spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano che sarà esaminata nel seguito. Le spiagge della penisola del Sinis, appartenenti all'unità fisiografica n° 4, sono interessate da un intenso flusso netto diretto verso Sud che potrebbe essere sovrastimato in quanto la (4), utilizzata per il suo calcolo, non tiene conto della resistenza al moto offerta dalla vasta zona degli antistanti bassi fondali e del riparo dell'Isolotto.

L'unità fisiografica n° 5 contiene diverse spiagge di cui due saranno esaminate in dettaglio nel seguito: le spiagge simmetriche di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu e S. Nicolò.

Infine, l'unità fisiografica n° 6 a cui appartengono, tra l'altro, la spiaggia simmetrica di Funtanamare e il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, del complesso delle spiagge del Canale di S. Pietro, che saranno esaminate nel seguito.

Spiaggia di Bosa Marina

Dalla cartografia storica IGMI risulta che fino al 1947 l'Isola Rossa, ubicata a sinistra della foce del fiume Temo, non era collegata con la terra ferma. Successivamente a tale data, con lo scopo di avviare la realizzazione di un bacino portuale, l'Isola Rossa è stata collegata alla Sardegna mediante un'opera a gettata. Da quel momento ha avuto inizio la stabilizzazione di una spiaggia asimmetrica la cui linea di riva, rilevata dalla carta IGM, 1:25.000 (1967), è riportata nella Figura 4. Questa linea, a parte le alterazioni locali prodotte dal pennello realizzato nella parte orientale della spiaggia, è interpretata bene dalla linea di equilibrio polinomiale (11) assumendo la direzione della normale alla spiaggia pari a $247^\circ N$ a cui corrisponde il flusso longitudinale netto nullo. La perpendicolare a questa direzione, che è tangente alla linea di equilibrio nella zona di minima curvatura, forma con la linea di controllo (lunga $R_0 = 800 m$) un angolo $\beta = 58^\circ$.

A cavallo degli anni '60 e '70 del secolo appena trascorso, con l'intento di completare il bacino portuale, è stata costruita un'opera di difesa a gettata, radicata all'Isola Rossa, della lunghezza di circa $200 m$. La conseguente riduzione del settore di esposizione della baia dal limite di $280^\circ N$ al limite di $268^\circ N$, proteggendo la spiaggia dagli intensi attacchi ondosi del quarto quadrante, ha modificato l'assetto della linea di equilibrio ed ha favorito l'avanzamento della linea di riva che, rilevata dalla carta IGM 1:25.000 del 1992, nella Figura è evidenziata a tratto continuo. L'avanzamento della linea di riva può aver contribuito a far desistere l'amministrazione dal completamento dell'infrastruttura portuale. La nuova linea di riva non risulta coincidere con un limite di equilibrio. Quest'ultimo è stato calcolato in base alla direzione del moto ondoso che produce un flusso netto medio annuo nullo rispetto all'estremità a curvatura nulla la cui direzione è orientata per $242^\circ N$. La perpendicolare a questa direzione, che è tangente alla nuova linea di equilibrio, riportata nella Figura 4 con un tratteggio, forma con la nuova linea di controllo (lunga $R_0 = 674 m$) l'angolo $\beta = 64^\circ$. Il diagramma contenuto nella Figura riguarda il flusso netto annuo calcolato con riferimento alla direzione della normale alla spiaggia di $242^\circ N$. La somma algebrica dei flussi netti degli undici anni è nulla.

In considerazione del fatto che il flusso longitudinale che può trasportare sedimenti verso la spiaggia di Bosa Marina ha origine presso il vicino Capo Marargiu (Fig. 3) e che la portata solida del fiume Temo, dopo lo sbarramento, è limitata alla sua poco estesa e pianeggiante parte valliva, non si ritiene che il raggiungimento della linea di riva di equilibrio possa avvenire in tempi brevi. Tuttavia si può dire che la linea di riva attuale non sarà soggetta ad erosione, ma eventualmente a modeste modifiche legate alle contingenti condizioni del moto ondoso.

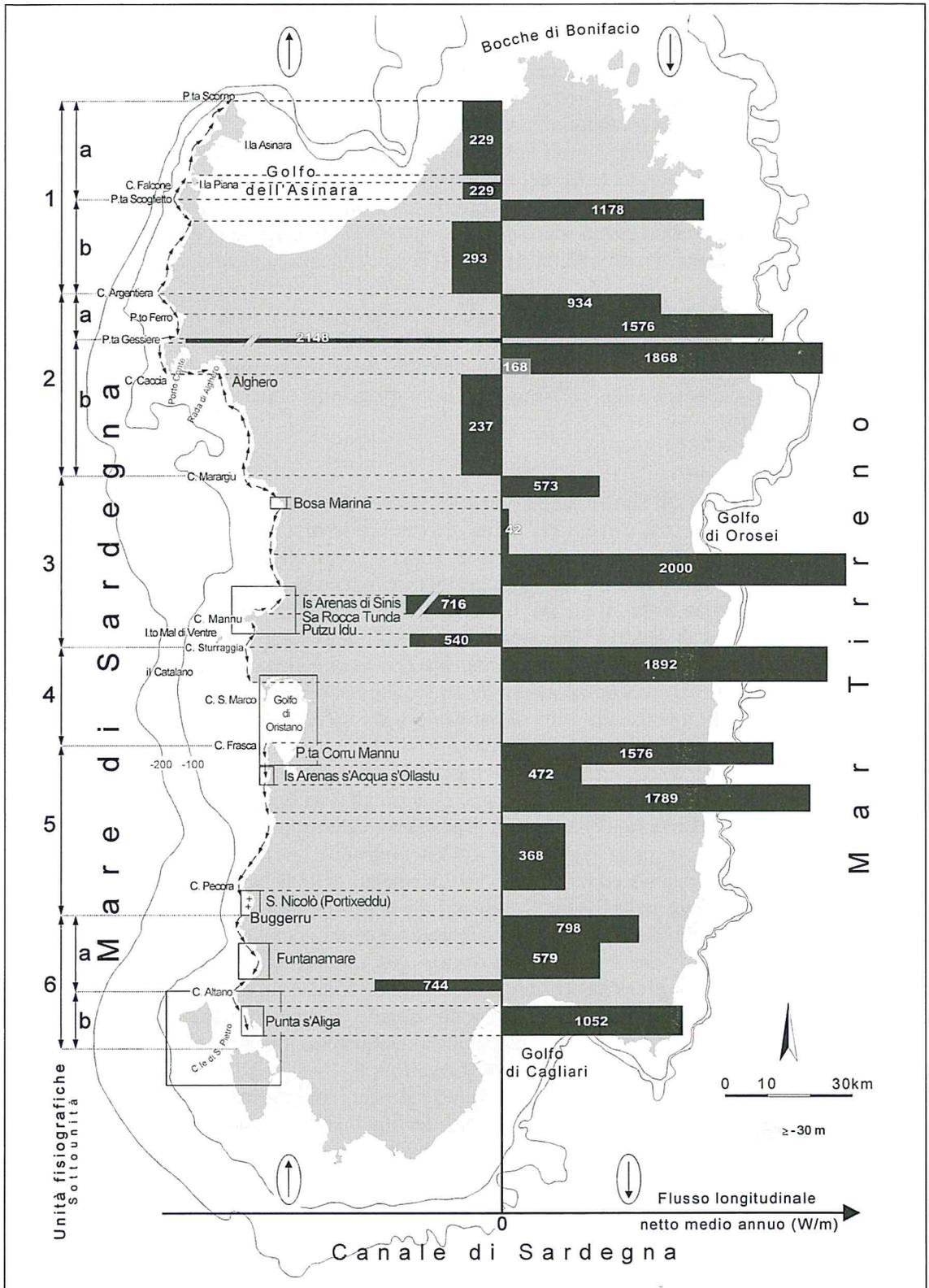


Figura 3 - Flusso netto medio annuo e unità fisiografiche della costa occidentale della Sardegna.

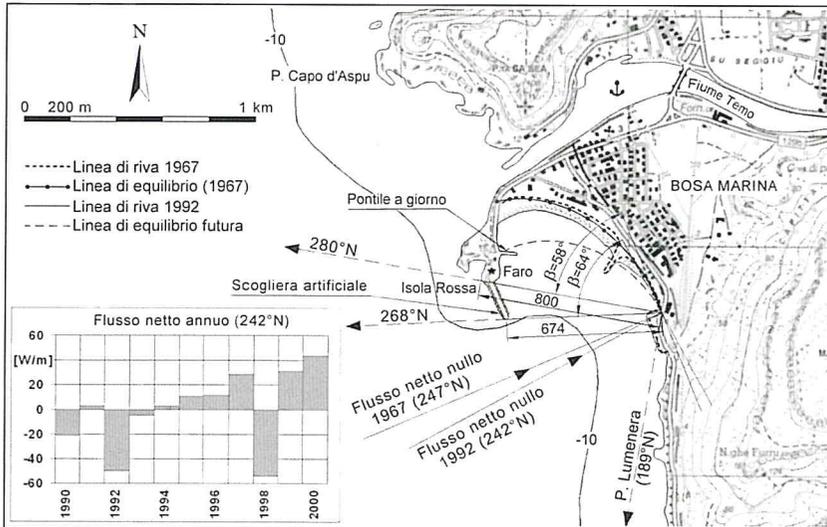


Figura 4 - Evoluzione della spiaggia asimmetrica di Bosa Marina nel breve periodo di tempo compreso tra il 1967 ed il 1992.

Spiaggia di Is Arenas del Sinis

La spiaggia di Is Arenas ha una forma simmetrica ed è molto ricca di sedimenti, sia nella parte sommersa che nella parte emersa, con la retrospiaggia ricoperta dal campo di dune più esteso della Sardegna, reso stabile da un rimboschimento realizzato nell'ultimo cinquantennio, Figura 5. La spiaggia è orientata per 315 °N ed è interessata da un flusso netto annuo diretto verso Nord-Est. L'orientamento della spiaggia, corrispondente ad un flusso netto medio annuo nullo si avrebbe per la direzione di 306 °N che si discosta dal suo reale orientamento di 9°.

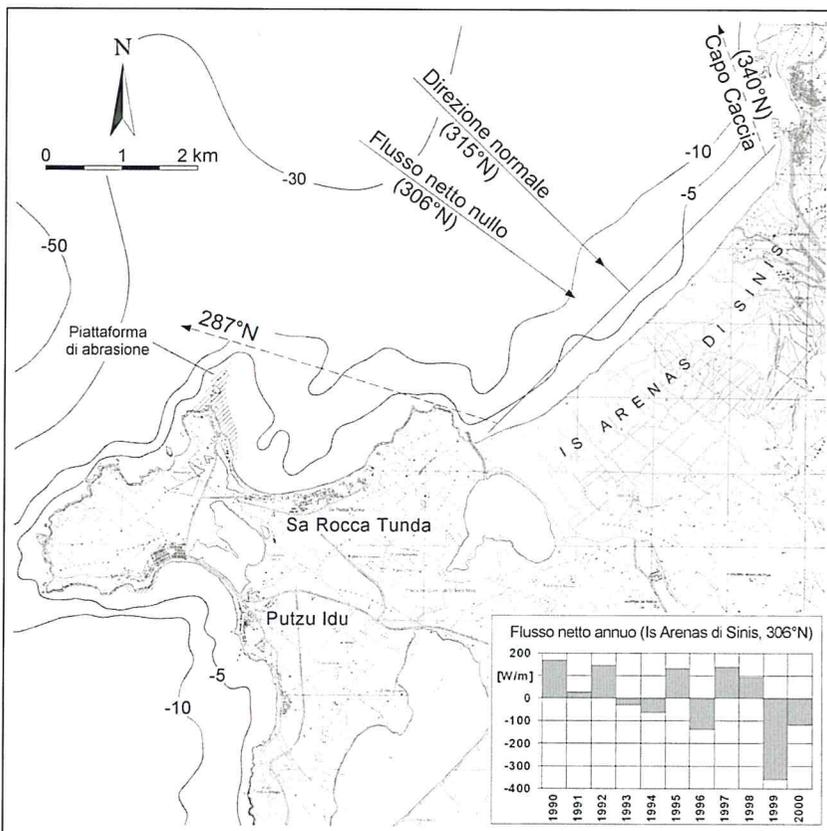


Figura 5 Spiaggia simmetrica di Is Arenas del Sinis. La condizione di flusso netto nullo non coincide perfettamente con l'orientamento della spiaggia.

Dunque, per raggiungere l'equilibrio, la spiaggia dovrebbe ruotare in senso antiorario di un uguale angolo. Tuttavia, si deve considerare che a questa condizione si oppone la deflazione eolica verso terra dei forti venti di Maestrale che riprendendo in carico i sedimenti convogliati dal flusso netto verso Nord-Est contribuisce ad impedire la rotazione della linea di riva. Si deve anche tener conto del fatto che, considerato il notevole scarto, da un anno all'altro, del flusso netto riportato nell'istogramma della Figura 5, una più estesa serie storica del moto ondoso potrebbe modificare la direzione del flusso verso una posizione più prossima alla direzione di 315°N .

Spiagge di Sa Rocca Tunda e di Putzu Idu

Le due spiagge hanno una forma asimmetrica non corrispondente ad una forma di equilibrio. Nella Figura 6 sono riportate le tracce delle linee ottenute con la polinomiale (11) assumendo i parametri che maggiormente si adattano alle due linee di riva delle spiagge, ma, a parte la scarsa sovrapposizione, le linee tracciate non rappresentano per le due spiagge condizioni di equilibrio stabile in quanto le normali alle tangenti nei punti di minima curvatura non coincidono con la direzione alla quale corrisponde il flusso netto medio annuo nullo.

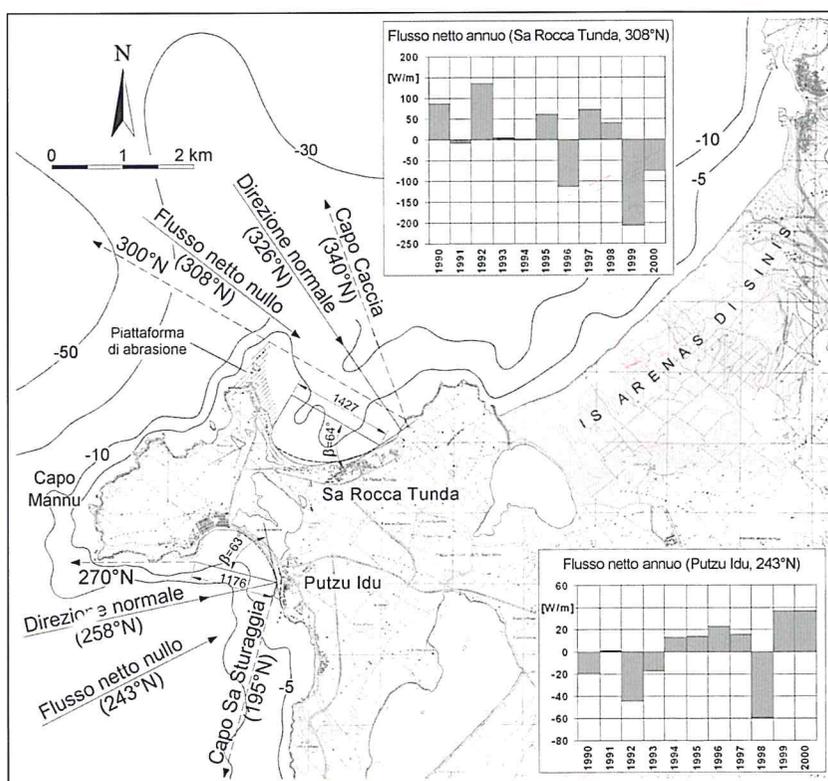


Figura 6 - Spiagge asimmetriche di Sa Rocca Tunda e Putzu Idu. Il loro stato di equilibrio non è inquadrabile mediante i criteri geometrici che definiscono le condizioni di stabilità.

Questa direzione si discosta dalla normale alla tangente nel punto di minima curvatura di 15° nel caso della spiaggia di Putzu Idu e di 18° nel caso della spiaggia di Sa Rocca Tunda. Si deve anche tener conto del fatto che la morfologia di queste spiagge è fortemente condizionata dalle zone rocciose che le comprendono la cui estensione non è di facile determinazione. Inoltre, i condizionamenti delle zone rigide influiscono sulla morfologia modificandola rispetto alla forma polinomiale della (11), che invece è valida nel caso di corpo sedimentario esteso e non condizionato da parti rigide. Le due spiagge hanno una forma asimmetrica non corrispondente ad una forma di equilibrio. Nella Figura 6 sono riportate le tracce delle linee ottenute con la polinomiale (11) assumendo i parametri che maggiormente si adattano alle

due linee di riva delle spiagge, ma, a parte la scarsa sovrapposizione, le linee tracciate non rappresentano per le due spiagge condizioni di equilibrio stabile in quanto le normali alle tangenti nei punti di minima curvatura non coincidono con la direzione alla quale corrisponde il flusso netto medio annuo nullo.

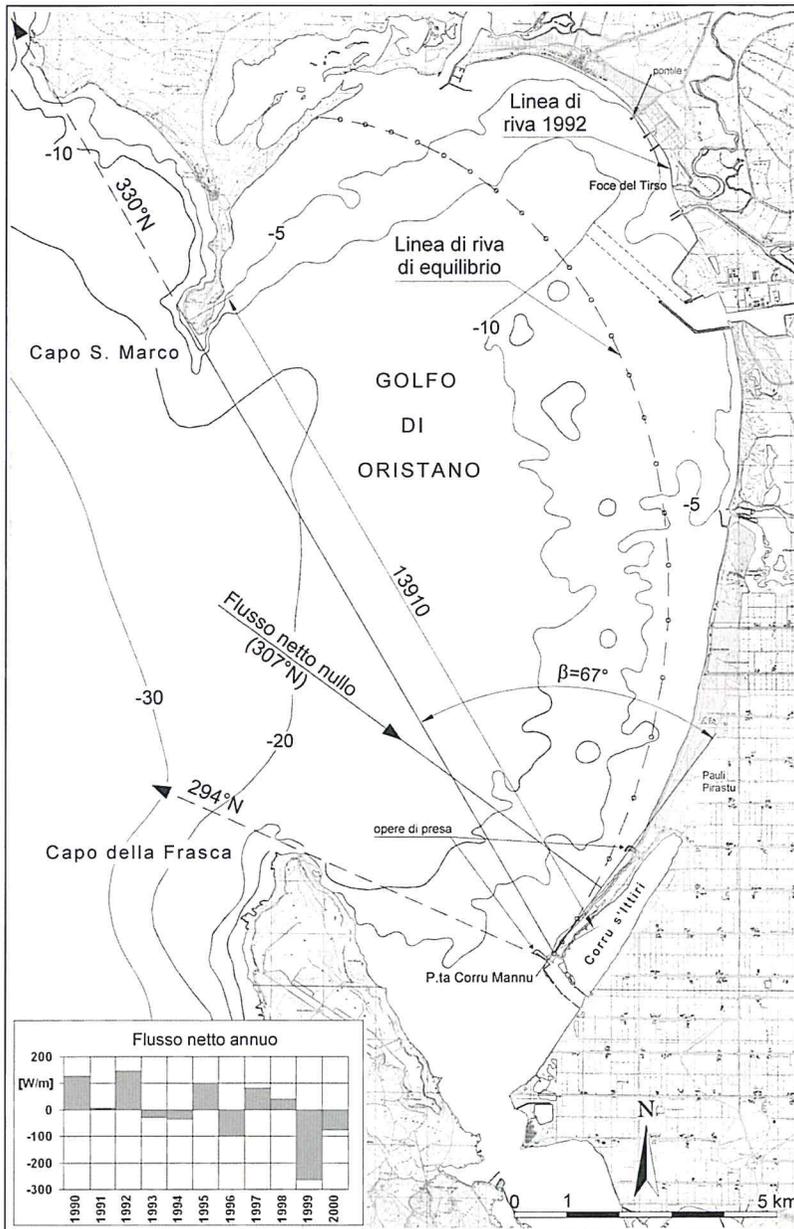


Figura 7 – Spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano che termina a Sud con il Cordone di Corru Mannu.

per un verso, dalla protezione offerta dai due promontori di Capo S. Marco e Capo Frasca e, per un altro, dallo scarso apporto di sedimenti da terra e da mare. Da terra, perché il trasporto solido del fiume Tirso è limitato alla sua parte pianeggiante a valle della diga di S. Chiara, che sottende un bacino di circa 2100 km², pari al 64% dell'intero bacino; da mare, perché il Golfo riceve i sedimenti di una unità fisiografica molto ridotta, la n° 4, estesa solo da Capo Sturraggia a Capo Frasca, Figura 3.

Golfo di Oristano

L'unità fisiografica n° 4 contiene la spiaggia asimmetrica del Golfo di Oristano, tra le più estese della Sardegna, lunga più di 20 km, interrotta solo dalle bocche a mare dei diversi stagni costieri, dalla foce del Tirso e dell'infrastruttura portuale. A Sud la spiaggia termina con il cordone litoraneo di Corru Mannu, lungo oltre 4 km (Fig. 7).

La spiaggia si presenta relativamente stabile pur non avendo ancora raggiunto il limite di equilibrio. Questo limite, determinato seguendo la morfologia della polinomiale (11), è riportato nella Figura 7 assumendo i limiti di settore e la lunghezza della linea di controllo ivi riportati. La normale alla tangente nell'estremità meridionale del cordone litoraneo coincide con la direzione del flusso netto medio annuo nullo, orientato per 307 °N. Il flusso netto, calcolato anno per anno, è riportato nell'istogramma della Figura. La linea di equilibrio ricade sempre in mare e nella zona Nord del Golfo si discosta dalla linea di riva fino ad un valore massimo di circa 3 km. La stabilità della linea di riva dipende,

L'esiguità del trasporto solido marino si rileva dall'andamento delle isobate - 5, - 10 e - 20 m che marciano la presenza del canyon del fiume Tirso, Fig. 7. La curvatura stretta dell'isobata - 20 sembra evidenziare che il canyon sia in fase di colmata, mentre l'ampiezza dell'ansa dell' isobata - 10 mostra che in questa zona più interna il ricoprimento del canyon da parte dei sedimenti è ancora lontano dal compiersi. Quanto all'isobata - 5 si fa notare che essa risulta centrata su una vecchia foce del Tirso, ubicata più a Nord dell'attuale, in prossimità del pontile evidenziato nella Figura 7, dunque anche questa isobata mostra che il canyon del Tirso non risulta colmato.

Cordone litoraneo di Corru Mannu

Nella zona interna e meridionale del Golfo si nota la presenza di un cordone litoraneo che prende il nome di Corru Mannu, la cui estensione è superiore a quanto rilevabile a prima vista. Infatti, esso si estende fino alla palude di Pauli Pirastu (Fig. 7) che è separata dallo stagno di Corru s'Ittiri da una strada di recente realizzazione. A differenza di quanto solitamente si osserva sui cordoni litoranei, quello di Corru Mannu non è interessato da un flusso netto unidirezionale molto angolato rispetto alla linea di riva e non mostra alcuna tendenza all'instabilità. Infatti, come si rileva dalla Figura 7, il flusso netto è addirittura nullo rispetto alla riva e i manufatti in scogliera, costruiti da circa 30 *anni* a protezione di due bocche a mare che alimentano l'omonimo stagno e quello di Corru s'Ittiri, hanno creato solo localmente piccoli spostamenti della linea di riva. È da segnalare inoltre che da più di 150 *anni* la lunghezza del cordone risulta invariata, segno dell'assenza di apporto di sedimenti.

Spiaggia di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu

Questa spiaggia appartiene alla categoria delle spiagge simmetriche che ricadono nell'unità fisiografica n° 5, il cui flusso netto è diretto verso Sud, ed è orientata per 293° N, Figura 8. Il flusso netto medio annuo nullo si ha per la direzione di 300° N, quindi la spiaggia, per raggiungere il suo limite di equilibrio, dovrebbe ruotare di 7° in senso orario.

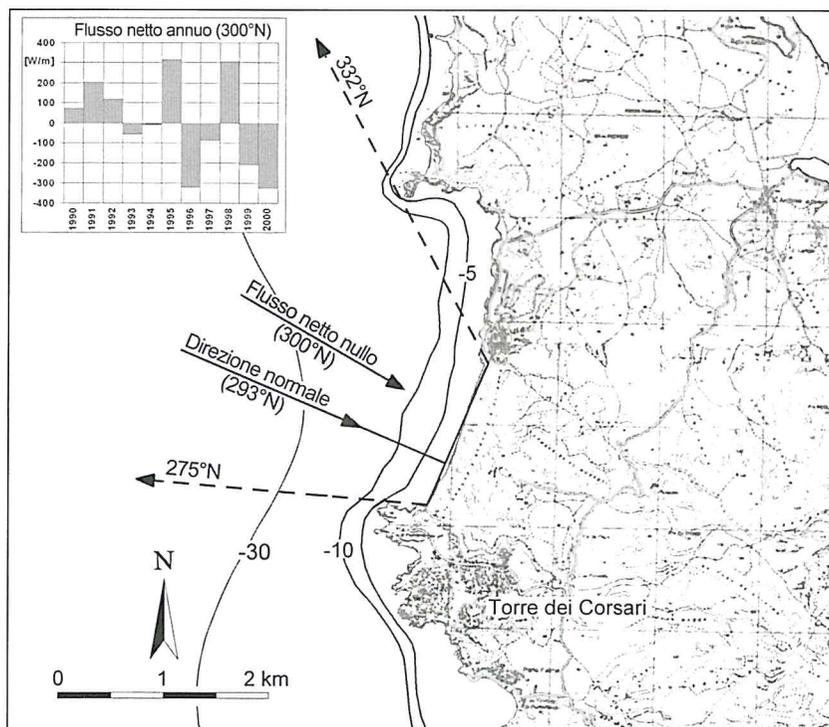


Figura 8 - Spiaggia simmetrica di Is Arenas s'Acqua 'e s'Ollastu. Il flusso netto nullo è discosto di 7° dall'orientamento della spiaggia.

L'istogramma riportato nella Figura 8 contiene la distribuzione del flusso annuo rispetto alla direzione di 300°N . Anche in questo caso la discrepanza tra orientamento della spiaggia e direzione di flusso nullo, pur misurabile, resta relativamente limitata, almeno nell'ottica con la quale devono essere letti questi tipi di fenomeni, pertanto valgono le considerazioni fatte a proposito della spiaggia di Is Arenas del Sinis. La retrospiaggia è ricoperta da un campo di dune relativamente esteso in proporzione alla dimensione della spiaggia.

Spiaggia di S. Nicolò (Portixeddu)

La spiaggia di S. Nicolò appartiene all'unità fisiografica n° 5 ed è una spiaggia simmetrica orientata secondo la direzione di 273°N , corrispondente alla condizione di flusso medio nullo. Pertanto, il suo orientamento coincide con le condizioni di equilibrio limite stabile, ma anche in questo caso sarebbe necessario disporre di una serie storica di moto ondoso più estesa per affermare con certezza questa condizione. Come mostra la Figura 9, la simmetria della spiaggia è praticamente perfetta, come pure quella delle isobate - 5 e - 10 m. Nella Figura è riportato anche l'istogramma del flusso netto annuo il cui alternarsi giustifica la simmetria riscontrata.

La retrospiaggia è ricoperta da un campo di dune, rimboschito nel recente passato, che è interrotto da una strada litoranea parallela alla spiaggia. Il frangivento creato per evitare l'insabbiamento della strada arrestando o riducendo il trasporto dei sedimenti verso terra potrebbe contribuire a far crescere la spiaggia emersa.

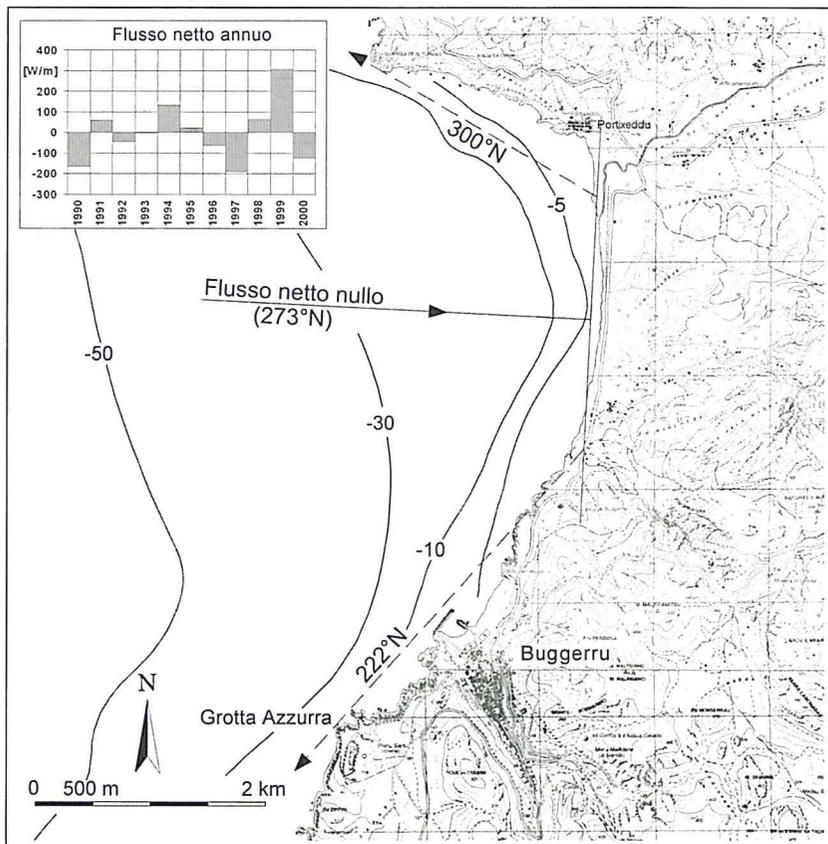


Figura 9 - Spiaggia simmetrica di S. Nicolò (Portixeddu). La simmetria è perfetta, il flusso netto nullo coincide con l'orientamento della spiaggia.

Spiaggia di Funtanamare

Anche la morfologia di questa spiaggia, riportata nella Figura 10, è simmetrica ed è orientata per 296°N . Il flusso netto nullo corrisponde però alla direzione di 303°N per cui anche in questo caso la spiaggia dovrebbe ruotare di 7° in senso orario per raggiungere la condizione di equilibrio stabile. Naturalmente, valgono le considerazioni fatte per le altre spiagge simmetriche il cui orientamento non coincide con quello corrispondente alla condizione di flusso nullo.

La spiaggia è alimentata dal flusso netto diretto verso Sud dell'unità fisiografica n° 6a. La retrospiaggia è interessata da un campo di dune, come negli altri casi delle spiagge simmetriche.

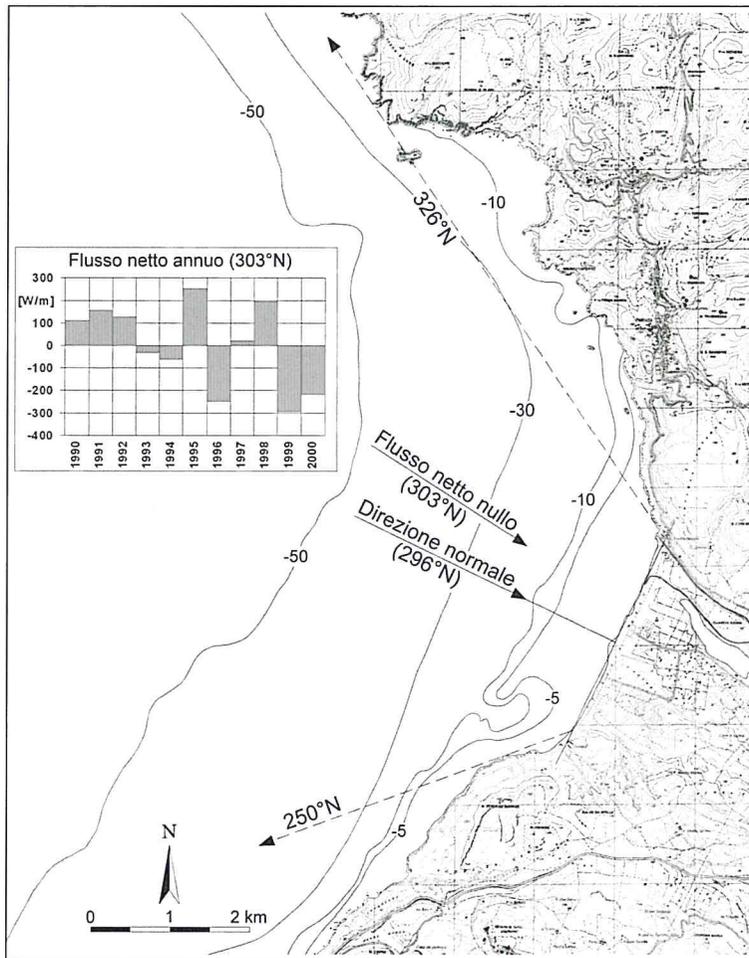
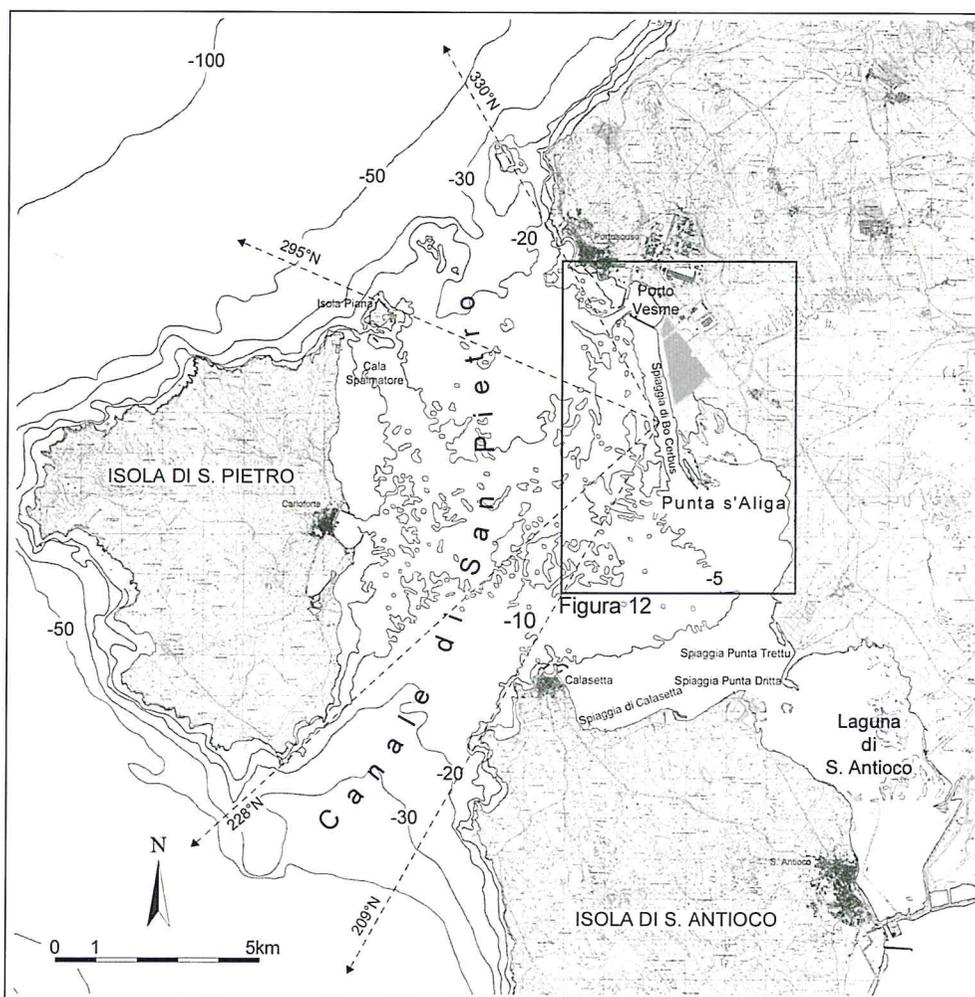


Figura 10 - Spiaggia simmetrica di Funtanamare. Il flusso netto nullo si scosta di 7° dall'orientamento della spiaggia.

Canale di S. Pietro

I fondali del Canale di S. Pietro sono ricoperti da un consistente strato di sedimenti sabbiosi e limo-sabbiosi per tutta l'estensione. I dragaggi del bacino portuale di Porto Vesme ed i sondaggi effettuati in mare fino a 25 m di profondità, a Sud di Porto Vesme, lungo la costa sarda (Fig. 11), hanno sempre rivelato la presenza di sedimenti sabbiosi, senza soluzione di continuità. Si ritiene che il Canale raccolga tutto il trasporto di sedimenti convogliati verso Sud dal flusso netto dell'unità fisiografica n° 6. Le sponde del canale sono ricoperte da spiagge interessate dal moto ondoso in maniera differente in base alla loro posizione rispetto alle due bocche del canale: la bocca Nord, esposta in un limitato settore alle agitazioni del quarto quadrante, e quella Sud, esposta all'agitazione del terzo quadrante.

A partire dalla sponda Est, a Nord si incontra la spiaggia di Bo Cerbus che termina con il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, di cui si dirà più avanti. Essa è esposta tangenzialmente al moto ondoso del quarto quadrante (Fig. 11) e, in misura nettamente minore per intensità, a quello del terzo. Segue la spiaggia di Punta Trettu, esposta solo al moto ondoso del quarto quadrante, che termina con un cordone litoraneo rivolto verso la laguna di S. Antioco. Continuando nell'ordine, in senso orario si incontrano le spiagge di Punta Dritta e di Calasetta della costa settentrionale dell'Isola di S. Antioco le cui retrospiagge sono ricoperte da campi di dune generate dai forti venti del quarto quadrante che penetrano nel Canale in direzione assiale. Infine, la piccola spiaggia di Cala Spalmatore nell'Isola di S. Pietro, rivolta verso la Sardegna e protetta dall'agitazione del mare aperto.



Cordone litoraneo di Punta s'Aliga

Come mostra l'istogramma della Figura 12, il cordone litoraneo di Punta s'Aliga, che è un altro esempio importante di cordone litoraneo della costa occidentale sarda, è sempre interessato da un intenso flusso netto diretto verso Sud. Conseguentemente, a differenza del cordone litoraneo di Corru Mannu, esso è in fase di forte evoluzione e, chiaramente, influenzato anche dai numerosi interventi e opere realizzate a Nord della sua radice. Infatti, anche prima del 1960, quando ebbero inizio le opere di difesa di Porto Vesme, tra il 1845 ed il 1954, la punta si era allungata di circa 500 m in direzione Sud-Sud Est corrispondente ad un avanzamento medio di circa 4.5 m/anno.

Dopo la realizzazione del porto di Porto Vesme e, soprattutto, a seguito della realizzazione delle difese radenti, costruite negli anni 1976-1977 per la protezione al piede della grande cassa di deposito dei fanghi residui della lavorazione della bauxite (Fig. 12), il cordone, a conferma della instabilità di questo tipo di morfologie, ha subito una trasformazione molto più veloce allungandosi di altri 500 m nell'arco di 26 anni (≈ 19 m/anno) e ruotando in senso orario di circa 10° .

Nella evoluzione verso un nuovo equilibrio, provocato dagli interventi di cui si è detto, il cordone ha modificato considerevolmente la linea di riva assottigliandosi in prossimità dell'estremità Sud della difesa radente e allargandosi verso la punta. I sedimenti che hanno alimentato quest'ultima evoluzione sono solo in piccola parte frutto del trasporto litoraneo che arriva nel Canale dalla zona a monte di Capo Altano dell'unità fisiografica, infatti il suo ritmo di crescita nel passato era, come si è detto, di appena 4.5 m/anno. Invece la crescita di 19 m/anno è stata in gran parte alimentata dall'assotti-

gliamento del cordone a Sud della difesa radente ove, recentemente, si è formata una piccola baia il cui ampliamento verso terra è rallentato dalla presenza di una pineta nella retrospiaggia, (Fig. 13).

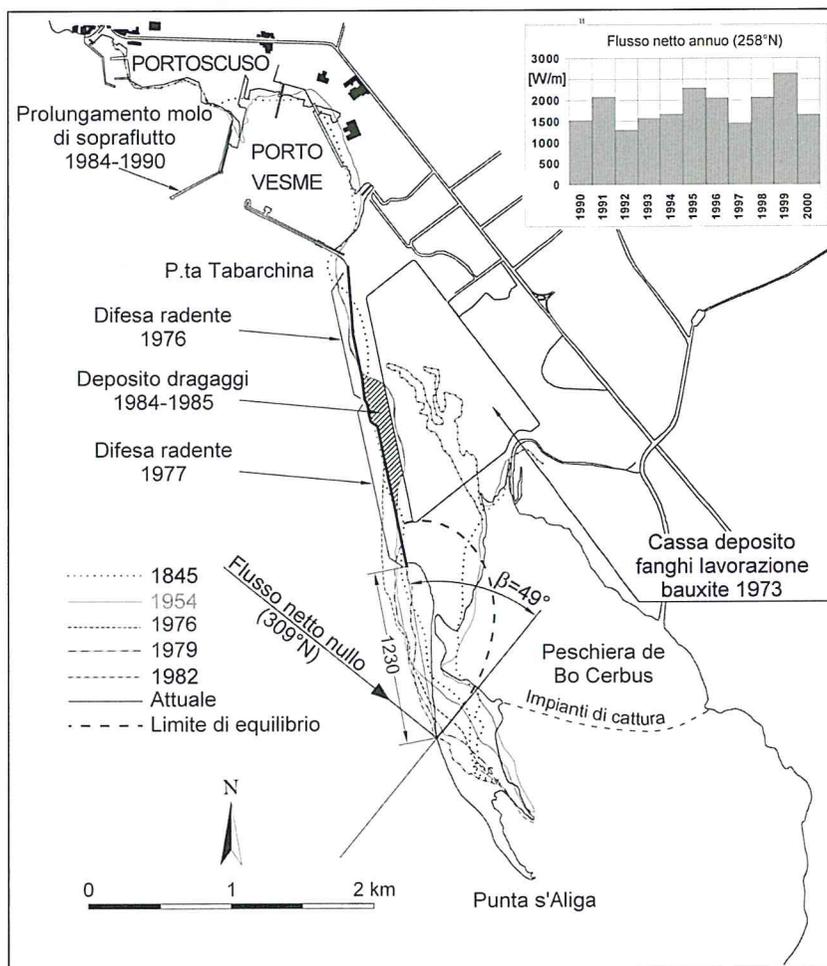


Figura 12 - La spiaggia di Bo Cerbus e il cordone litoraneo della sua estremità meridionale. La direzione di 309°N corrisponde all'orientamento della spiaggia con flusso netto nullo.

Se al posto del cordone litoraneo ci fosse stata una estesa spiaggia sabbiosa l'insenatura avrebbe potuto procedere fino a formare una baia asimmetrica la cui linea di riva al limite di equilibrio avrebbe raggiunto la forma polinomiale (11). È stato fatto un tentativo di valutare quale sarebbe potuta essere la linea di equilibrio di questa ipotetica spiaggia assumendo una linea di controllo di lunghezza $R_0 = 1230 \text{ m}$ e un angolo di attacco del moto ondoso a flusso netto nullo tale da formare l'angolo $\beta = 49^\circ$ con la linea di controllo. La lunghezza e l'orientamento della linea di controllo sono state scelte tra la testata della difesa radente e il punto attorno al quale appare avvenga la rotazione della linea di riva del cordone. Utilizzando i parametri detti sopra si è ottenuta la ipotetica linea di equilibrio che nella Figura 12 è riportata con un tratteggio.

Nella realtà, con il progredire dell'insenatura, prima che si raggiunga la condizione di equilibrio, si produrrà la rottura del cordone litoraneo che si trasformerà in un isolotto di sabbia.



Figura 13 - Baia formatasi in prossimità dell'estremità Nord del cordone di Punta s'Aliga dopo la costruzione della difesa radente di cui nella foto, a sinistra, si intravede l'estremità meridionale.

Conclusioni

Utilizzando i dati ondametrici della boa RON-Alghero è stato calcolato, anno per anno, il flusso netto del moto ondoso ed il flusso medio annuo di tutta la costa occidentale della Sardegna e sono state individuate sei unità fisiografiche.

Nelle quattro unità fisiografiche a Sud di Capo Marargiu sono state prese in esame le morfologie di alcune spiagge asimmetriche e simmetriche e di due cordoni litoranei.

Il flusso netto medio annuo che interessa le quattro spiagge simmetriche esaminate è nullo rispetto al loro orientamento, con scostamenti dalla normale inferiori ai 10° . Esse formano una morfologia a se stante, distinta da quella delle spiagge a baia asimmetrica, e il loro grado di stabilità può essere valutato verificando se la direzione del flusso netto nullo coincide con l'asse di simmetria. Nel caso della spiaggia di S. Nicolò (Fig. 9) questa condizione si verifica con precisione. Tutte le retrospiagge delle spiagge simmetriche esaminate sono ricoperte da estesi campi di dune.

Le quattro spiagge asimmetriche esaminate, come tutti questi tipi di spiaggia, sono interessate da un flusso netto obliquo che forma un angolo con la linea di controllo sempre inferiore a 80° .

Dei due cordoni litoranei esaminati, quello di Corru Mannu (Fig. 7), nel Golfo di Oristano, è particolarmente stabile, come è mostrato dalla sua lunghezza, invariata da oltre 150 *anni*, e dagli scarsi effetti subiti dalla sua linea di riva a seguito della realizzazione di due opere a gettata. La sua stabilità, che è in accordo con la condizione di flusso netto medio nullo ottenuto con il calcolo, porta a ritenere che questo cordone costituisca una singolarità di questo tipo di morfologia o, perlomeno, una situazione limite.

Il cordone litoraneo di Punta s'Aliga (Fig. 12), nel canale di S. Pietro, a differenza di quello di Corru Mannu, è interessato da un flusso netto medio molto angolato rispetto alla sua linea di riva ed è instabile, come documentano le rapide variazioni che si sono avute a seguito della realizzazione di opere rigide a monte.

Dall'esame condotto appare evidente che il flusso netto medio annuo, calcolato nella forma assai semplice della (4), può essere un valido strumento per la classificazione della morfologia delle spiagge esposte ad un regime di moto ondoso persistente e per dare un contributo alla valutazione della loro stabilità. Ad esempio, nel caso del cordone litoraneo di Punta s'Aliga, mediante il calcolo

del flusso netto medio annuo, sarebbe stato possibile prevedere le trasformazioni della spiaggia che sarebbero conseguite alla realizzazione della difesa radente.

Nel campo applicativo dell'ingegneria costiera il flusso netto medio annuo dovuto a moto ondoso persistente rappresenta un dato di base per la progettazione di opere di difesa rigide da realizzare, a protezione di spiagge in erosione, in alternativa ai pennelli e ai frangiflutti distaccati dalla riva. Infatti, noto il flusso netto, se la sua direzione non è perpendicolare alla riva, stabilita la disposizione delle opere di protezione, mediante la (11), ricorrendo anche al modello semiempirico di Gonzales e Medina (2001) che permette di individuare in maniera obbiettiva la linea di controllo, si può prevedere la forma stabile della spiaggia.

Bibliografia

- Bird E. C. F. (1984) - *Coasts: an introduction to coastal geomorphology*. 3^a ed. Australian National University Press, Canberra.
- Bretschneider C. L. (1968) - *Significant waves and wave spectrum*. Ocean Industry, Feb. 1968, pp. 40-46.
- CUR (1987). *Manual on artificial beach nourishment*. Delft Hydraulics. Report 130.
- Davies J. L. (1958) - *Wave refraction and the evolution of shoreline curves*. Geogr. Stud. 5: 1-14.
- Davies J. L. (1964) - *A morphogenetic approach to world shorelines*. Zeits. für geomorph. 8, Sup. 127-142.
- Fairbridge R. W. (1961) - *Eustatic change in sea level*. Physics and chemistry of the earth, 4: 99-185.
- Gonzales M. e Medina R. (2001). *On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches*. Coastal Engineering, 43: 209-225.
- Halligan G. H. (1906) - *Sand movement on the New South Wall coast*. Proc. Limn. Soc. N. S. W., 31: 619-640.
- Ho S. K. (1971) - *Crenulate shaped bays*. Asian Inst. Tech. Master Eng. Thesis, N° 346
- Hsu J. R. C. e Evans C. (1989) - *Parabolic bays shaped and applications*. Proc. Instn. Civil Engrs. 87: 557-570.
- Komar P. D. e Inman D. L. (1970) - *Longshore sand transport on beaches*. Journal of Geophysical Research, 75: 5914-5927.
- Krumbein W. C. (1944) - *Shore processes and beaches characteristics*. U. S. Corps. of Engineers. Beach Erosion Board. Mem. N° 3.
- Le Blond P. H. (1972) - *On the formation on spiral beaches*. Proc. 5th Inter. Conf. Coastal Eng. ASCE 2: 1331-1345.
- Meyerhoff A. A. (1970) - *Continental drift: implication of pale magnetic studies, meteorology, physical oceanography, and climatology*. Journal Geology, 78: 1-51.
- Mitsuyasu H. (1970) - *On the growth of spectrum of wind-generated waves (2) – spectral shape of wind waves at finite fetch*. Proc. Japanese Conf. Coastal Engrs., pp. 1-7.
- Mitsuyasu et al. (1975) - *Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy*. J. Physical Oceanogr., 5: 114-130
- Rea C. C. e Komar P. D. (1975) - *Computer simulation models of a hooked beaches shoreline configuration*. J. Sed. Petrology, 45: 866-872.
- Shepard F. P. (1937) - *Revised classification of marine shoreline*. Journal Geology, 45: 602-624.
- Silvester R. (1960) - *Stabilization of sedimentary coastlines*. Nature 188. Paper 4749: pp. 467-536.
- Silvester R. (1962) - *Sediment movement around the coastline of the world*. Proc. Instn. Civil Engrs.: pp. 289-315.
- Silvester R. (1965) - *Coral reefs, atolls and guyots*. Nature 207. Paper 4498: pp. 681-688.
- Silvester R. e Hsu J. R. C. (1997) - *Coastal stabilization*. World Scientific, Singapore, pp. 578.

Manoscritto ricevuto il 12/11/2003, accettato il 10/02/2004.

Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo

Umberto Simeoni¹, Carlo Del Grande² e Giovanni Gabbianelli²

¹Dipartimento di Scienze della Terra, C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara
e-mail g23@unife.it)

² Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Bologna
Vicolo degli Ariani, 1 - 48100 Ravenna

Riassunto

Nell'evoluzione della fascia costiera emiliano-romagnola un fattore di notevole importanza è rappresentato dagli abbassamenti di quota del territorio determinati dalla subsidenza sia naturale sia antropica. Questi, uniti al previsto innalzamento del livello del mare, determineranno non soltanto un nuovo assetto altimetrico dell'area ma incrementeranno i già consistenti arretramenti della linea di riva e provocheranno una pesante variazione della circolazione idrica dei canali e delle aree umide ad essi collegate. Lo studio condotto, partendo dai dati di quattro successive livellazioni (1984, 1987, 1993 e 1999), aggiorna l'altimetria della Carta Tecnica Regionale e propone uno scenario dell'area al 2020. Per quest'ultimo sono state sviluppate tre differenti ipotesi: tassi d'abbassamento del suolo costanti, subsidenza attenuata ed, infine, subsidenza attenuata sommata al previsto innalzamento del mare. Le simulazioni condotte pongono in rilievo un fenomeno assai preoccupante: i territori con quote sotto al livello medio marino che nel 1986 avevano un'estensione di 945 ettari (15% della fascia costiera studiata) probabilmente raggiungeranno nel 2020 un'estensione di 3.027 ha (48%). Il futuro assetto territoriale suggerisce, per l'area, la possibilità dell'intensificarsi degli eventi d'inondazione, l'amplificarsi dei fenomeni d'erosione della spiaggia, un dissesto nella circolazione idrica interna ed una maggiore intrusione d'acque salate nelle falde.

Parole chiave: costa, subsidenza, innalzamento del livello marino, aree umide, circolazione idrica, Adriatico

Abstract

In the Emilia Romagna coast line evolution a very important factor is represented from quote lowering determined by anthropical and natural subsidence that, joined to the forecasted sea level rise, will determine not only a new altimetric land setting, but an increasing of the by now, substantial coast line regression and will provoke a heavy hydraulic circulation variation of canals and humid areas. The research, starting from the data collected during four topographic surveys (1984, 1987, 1993 and 1999), updates the Regional Technical Map altimetry and proposes a scenario for 2020. With regard to the last one, three different hypothesis have been developed: constant land lowering rates, attenuate subsidence and attenuate subsidence added to the forecasted sea level rise. The conducted models simulation highlights a worrying problem: the territory under the medium sea level, of 1986, which had an extension of 945 ha (15% of the examined coastal area), will probably reach 3027 ha (48% of the examined coastal area) in 2020. The future land set suggests the possibility of flooding events intensifying; beach erosion phenomena amplifying; an internal hydraulic circulation disruption, and an increase of salt water intrusion into the ground water table.

Keywords: coast, subsidence, sea level rise, humid zones, hydraulic circulation, Adriatic Sea.

Introduzione

Le variazioni del litorale sono determinate dall'interazione tra due movimenti: uno orizzontale e l'altro verticale. Il primo, nel caso dell'Emilia-Romagna, è sostanzialmente determinato dagli apporti solidi dei fiumi distribuiti dalle correnti lungo riva, e dall'alterazione della dinamica idrosedimentaria operata dall'uomo. Poiché dagli anni '50 vi è stata una drastica riduzione dei materiali portati dai corsi d'acqua, oggi le spiagge regionali sono, per la maggior parte, interessate da evidenti fenomeni erosivi.

Il movimento verticale è, invece, legato a due principali cause: subsidenza, naturale ed antropica, e variazioni del livello marino. Mentre esistono informazioni sufficientemente accurate sull'abbassamento del territorio, quelle relative alle variazioni eustatiche sono ancor oggi incerte e, spesso, contrastanti (Pirazzoli, 2000). Queste ultime si basano su misure dirette (Emery, 1980), effettuate con mareografi e satelliti, oppure su stime indirette, dedotte analizzando le cause che possono aver variato i volumi d'acqua oceanica.

Studi condotti a tal riguardo propongono, per l'ultimo secolo, una velocità di risalita del livello medio marino di 1,1-1,5 mm/anno (Gornitz et al, 1982; Gornitz e Lebedeff, 1987; Pirazzoli, 1986) e di -0,05 e 1,35 mm/anno, valutando i dati geologici (Trupin e Wahr, 1990; Shennan e Woodworth, 1992), gli effetti dell'aumento della temperatura media globale e la conseguente variazione della densità dell'acqua oceanica (Lisitzin, 1958; Kalinin e Klige, 1978; Barnett, 1983). Le misure provenienti dai satelliti Topex-Poseidon (Cecile et al., 2001) evidenziano invece un innalzamento medio, per il periodo 1993-2000, compreso tra 0 e 5 mm/anno (Cazenave, 1999), con una forte fluttuazione dei dati specie nel periodo 1997-99 per effetto El Niño del 1997.

E' interessante ricordare come nell'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) si prevedano, per questo secolo, valori d'innalzamento del mare compresi tra 14 e 48 cm.

La riduzione del trasporto solido dei fiumi ed i forti abbassamenti avvenuti lungo la costa negli ultimi cinquant'anni (ad esempio 90-100 cm a Cesenatico, Ravenna e Codigoro) hanno reso particolarmente critica l'area litorale. A ciò vanno aggiunti gli interventi a mare che hanno modificato pesantemente, con la costruzione ed il protendimento di moli portuali e d'opere di difesa, la dinamica idrosedimentaria dando origine a fenomeni erosivi non omogenei e d'intensità, in tratti contigui, a volte molto differenti.

Scenari non certo ottimistici possono essere tracciati per il futuro a seguito della prevista accelerazione nella risalita, a livello globale, del livello marino (Steward, 1989; Simeoni e Fierro, 2001). Sommando quest'innalzamento agli abbassamenti indotti dalla subsidenza è ipotizzabile un aggravarsi delle situazioni di disequilibrio costiero nel breve-medio termine. Simulazioni condotte con i più diffusi modelli previsionali evidenziano come per il 2025 si possano ipotizzare arretramenti costieri dell'ordine dei 20-40 m. Significative indicazioni su questo fenomeno possono essere tratte dallo studio condotto sul territorio litorale ravennate (Comune di Ravenna, 1996; Simeoni et al., 1999) basato sull'estrapolazione e la proiezione delle quote di due livellazioni effettuate nel 1986 e 1992. Il territorio, che già in buona parte nel 1992 si trovava a quote inferiori del livello medio mare, continuerà progressivamente ad abbassarsi così che, nell'ipotesi più pessimistica, nel 2050 oltre il 62% raggiungerà una quota prossima allo zero. L'innalzamento del mare avrebbe conseguenze particolarmente nefaste nella zona costiera poiché le aree dunari ridurrebbero notevolmente la loro estensione: 25 % nel 1992, 14% nel 2025 e solo 8% nel 2050. La ricerca si propone di mettere in evidenza le modificazioni dell'assetto altimetrico di un tratto di costa emiliano-romagnola determinate dalla subsidenza e dall'innalzamento del livello del mare. Queste modificazioni di quota relativa tra le terre emerse ed il mare sono di notevole importanza per l'evoluzione morfologica dell'area. Esse possono determinare un incremento del rischio d'inondazione del litorale per eventi di tempesta ed acqua alta, incidere pesantemente sullo scambio idrico tra laguna e mare e, di conseguenza, sulla circolazione idrica interna alle Valli.

Inquadramento dell'area

L'area di studio, che si estende per circa 21 km di costa (Fig. 1), riguarda un territorio di 6.250 ha compreso tra le provincie di Ferrara e Ravenna, il cui limite amministrativo è segnato dal corso del fiume Reno. L'area è situata a meridione del delta del fiume Po ed è delimitata a mare dai moli portuali di Porto Garibaldi (FE) e Porto Corsini (RA). Queste opere, interrompendo la deriva litoranea delle sabbie, possono essere considerate come limiti di un'unità fisiografica con un bilancio sedimentario autarchico e svincolato dai contributi provenienti dai tratti di costa contigui.

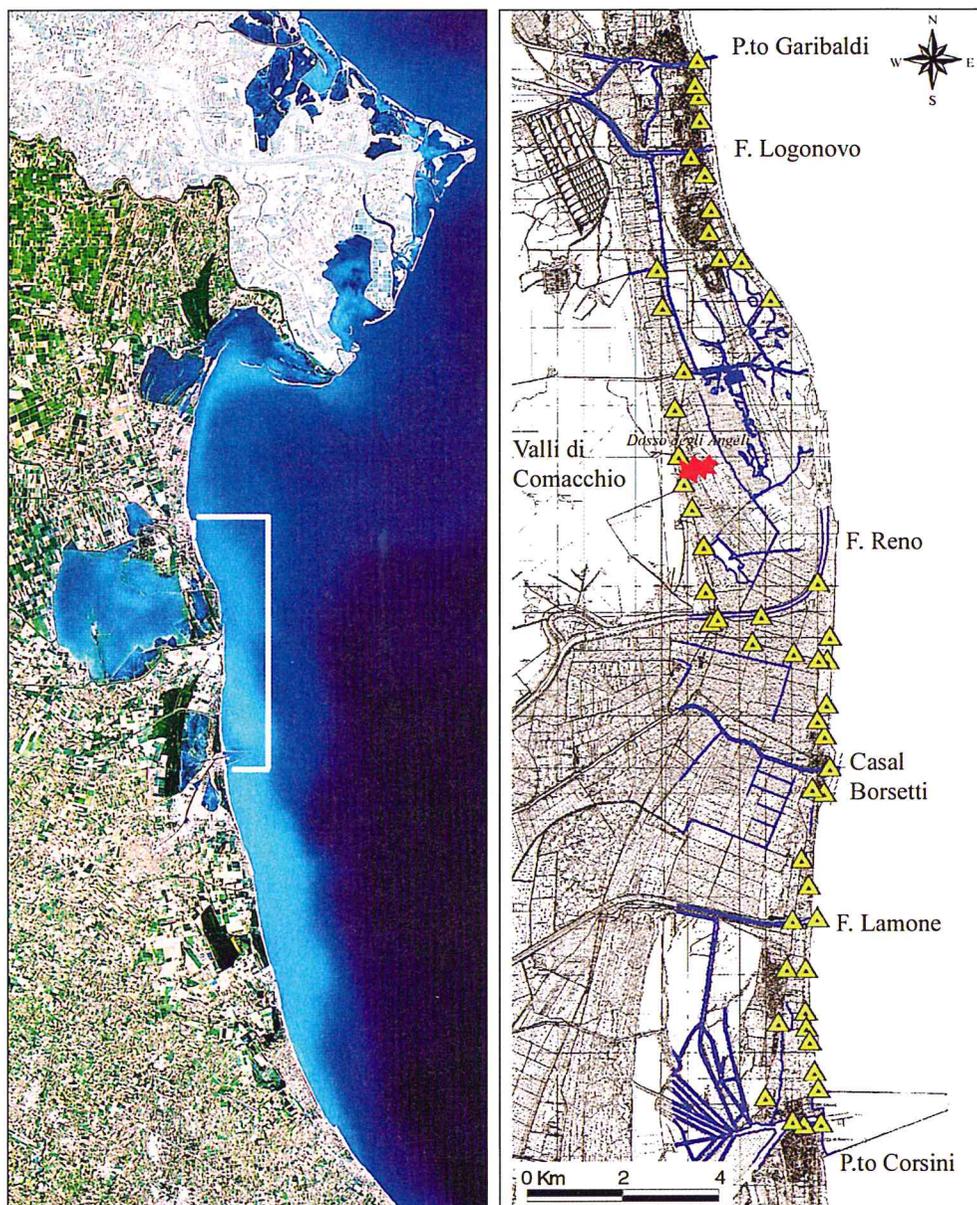


Figura 1 - L'immagine a sinistra consente d'ubicare l'area dello studio (evidenziata dal tratto bianco) posta a meridione del delta del Po e che, nell'altra, viene rappresentata con maggior dettaglio; in quest'ultima sono riportate le ubicazioni dei alcuni capisaldi di livellazione (triangoli verdi) e, in rosso, è evidenziata l'area d'estrazione del pozzo Dosso degli Angeli.

Il litorale, dove mettono foce i fiumi Reno e Lamone ed il canale Gobbino, che mette in comunicazione il mare con le Valli di Comacchio, oggi soffre, per buona parte, di un'evidente crisi erosiva (Simeoni *et al.*, 2000). Le cause vanno ricercate nelle molteplici attività che l'uomo ha intrapreso nel territorio ed hanno ridotto drasticamente le portate solide dei fiumi (Idroser, 1983): cambiamento dell'uso del suolo nei bacini, attività estrattiva dall'alveo, che ha raggiunto punte massime negli anni '60, ed opere di sbarramento costruite lungo i corsi d'acqua.

Secondo le stime Idroser (1996) l'apporto teorico a mare della frazione di fondo del Reno si è notevolmente ridotta dal 1955 (814.000 m³/anno) al 1985 (200.000 m³/anno). Successivamente, per gli interventi attuati nell'alveo (chiusura delle cave resa operativa nel 1983) e nel bacino, la portata nel 1995 è aumentata a 273.000 di m³/anno.

Lungo la costa emiliano-romagnola la marea è caratterizzata da componenti diurne e semidiurne d'intensità quasi pari; ne risulta un ciclo diurno pronunciato, fortemente distorto dalla componente semidiurna, salvo che nei periodi di quadratura. Quote del mare particolarmente elevate (Idroser, 1996) si raggiungono se ad un'alta marea astronomica si sovrappongono gli effetti di una bassa pressione atmosferica, di venti spiranti verso costa e di mareggiate particolarmente violente: ad esempio la massima quota registrata a Rimini è stata di 1,77 m sul l.m.m. nell'anno 1937.

Nello stesso studio s'ipotizza, per il litorale di P.to Corsini, valori d'innalzamento del livello medio del mare in battigia, includendo il set-up da onda, di 1,50, 1,95 e 2,45 m con tempi di ritorno di 1, 10 e 100 anni. L'indagine condotta fornisce inoltre una valutazione dell'altezza delle onde estreme che possono essere stimate tra 2,4 e 3,5 m, per eventi con un tempo di ritorno di 1 anno, tra 3,5 e 4,9 m con 10 anni e di 4,6-6,2 m ogni 100 anni.

Non va inoltre dimenticato come, negli ultimi decenni, l'evoluzione della costa regionale sia stata fortemente condizionata anche dagli accelerati incrementi della subsidenza, di per sé già naturalmente elevata in questo territorio, dovuti all'estrazione d'acque metanifere, alla bonifica di vaste aree vallive, allo sviluppo edilizio legato al boom del turismo balneare ed agli intensi emungimenti delle falde sotterranee per l'alimentazione d'attività idroesigenti. Questo fenomeno, unito ad una mancata compensazione naturale, è la causa principale dell'attuale assetto altimetrico della fascia costiera. Nei confronti delle spiagge a debole pendenza, come quelle emiliano-romagnole, la subsidenza induce non solo arretramenti della linea di riva (diversi metri a fronte d'abbassamenti di pochi centimetri) ma anche un aumento della pendenza dei fondali: in definitiva una riduzione del corpo sabbioso costiero.

Livellazioni di precisione, effettuate lungo i 130 km del litorale regionale, hanno evidenziato abbassamenti compresi tra 5 e 50 mm/anno per il quadriennio 1984-87, ridottisi a 2-36 mm/anno nel periodo 1987-93: ciò equivarrebbe ad una "perdita" in un decennio di 19-20 milioni di m³ di sedimenti (Idroser, 1996).

Metodologia

L'analisi delle variazioni altimetriche è di fondamentale importanza per lo studio del territorio costiero emiliano-romagnolo. Senza questa conoscenza valutazioni sulla vulnerabilità e sul rischio d'inondazione, a breve e medio termine, risultano incompleti e non esaustivi.

Come punto di riferimento per la ricerca condotta è stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale (scala 1:10.000), i cui rilievi altimetrici risalgono al 1978 mentre quelli planimetrici al 1986, perché presentava un buon dettaglio e comprendeva tutta l'area in esame. Quest'ultima è stata successivamente suddivisa in celle da 50 m di lato, onde facilitare le successive elaborazioni.

Per apportare le giuste correzioni all'assetto altimetrico del territorio sono stati utilizzati i dati delle livellazioni altimetriche condotte negli anni 1978, 1984, 1986, 1993 e 1999 e forniti dall'ARPA (Fig. 1). Poiché nei rilievi condotti non sempre sono state rilevate le quote di tutti i capisaldi, per le correzioni altimetriche dell'area in esame sono state utilizzate 21 misure per il 1984, 24 per il 1986, 29 per il 1993 e 49 per il 1999. Attraverso il confronto delle quote dei capisaldi, rilevate nelle quattro levate altimetriche, è stata effettuata una verifica dell'affidabilità delle misure onde eliminare gli abbassamenti anomali, eccessivi e non giustificati. Ad esempio non sono state considerate due misure

che tra il 1993 ed il 1999 presentavano abbassamenti superiori a 30 cm, dovuti probabilmente allo spostamento dei caposaldi ubicati sulla sommità di arginature.

Le differenze altimetriche, tra le diverse misurazioni effettuate e calcolate per ogni caposaldo, suddivise per gli anni intercorsi tra una levata e quella successiva forniscono le velocità di abbassamento del suolo. Questi valori (mm/anno) sono stati successivamente interpolati utilizzando le capacità di calcolo dello Spatial Analyst, estensione del software GIS ArcView dell'Esri, ottenendo la distribuzione bidimensionale delle velocità di abbassamento del suolo su tutta l'area considerata.

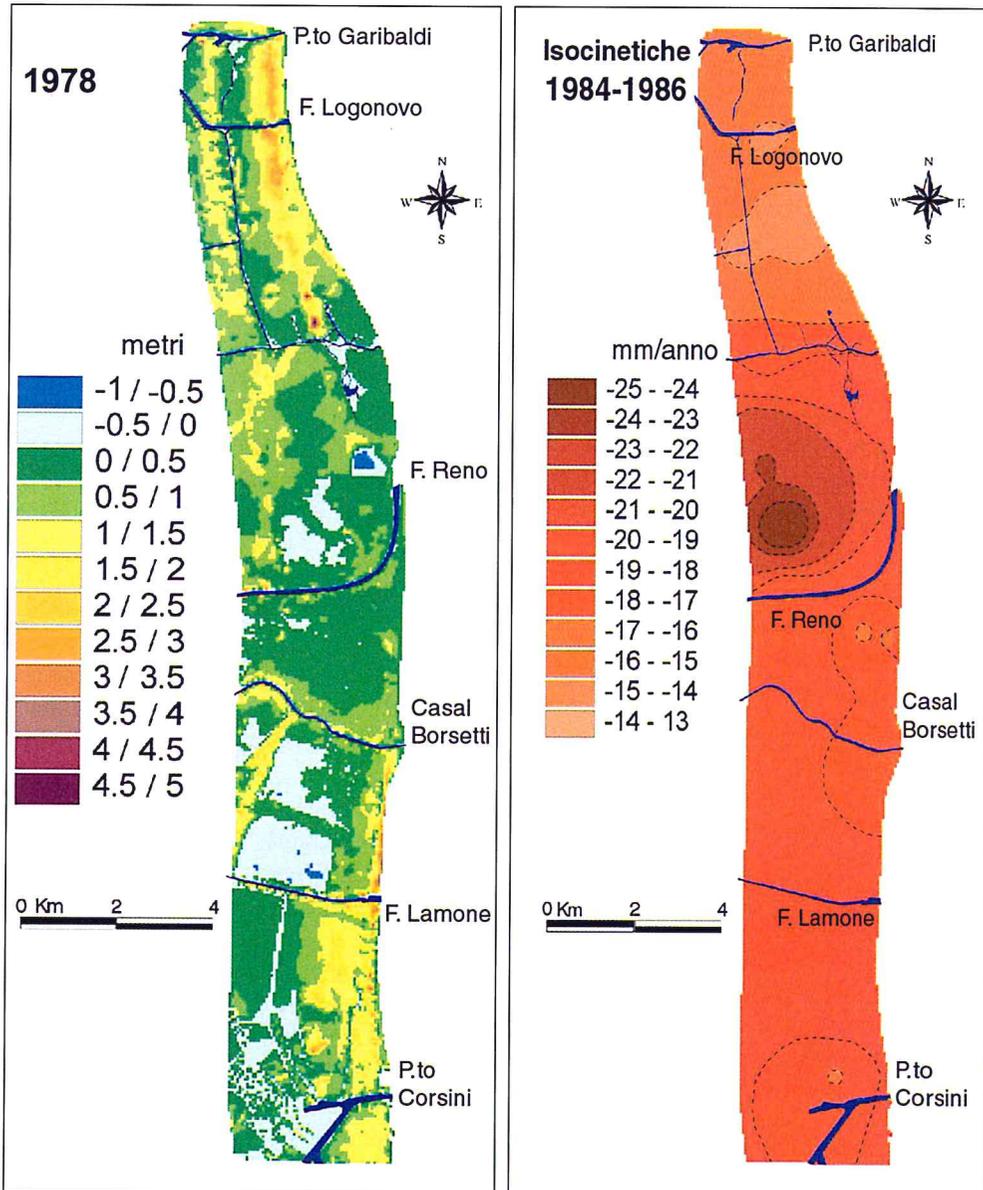


Figura 2 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1978 e mappa delle isocinetiche del periodo 1984-1986.

L'algoritmo scelto per l'interpolazione bidimensionale dei dati (Davis,1986) è quello di Inverse Distance to a Power (IDW). Poiché le misure altimetriche disponibili per il 1978 non sono sufficienti per costruire un modello di velocità per il territorio considerato ma risultano confrontabili con le velocità misurate nel periodo successivo (1978-1984), al dem del 1978 (Fig. 2) è stata dunque applicata la subsidenza ricavata dalle mappe isocinetiche del 1984-1986. Successivamente, per la stima degli effetti della subsidenza al 2020, le quote del modello digitale del terreno sono state "proiettate" nel tempo utilizzando i tassi di abbassamento del suolo ottenuti dalle interpolazioni spaziali.

Per una più attenta simulazione dell'abbassamento indotto dalla coltivazione del campo di gas di Dosso degli Angeli (Fig. 1), oramai esaurito, sono stati approntati due differenti scenari: nel primo sono stati utilizzati gli stessi trend di subsidenza rilevati dal confronto 1986-99 (ipotesi **A**), nel secondo, che appare più realistico, sono stati smorzati gli effetti locali generati dal campo mantenendo solo i termini di subsidenza naturale ed antropica (ipotesi **B**) dovuti all'estrazione d'acqua dal sottosuolo.

I modelli digitali del terreno, per i vari anni considerati, sono stati quindi ottenuti applicando i trend di abbassamento del suolo, forniti dalle isocinetiche, ed interpolando i dati tridimensionali utilizzando, ancora una volta, le funzioni presenti all'interno del modulo Spatial Analyst. La dimensione della cella considerata per l'elaborazione delle carte delle isocinetiche e dei modelli digitali del terreno è di 50 metri.

Infine per lo scenario altimetrico del 2020 si è cercato di valutare le variazioni di quota anche in funzione del previsto innalzamento del livello del mare sulla base dei dati previsionali presenti nell'IPCC 1996. Sono state quindi applicate opportune correzioni al modello previsionale del 2020, che considera un'attenuazione degli abbassamenti nell'area del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi **B**), considerando l'innalzamento del livello del mare, sull'intervallo 1986-2020, pari ad 11 cm, corrispondente al valore medio tra le tre curve proposte nel rapporto dell'IPCC (ipotesi **C**).

Discussione dei risultati

La mappa delle isocinetiche riferita al periodo 1984-86 (Fig. 2) mette in evidenza come i maggiori abbassamenti del territorio siano localizzati ad ovest della foce Reno (24-26 mm/anno), in corrispondenza dell'area di influenza della stazione di pompaggio del campo a gas dell'Agip di Dosso degli Angeli. Procedendo verso nord e sud gli effetti delle estrazioni si attenuano stabilizzandosi su abbassamenti compresi tra 13 e 17 mm/anno per la parte settentrionale mentre in quella meridionale le velocità risultano leggermente più elevate (20-18 cm/anno).

Il modello digitale del 1986 (Fig. 3) evidenzia, alle estremità dell'area studiata, un assetto territoriale sufficientemente rassicurante, per la presenza di zone di retrospiaggia, sufficientemente estese, con quote sul livello del mare tra 1 e 3,5 m. Nella zona centrale, baricentrica alla foce del fiume Reno, i territori presentano mediamente quote comprese tra 0 ed 1 m, ciò priva notevolmente i territori retrostanti di una naturale difesa nei confronti dell'ingressione marina per gli eventi di tempesta ed acqua alta. Da un computo areale risulta che solo il 7.6% del territorio presenta quote al di sopra di 1,5 m, mentre circa il 15% si trova al di sotto del livello medio marino.

L'andamento degli abbassamenti evidenziato per il periodo 1986-99 è assai simile al precedente (Fig. 3). L'area compresa tra il corso del fiume Reno e del canale Bellocchio, il cui tratto terminale assume il nome di canale Gobbino, presenta le maggiori velocità subsidenziali, che sono comprese tra 13 e 19 mm/anno con punte massime nei pressi di Dosso degli Angeli. Lievi sintomi di riduzione del fenomeno sono invece evidenziati nel territorio ravennate, dove gli abbassamenti si attestano tra 9 e 13 mm/anno. Dal confronto tra il modello digitale del 1986 (Fig. 3) e quello del 1999 (Fig. 4) emergono considerazioni non certo rassicuranti: basti ricordare come le aree del territorio con quote superiori ad 1 m si riducano al 5.6%, mentre quelle al di sotto del livello marino aumentino al 28% circa. Un altro fattore di preoccupazione riguarda la distribuzione areale di quest'ultime che coprono vaste

zone a ridosso della spiaggia in prossimità della foce Reno e Gobbino. Appare altresì chiaro come i territori rilevati di retrospiaggia, ben sviluppati nel 1986, si siano notevolmente ridotti. L'elaborazione altimetrica condotta per il 2020 (ipotesi A; Fig. 5) pone in evidenza come, per il solo effetto della subsidenza ottenuto considerando lo stesso trend del periodo precedente (1986-99), le zone costiere a settentrione del Reno, già in crisi all'inizio dell'intervallo considerato, subiscano un abbassamento generalizzato, che si estende anche a sud del corso del fiume. Per quanto concerne l'area ravennate, a meridione del Reno, si può riscontrare un'estensione delle aree con quote comprese tra 0 e -0.5 metri di retrospiaggia, che però sono ancora protette da una stretta fascia di territorio tra 0.5 e 2 m di quota.

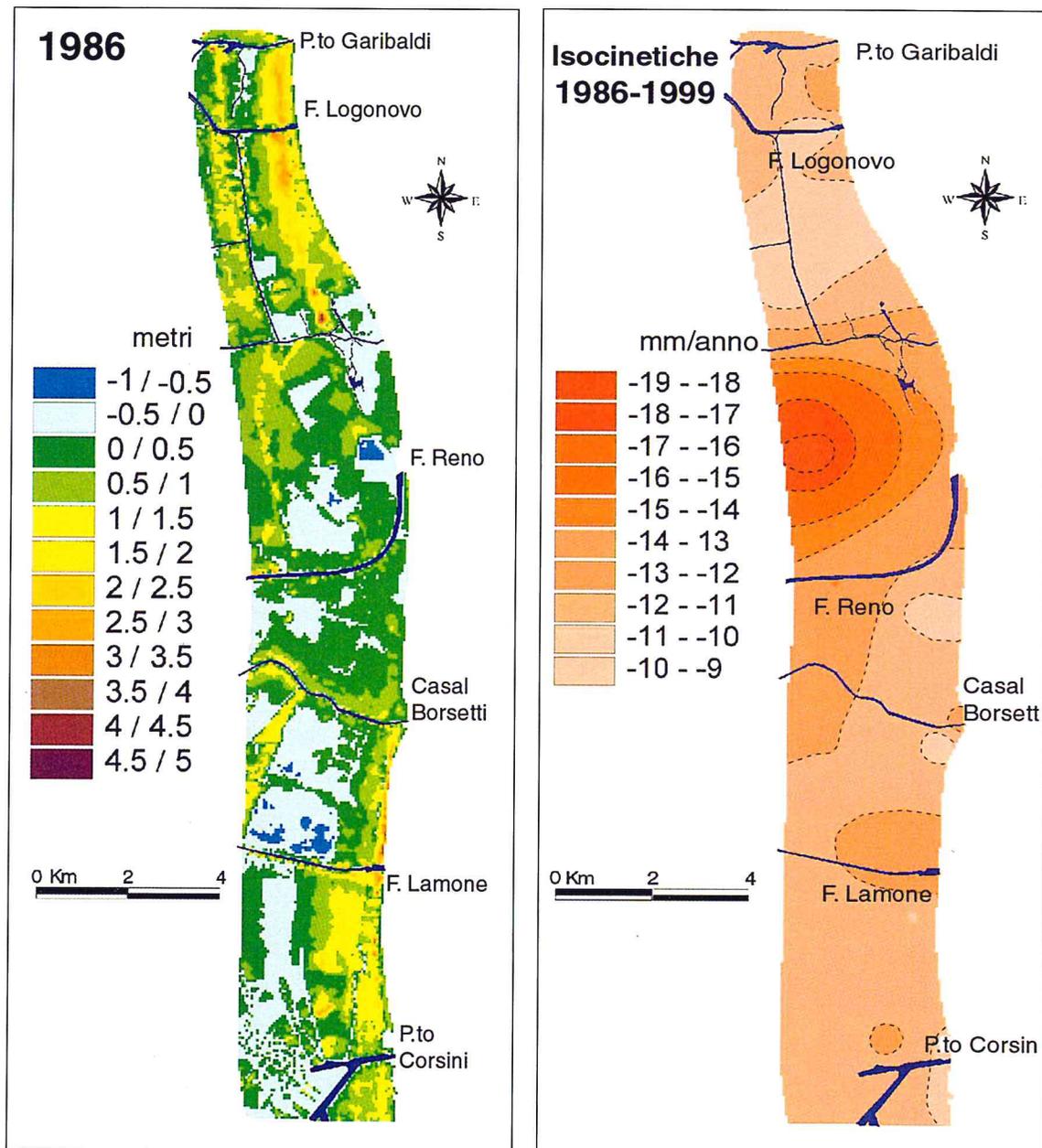


Figura 3 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1986 e mappa delle isocinetiche del periodo 1986-1999.

Dal confronto delle isocinetiche appare evidente come la chiusura delle estrazioni abbia comportato una riduzione localizzata negli abbassamenti del suolo: infatti mentre in prossimità del pozzo di Dosso degli Angeli venivano registrate nel periodo 1984-86 velocità comprese tra 24-25 mm/anno, in quello successivo (1986-99) si presentano valori tra 18 e 19 mm/anno che nell'ipotesi **B** del 2020 si riducono a 12-13 mm/anno (Fig. 4). In quest'ultima ipotesi le elaborazioni condotte suggeriscono che l'area interessata sia approssimativamente baricentrica al pozzo e si sviluppi con un raggio di circa 3 km.

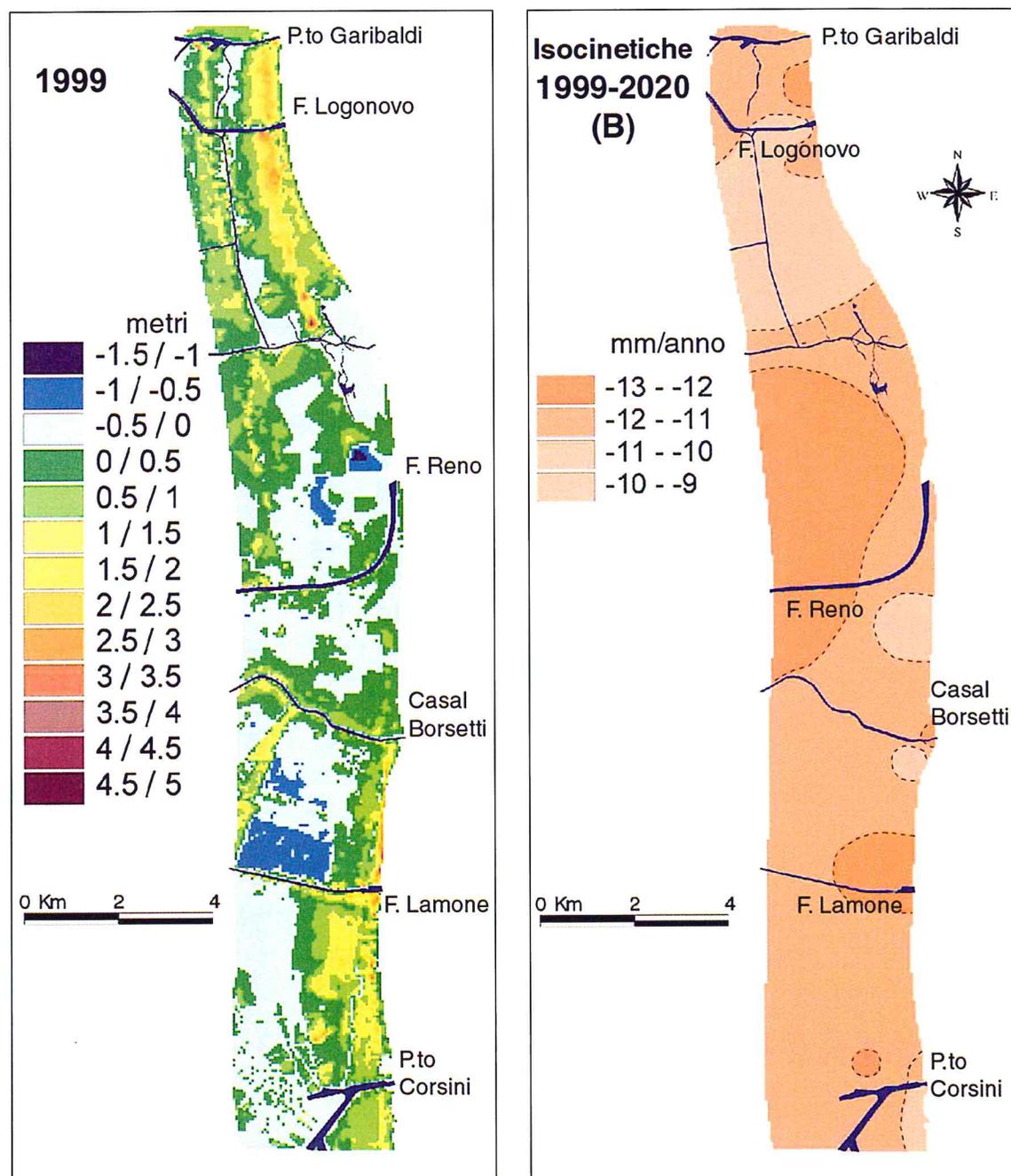


Figura 4 - Rappresentazione altimetrica del territorio al 1999 e mappa delle isocinetiche del periodo 1999-2020 ottenuta modificando i tassi d'abbassamento per effetto dell'esaurimento del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi B).

La successiva elaborazione altimetrica al 2020 (ipotesi B; Fig. 5) non mostra sostanziali differenze rispetto all'ipotesi A. Infatti, lungo il tratto costiero si ripropongono le stesse variazioni e solo verso l'interno si nota una parziale riduzione dei termini d'abbassamento del suolo. Ciò pone in evidenza il fatto che l'effetto subsidenziale generato dal campo a gas si esplica in un'area limitata e confinata rispetto all'estensione del territorio analizzato.

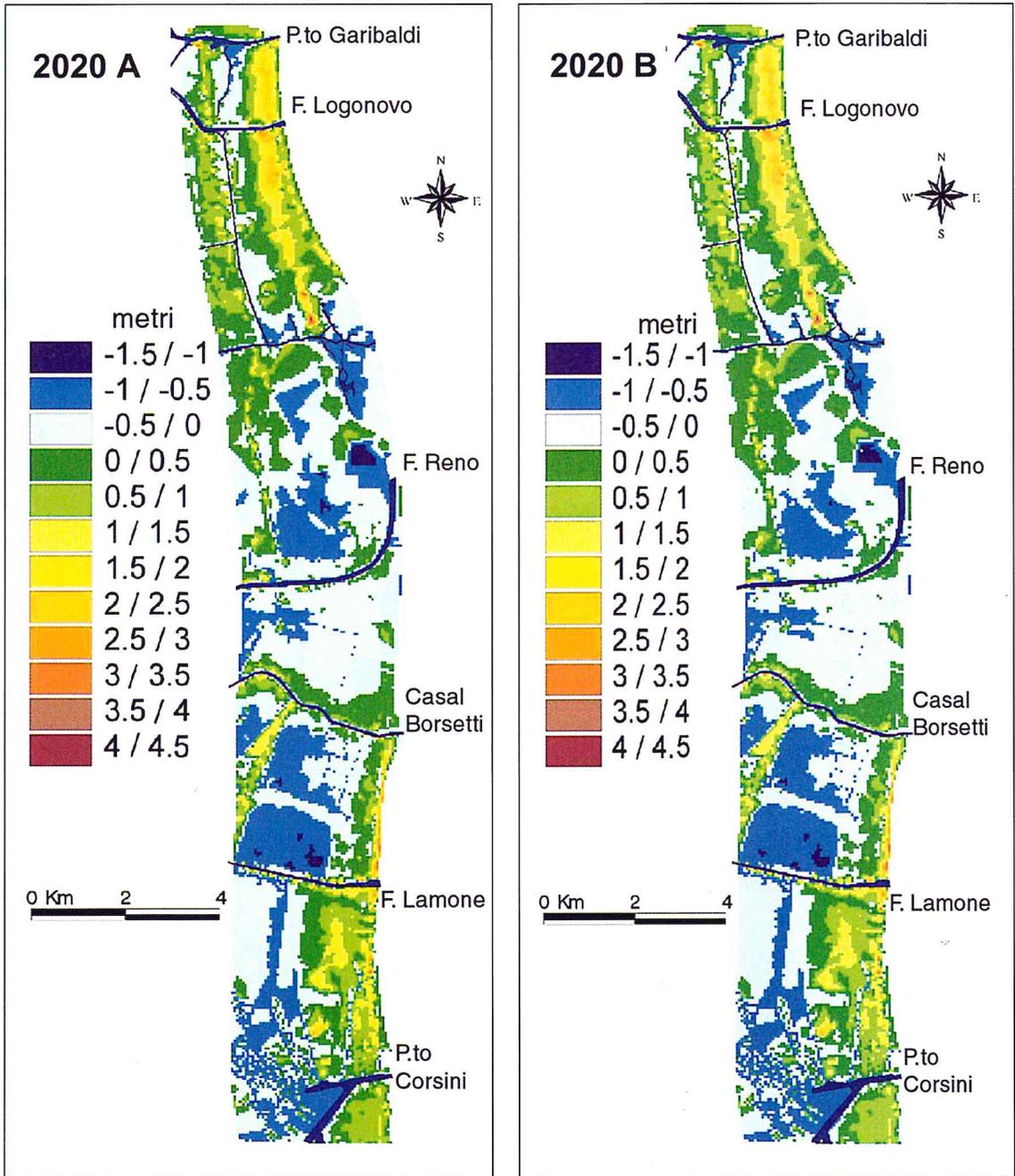


Figura 5 - Assetto territoriale al 2020 ottenuto mantenendo i tassi d'abbassamento uguali a quelli registrati nel periodo 1993-1999 (ipotesi A) e, a destra, modificando i tassi d'abbassamento per effetto dell'esaurimento del pozzo Dosso degli Angeli (ipotesi B).

La carta dell'altimetria al 2020 (ipotesi C; Fig. 6) ottenuta sommando alla precedente un contestuale innalzamento del livello marino non è particolarmente differente rispetto a quella con i soli risultati ottenuti con la sola subsidenza. Rimangono, infatti, valide le stesse considerazioni precedentemente per la zona del Reno e per Porto Corsini. Quest'ultima elaborazione, che pone in rilievo le aree con quote comprese tra -0.5 ed -1 m, evidenzia la predisposizione all'inondazione specialmente per la zona di foce Reno e di Bellocchio, mentre è meno preoccupante la situazione del settore settentrionale dell'area di studio. Da quest'ultima elaborazione si può ipotizzare che nel 2020, per effetto della subsidenza e dell'innalzamento del mare, solo il 3,4% del territorio presenterà quote superiori ad 1,5 m mentre il 48,5% sarà al di sotto di 0 m (Fig. 6).

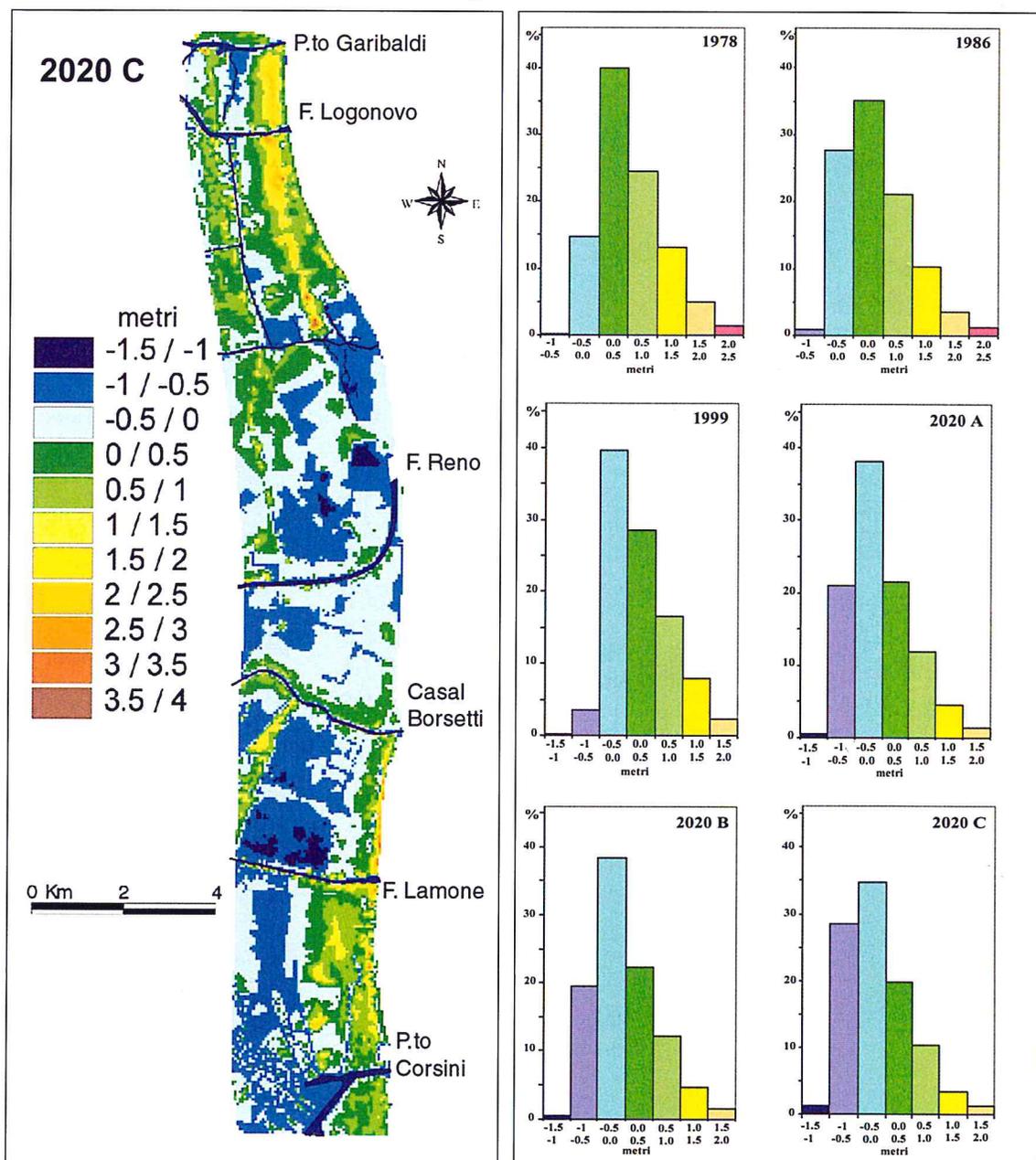


Figura 6 - Assetto territoriale del 2020 ottenuto sommando all'ipotesi B l'innalzamento del livello del mare stimato per il periodo 1986-2020 (ipotesi C); gli istogrammi evidenziano le variazioni areali, espresse in percentuali, delle classi altimetriche comprese tra 2 e -1.5 m, con intervalli di 0.5 m.

I soli termini di variazione altimetrica elaborati non sono certamente sufficienti per rappresentare correttamente l'evoluzione dell'area in esame perché non si è tenuto conto della perdita di volume di sedimento del fondale antistante. Per far ciò sarebbero stati necessari ulteriori ed onerosi calcoli predittivi dell'evoluzione della linea di costa, realizzati con il codice di calcolo LITPACK, in cui oltre ad abbassare le quote delle batimetrie dei modelli, applicando i trend subsidenziali calcolati, sarebbe stato necessario allargare le dimensioni delle griglie di calcolo, già al limite delle capacità computazionali. Ciò avrebbe consentito di valutare sia l'arretramento della linea di riva sia di ottenere una più accurata valutazione planimetrica delle aree interne allagabili.

Altresì, per predire l'evoluzione del profilo di spiaggia in funzione dell'innalzamento del mare, non è stata ritenuta percorribile l'applicazione del Principio di Bruun (1962). Infatti, non sarebbe stato utilizzato in modo conforme a quanto proposto dallo stesso autore, che pone i seguenti limiti all'applicabilità di questo modello fondamentalmente bidimensionale (Bruun, 1983; 1988): la spiaggia deve essere in uno stato d'equilibrio dinamico, dunque con variazioni cicliche (giornaliere, mensili, stagionali) ma che nell'arco dell'anno deve mantenere il proprio profilo medio (bilancio in equilibrio); il movimento dei sedimenti avviene solo in senso trasversale (lungo il profilo) sotto l'azione dell'onda.

L'impossibilità di avere dei profili con bilancio nullo, la presenza di foci fluviali e d'opere antropiche rende difficoltosa l'applicabilità del modello nell'area di studio, senza con ciò nulla togliere alla sua validità.

Pur con le dovute cautele, è possibile, anche sulla base d'esperienze pregresse condotte su aree morfologicamente simili (Simeoni *et al.*, 1999; Gonella, 1998), ipotizzare come la variazione dell'assetto altimetrico del territorio si ripercuoterà sulla circolazione idrica interna del Canale Gobbino e delle aree lagunari e paralagunari ad esso collegate, ubicate nell'area dove è più pronunciato l'effetto subsidenziale.

Poiché la circolazione idrodinamica lungo i canali è tanto più efficace quanto maggiori sono i battenti idrici, l'abbassamento del territorio ed il contemporaneo innalzamento del mare determineranno tiranti idrici più elevati degli attuali ed un miglioramento della penetrazione dell'onda di marea. Nelle aree umide (Vene ed Ancone di Bellocchio), caratterizzate da termini di deflusso propriamente bidimensionali, la subsidenza tenderà ad allargarne i loro confini, coinvolgendo nel gioco dell'immersione ed emersione, secondo i cicli di marea, aree sempre più vaste. Per garantire un'adeguata circolazione idrica di quest'ultime dovrà aumentare la capacità di trasporto dei canali. Tuttavia l'incremento incontrollato dei battenti può determinare una riduzione della velocità di penetrazione delle onde nelle zone più interne ed accrescere la quantità di sedimento depositata, determinando così l'insabbiamento dei canali. Ciò provocherà un aggravarsi dei delicati equilibri che regolano lo scambio idrico tra il mare e le aree interne, e renderà necessario garantire l'officiosità idraulica del tratto terminale e della foce Gobbino, spesso occlusi dalle sabbie trasportate dalla deriva litoranea. All'interno delle aree umide la subsidenza e la variazione eustatica determineranno una riduzione delle aree barenicole, che saranno via via sostituite da zone perennemente sommerse. Nello stesso tempo la circolazione idrodinamica di queste aree, già attualmente difficile, diventerà più problematica perché i flussi interni, non più orientati nella direzione dei canali interclusi tra le barene, tenderanno a depositare materiale trasversalmente alle direzioni di penetrazione dell'onda di marea. La ridotta movimentazione delle masse d'acqua incrementerà le zone d'acque morte favorendo la crescita eutrofica ed un generale depauperamento delle caratteristiche ambientali di queste aree umide.

Conclusioni

Lo studio ha messo in evidenza come nell'evoluzione della fascia costiera emiliana-romagnola siano determinanti gli abbassamenti del territorio. Quest'ultimi, elaborati con opportuni modelli numerici e coerenti con quelli proposti da studi analoghi (Gabolati *et al.*, 1998), hanno consentito di proporre elaborazioni altimetriche riferite al 1986, 1999 ed al 2020. Gli scenari ottenuti evidenziano come il

previsto innalzamento del mare, nell'evoluzione di quest'area, avrà sì un peso determinante ma sarà sicuramente minore rispetto agli abbassamenti di quota, riscontrati e previsti, per il fenomeno subsidenziale del territorio.

Questi due movimenti determineranno una notevole riduzione nel bilancio delle spiagge ed un arretramento della linea di riva, poiché buona parte dei nuovi contributi sabbiosi portati dai fiumi servirà a compensare la perdita di quota dei fondali antistanti. Il danno, però, sarà molto maggiore rispetto alla perdita del solo arenile perché l'incremento delle aree depresse, in prossimità della costa, e la contemporanea riduzione dei cordoni dunari rappresentano i presupposti per sempre più frequenti ed estese sommersioni, per eventi di tempesta ed acqua alta, del territorio litorale. Questi eventi, per la natura stessa del clima meteomarinario regionale, non avranno notevole intensità e ciò fa sperare che queste possibili inondazioni provocheranno soprattutto danni materiali.

Tutto ciò assume particolare risalto alla luce dei recenti modelli previsionali che mettono in luce la possibilità dell'intensificarsi degli eventi d'inondazione che amplificheranno i fenomeni d'erosione della spiaggia e d'intrusione d'acque salate nelle falde, alterando così i delicati equilibri chimico-fisici delle acque del sottosuolo.

E' inoltre possibile che le variazioni in atto determinino una sempre più rapida occlusione del canale Gobbino, che collega il mare alle aree paralagunari e lagunari, ed una perdita d'efficienza idraulica delle zone umide. Ciò richiederà una maggiore attenzione nei confronti del sistema dei canali mareali onde mantenere un adeguato rapporto tra la loro profondità e quella delle aree umide, in modo da garantire un ricambio idrico ed una circolazione idrodinamica interna sufficienti per la salvaguardia di questi ambienti unici.

Infine, i diversi scenari proposti hanno posto in evidenza come, nella fascia costiera esaminata, la subsidenza indotta dall'estrazione di gas non sia certamente trascurabile, anche se sembra sia confinata in un'area meno estesa del previsto.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il dott. W. Zago, l'arch. L. Previati e il Consorzio Ferrara Ricerche per il supporto fornito. Un ulteriore ringraziamento va rivolto all'ing. M. Gonella per le fatiche discussioni, all'ing. M. Preti dell'ARPA di Bologna per i dati forniti, ai dottori A. Zamariolo ed U. Tessari per l'aiuto prestato nelle attività di campagna.

Lo studio è stato condotto nell'ambito del "Progetto Bellocchio" finanziato dal Consorzio del Parco del Delta del Po emiliano-romagnolo, e supportato dai progetti Cofin2000 e CNR-GNDICI (Linea 2, Unità Operativa 51).

Bibliografia

- Barnett T.P. (1983) - *Recent changes in sea level and their possible causes*. Climatic Change, 5: 15-38.
- Bruun P. (1962) - *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. Journ. Waterways, Harbours Div., 88: 117-130.
- Bruun P. (1983) - *Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion*. Coastal Engineering, 7: 77-89.
- Bruun P. (1988) - *The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large scale two- and three-dimensional usages*. Journal of Coastal Research, 4 627-648.
- Cazenave A. (1999) - *Les variations actuelles du niveau moyen de la mer*. C.R. Acad. Sci, Paris, 329: 457-469.
- Cecile C., Cazenave A. e Le Provost C. (2001) - *Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations*. Science, 294: 840-842.
- Comune di Ravenna (1996) - *Valutazione e conseguenze delle variazioni del livello marino medio sulla costa ravennate dovute a subsidenza e ad effetti climatici*. Rapporto Tecnico, Ravenna, pp.270.

- Davis J.C. (1986) - *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York.
- Emery K.O. (1980) - *Relative sea levels from tide-gauge records*. Proceedings National Academy Sciences, USA, 77, 12: 6968-6972.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backer K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broker I., Christensen E.D., Elfrink B., Dante A. and Gonella M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to sea level rise and natural and anthropic land subsidence*. In: CENAS, Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropic Land Subsidence, G. Gambolati (ed.), Kluwer Academic Publ., 1-34.
- Gonella M. (1998) - *Interventi di risanamento della Pialassa del Piombone e di separazione fisica delle zone vallive dalle zone portuali mediante arginatura naturale, Relazione generale*. Studio e progettazione preliminare affidati dal Comune di Ravenna, Servizio Ambiente alla società Hydrodata S.p.A. di Torino, pp. 56.
- Gornitz V. e Lebedeff S. (1987) - *Global sea-level changes during the past century*. In: D. Nummndal et al. (eds), Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution. Soc. Econ. Paleont. Miner., Sp. Publ. 41, pp. 3-16.
- Gornitz V., Lebedeff S. e Hansen J. (1982) - *Global sea-level trend in the past century*. Science, 215: 1611-1614.
- Kalinin G.P. e Klige R.K. (1978) - *Variation in the world sea level*. In: World Water Balance and Water Resources of the Earth. Paris, Unesco, Studies and Reports in Hydrology, 25: 581-585.
- Idroser (1983) - *Il trasporto solido fluviale nei bacini tributari dell'Adriatico*. - Regione Emilia-Romagna, Piano progettuale per la difesa della costa Emiliano-Romagnola, volume IV, Bologna, pp.429.
- Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp.365.
- Lisitzin E. (1958) - *Le niveau moyen de la mer*. Bull. Inf. Comité Central d'Océanogr. Et d'Etude des Côtes (COEC), 10 : 254-262.
- Pirazzoli P.A. (1986) - *Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records*. Journal of Coastal Research, 1: 1-26.
- Pirazzoli P.A. (2000) - *L'élévation récente du niveau de la mer et les prévisions pour le XXI^e siècle*. In: Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer: risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12-13 octobre 2000, Francia, 10-13.
- Shennan I. e Woodworth P.L. (1992) - *A comparison of late Holocene and twentieth-century sea-level trends from the UK and North Sea region*. Geophysical Journal International, 109 : 96-105.
- Simeoni U. e Fierro G. (2001) - *Le delta du Po et l'élévation du niveau de la mer*. In: Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer: risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12-13 octobre 2000, Francia, pp. 62-65.
- Simeoni U., Gabbianelli G. e Melandri S. (1999) - *Effetti delle attività antropiche e dell'innalzamento del livello marino sull'evoluzione del litorale emiliano-romagnolo*. Atti del Congr. "Le pianure: conoscenza e salvaguardia", Regione Emilia-Romagna, Ferrara, pp. 42-44.
- Simeoni U., Anconetani P., Gabbianelli G., Gonella M., C. Del Grande, M. Pellizari, Tessari U., Zamariolo A. (2000) - *Studio dell'Ancona e delle Vene di Bellocchio, del litorale tra Porto Garibaldi e Porto Corsini: proposte di sistemazione ambientale*. Rapporto conclusivo II Fase, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara, pp.190.
- Steward R.W. (1989) - *Sea-level rise or coastal subsidence?* Atmosphere-Ocean, 27: 461-477.
- Trupin A. e Wahr J. (1990) - *Spectroscopic analysis of global tide gauge sea level data*. Geophysical Journal International, 100: 441-453.

Approccio gestionale dell'area costiera del Parco del Delta del Po Emiliano-Romagnolo

Simona Gragnaniello¹ e Lucilla Previati²

¹Dipartimento di Scienze della Terra Università di Ferrara, C.so Ercole I d'Este, 32 – 44100, Ferrara

²Direttore Consorzio Parco Regionale del Delta del Po, Via Cavour, 11 – 44022, Comacchio (Fe)

Riassunto

Il Parco Regionale del Delta del Po è stato istituito nel 1988 dalla Regione Emilia-Romagna per tutelare e valorizzare uno degli ambienti naturali più ricchi ed interessanti di tutto il territorio nazionale. Il Delta del Po costituisce un ambiente singolare da gestire unitariamente, mentre la suddivisione amministrativa del territorio in regioni diverse (Emilia-Romagna e Veneto) ne fa due entità separate. Il tratto di litorale in esame presenta una successione di ambienti naturali con elevata diversità biologica: spiagge, dune attive e fossili, stagni, paludi, bassure salmastre e foci fluviali. La conservazione di tali ambienti è però spesso compromessa dall'attività antropica. La complessa gestione e pianificazione del territorio è affidata a numerosi Enti e soggetti non coordinati e spesso titolari di competenze relative alla stessa materia, ma non comunicanti tra loro. Tutto ciò rende difficile e particolarmente complesso un approccio di gestione integrata per la conservazione delle zone umide, ma anche per lo stabilirsi di relazioni causa-effetto tra interventi effettuati e condizioni ambientali. Inoltre, gli strumenti di programmazione adottati dai diversi soggetti e le modalità della loro attuazione sono talvolta contrastanti. La presenza di un Parco "forte", cioè di una struttura qualificata, autorevole ed attiva, sia propositivo che autorizzativo, potrebbe concorrere a risolvere i problemi di frammentazione delle competenze, realizzando una sorta di "regia" per le attività gestionali nel territorio del Delta del Po.

Parole chiave: pianificazione, tutela ambientale, sviluppo sostenibile, gestione integrata, aree protette.

Abstract

The Po Delta Regional Park was founded in 1988 by the Region of Emilia Romagna (L.R. n° 27/88) to preserve and protect one of the most interesting and richest environments in the entire national territory. The Po Delta constitutes a unique environment for unitary management, but its subdivision into two different regions of administrative territory (Emilia Romagna and The Veneto) in fact divides it into two separate entities. An examination of the littoral tract presents an environmental succession with high biological diversity: beaches, active and fossil dunes, swamps, marshes, low salt marshes and fluvial mouths. The conservation of these environments is often compromised by anthropical activities. The land management and the planning activities are entrusted to uncoordinated corporate bodies, which often have the same competencies but have no interaction among themselves. This situation makes for a difficult and complex approach to integrated management for humid zone conservation as well as to the cause-effect relationship between executed intervention and environmental conditions. In addition, the programming instruments, and their implementations, adopted by different managers are sometimes conflicting. A "strong Park presence", with a qualified, authoritative and active structure, both for proposals and authorizations, could be the beginning of the solution to these fragmentation competency problems for the Delta Po territory managerial activities.

Keywords: Planning, environmental preservation, sustainable development, integrated management, protected areas.

Premessa

Il Parco Regionale del Delta del Po (Figg. 1 e 2) è stato istituito nel 1988 dalla Regione Emilia-Romagna (L. R. n° 27/88), per tutelare e valorizzare uno degli ambienti naturali più ricchi ed interessanti di tutto il territorio nazionale. Ha una superficie di quasi 53000 ha, comprende la parte meridionale dell'attuale delta padano, il "delta storico", nonché una vasta porzione di zone umide collocate più a sud, di grande interesse naturalistico.

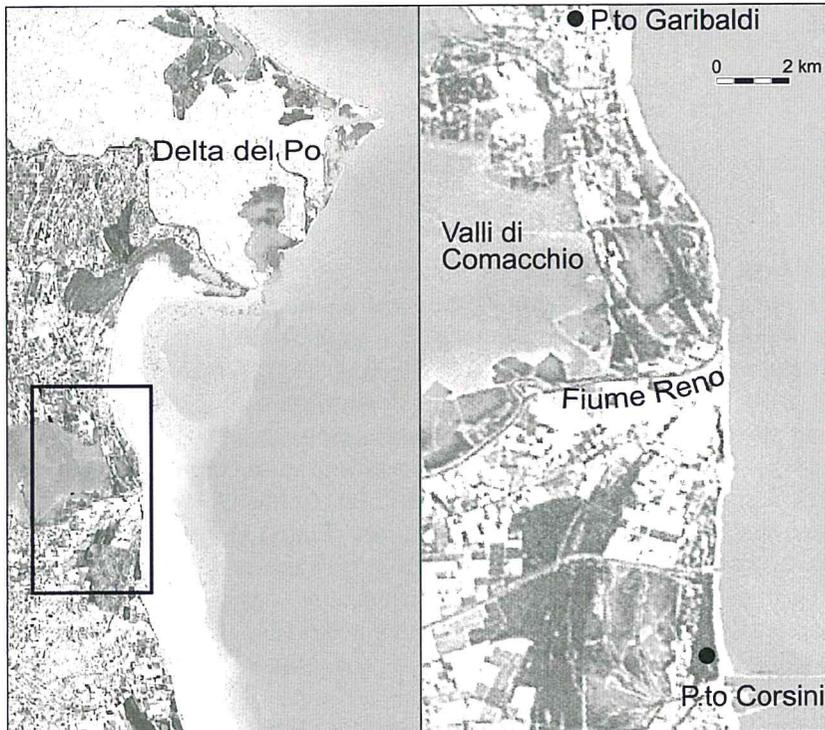


Figura 1 - Inquadramento Geografico dell'area; nella figura di sinistra è indicato in tono più chiaro il territorio afferente alla Regione Veneto, in tono più scuro il territorio afferente alla Regione Emilia Romagna.

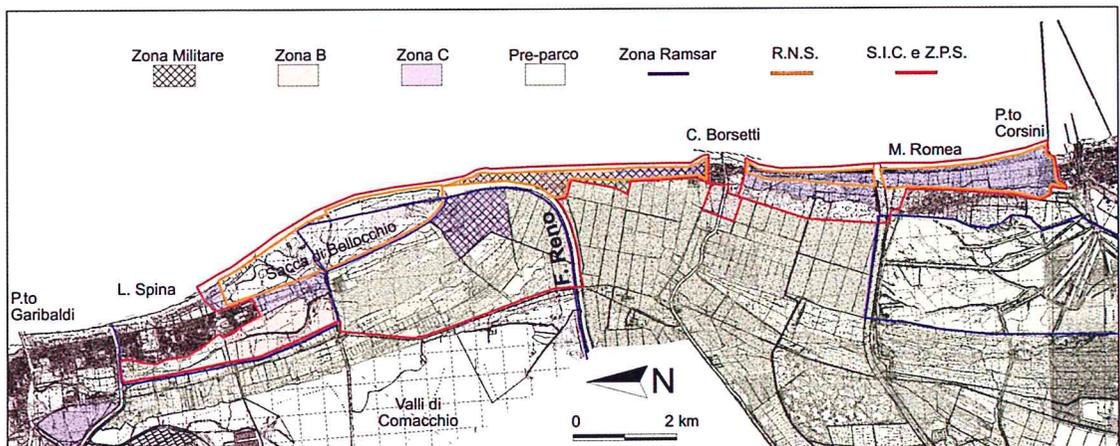


Figura 2 - Zonazione dell'area di studio.

Il delta del Po, inteso come elemento fisico, costituisce un ambiente singolare da gestire unitariamente, mentre la suddivisione amministrativa del territorio in regioni diverse (Emilia-Romagna e Veneto) ne fa due entità separate. Per questo, come stabilito dalla Legge Quadro Nazionale sulle aree protette e da una specifica intesa Stato/Regioni, si dovrebbe a breve giungere alla costituzione di un parco interregionale. Ciò consentirebbe una forma di coordinamento dei due parchi, che garantirebbe una gestione armonica delle attività di conservazione, valorizzazione e promozione dell'intera area del delta del Po.

Il Parco emiliano-romagnolo risulta atipico, se paragonato ad altri parchi caratterizzati da ambienti naturali incontaminati e da una presenza antropica estremamente ridotta e concentrata in piccole aree (Parco dello Stelvio, Parco degli Abruzzi, etc.). Nel Parco, è evidente che gli insediamenti urbani e le attività antropiche erodono il territorio e creano in continuazione conflitti tra ciò che dovrebbe essere conservato e le trasformazioni in atto: 40000 abitanti nel perimetro dell'area protetta in un bacino di 250000 abitanti, con la presenza di oltre 15 milioni di turisti lungo la costa adriatica (70 km effettivi di litorale inclusi nella perimetrazione istitutiva del parco, 90 km complessivi includendo i centri abitati costieri).

L'Ente di gestione del Parco, costituito nel febbraio 1996 da due province (Ferrara e Ravenna) e nove comuni territorialmente interessati (Alfonsine, Argenta, Cervia, Codigoro, Comacchio, Goro, Mesola, Ostellato e Ravenna), ha l'ambizione di proporsi come un laboratorio, nel quale si sperimenta la possibilità di riconciliare o trovare un nuovo equilibrio tra uomo e natura.

L'attività agricola ha causato la scomparsa quasi totale dei prati umidi ed allagati, ambienti che un tempo dominavano il paesaggio ed erano utilizzati come pascolo per il bestiame brado. L'intervento antropico ha soppiantato anche gran parte delle valli da pesca (si pensi alle grandi bonifiche ferraresi) e da canna e delle risaie eliminando decine di migliaia di zone umide.

Sono pochissime le aree lagunari e paralagunari del Parco che conservano inalterata la loro evoluzione e destinate a riserve integrali. Questo lembo della pianura padana offre una varietà di ambienti e di attrattive culturali. E' possibile osservare i relitti della primitiva macchia mediterranea ed il bosco igrofilo; le lagune litoranee, le valli salmastre e le zone umide di acqua dolce. Vi sono, inoltre, le vestigia etrusche (necropoli di Spina) e romane (Villa romana Agosta rinvenuta nella valle del Mezzano, Nave romana di valle Ponti), gli splendori dei mosaici bizantini (Basiliche di St. Apollinare e Mausoleo di Teodorico) e la suggestiva architettura romanica (Abbazia di Pomposa) ed estense (Castello della Mesola), oltre a numerose architetture idrauliche e rurali, tanto che il delta ferrarese è stato riconosciuto nel 1999 dall'UNESCO patrimonio dell'umanità.

Quanto sopra delineato evidenzia che l'opera della natura e dell'uomo si sono intrecciate nel corso dei millenni, dando forma a questo territorio in continua evoluzione.

Inquadramento geografico ed ambientale

Il territorio in esame è costituito dalla zona di litorale limitata a settentrione dal molo di Porto Garibaldi, ed a meridione dal molo di Porto Corsini, mentre la zona d'entroterra è delimitata dalla strada statale Romea (ss. 309). E' incluso nella provincia di Ferrara, con il comune di Comacchio e le relative frazioni di Porto Garibaldi, Lido degli Estensi, Lido di Spina, e nella provincia di Ravenna, con le frazioni di Casal Borsetti, Marina Romea e Porto Corsini (Fig. 1).

L'area presenta una successione di ambienti naturali dal mare all'entroterra, con elevata diversità biologica: spiagge, dune attive e fossili; stagni, paludi, bassure salmastre e foci fluviali.

Per quanto concerne la vegetazione nella zona della Sacca di Bellocchio si trovano associazioni tra le più importanti del territorio deltizio.

Lungo la spiaggia antistante la vegetazione è scarsa o assente, per la ridotta superficie della stessa in conseguenza dell'erosione marina e per la forte presenza di bagnanti, il cui calpestio estivo ne impedisce l'evoluzione. Nelle aree a maggiore disturbo sono presenti popolamenti di specie alloctone con scarso pregio naturalistico (*Spartina juncea*, *Cicloba atriplicifolia*, ecc.). Sui cordoni di dune si insedia una comunità di specie perenni con aspetto di prateria più o meno densa che colonizzano le dune em-

brionali avanzate e quelle più arretrate (Sint. *Ammophiletalia arundinaceae*). In condizioni ottimali si distinguono due associazioni ad elevato pregio naturalistico: 1) una comunità dominata da *Agropyron junceum*, con *Echinophora spinosa*, *Eryngium maritimum*, *Calystegia soldanella* e *Xanthium italicum*; (Sint. *Echinophoro spinosae-Elymetum farciti*); 2) una comunità dominata da *Ammophila littoralis* associata ad *Echinophora spinosa* (Sint. *Echinophoro spinosae-Ammophiletum arundinaceae*) che si riscontra in dune in forte regressione (Piccoli, Gerdol, 1990).

Spostandosi verso l'interno, fino ai bacini perennemente allagati, sono presenti molte comunità di vegetazione alofita e alotollerante.

Le acque del lago di Spina e degli specchi minori sono caratterizzate da comunità di macrofite a dominanza di alghe verdi dell'ordine *Ulvales*. Le acque del bacino della Valle Ancona, in prossimità del litorale nella parte SE dell'area che rappresenta il residuo della vecchia foce del Reno, presentano una vegetazione scarsa o nulla. Nella zona umida tra i bacini e la pineta retrostante vi sono prati salsi a giunchi e graminacee (Sint. *Juncetalia maritimi*).

Nella zona indagata è stata identificata una fauna di vertebrati di particolare pregio, soprattutto per quanto riguarda le specie ornitologiche.

Tali ambienti sono siti tipici per i popolamenti di Nono (*Aphanius fasciatus*) e Ghiozzetto di laguna (*Knipowitschia panizzae*). Inoltre, sono relativamente importanti per lo svernamento dell'Alzavola (*Anas crecca*), del Fischione (*Anas penelope*) e della Folaga (*Fulica atra*). In estate sono presenti il Cavaliere d'Italia (*Himantopus himantopus*), l'Avocetta (*Recurvirostra avosetta*) e sternidi, come il Fraticello (*Sterna albifrons*) e la Sterna comune (*Sterna hirundo*). Nella parte meridionale delle Vene si è insediato da parecchi decenni il Tarabuso (*Botaurus stellaris*). Lungo la fascia costiera, in particolare nel tratto del canale Bellocchio-Gobbino alla foce del Reno, hanno rilevanza nazionale le nidificazioni della Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*) e del Fratino (*Charadrius alexandrinus*) (Costa, 1998).

Strumenti di pianificazione e di gestione

La salvaguardia, la protezione e il miglioramento della qualità dell'ambiente, compresa la conservazione degli habitat naturali della flora e della fauna selvatiche, costituiscono un obiettivo essenziale e di interesse perseguito dalla Comunità Europea (direttiva 79/409/CEE e direttiva 92/43/CEE).

Con la Legge Regionale n° 3/99 (comma 1 art.105) gli enti di gestione delle aree naturali protette regionali provvedono attraverso il Piano Territoriale del Parco e il regolamento all'individuazione degli habitat e delle specie presenti sul territorio di competenza che hanno le caratteristiche di cui alla direttiva 92/43/CEE, nonché alla definizione dello stato di conservazione e delle modalità di gestione idonee a garantire il perseguimento degli obiettivi fissati dalla direttiva stessa. In via transitoria però è il parco che provvede secondo quanto previsto dal comma 3 dell'art.104.

I principali strumenti di pianificazione regionale sono: il Piano Territoriale Regionale (P.T.R.) e il Piano Territoriale Paesistico Regionale (P.T.P.R.), che tutela la componente paesaggistica ed ambientale (Fig. 3).

Essi costituiscono riferimento e indirizzo generale per la pianificazione affidata alle Province tramite i Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale (P.T.C.P.). Questi ultimi assumono la valenza di riferimento univoco e coordinato per tutte le politiche di programmazione e pianificazione di settore ed hanno valore a tutti gli effetti di Piano Territoriale Paesistico Regionale, una volta approvati dalle Amministrazioni Provinciali competenti.

Le aree comprese nel perimetro dei parchi, siano essi nazionali o regionali, sono poi disciplinate da uno strumento specifico, il Piano Territoriale del Parco (P.T.P.) che, con riferimento alle leggi di settore ed agli obiettivi, definisce gli indirizzi gestionali e di pianificazione del territorio di competenza, analizza e precisa le conoscenze sui caratteri del territorio di riferimento ed individua, di conseguenza, le modalità e le azioni per la conservazione e la tutela delle componenti naturali e dei loro equilibri. Tali obiettivi devono coniugarsi con quelli di sviluppo socio-economico e di valorizzazione delle culture e delle tradizioni locali.

I Comuni, nell'esercitare le proprie competenze in materia di pianificazione urbanistica attraverso i Piani Regolatori Generali (P.R.G.), sono tenuti alla conformità con gli strumenti sopra indicati, in particolare con il Piano Territoriale del Parco, ai quali devono anche adeguare i P.R.G. previgenti (quando i piani di stazione sono approvati).

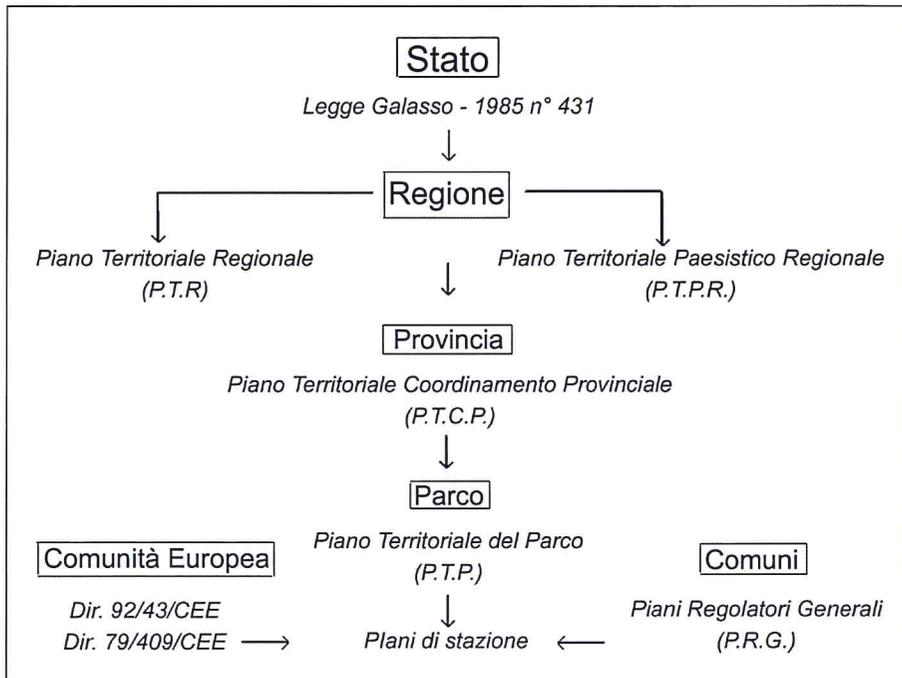


Figura 3 - Schema della pianificazione.

L'area del Parco del Delta del Po emiliano romagnolo è suddivisa, nell'ambito del sistema di pianificazione, in sei stazioni. Ogni Stazione è regolamentata da uno specifico Piano Territoriale, il quale rappresenta un riferimento per il territorio di competenza. Dei sei Piani di Stazione adottati, sono stati approvati quello della stazione "Volano, Mesola, Goro" (Delib. Giunta Regionale n° 1626 del 31/07/2001) e "Valli di Comacchio" (Delib. Giunta Regionale n° 2282 del 17/11/2003).

Gestione amministrativa

Nei territori oggetto di studio la responsabilità per la conservazione della natura è principalmente affidata al Parco Regionale del Delta del Po, mentre la gestione delle Riserve Naturali Statali, in attesa del loro trasferimento alle Regioni previsto dalla più recente legislazione nazionale (Legge Quadro n° 394/91), è attualmente affidata al Ministero delle Politiche Agricole e Forestali.

Tuttavia, a tali competenze specifiche se ne sovrappongono molte altre, territoriali e settoriali, che vedono coinvolte nella gestione numerosi Enti pubblici, previ accordi con privati per le zone di loro proprietà, quali:

- Corpo Forestale dello Stato (Ministero per le Politiche Agricole) per la conservazione della natura (RNS: Sacca di Bellocchio e Foce del Reno);
- Capitaneria di Porto (Ministero dei Trasporti e Infrastrutture) per il litorale ed il mare aperto;
- Esercito Italiano (Ministero della Difesa) per il poligono militare;
- Regione Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale (PTR, PTRP);
- Provincia di Ferrara per la pianificazione territoriale (PTCP), la pianificazione faunistico-venatoria e la regolamentazione della pesca e dell'agricoltura;
- Provincia di Ravenna per la pianificazione territoriale (PTCP), la pianificazione faunistico-venatoria e la regolamentazione della pesca e dell'agricoltura;

- Parco del Delta del Po per la pianificazione territoriale delle zone del parco (PTP), per la conservazione della natura, per la regolamentazione delle attività antropiche e la gestione del canale adduttore Gobbino;
 - Comuni di Comacchio e Ravenna per la pianificazione territoriale (PRG);
 - Sovrintendenza ai Beni Culturali e Ambientali;
 - Servizio Provinciale Difesa del Suolo per l'assetto idrogeologico del Reno;
 - Servizio Tecnico di Bacino Po di Volano e Reno;
 - Autorità di Bacino del Reno;
 - Consorzi di Bonifica per la gestione rete scolante ed irrigua;
 - Privati: alcuni proprietari di frazioni delle Vene settentrionali di Bellocchio, e un solo proprietario terriero per tutta la parte meridionale delle Vene di Bellocchio;
 - Imprenditori e privati per l'itticoltura estensiva, la caccia, l'agricoltura e l'ospitalità turistica.
- Spesso però, insorgono notevoli contrasti tra le esigenze di conservazione e quelle di produzione. Ciò è soprattutto causato da questa settorialità, che determina la mancanza di una visione unitaria dei problemi inerenti la salvaguardia delle caratteristiche ambientali.

Articolazione delle zone territoriali del Parco

Il Piano Territoriale del Parco precisa l'articolazione di zone omogenee in relazione agli usi funzionali e produttivi. Nel Piano sono distinte le seguenti zone (L. R. n° 11/88 art. 7):

- **Zona A** di protezione integrale, nella quale l'ambiente naturale è protetto nella sua integralità. In tale zona è consentita l'osservazione a scopi scientifici e didattici, previa autorizzazione dell'ente di gestione del parco.
- **Zona B** di protezione generale, nella quale: suolo, sottosuolo, acque, vegetazione e fauna sono rigorosamente protetti. E' vietato costruire nuove opere edilizie, ampliare costruzioni esistenti ed eseguire opere di trasformazione del territorio che non siano specificamente rivolte alla tutela dell'ambiente e del paesaggio. Sono consentite le attività agricole, silvo-culturali, zootecniche non intensive, agrituristiche nonché le infrastrutture necessarie al loro svolgimento.
- **Zona C** di protezione ambientale. Tali zone sono finalizzate all'assorbimento dei residui effetti indotti dalle zone antropizzate, esterne al parco, a protezione ulteriore delle zone A e B. Sono consentite attività agricole, forestali, zootecniche non intensive ed altre attività compatibili, nel rispetto delle finalità generali e della normativa del parco. Sono consentite le costruzioni e le trasformazioni edilizie compatibili con la valorizzazione dei fini istitutivi del parco e delle attività consentite.
- **Zona di pre-parco.** In tale area il Piano Territoriale del Parco disciplina le attività economiche, sociali, ricreative, sportive e culturali in modo tale che non siano in contrasto con i fini fondamentali del Parco.

La parte ferrarese delle Vene di Bellocchio (circa 250 ha) e parte del Poligono Militare (circa 50 ha), sito in foce Reno, sono all'interno del Parco Regionale del Delta del Po, mentre l'area ravennate delle Vene (circa 220 ha) è una zona di pre-parco.

E' possibile quindi osservare che il tratto di litorale esaminato non presenta zone di protezione integrale (A). Risulta pertanto evidente che il grado di tutela varia passando da zone di protezione generale (B), a zone di protezione ambientale (C), fino ad arrivare a zone di pre-parco, in accordo con le vocazioni ambientali o antropiche (Fig. 2).

Stato di protezione

Oltre all'articolazione precedentemente vista, l'area studiata presenta ulteriori vincoli, talvolta in sovrapposizione a quelli delle zone sopra descritte, e che presentano normative di seguito esposte.

La Sacca di Bellocchio è Zona Ramsar (D.M. 09/05/1977).

La Convenzione Internazionale di Ramsar, tenutasi in Iran, il 02/02/1971, ha indicato i criteri per identificare le zone umide di importanza internazionale, al fine di impedire la perdita e l'impoverimento progressivo delle suddette zone e rispettare il loro valore ecologico, economico, culturale, scientifico e ricreativo. E' stata recepita in Italia con il D.P.R. 13/03/1976 n. 448.

Le Vene e la Sacca di Bellocchio, la foce del fiume Reno e la Pineta litoranea sezione Bellocchio, (circa 2025 ha) sono state individuate come Zone di Protezione Speciale (Z.P.S.) e Siti di Importanza Comunitaria (p.S.I.C.) D.M. 03/04/2000 (fig. 3).

Le Zone di Protezione Speciale sono aree ad elevato interesse ornitologico internazionale, designate ai sensi della direttiva 79/409/CEE, nota come "Direttiva Uccelli". Gli obiettivi di conservazione si riferiscono alle specie ornitiche, agli habitat che ne consentono la vita nelle diverse fasi (alimentazione, accoppiamento, nidificazione, cure parentali) e all'utilizzo dell'area (riproduttivo, di svernamento, di sosta).

I Siti di Importanza Comunitaria, designati ai sensi della direttiva 92/43/CEE denominata "Habitat", sono aree che, nelle regioni biogeografiche di appartenenza, contribuiscono a mantenere od a ripristinare un tipo di habitat naturale (di cui all'allegato I della direttiva) o una specie della flora o della fauna selvatica (di cui all'allegato II della direttiva) in uno stato di conservazione soddisfacente per favorire il mantenimento della biodiversità nelle zone in questione.

Tali direttive hanno lo scopo di costituire una "Rete ecologica europea coerente di zone speciali di conservazione", che viene chiamata Natura 2000.

Infine, sono Riserva Naturale dello Stato: la Sacca di Bellocchio (D.M. 09/02/1972), la foce del fiume Reno (D.M. 16/03/1981), la Pineta di Ravenna (D.M. 13/07/1977) e la duna costiera di Porto Corsini (D.M. 15/04/1983).

Le Riserve Naturali Nazionali (Legge Quadro n° 394/91) sono costituite da aree terrestri, fluviali, lacuali o marine che contengono una o più specie naturalisticamente rilevanti della flora e della fauna, ovvero presentino uno o più ecosistemi importanti per le diversità biologiche o per la conservazione delle risorse genetiche.

Le riserve naturali possono essere statali o regionali in base alla rilevanza degli interessi in esse rappresentati.

Il decreto istitutivo delle riserve naturali statali, oltre a determinare i confini della riserva ed il relativo organismo di gestione, ne precisa le caratteristiche principali, le finalità istitutive ed i vincoli principali. Stabilisce altresì indicazioni e criteri specifici cui devono conformarsi il piano di gestione della riserva ed il relativo regolamento attuativo. Il piano di gestione della riserva ed il relativo regolamento attuativo sono adottati dal Ministro dell'Ambiente entro i termini stabiliti dal decreto istitutivo della riserva stessa, sentite le regioni a statuto ordinario e d'intesa con le regioni a statuto speciale e le province autonome di Trento e Bolzano.

La gestione delle riserve naturali istituite su proprietà dello Stato, che ricadono o vengono a ricadere per effetto dell'istituzione di nuovi parchi nell'ambito di un parco nazionale, spetta all'Ente parco.

L'affidamento è affettuato mediante provvedimento di concessione predisposto dal Ministro dell'Ambiente, d'intesa con il Ministro delle Politiche Agricole e Forestali. In caso di mancata intesa si provvede con decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri entro due anni dall'istituzione dell'Ente parco. Le riserve biogenetiche ed i territori delle riserve parziali destinati ad attività produttive sono affidati alla gestione del Corpo Forestale dello Stato.

Principali forme di utilizzo ed eventuali conflittualità

Tra le attività principali praticate nei territori in esame, vanno sicuramente citate l'itticoltura estensiva, l'attività venatoria, la pesca (ricreativa e professionale), il turismo balneare e l'agricoltura estensiva. Le Vene di Bellocchio sono un complesso di stagni salmastri e barene posti in una ampia depressione parallela alla costa, ad est della ss. Romea (250 ettari circa). Il rifornimento idrico avviene tramite il Canale Bellocchio-Canale delle Vene, canale che è in comunicazione con il mare attraverso il Logo-

novo. I bacini sono di proprietà privata e sono gestiti direttamente o dati in comodato per l'esercizio della pesca. Nel tratto ferrarese delle Vene sono presenti tre piccole aziende, tutte a conduzione familiare, in cui sono occupate circa 10 persone. In queste viene effettuata la pesca e l'itticoltura estensiva (per un totale di 100 ettari circa) (Pagnoni, 2001).

A nord di Ravenna, invece, si trova il comprensorio costituito dalla Piallassa della Baiona e del Piombone, comprende all'incirca 1800 ettari di zone umide, collegate al mare dal Canale Candiano e dalla bocca di porto. La Piallassa della Baiona (1307 ha) è di proprietà del Comune di Ravenna che si occupa anche della sua gestione. Nella Piallassa è presente un uso civico di pesca (ai sensi del Regolamento approvato dal Consiglio Comunale con deliberazione n.114/28819 del 13/07/1999 e modificato con deliberazione n.147/36918 del 01/08/2000) per il quale attualmente circa 70 pescatori di mestiere utilizzano l'area per la raccolta di molluschi (*Tapes philippinarum*) e, in minor misura, per la pesca di specie ittiche (Pagnoni, 2001).

Va in ogni caso detto che i capanni da pesca presenti in tali aree sono numerosi ed in parte sprovvisti di regolare concessione (Fig. 4).

Vi è inoltre da considerare che la pesca ricreativa è assai dannosa, poiché il numero di impianti fissi con reti a bilancia è cospicuo, e può pregiudicare la crescita naturale delle specie eurialine come l'Anguilla di fiume (*Anguilla anguilla*), il Latterino (*Atherina boyeri*) e la Passera (*Platichthys flesus*) (Costa, 1999).

I bilancioni, situati lungo il fiume Reno, hanno anche un forte impatto sulla Cheppia (*Alosa fallax*, allegato II direttiva 92/43/CEE). La Cheppia, non riconosciuta come specie protetta, viene pescata sotto misura e durante il periodo di divieto generale che corrisponde alla sua risalita.

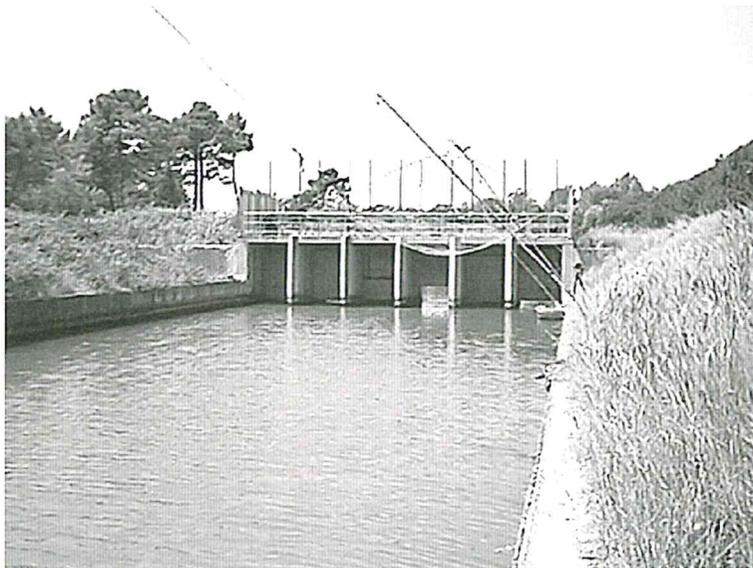


Figura 4 - Bilancione presso una chiavica.

In tale sito sono segnalati episodi di bracconaggio, mentre nella zona litoranea e alla foce del fiume Reno è frequente la raccolta abusiva di molluschi e la pesca di frodo, che causano un notevole danno all'avifauna presente. Ancora maggiore è il disturbo arrecato dai bagnanti che frequentano le spiagge, condizionando negativamente alcune specie nidificanti, come la Beccaccia di mare (*Haematopus ostralegus*) e il Fratino (*Charadrius alexandrinus*).

La caccia è praticata in tutta la parte ravennate delle Vene di Bellocchio pur con una bassa pressione venatoria.

Per quel che riguarda il turismo è difficile quantificare le presenze in quanto, i dati raccolti presso gli enti preposti fanno riferimento esclusivamente alle presenze registrate presso le strutture alberghiere e i camping, mentre prevale una forte componente di pendolari.

L'agricoltura è esercitata essenzialmente nelle aree confinanti con le zone umide. Questa attività condiziona fortemente lo stato di conservazione, influenzando negativamente la qualità delle acque a causa dell'eutrofizzazione provocata dai fertilizzanti, dai reflui zootecnici e dall'inquinamento provocato dai pesticidi. Anche la quantità delle acque ne risente, data l'elevata quantità prelevata per soddisfare i bisogni irrigui.

Inoltre, le esercitazioni militari presso il Poligono danneggiano la vegetazione e le morfologie litoranee (ambienti aridi retrodunali e dune costiere).

Infine, non si può omettere il deturpamento paesaggistico della costa, che è stato condizionato dalla presenza di centri balneari ricettivi e dal posizionamento di strutture (tubi longard), atte a contrastare, seppur con scarsi risultati, l'arretramento della linea di riva (Fig. 5).



Figura 5 - Un tentativo di protezione della costa mediante sacconi e tubi Longard.

La gestione integrata

Come si evince da quanto precedentemente detto, la complessa gestione e pianificazione del territorio, è affidata a numerosi Enti e soggetti non coordinati e spesso titolari di competenze relative alla stessa materia, ma non comunicanti tra loro. Tutto ciò rende difficile e particolarmente complesso un approccio di gestione integrata per la conservazione delle zone umide, ma anche lo stabilirsi di relazioni causa-effetto tra interventi effettuati e condizioni ambientali. Inoltre, gli strumenti di programmazione adottati dai diversi soggetti e le modalità della loro attuazione sono talvolta addirittura contrastanti.

La presenza di un Parco "forte", cioè di una struttura qualificata ed autorevole in grado di svolgere un ruolo attivo, sia propositivo che autorizzativo, potrebbe concorrere a risolvere i problemi di frammentazione delle competenze, realizzando una sorta di "regia" per le attività gestionali nel territorio del Delta del Po (Rapporto finale, Progetto Wetlands, 2001).

Il Parco deve essere in grado di mediare le diverse esigenze che animano questi territori, senza però perdere di vista i bisogni occupazionali dei cittadini determinati dalla presenza di attività produttive. La gestione integrata dell'ambiente e degli habitat umidi, in particolare, è certamente la strada da percorrere per raggiungere gli obiettivi di conservazione e sviluppo sostenibile prefissati (Agenda 21), ma sono ancora molti i problemi da risolvere a livello locale.

Il concetto di sviluppo sostenibile costituisce uno dei principi fondamentali nella definizione delle future politiche economiche, ambientali e sociali su scala globale, nazionale e regionale. Per sviluppo sostenibile si intende uno sviluppo in grado di soddisfare le esigenze delle generazioni attuali, senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie. In altri termini, si tratta di conciliare efficienza economica, equità sociale ed uso durevole delle risorse ambientali. Alle volte la mancata approvazione di Programmi di Sviluppo Socio-Economico può provocare un diffuso malcontento nelle comunità, che vedono applicare solo i divieti senza che si realizzino nuove opportunità economiche e si incentivino le attività alternative. Ecco perché la moderna politica di salvaguardia e risanamento ambientale deve prevedere l'elaborazione di progetti atti a perseguire il massimo livello di integrità ambientale, congiuntamente al rilancio economico del territorio, in una logica di sviluppo sostenibile.

Occorre, pertanto, passare da "piani urbanistici" tradizionali a "programmi di gestione integrata", dove agli strumenti di protezione ecologica si devono affiancare programmi di tutela e valorizzazione delle eredità culturali, sempre valutando la compatibilità e la convergenza degli obiettivi strategici generali.

Attraverso le molteplici attività-compatibili ogni area protetta costituisce un importante strumento di benessere e ha lo scopo di gestire in modo ottimale le risorse naturali per la conservazione dell'ambiente nella sua interezza. L'obiettivo verso il quale occorre impegnare maggiori energie è rappresentato dal coinvolgimento meno formale e più sostanziale delle popolazioni, che nel Parco vivono ed operano. Tale coinvolgimento dovrebbe spaziare dalla diffusione della conoscenza dei valori ambientali e culturali del territorio, alla comprensione degli obiettivi di uso durevole. Questi obiettivi sottendono la regolamentazione delle attività produttive e delle conseguenze determinate da un uso non appropriato delle risorse, sino alle potenzialità occupazionali che potrebbero derivare dalle scelte di conservazione e di sviluppo ecocompatibile.

Conclusioni

Appare evidente, che i territori esaminati sono luoghi in cui la presenza antropica ha determinato un forte impatto: trovare lembi di natura non manipolati dall'uomo risulta un'impresa ardua. Queste zone costituiscono, di fatto, un sistema artificiale che interagisce con quello naturale, la qualità di queste interazioni a gradi diversi è l'immagine culturale di chi "governa".

Nonostante ciò tali ambienti, se pur trasformati ed in continua evoluzione, risultano unici.

E' chiaro che l'obiettivo principale al quale tendere è soddisfare le esigenze economiche (produrre reddito) nel rispetto e nella salvaguardia ambientale.

Da qui, scaturisce l'importanza di analizzare la presenza e l'evoluzione di habitat prioritari, intesi come luoghi con caratteristiche naturali non riproducibili. E' fondamentale, infatti, effettuare delle ripermetrazioni di tali aree per una suddivisione in funzione dei loro pregi, che renda possibile la creazione di una "zonazione" finalizzata ad una gestione territoriale in grado di integrare le esigenze antropiche e la tutela ambientale.

E' necessaria un'analisi delle normative gestionali delle aree da salvaguardare, per elaborare dei regolamenti che tengano conto di parametri compensativi e vincoli per le zone di diverso interesse naturalistico. Ciò consentirebbe di creare delle normative specifiche che da un lato salvaguardino l'ambiente, ed al tempo stesso individuino delle zone di compensazione in cui vengano prese in considerazione le esigenze della popolazione.

Ciò evidenzia l'importanza di elaborare dei progetti di gestione integrata per affrontare il problema della conservazione di tali zone agendo contemporaneamente su diversi fronti (scientifico, culturale, formativo, socio-economico, normativo e gestionale) e a diversi livelli (regionale, provinciale e comunale) in base alle competenze.

E', infatti, importante considerare che le aree protette, se ben gestite, possono essere molto importanti anche dal punto di vista socio-economico, basti pensare alla sempre crescente tendenza all'eco-

turismo. Questo aspetto potrebbe rappresentare una notevole fonte di reddito alternativa a quelle esistenti e permettere una diversificazione dell'economia locale.

Ringraziamenti

Gli autori esprimono un sentito ringraziamento al Prof. U. Simeoni per la revisione critica del testo, al Dr. U. Tessari ed al Dr. F. Zanni per i preziosi suggerimenti impartiti durante la stesura.

Un particolare ringraziamento al Dr. N. Bonora per il continuo e prezioso scambio d'idee e per il supporto tecnico.

Un doveroso ringraziamento va rivolto al Prof. P. Fabbri per la disponibilità offerta, alla Dott.ssa E. Cavalieri ed alla Dott.ssa F. Ravalli, che in vario modo hanno collaborato durante lo svolgimento della ricerca.

Lo studio è stato condotto nell'ambito del "Progetto Bellocchio" finanziato dal Consorzio del Parco del Delta del Po emiliano-romagnolo, e supportato dai progetti Cofin2000 e CNR-GNDICI (Linea 2, Unità Operativa 51).

Bibliografia

Costa, M. (1998) - *L'analisi faunistica per il Piano Territoriale*. In "Il Piano Territoriale del Parco: analisi faunistica e flogistico-vegetazionale", Atti della Giornata di studio Qualità Ambientale nel Parco del Delta del Po, 11 Dicembre 1997, Palazzo Bellini, Comacchio, Consorzio del Parco Regionale del delta del Po. Pp 113-124.

Costa, M. (1999) - *Zone umide Costiere della Regione Emilia-Romagna*. Progetto "Integrated Management of Wetlands", Interreg. II C – CADES (1997/1999), Parco Regionale del Delta del Po. Pp 35-43.

Pagnoni, G. A. (2001) - *Le aziende di pesca e acquicoltura nel Parco del Delta del Po*. In: Parco Regionale del Delta del Po, Regione Emilia-Romagna. Integrated management of Wetlands, Programma Interreg. II C 1997/1999, Measure E "Prudent Management and development of natural and cultural Heritages" European Commission DG XVI. Pp 33-38, 43-44.

Piccoli F., Gerdol R., Frugis S. e Vicini G. (1990) - *Il Parco del delta del Po, studi ed immagini. L'ambiente come risorsa*. Spazio libri Editori. Ferrara. Pp. 87-107.

Pogetto Wetlands (2001) - *Gestione integrata di zone umide*. Rapporto finale. Interreg. C - CAADES. Misura E - Oculata gestione e sviluppo del patrimonio naturale e culturale. Pp. 21-36.

Riferimenti normativi

Legge Regionale Emilia-Romagna n° 27/88 Bollettino ufficiale della Regione Emilia-Romagna n° 63 del 7/7/1988.

Direttiva 79/409/CEE Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee 25/04/'79 N. L. 103/1.

Direttiva 92/43/CEE Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee 22/07/'92 N. L. 206/7.

Legge Regionale Emilia-Romagna n° 3/99 Bollettino ufficiale della Regione Emilia-Romagna n°52 del 26/04/1999.

Delibera Giunta Regionale n° 1626 del 13/07/2001 – Intranet Regione Emilia-Romagna.

Delibera Giunta Regionale n° 2282 del 17/11/2003 – Intranet Regione Emilia-Romagna.

Legge Quadro n° 394/91 Supplemento ordinario Gazzetta Ufficiale 13 dicembre 1991 n°292.

Legge Regionale Emilia-Romagna n° 11/88 Bollettino ufficiale della Regione Emilia-Romagna n° 32 del 7/4/1988.

Decreto del Presidente della Repubblica 13/03/1976 n°448 Gazzetta Ufficiale 15 maggio 1976 n° 111.

Manoscritto ricevuto l' 11/6/2002, accettato il 23/12/2003.

Studio geomorfologico-ambientale dell'area costiera del comune di Taranto compresa tra Capo S. Vito ed il limite comunale di Leporano

Tesi di laurea di: **Lea Romaniello**

Relatore: **Giuseppe Mastronuzzi**

Correlatore: **Gianfranco D'Onghia**

Università degli Studi di Bari, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Corso di Laurea in Scienze Ambientali - Anno Accademico 2002-2003.

Il lavoro sperimentale di seguito presentato ha permesso di quantificare il valore e la vulnerabilità, ai fini della definizione del rischio geologico, in un'area fortemente antropizzata della fascia costiera del Golfo di Taranto, tra Capo San Vito ed il limite comunale di Leporano, a sud del capoluogo.

Le componenti del paesaggio analizzate sono state quelle geo-litologiche e geomorfologiche, quelle vegetazionali e faunistiche, quelle architettoniche e paesistiche. L'area in esame è stata suddivisa in 15 lotti: i lotti sono stati scelti in base a caratteristiche omogenee e sono stati denominati nello specifico EU cioè Environmental Unit, secondo la definizione utilizzata nel progetto MaREP (Marine Reserve Evaluation Procedures): *“porzione di fascia costiera all'interno della quale le caratteristiche ambientali, quali esposizione al moto ondoso, substrato roccioso, aspetti biologico – naturalistici e situazioni di degrado, sono alquanto omogenee su larga scala”*. La metodica utilizzata in tale progetto è basata sulle Habitat Evaluation Procedures (HEP) volte alla valutazione della qualità ambientale ed utilizzate nei programmi di gestione territoriale e nella pianificazione di interventi sulla fascia costiera. Il procedimento di selezione di tali EU consiste nella suddivisione di un territorio eterogeneo in porzioni, o strati, più omogenei, reciprocamente esclusivi e collettivamente esaustivi.

Caratteristiche geomorfologiche e vulnerabilità del territorio

La vulnerabilità è stata calcolata per ogni EU considerando i parametri geomorfici rilevati sul terreno e mediante la ricostruzione di eventi distruttivi verificatisi lungo il litorale (mareggiate eccezionali, tsunami, crolli della falesia).

Il tratto costiero esaminato corrisponde alla zona in cui i depositi biocalcarenitici ben cementati dei terrazzi marini del Pleistocene superiore (Tirreniano) sono disposti a mantello fra loro e sovrapposti alle unità argilloso-siltose del Pleistocene Inferiore e medio. Esso è caratterizzato essenzialmente dalla presenza di coste rocciose digradanti a bassa velocità di arretramento. Su di esse sono incise piccole baie, corrispondenti a solchi d'incisione fluviale ripresi dall'erosione marina; delimitate da falesie in arretramento, alte sino a circa 10 m, queste ospitano pocket beach e i cinque stabilimenti balneari più importanti di questo tratto costiero.

Caratteristica dominante della fascia costiera in esame è l'alto grado di fratturazione del corpo biocalcarenitico. Ampia è infatti la diffusione di fratture longitudinali e trasversali rispetto alla linea di costa che si protraggono verso l'entroterra, delineando aree ad elevato rischio di crollo. Emblematico è l'esempio dell'Unità Ambientale “Grottaglia” (EU IX) dove sono riconoscibili fenomeni di dissesto recenti ed attivi (vedi figura). L'effetto carapace indotto dai depositi biocalcarenitici rallenta peraltro l'arretramento della linea di costa che invece è ben più veloce dove i depositi del basamento locale sono direttamente esposti all'azione del moto ondoso. All'alto grado di fratturazione e alla morfologia fluviale ereditata è quindi da imputare l'elevata articolazione della costa e il suo localizzato veloce arretramento in seguito alle sollecitazioni da parte del moto ondoso.



Evidenza di crollo recente conseguente a scalzamento alla base ad opera del moto ondoso il località Grottaglia (Taranto).

Altra evidenza significativa di vulnerabilità è sottolineata dalla presenza discontinua di grossi blocchi provenienti dall'immediato sopralitorale, distribuiti verso l'entroterra dalle più intense mareggiate e da tsunami storici registrati e riconosciuti anche grazie a testimonianze documentarie.

Il Valore del territorio

Il valore di ogni EU è stato calcolato sulla base di 7 categorie (numero di vite umane, edifici civili, aree militari, aree naturali, stabilimenti balneari, terreni coltivati, aree di parcheggio) scelte in funzione delle caratteristiche dell'area e poi distinguibili con colori e simboli differenti sulla base topografica 1:5000. A questa scala è stata infatti realizzata una carta dell'uso del territorio nella quale è stato possibile individuare zone omogenee in base alle quali definire il valore dell'area. Per zone omogenee si sono intese quelle con caratteristiche simili in termini di strutture balneari, tipologie di abitazioni (residenziali annuali o estive), aree naturali o terreni coltivati. Ad ogni categoria di ogni EU è stato dato un punteggio iniziale, ricavato sia per il periodo invernale che per quello estivo. Successivamente si sono scelti intervalli numerici ai quali assegnare un valore a partire da 10 (corrispondente al punteggio massimo trovato) fino ad arrivare a 0 (corrispondente al punteggio minimo). Da una media finale ricavata per ogni EU, si è ricavato un unico valore. Tale valore di tipo oggettivo (indicato come *valore 1*) è stato poi confrontato con un valore di tipo soggettivo (indicato come *valore 2*), ricavato moltiplicando il punteggio di ogni categoria per un coefficiente scelto in base alla priorità, puramente soggettiva, che alcune categorie hanno avuto rispetto ad altre. La quantificazione del valore, utilizzabile nel calcolo del rischio ambientale, è stata ottenuta confrontando i due valori con la carta dell'uso del suolo e del territorio realizzata per la fascia costiera in esame.

Vulnerabilità del sito costiero

Nel calcolo della vulnerabilità sono state considerate sette componenti che potessero descrivere al meglio le caratteristiche geomorfologiche del sito: ampiezza della costa rocciosa, ampiezza delle pocket beach, numero totale di fratture trasversali e longitudinali, altezza delle falesie, peso dei blocchi, distanza dei blocchi dalla linea di costa. Anche in questo caso è stato assegnato un punteggio finale che ha quantificato l'importanza della vulnerabilità per le 15 EU in cui è stato suddiviso il tratto costiero. La scelta di queste componenti è dovuta alla volontà di correlare la percentuale di territorio perdibile, ad elementi del paesaggio naturale che potrebbero contribuire alla diffusione di un danno.

Completano la tesi la stesura di una carta dell'uso del suolo e del territorio, di una carta della dinamica geomorfologica, e di una carta della vulnerabilità, tutte prodotte in scala 1:5000.

Studio di una *pocket beach* nella costa orientale della Sardegna con applicazione di due macro-modelli

Tesi di laurea di: **Simonetta Ornello**

Relatore: **Leopoldo Franco**

Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Idraulica
- Anno Accademico 2002-2003.

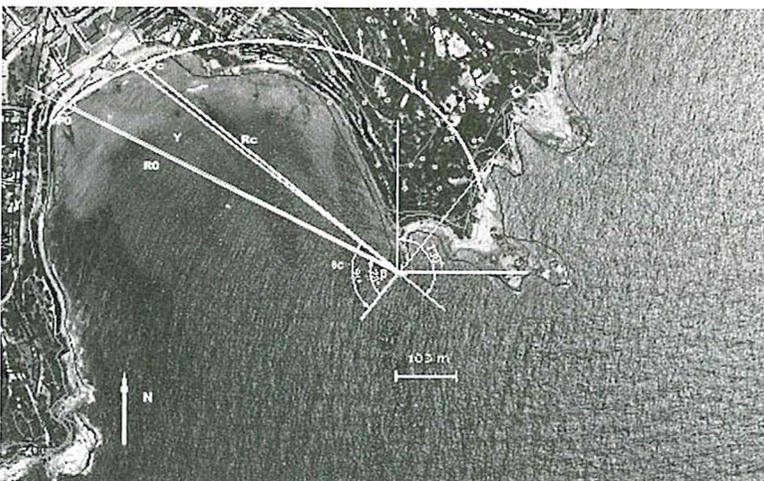
Oggetto di studio della tesi di laurea è stata l'analisi della morfodinamica della spiaggia alveolare (o crenulata, o "pocket beach") di Porto Frailis (Arbatax), ubicata sulla costa orientale della Sardegna. Essa si presenta come una spiaggia di sabbia grossolana ($D_{50} = 0.42$ mm) incastonata tra alti promontori rocciosi che si estendono in mare per una lunghezza di circa 500 m. Il fondale all'imboccatura della baia è di circa 10 m. E' rivolta a mezzogiorno ed il suo equilibrio è quindi influenzato da onde provenienti da sud,sud-est.

In base alla sua particolare conformazione geografica il modesto trasporto di sedimenti è confinato all'interno della baia.

Al fine di determinare la condizione di equilibrio della linea di riva a lungo termine sono stati utilizzati due modelli empirici. L'applicazione di questi fornisce l'andamento della linea di riva nel caso in cui questa sia stata erosa fino alla posizione limite ed in cui le onde entranti siano riflesse e diffratte all'interno della baia e frangano simultaneamente intorno all'intero perimetro.

Il primo modello, quello a spirale logaritmica, fu elaborato da Silvester nel 1970. In base ad esso la spiaggia crenulata segue, in condizioni di equilibrio, un andamento a spirale equiangolare. Il centro di essa è posizionato nel punto più estremo del promontorio maggiormente esposto al moto ondoso, o poco vicino.

Il secondo modello, quello parabolico, fu elaborato nel 1989 da Hsu ed Evans e successivamente migliorato da Gonzalez e Medina nel 2001. In base ad esso la spiaggia crenulata segue, in condizioni di equilibrio, un andamento parabolico.



Applicazione del macro-modello di Gonzalez e Medina alla spiaggia alveolare di Porto Frailis (la fotogrammetria utilizzata è stata commissionata dal Servizio di Vigilanza Edilizia per la Regione Sardegna).

A differenza del precedente modello quest'ultimo tiene conto della granulometria e della direzione di provenienza del moto ondoso. Essa viene fatta coincidere con la risultante del flusso d'energia medio esistente nei pressi della spiaggia.

L'applicazione del secondo modello si basa sull'utilizzazione di un metodo iterativo che fa uso di grandezze geometriche e della formula ad andamento parabolico.

Per la sua applicazione al sito in esame è stato necessario condurre precedentemente una serie di indagini. La tesista ha eseguito in proprio, durante l'estate 2003, alcuni rilievi fotografici e topografici, nonché la raccolta di campioni di sedimento, le cui analisi granulometriche sono state da lei condotte all'Università. Inoltre è stato ricostruito il clima ondoso al largo di Porto Frailis, con differenti metodologie: trasposizione geografica delle registrazioni ondometriche della nuova boa di Capo Comino (66 km a nord di Porto Frailis); dati da satellite (1991-96); metodo SMB applicati ai dati anemometrici di Capo Bellavista (1980-97), con il calcolo dei fetch efficaci.

Considerata una direzione di incidenza dell'onda morfologica pari a 130° N è stata individuata in prima analisi la distanza (Y) tra il punto del promontorio orientale maggiormente esposto al moto ondoso e la tangente al tratto terminale della parabola (per la prima volta il punto terminale, P_0 , viene ipotizzato). Successivamente è stata calcolata la distanza reale e quindi i parametri geometrici che la descrivono.

Di seguito è riportata l'applicazione del modello di Gonzalez e Medina alla pocket beach di Porto Frailis (vedi figura). Come si può osservare l'andamento della linea di riva coincide abbastanza bene con quello parabolico, ciò testimonia lo stato di equilibrio della spiaggia.

Analisi dei fenomeni erosivi delle dune di sabbia di Rottnest Island (Australia occidentale)

Tesi di laurea di: **Chiara Danese Galano**

Relatori: **Giuliano Rodolfi, Ian Eliot**

Correlatore: **Ugo Galligani**

Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Agraria, Corso di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali
- Anno Accademico 2002-2003.

L'obiettivo della tesi è quello di identificare e descrivere i maggiori processi erosivi che colpiscono la costa dell'isola con particolare attenzione rivolta ai sistemi dunari. Lo scopo del mio studio è quello di fornire una classificazione delle spiagge in base al grado di erosione e una classificazione delle spiagge in base alla priorità d'intervento per il contenimento del fenomeno erosivo.

Rottnest Island è un'isola situata nell'Australia occidentale ed è caratterizzata da un sistema costiero eterogeneo alternato da spiagge e cordoni dunari di varia natura e morfologia modellati dall'azione vento, dal moto ondoso e dall'uomo. Il sistema costiero risulta così in continuo cambiamento, alternato da processi di arretramento della linea di riva (erosione costiera), soprattutto nelle aree abitate e da processi di accumulo di sedimenti (*blowouts*, Fig.1).



Figura 1 - Blowout in Salmon Bay nel 1998, Rottnest Island (Fotografia aerea Rottnest Island Authority, Fremantle; Concessione DOLA, Perth).

I principali responsabili dell'erosione delle spiagge sono in estate, i venti estivi di forte intensità provenienti da sud-ovest (*seabreeze*) e in inverno i venti provenienti da nord-ovest. La presenza della barriera corallina attorno a tutta l'isola condiziona notevolmente l'energia e l'andamento del moto ondoso che riesce a giungere sulla costa in maniera incisiva solo nei mesi invernali durante le mareggiate e sempre con lo stesso angolo d'incidenza. Questo fenomeno innesca trasporto da nord a sud di materiale sabbioso con conseguenze negative sul bilancio delle spiagge collocate nella parte a nord dell'isola nelle quali si verifica un consistente arretramento della linea di riva. Il fenomeno erosivo in questi tratti è tanto marcato da interessare anche il cordone dunare e quin-

di la stabilità delle abitazioni costruite direttamente sulle *foredunes*. La presenza di opere marittime come moli e pennelli ortogonali, eretti in passato per ridurre l'arretramento della linea di riva, ha ridotto il fenomeno erosivo solo in parte o in alcuni tratti della costa ma in generale non hanno dato risultati sufficienti.

Al fine di giungere alla comprensione della dinamica globale del sistema dunare si è proceduto all'analisi dei tratti di costa caratterizzati da un elevato grado di erosione o da processi morfodinamici

maggiormente rappresentativi mediante: a. l'esame dei vari fattori che agiscono sulla stabilità della costa (fattori ambientali e antropici) e le conseguenze di essi sul sistema dunare; b. allo studio delle condizioni morfologiche d'insieme e di dettaglio; c. all'analisi dell'evoluzione del sistema dunare dal 1941 ad oggi. c. all'analisi della granulometria di campioni compositi di spiaggia sommersa. Per ogni spiaggia sono stati effettuati più profili trasversali lungo i quali si è proceduto alla raccolta dei campioni di sabbia e allo studio della densità di vegetazione. Il periodo di raccolta dati ha avuto la durata di 6 mesi. I dati raccolti sono stati integrati con l'elaborazione di foto aeree, di dati storici (disponibili dal 1940 ad oggi), di carte tematiche e con tecniche di monitoraggio eseguite con la strumentazione messa a disposizione dal Dipartimento di Geografia di Perth e finanziate dalla RIA (Ente locale per la protezione della costa).

I dati ottenuti dall'analisi del sistema dunare ha permesso di *classificare le spiagge in base al grado di vulnerabilità* (A.T. Williams 2001). Per ogni spiaggia sono state compilate delle schede descrittive (con parametri qualitativi e quantitativi) specifiche per il calcolo degli indici della vulnerabilità. La classificazione prevede la comparazione fra il grado di erosione in cui versano le spiagge e il livello di protezione e tutela delle stesse da parte dell'autorità preposta alla loro gestione (Fig.1) e l'attribuzione alle stesse di indici di grado di rischio: H (high), M (moderate), L (low).

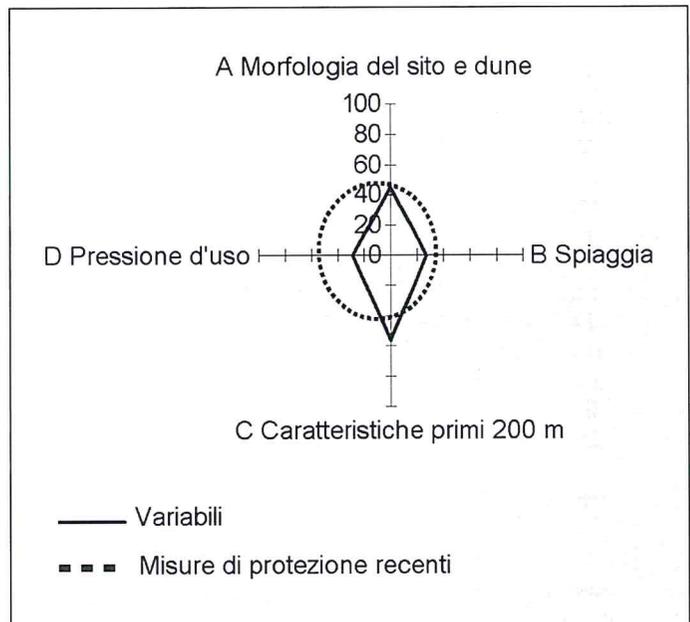


Figura 2 - Vulnerabilità e misure di protezione di Salmon Bay 15, dalla Main root checklist. Il cerchio rappresenta le misure di protezione adottate e il poligono rappresenta il grado di vulnerabilità del sistema.

**A – Morfologia del sito e dune,
B – Spiaggia,
C – Caratteristiche primi 200 m dal piede della duna verso il mare,
D – Pressione d'uso.**

Un'ulteriore analisi del sistema è stata effettuata prendendo in considerazione le spiagge soggette a maggiore pressione antropica dove sono presenti opere di difesa di tipo rigido (pennelli ortogonali, difese aderenti) valutate oggi di debole o scarsa efficacia. La classificazione in *base alla priorità d'intervento* delle spiagge di Rottnest Island ha quindi permesso di individuare le aree che necessitano operazioni di difesa immediate e di ipotizzare delle nuove strategie per la riduzione del fenomeno erosivo.

La tesi di laurea è stata svolta con la collaborazione del Dipartimento di Geografia dell'Università di Perth (WA) e dell'Ente (RIA) preposto alla tutela di Rottnest Island quale Riserva Naturale Integrale.

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 o alla

Redazione di Studi costieri

c/o Dipartimento di Scienze della Terra

Via Jacopo Nardi, 2 - 50132 Firenze

Tel. 055 243486 - Fax 055 241595

E-mail: epranzini@unifi.it

o alla

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