

Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto

Serena Ferri¹, Filippo Pelliccia²,
Enzo Pranzini¹, Maria Grazia Rizzo¹ e Giovanni Vitale¹

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze.
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze. Tel.: 055 2479241, Fax: 055 2001618.

²Geo.Coste s.r.l., Via Ugo Corsi, 19 - 50100 Firenze

Riassunto

Il tratto settentrionale della spiaggia posta sopraflutto al porto di Marina di Carrara è soggetto ad una moderata erosione nonostante goda di questa posizione privilegiata; ciò è spiegabile con il ridotto input sedimentario del fiume alimentatore (F. Magra) e con l'irrigidimento della costa posta fra la foce e il porto, che è stata difesa con opere di ogni tipo.

Tra il Maggio ed il Giugno 2006 è stato oggetto di un ripascimento artificiale non protetto di circa 71.000 m³ di materiale proveniente da una cassa di espansione del Fiume Po, caratterizzato da dimensioni medie di 0.37 mm a fronte di un sedimento nativo di 0.5 mm.

I rilievi topografici della linea di riva, eseguiti mensilmente da Gennaio 2006 a Dicembre 2007, mettono in evidenza la forte espansione iniziale della spiaggia nel tratto alimentato e il graduale flusso dei sedimenti verso i settori posti sottoflutto.

Il confronto fra rilievi batimetrici eseguiti prima e dopo l'intervento mostra una forte variabilità morfologica spaziale e temporale, che rende difficile la correlazione fra l'intervento e l'evoluzione dei fondali.

L'elaborazione dei dati prodotti dalle analisi granulometriche effettuate su sedimenti raccolti nel corso di 3 campagne indica una modesta variazione tessiturale dei sedimenti di spiaggia emersa e di fondo. L'unico elemento significativo è costituito dall'incremento percentuale della classe modale dei materiali versati nelle distribuzioni granulometriche dei sedimenti del paraggio.

Il clima ondoso rilevato da un ondometro posizionato sotto costa su di un fondale di 14 m è stato caratterizzato da forti mareggiate anche nel periodo estivo, cosa che può giustificare, insieme alle ridotte dimensioni dei sedimenti utilizzati, la rapida redistribuzione dei materiali su tutto il tratto di litorale posto sopraflutto al porto.

Parole chiave: Marina di Carrara, ripascimento artificiale, Indice di stabilità, monitoraggio, morfodinamica costiera.

Abstract

The northern side of the beach located updrift from the harbour of Marina di Carrara experiences moderate erosion in spite of such a favourable position; this results from the reduction in the sedimentary input from the feeding river (R. Magra) and from the many defences that have been built on this part of the coast, south of the river mouth.

Between May and June 2006, an unprotected beach nourishment project was carried out with 71.000 m³ of medium

size sand coming from a flooding area along the Po River course. Mean borrow sediment size is 0.37 mm, finer than native sediments (0.50 mm in size).

Shoreline position was monitored through monthly surveys from January 2006 to December 2007. On average, beach expansion of 25 meters was verified in the sector under nourishment, but fill material soon moved downdrift triggering the expansion of nearby sectors.

Three bathymetric surveys performed during the study period show intense morphological variability, involving sediment volumes larger than the volume of sediment used in this nourishment project.

Sediment analysis performed on samples collected during bathymetric surveys, from the dry beach and the nearshore, show limited grainsize variability.

The frequency of the modal class of the borrow material (1.5 phi) gradually increased along downdrift sectors but limited offshore displacement is shown, except along the harbour breakwater, proving that sand can overpass the port.

Wave gauge data, collected offshore the harbour at 14 m water depth, indicates the severity of wave climate during the study period. Such high wave energy, together with the reduced size of the sediment used, could have been responsible for the distribution of fill sediments alongshore.

Keywords: *Marina di Carrara, nourishment, monitoring project, coastal morphodynamics, Stability Index.*

Introduzione

In Italia, nell'ultimo decennio, alcuni aspetti della gestione della fascia costiera hanno subito consistenti trasformazioni a seguito del passaggio di molte competenze dallo Stato alle Regioni. In particolare, la legge 183/89 (*Norme per la difesa del suolo*) delega alle Regioni le funzioni amministrative relative alla difesa delle coste, ed il successivo Decreto Legislativo 112/98 ha ulteriormente responsabilizzato Regioni ed Enti locali conferendo loro, oltre alla responsabilità del rilascio delle concessioni dei beni demaniali, anche la programmazione, la pianificazione e la gestione integrata degli interventi di difesa delle coste e degli abitati costieri.

Molte regioni hanno colto questa occasione per rivedere le strategie di difesa costiera precedentemente adottate dal Ministero dei Lavori Pubblici, facendo tesoro di quelle esperienze che si stavano conducendo non solo all'estero, ma anche in quelle regioni che precedentemente si erano dotate di leggi specifiche per intervenire direttamente per la protezione delle spiagge (Lazio, Emilia Romagna e Liguria) o che, grazie all'autonomia amministrativa, non erano state costrette a ricorrere agli organi centrali (Sicilia e Sardegna).

Tutto ciò ha coinciso, o ha favorito, il passaggio dalle difese rigide, con scogliere emerse, a difese più morbide, basate su ripascimenti artificiali e su strutture sommerse; a fianco di queste si sono sperimentate nuove tecniche, come quelle basate sul drenaggio artificiale delle spiagge.

La Regione Toscana ha recepito queste disposizioni (L.R. n. 88/98 e L.R. n. 91/98) e ha predisposto, nel 2001, il *Piano Regionale di Gestione Integrata della Costa ai fini del riassetto idrogeologico – PRGIC*, al fine di garantire la sostenibilità dello sviluppo economico delle aree costiere (Sargentini et al., 2004).

Successivamente, nel 2003, ha trasferito le competenze relative alla progettazione e realizzazione degli interventi di riequilibrio costiero alla province, assicurando una copertura finanziaria di 106 milioni di euro e assicurando un quadro conoscitivo approfondito ed omogeneo su tutto il litorale con una spesa di 1.5 milioni di euro. Inoltre, ha promosso uno studio volto ad identificare e quantificare i sedimenti eventualmente disponibili sulla piattaforma continentale ed idonei per il ripascimento artificiale, impegnando per questa attività altri 2 milioni di euro. Altri 500.000 euro sono destinati alla caratterizzazione dei sedimenti (Sargentini et al., 2004).

Caso unico in Toscana, il Comune di Carrara è stato identificato dalla Provincia di Massa Carrara come Ente attuatore di un intervento di difesa del litorale ed ha proceduto alla redazione di un progetto ed alla sua realizzazione. Il progetto, alla luce delle indicazioni presenti nel PRGIC, si è basato quasi esclusivamente sul ripascimento artificiale, rimandando la realizzazione di strutture di contenimento

ad una fase successiva, nel caso in cui si dimostri l'inefficacia del ripascimento libero. Lo studio qui presentato costituisce la fase iniziale del monitoraggio che il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze sta conducendo proprio per valutare l'efficacia dell'intervento e per contribuire alle proposte progettuali nell'eventualità di una ottimizzazione del progetto.

L'area di studio

La spiaggia di Marina di Carrara, che si estende per circa 1600 m fra la foce del Torrente Parmignola e il molo settentrionale del Porto di Marina di Carrara (Fig. 1), fa parte dell'unità fisiografica compresa fra Bocca di Magra e Livorno (Aiello et al., 1976).

Il clima meteomarinario al largo è stato ricostruito applicando un modello spettrale WAM di simulazione del moto ondoso e utilizzando come dati di input quelli elaborati dall'ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) di Reading, Inghilterra (Dip. Scienze della Terra, Unifi, DEAM, 2007).



Figura 1 - L'unità fisiografica della Toscana settentrionale (a sinistra) e la spiaggia di Marina di Carrara con il porto (a destra).

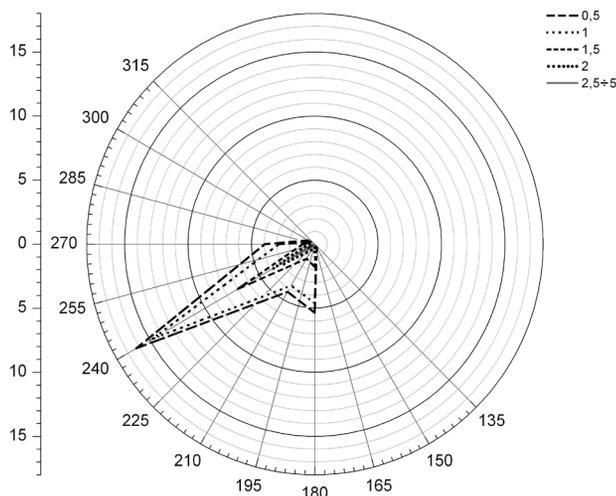


Figura 2 - Distribuzione direzionale del moto ondoso. La ridotta scala di stampa non permette di discriminare le frequenze di H_s comprese fra 2.5 e 5.0 m (dati ECMWF elaborati da DEAM, 2007).

Dalla Figura 2, che riporta la distribuzione direzionale del moto ondoso, si nota come la direzione intorno ai 240°N sia quella da cui provengono le mareggiate più frequenti e più intense. Sulla base di questi dati è stato valutato in 84.000 m³/anno il trasporto netto lungo costa immediatamente a sud della foce del Magra, ed in 62.000 m³/anno, sempre verso sud, all'altezza di Marina di Massa, subito a sud del Porto di Marina di Carrara.

La profondità di chiusura, calcolata con la formula di Hallermier (1977), dà un valore di 9.1 m per il periodo considerato (1992-2004) e di 13.5 m per un tempo di ritorno di 50 anni.

Il trasporto solido del Fiume Magra, che ha un corso lungo 62 km ed un bacino idrografico di 1693 km², è stato stimato in 632.000 t/anno (351.000 m³/a) da Cavazza, nel 1984, ma valutazioni più recenti indicano un valore di circa 125.000 m³/anno per quanto riguarda il trasporto in sospensione e 8.900 m³/anno sul fondo (Rinaldi, 2005).

L'analisi dell'evoluzione subita dalla linea di riva fra il 1878 e il 2006, effettuata dividendo il litorale in 13 settori (Fig. 3 e Tab. 1), mostra un forte arretramento delle spiagge poste in prossimità della foce del Magra (settori n. 1, 2 e 3) ed una progressiva riduzione dell'erosione procedendo verso sud, fino a che, al passaggio fra il settore n. 8 e il settore n. 9 non si ha una inversione del processo con una graduale espansione della spiaggia emersa. L'analisi temporale mette in evidenza come il processo erosivo sia partito dalla foce del Magra, per andare poi ad interessare un tratto costiero sempre più ampio. Prima dell'inizio dei lavori di costruzione del porto di Marina di Carrara (1920) l'erosione aveva raggiunto questa località (Albani, 1940), ma l'ostacolo costituito dalla diga di sovrappiutto nei confronti del flusso sedimentario determinò un'inversione della tendenza evolutiva ed una forte crescita della spiaggia posta a nord del porto. Complessivamente si sta verificando una rotazione della spiaggia che evolve verso una *zeta bay* (Yasso, 1965), con l'*updrift point* in corrispondenza del pennello di foce del Magra e il *downdrift point* nel porto di Marina di Carrara. Il punto di rotazione è coinciso, per molti anni, con la foce del Torrente Parmignola, che segna il confine fra la Liguria e la Toscana, ma negli ultimi tempi si è spostato verso sud, in conseguenza del ristabilirsi dell'erosione sul litorale di Marina di Carrara.

In territorio ligure, infatti, l'erosione è contrastata con varie opere di difesa (piattaforme isola, pennelli e scogliere parallele), che hanno contribuito alla riduzione dell'input sedimentario nel settore toscano, dove è ripreso quel processo erosivo che si era manifestato agli inizi del '900.

Il tratto più colpito dall'erosione è quello che si estende per circa 650 m a sud della foce del Parmignola (settori n. 9 e 10), dove fra il 1998 e il 2006 si è avuto un arretramento medio della linea di riva superiore ai 3 m/anno (Tab. 1).

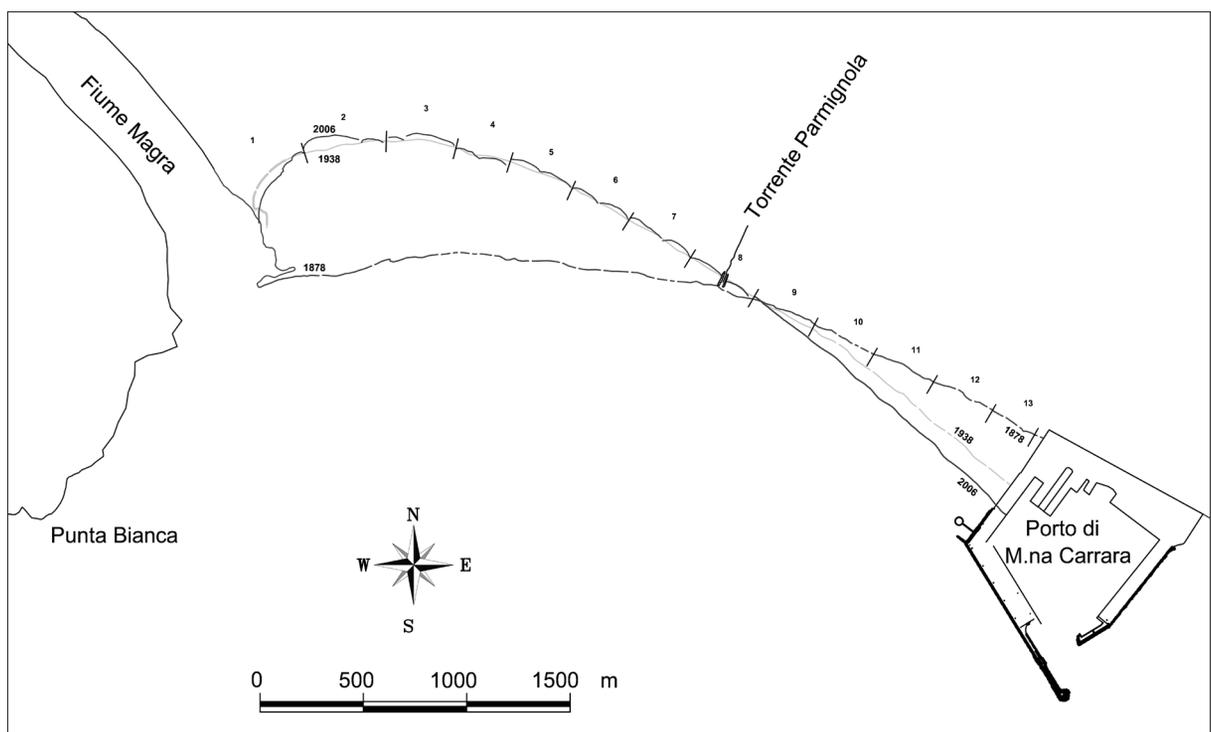


Figura 3 - Variazione della linea di riva sul lungo periodo e delimitazione dei 13 settori nei quali è stato suddiviso il litorale per lo studio della sua evoluzione dal 1878 al 2006.

Il fenomeno, non eccessivamente intenso se confrontato con i tassi di arretramento che caratterizzano altri tratti del litorale toscano (GNRAC, 2006) assume qui un'importanza maggiore a causa della limitata ampiezza dell'arenile: durante le mareggiate gli stabilimenti balneari vengono infatti lambiti dalle onde. Ad aggravare la situazione in prossimità della foce del Parmignola vi erano i moli guardiani, inclinati rispetto ai fronti d'onda dominanti, che favorivano la riflessione delle onde innescando un flusso sedimentario che portava allo scalzamento alla base dell'opera e ad un *hotspot* erosivo sottoflutto ad essi. E' questa situazione che ha portato la Regione Toscana a prevedere un intervento di riequilibrio di questo litorale nell'ambito del PRGIC.

Tabella 1 - Tasso di spostamento medio (m/anno) della linea di riva nei 13 settori analizzati fra il 1878 e il 2006.

Settori	1878-1928	1928-1938	1938-1954	1954-1978	1978-1985	1985-1998	1998-2006
1	-6.6	-8.3	-0.7	-0.3	-	-	1.0
2	-5.4	-12.3	-0.7	-1.4	-	-	-0.9
3	-7.1	-12.6	-0.1	-0.9	-1.7	1.4	-0.5
4	-6.6	-12.2	0.3	0.3	-2.4	1.3	-0.8
5	-5.1	-13.9	-0.1	1.1	-3.5	-1.2	0.3
6	-3.2	-14.5	-0.2	0.9	-2.5	-1.4	0.8
7	-2.6	-7.6	0.3	0.6	-2.3	-0.9	-0.8
8	-0.7	-2.8	0.5	0.8	-0.9	-0.9	-1.6
9	0.2	0.7	1.0	1.3	-0.3	0.1	-3.2
10	0.2	3.6	2.2	1.0	2.3	0.7	-3.1
11	0.2	10.3	3.1	0.7	2.4	0.9	-2.3
12	0.2	18.3	2.7	1.4	1.3	0.9	-1.1
13	0.6	21.6	3.9	1.0	0.7	1.7	-1.4

Il progetto

Il progetto, realizzato in due lotti, si basa sul ripascimento artificiale per un volume di 81.000 m³ di sabbia versata sul tratto di circa 300 m posto a sud della foce del Torrente Parmignola (settore n. 9) e nella modifica della geometria dei pennelli di foce.

Il primo lotto dei lavori, realizzato fra il Dicembre 2005 e il Maggio 2006, si è svolto in più fasi:
 - dal 20 Dicembre 2005 al 3 Marzo 2006 sono stati modificati i pennelli di foce del Torrente Parmignola rendendoli ortogonali a costa e dotando quello meridionale di un'estensione sommersa per circa una ventina di metri;



Figura 4 - Stoccaggio del materiale sulla spiaggia.

- il 25 Gennaio 2006 è iniziato lo stoccaggio della sabbia nell'area di cantiere, posta sulla spiaggia ma non in contatto con il mare (Fig. 4);
- il 15 Febbraio, dopo che l'ARPAT (Agenzia Regionale per l'Ambiente della Toscana) aveva verificato la compatibilità ambientale di un primo lotto di 5.000 m³ di sabbia, è iniziato lo stendimento (Fig. 5), che è proseguito fino al 15 di Maggio 2006, sempre dopo la verifica di analoghi volumi di sabbia.



Figura 5 - Stendimento del materiale di ripascimento.

La sabbia, per complessivi 71.000 m³ (240 m³ per metro di costa), è stata distribuita in modo uniforme sulla parte emersa della spiaggia, conferendo alla battigia una maggiore pendenza rispetto a quella che caratterizzava il profilo pre-ripascimento.

Il secondo lotto, consistente nel versamento dei rimanenti 10.000 m³ di sabbia, è stato realizzato fra il Dicembre 2007 e il Febbraio 2008, periodo non preso in considerazione in questo lavoro. I materiali di ripascimento provengono da una cassa di espansione del Fiume Po, ubicata a Bre-scello, in Emilia Romagna e sono costituiti da sabbie di dimensioni medie (Mz) pari a 1.45 phi (0.37 mm) e con una Classazione (σ_1) di 0.67 phi (Tabella 2).

Si tratta di sedimenti leggermente più fini e meglio classati delle sabbie native, il cui campione composito ha un valore di Mz pari a 0.97 phi (0.51 mm) e di σ_1 pari a 1.24 phi. Includendo nel composito anche i sedimenti di step le differenze si fanno più rilevanti.

Tabella 2 - Caratteristiche granulometriche dei sedimenti nativi e di quelli di ripascimento.

	Mz (phi)	Mz (mm)	σ_1 (phi)
Nativo di battigia e spiaggia emersa	0.97	0.51	1.24
Nativo di battigia, spiaggia emersa e step	0.17	0.89	1.81
Ripascimento	1.45	0.37	0.67

Il confronto fra le distribuzioni granulometriche dei due sedimenti (Fig. 6 a e b) mostra come il materiale di ripascimento abbia una distribuzione unimodale, con la classe modale di 1.5 phi, mentre il composito dei sedimenti nativi è bimodale, caratteristica in parte spiegabile con il mescolamento di campioni rappresentativi di fasce morfologiche diverse (spiaggia alta, battigia e, per il campione b, *step*). In ogni caso è evidente come la classe modale dei materiali di ripascimento sia poco frequente in quelli nativi. Le distribuzioni granulometriche mettono anche in evidenza una coda grossolana in quello nativo ed una più fine in quello di ripascimento.

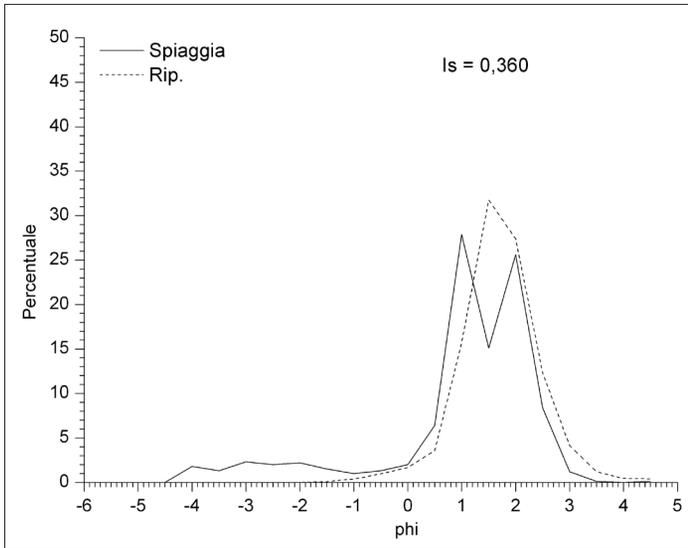


Figura 6a - Confronto fra le distribuzioni granulometriche del campione composto di ripascimento e del campione composto di spiaggia senza i campioni di *step*. In alto sono riportati i valori dell'Indice di stabilità (I_s).

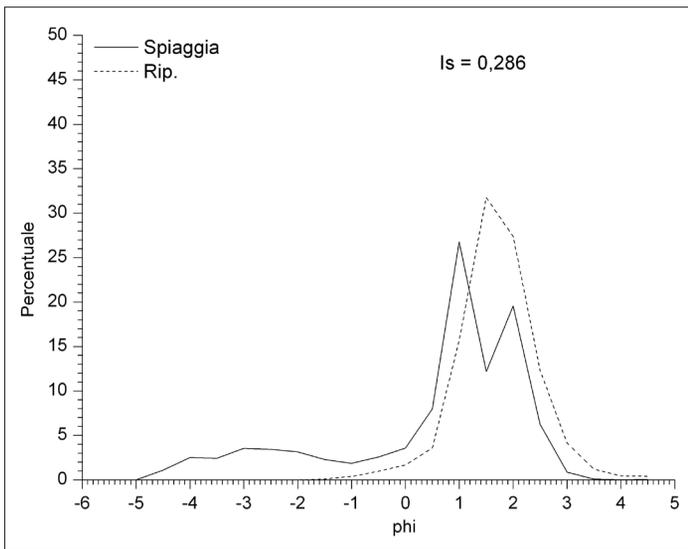


Figura 6b - Confronto fra le distribuzioni granulometriche del campione composto di ripascimento e del campione composto di spiaggia con i campioni di *step*. In alto sono riportati i valori dell'Indice di stabilità (I_s).

Il calcolo dell'Indice di stabilità (Pranzini, 1999) porta ad un valore di 0.360, che scende a 0.286 nel caso in cui si prendano in considerazione anche i campioni di *step* per costituire il composito del materiale nativo. E' un indice significativamente più basso di quello 0.500 che caratterizza i materiali di ripascimento con identica distribuzione granulometrica dei sedimenti nativi.

Il costo del materiale steso è stato pari a circa 18 euro a m^3 (incluso un ribasso in fase d'asta di circa il 20%), quindi decisamente inferiore ai 30 euro a m^3 che costituiscono oggi il prezzo di riferimento del mercato in Toscana. Tale riduzione è stata possibile, nonostante la grande distanza della cava, poiché la ditta aggiudicataria ha potuto usufruire dei mezzi che trasportano nel nord Italia i materiali lapidei lavorati nella zona di Massa e di Carrara e che normalmente ritornano scarichi.

In via preliminare, il progetto prevede anche la realizzazione di una struttura sommersa ortogonale a riva in grado di limitare le perdite longitudinali di sabbia. Il monitoraggio che qui viene presentato è stato voluto dall'Amministrazione comunale di Carrara anche al fine di poter disporre di elementi necessari alla valutazione di questa ipotesi.

Materiali e metodi

Il tratto di costa oggetto del monitoraggio corrisponde a 5 settori, quelli più meridionali (n. 9 ÷ 13) dei 13 in cui è stato diviso il litorale per lo studio dell'evoluzione storica del litorale (Fig. 3).

Il rilievo della linea di riva è stato effettuato con cadenza mensile, in giorni di mare calmo, dal Gennaio 2006 al Dicembre 2007, fatta eccezione per i mesi di Agosto 2006 e Gennaio, Maggio, Agosto e Novembre 2007, quando non si sono verificate le condizioni meteomarine opportune.

Per il rilievo sono stati utilizzati due GPS differenziali a doppia frequenza in modalità RTK con radio modem (precisione 10 mm + 2 ppm rms in tempo reale e 3 mm + 0.5 ppm rms in modalità statica) ed una Stazione Totale per riportare le quote dai capisaldi di riferimento ai vertici del piano di rilievo.

I rilievi batimetrici sono stati effettuati nei mesi di Dicembre 2005 e 2006 e nel Novembre 2007 con profili che si estendono dalla prima costruzione o recinzione presente sulla spiaggia fino alla profondità di circa 7 m.

Dai punti rilevati (x, y, z) sono stati derivati i profili e le carte batimetriche, il cui confronto ha permesso di studiare le variazioni morfologiche del fondale.

Le caratteristiche sedimentologiche della sabbia presente sul litorale di Marina di Carrara immediatamente prima dell'intervento di ripascimento sono state definite attraverso un campionamento avvenuto nel Maggio 2005 e che ha comportato il prelievo di 46 campioni di spiaggia emersa (spiaggia alta, battigia e *step*) e sommersa lungo profili distanziati circa 400 m.

Ulteriori campagne di prelievo di campioni si sono svolte nel Giugno 2006, immediatamente dopo la fine dei lavori, e nell'Aprile 2007, sempre sugli stessi punti della prima campionatura.

I campioni sono stati sottoposti a setacciatura automatica a secco con intervallo di $\frac{1}{2}$ phi, previa asportazione della frazione fine (< 0.0625 mm) ad umido, per ottenere i parametri statistici di Folk e Ward (1957). Da questi sono state prodotte le carte della distribuzione spaziale delle dimensioni medie (Mz) dei sedimenti e quella delle variazioni della classe modale dei materiali di ripascimento.

Per l'analisi delle condizioni meteomarine nel periodo di monitoraggio sono stati usati i dati rilevati dall'ondametro direzionale gestito dall'Autorità Portuale Marina di Carrara e ubicato a circa 600 m a largo del porto su di un fondale di 14 m (Fig. 7).

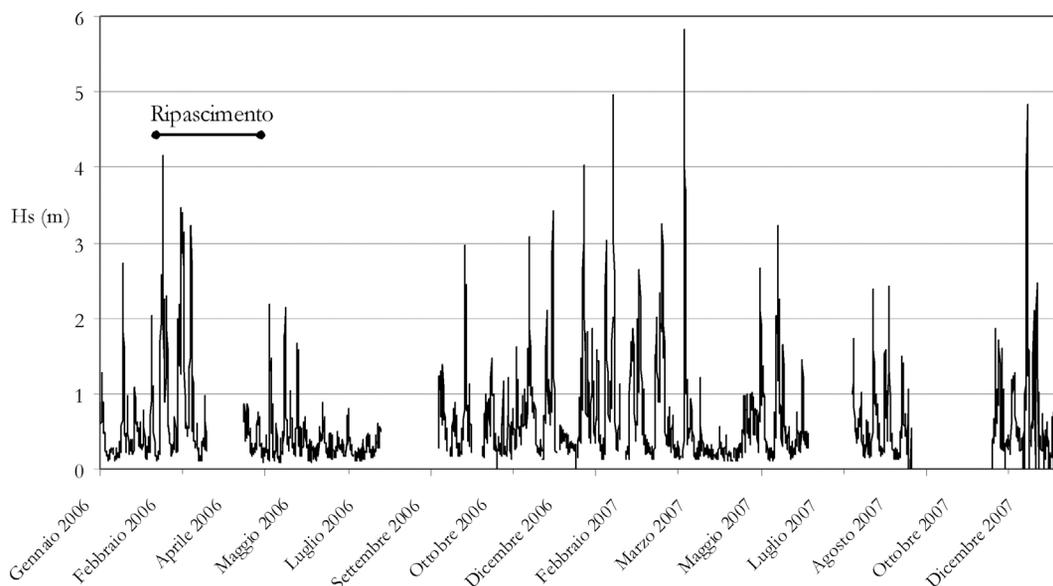


Figura 7 - Altezza d'onda significativa (Hs) registrata dall'ondametro posto su di un fondale di 14 m davanti al porto di Marina di Carrara (dati forniti dall'Autorità Portuale di Marina di Carrara).

Evoluzione della linea di riva

L'analisi dello spostamento medio subito dalla linea di riva nei vari settori (Tab. 3 e Fig. 8) mostra il diverso comportamento tenuto dalla zona direttamente alimentata (settore n. 9) rispetto a quello dei tratti posti sottoflutto. L'analisi effettuata con frequenza mensile mostra oscillazioni che spesso appaiono in fase e che sono correlabili alle condizioni meteomarine dei vari periodi.

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva è stata affrontata considerando separatamente tre periodi (Tab. 4 e Fig. 9):

- Gennaio 2006 - Maggio 2006, durante il quale erano in corso i lavori;
- Maggio 2006 - Aprile 2007, ossia fino ad un anno dopo la chiusura dei lavori e per il quale sono disponibili i dati ondametrici pressoché continui;
- Aprile 2007 - Dicembre 2007, che copre il periodo estivo caratterizzato da condizioni meteomarine insolitamente severe e per il quale i dati dell'ondametro non sono sempre continui.

Tabella 3 - Variazione della posizione media della linea di riva nei 5 settori considerati rispetto a quella del Gennaio 2006.

Mesi	Settori				
	9 (Rip.)	10	11	12	13
Gennaio 2006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Febbraio 2006	-0.3	-0.4	0.4	0.0	1.6
Marzo 2006	12.8	7.0	8.5	4.9	7.2
Aprile 2006	17.8	5.6	2.6	-1.1	1.4
Maggio 2006	23.9	8.1	7.2	5.8	6.1
Giugno 2006	18.5	7.5	3.6	2.7	1.2
Luglio 2006	14.1	8.0	4.0	2.5	3.2
Settembre 2006	14.3	7.4	3.0	2.8	4.0
Ottobre 2006	13.6	7.9	1.3	1.2	2.9
Novembre 2006	13.3	7.6	1.8	2.1	2.4
Dicembre 2006	13.0	7.7	3.4	1.4	2.1
Febbraio 2007	12.9	6.4	1.9	-0.3	2.5
Marzo 2007	14.8	9.3	5.2	2.2	4.3
Aprile 2007	13.6	8.7	4.4	1.8	3.6
Giugno 2007	12.2	9.4	4.9	0.0	4.3
Luglio 2007	6.9	9.3	1.3	-2.8	-1.6
Settembre 2007	7.7	13.1	4.8	1.8	2.4
Ottobre 2007	4.9	7.4	1.2	-3.5	0.3
Dicembre 2007	1.6	7.1	4.6	-1.5	4.1

Gennaio 2006 - Maggio 2006

Durante l'esecuzione dei lavori tutti i settori studiati registrano una espansione della spiaggia, più consistente in corrispondenza del versamento (+23.9 m) ma rilevante anche più a sud, con valori decrescenti da 8.1 m a 5.8 m dal settore n. 10 al settore n. 12, con un leggero aumento nel settore 13 a ridosso del porto.

Nei settori non alimentati direttamente l'avanzamento della spiaggia può essere attribuito al passaggio dalle condizioni invernali a quelle estive, ma il trend indica una distribuzione dei sedimenti nel senso del trasporto litoraneo ed un lieve rallentamento del flusso in prossimità del porto.

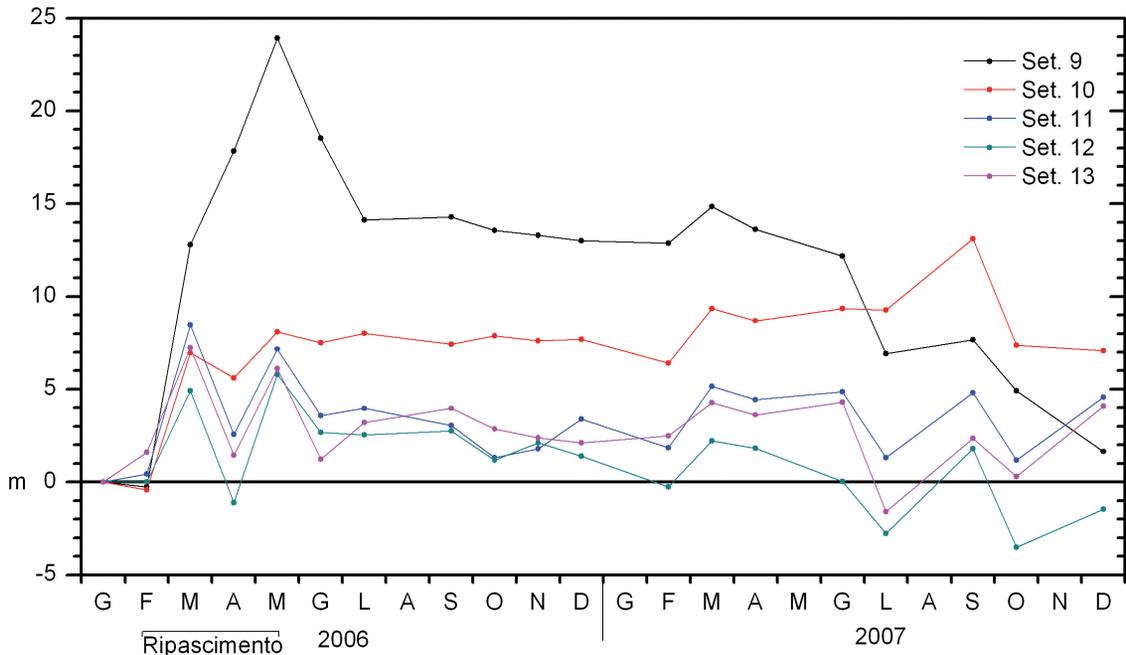


Figura 8 - Posizione media della linea di riva nei vari settori rispetto a quella del Gennaio 2006.

Maggio 2006 - Aprile 2007

Finiti i lavori, la spiaggia del settore n. 9 entra in quella fase di rapido arretramento che caratterizza tutti i litorali dopo un ripascimento artificiale (Dean e Yoo, 1993) e perde in media 10.3 m.

Tabella 4 -Variazioni lineari medie (m) nel periodo compreso tra Gennaio 2006 e Dicembre 2007.

Settori	Gennaio 2006- Maggio 2006	Maggio 2006- Aprile 2007	Aprile 2007- Dicembre 2007	Gennaio 2006- Dicembre 2007
9 (Rip.)	23.9	-10.3	-12.0	1.6
10	8.1	0.6	-1.6	7.1
11	7.2	-2.7	0.1	4.6
12	5.8	-4.0	-3.3	-1.5
13	6.1	-2.5	0.5	4.1

Anche gli altri settori, fatta eccezione per il n. 10 che si avvale in modo più diretto delle perdite del settore n. 9, perdono una parte di quanto avevano guadagnato, cosa spiegabile con le condizioni meteomarine estremamente severe dell'inverno 2006-2007 (Fig. 7).

Gli spostamenti medi della linea di riva, fatta eccezione per il settore 9, sono comunque assai modesti e risultano compresi fra +0.6 m e -4.0 m.

Aprile 2007 - Dicembre 2007

Anche il periodo compreso fra l'Aprile e il Dicembre 2007 è stato caratterizzato da intense mareggiate (Fig. 7), tanto che nella stagione estiva gli operatori balneari di tutta la costa apuo-versiliese hanno dovuto ridurre in continuazione le file degli ombrelloni. L'ondametro, nel periodo precedente l'ultimo rilievo, registra onde con Hs superiore ai 4 m. La spiaggia di progetto perde altri 12 m, raggiungendo una posizione media di soli 1.6 m più avanzata di quella registrata all'inizio dei lavori.

Quando vengono effettuati i rilievi, in condizioni di mare calmo, gli altri settori vedono modesti spostamenti della linea di riva, con settori in debole crescita che si alternano a settori in lieve erosione.

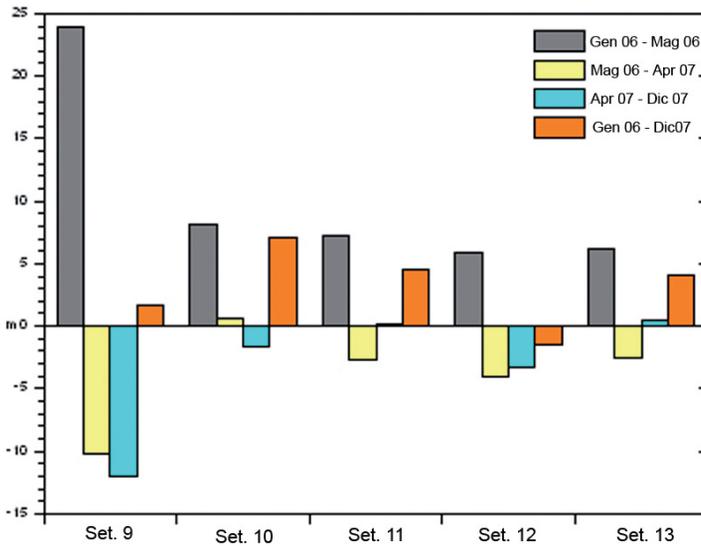


Figura 9 - Variazioni lineari da Gennaio 2006 a Dicembre 2007.

Gennaio 2006 - Dicembre 2007

Analizzando la posizione media che assume la linea di riva dei cinque settori in tutto il periodo di osservazione, si nota che quasi sempre la spiaggia è più ampia di quanto non lo fosse nel Gennaio 2006.

Nel settore n. 9 si registra la forte crescita prodotta dal ripascimento e la successiva graduale riduzione di ampiezza per la redistribuzione dei sedimenti. Dopo la prima perdita, la spiaggia rimane pressoché stabile nell'inverno 2006-2007, ma subisce ulteriori forti perdite nell'estate 2007, caratterizzata da mareggiate di notevole intensità (Fig. 7), tanto che nel Dicembre 2007 è di soli 1.6 m più ampia di quanto non lo era all'inizio dei lavori.

L'adiacente settore n. 10 si accresce progressivamente grazie ai sedimenti che vengono persi dalla spiaggia di progetto, ed esce dal periodo di monitoraggio con l'espansione maggiore registrata (+ 7.1 m).

Il settore n. 11 si accresce immediatamente di 7.2 m, ma nei periodi successivi arretra, pur con alcune oscillazioni, fino ad avere una spiaggia emersa più ampia di soli 4.6 m.

Il settore n. 12 è quello che registra le variazioni minori, ma è l'unico che chiude il periodo di monitoraggio con una perdita di spiaggia, seppur di soli 1.5 m.

Anche il n. 13, che termina con la diga di sopraflutto del porto, subisce modeste oscillazioni della linea di riva, ma alla fine registra una progradazione media di 4.1 m.

Bilancio sedimentario

La spiaggia della costa apuo-versiliense è caratterizzata da un doppio sistema di *crescentic bars* (Wright e Short, 1984), come messo in evidenza da Chiabrera et al. già nel 1980. Nel tratto oggetto del presente studio le barre si sviluppano entro l'isobata dei 5 m ed occupano una fascia ampia circa 150 m (Fig. 10 a e b).

In tutti i rilievi batimetrici disponibili sono chiaramente identificabili 9 depressioni delimitate dalle due barre (esterna ed interna) e, in senso trasversale, dalle punte delle barre festonate esterne che si collegano alle creste delle mega-cuspidi.

I rilievi batimetrici ripetuti nel tempo mostrano una relativa mobilità del sistema più interno, correlato con le mini- e meso-cuspidi che si formano a riva, mentre quello più esterno, in fase con le mega-cuspidi, è più stabile e subisce solo modesti spostamenti *cross-shore* con l'avvicinarsi delle mareggiate più intense.

Gli spostamenti *cross-shore* della barra esterna sono evidenti nel confronto fra i profili batimetrici lungo quelle sezioni che intersecano le depressioni (Fig. 11a), mentre quelli posizionati sui cordoni perpendicolari a riva mostrano una minore variabilità (Fig. 11b).

Il confronto fra il rilievo del Dicembre 2005 e quello del Dicembre 2006 indica un incremento di volume sulla spiaggia emersa di circa 57.000 m³, denunciando una perdita di circa 14.000 m³ del volume versato. Una simile perdita si registra fra il Dicembre 2006 e il Novembre 2007, quando vengono a mancare circa 11.000 m³ di sedimenti.

Analizzando l'evoluzione batimetrica dei fondali antistanti si ha, nel primo anno, una perdita pari a circa 142.000 m³ e, nel secondo anno, un incremento di 65.000 m³ di sedimenti, con un bilancio che chiude in passivo per 77.000 m³.

Mentre il confronto fra i rilievi della spiaggia emersa è considerato attendibile, salvo un errore di 1 o 2 cm in quota, quello sui fondali è estremamente meno affidabile, data l'accuratezza delle misure batimetriche, stimata in circa 10 cm e che, nel confronto fra due rilievi, può portare a variazioni di quota di 20 cm (Beachmed, 2004).

Considerando l'area del tratto di litorale interessato da queste variazioni volumetriche (824.000 m³), si ha, nel primo anno, un abbassamento medio del profilo di circa 17 cm, mentre nel secondo anno un innalzamento pari a circa 8 cm. Nei due anni di monitoraggio si è quindi misurata una variazione altimetrica media di 9 cm; si tratta, in tutti i casi, di valori inferiori ai 20 cm sopra indicati.

Altro elemento che può aver reso meno accurata la stima del bilancio sedimentario è data dalla profondità massima scandagliata, che è stata di circa 7 m. Le mareggiate registrate dall'ondametro nel periodo di monitoraggio hanno spesso superato i 4 m (Hs). Tale altezza d'onda, inserita nella formula di Hallermaier (1977), porta a porre la profondità di chiusura a oltre 8 m. E' quindi possibile che parte dei sedimenti mancanti nel primo periodo sia uscita verso il largo dalla zona monitorata. Dando fiducia ai rilievi, una parte si sarebbe riavvicinata a costa nell'anno successivo, in realtà caratterizzato da mareggiate maggiori (Fig. 7).

Si ritiene comunque che le variazioni batimetriche misurate non possano essere considerate effettive e che il monitoraggio di modesti ripascimenti non sia realizzabile con le tecnologie oggi in uso, se non limitatamente alla spiaggia emersa. E' per questo che nell'ambito del Progetto BEACHMED-e OptIMAL sono stati installati dei Punti di Controllo a Mare (*Sea Control Points*) da utilizzare come capisaldi nel corso dei rilievi, in modo da migliorare l'accuratezza dei dati batimetrici (Cipriani e Pranzini, 2008).

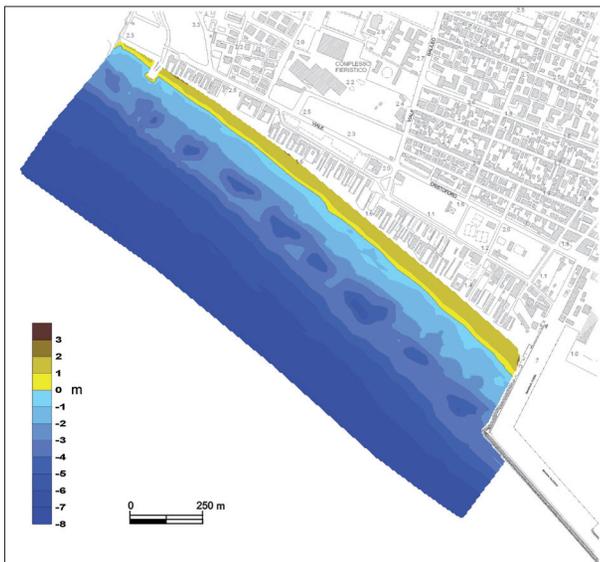


Figura 10a - Carta batimetrica del Dicembre 2006.

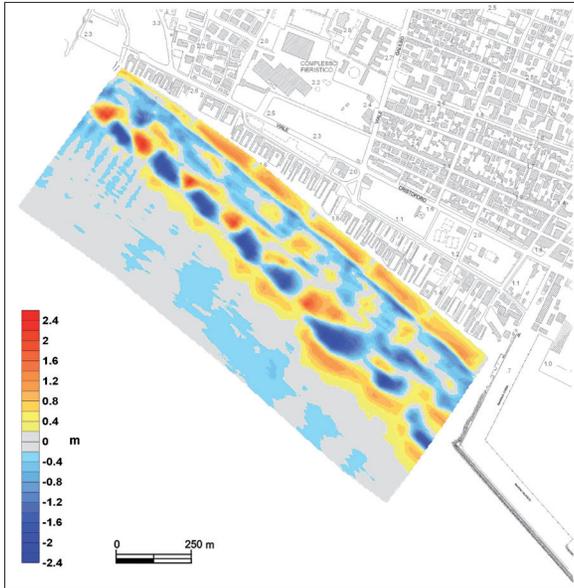


Figura 10b - Variazioni di quota fra il rilievo del Dicembre 2005 e quello del Novembre 2007.

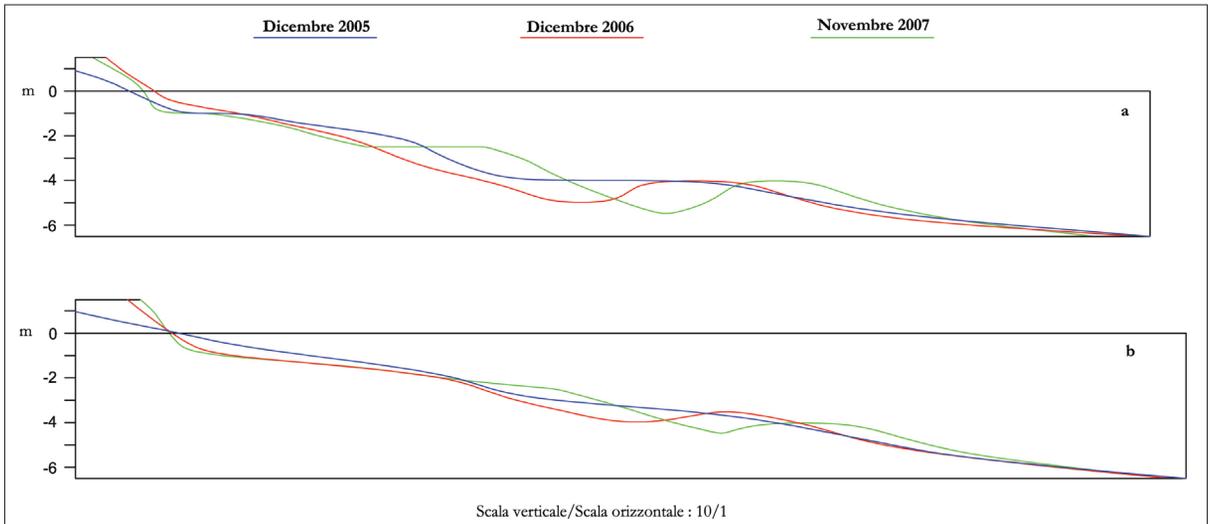


Figura 11 - Profili batimetrici lungo una sezione intersecante una depressione (a) e lungo una sezione posizionata su di un cordone perpendicolare (b).

Evoluzione granulometrica dei sedimenti

L'esiguità del volume artificialmente immesso nel sistema costiero e la similitudine tessiturale fra sedimenti nativi e materiali riportati sono tali da non determinare variazioni significative nelle caratteristiche granulometriche della spiaggia emersa e sommersa, come mostrano le carte delle dimensioni medie (Mz) dei sedimenti riportate in Figura 12.

La variabilità spaziale dei sedimenti di battigia, evidente sulle singole carte, è infatti analoga a quella temporale che appare dal confronto fra di esse.

Le *sabbie medie* ($1 \text{ phi} < Mz < 2 \text{ phi}$) presenti al largo del tratto meridionale nell'Aprile 2007, di fatto, entrano per poco in questa classe e sono associate alle barre dove occasionalmente si trovano clasti grossolani, come messo in evidenza da analisi effettuate su campioni prelevati nel 1998 e nel 2000 (Pranzini, 2001). Ciò che cambia in modo evidente è la percentuale della frazione 1.5 phi ($0.500 \div 0.350 \text{ mm}$) (Fig. 13), che costituisce la classe modale dei sedimenti versati (cfr. Fig. 6).

Questa, nel Maggio 2005, era assai poco rappresentata nelle sabbie di Marina di Carrara, con valori inferiori al 5% in mare e con valori compresi fra il 10 e il 25% sulla battigia e sulla spiaggia alta.

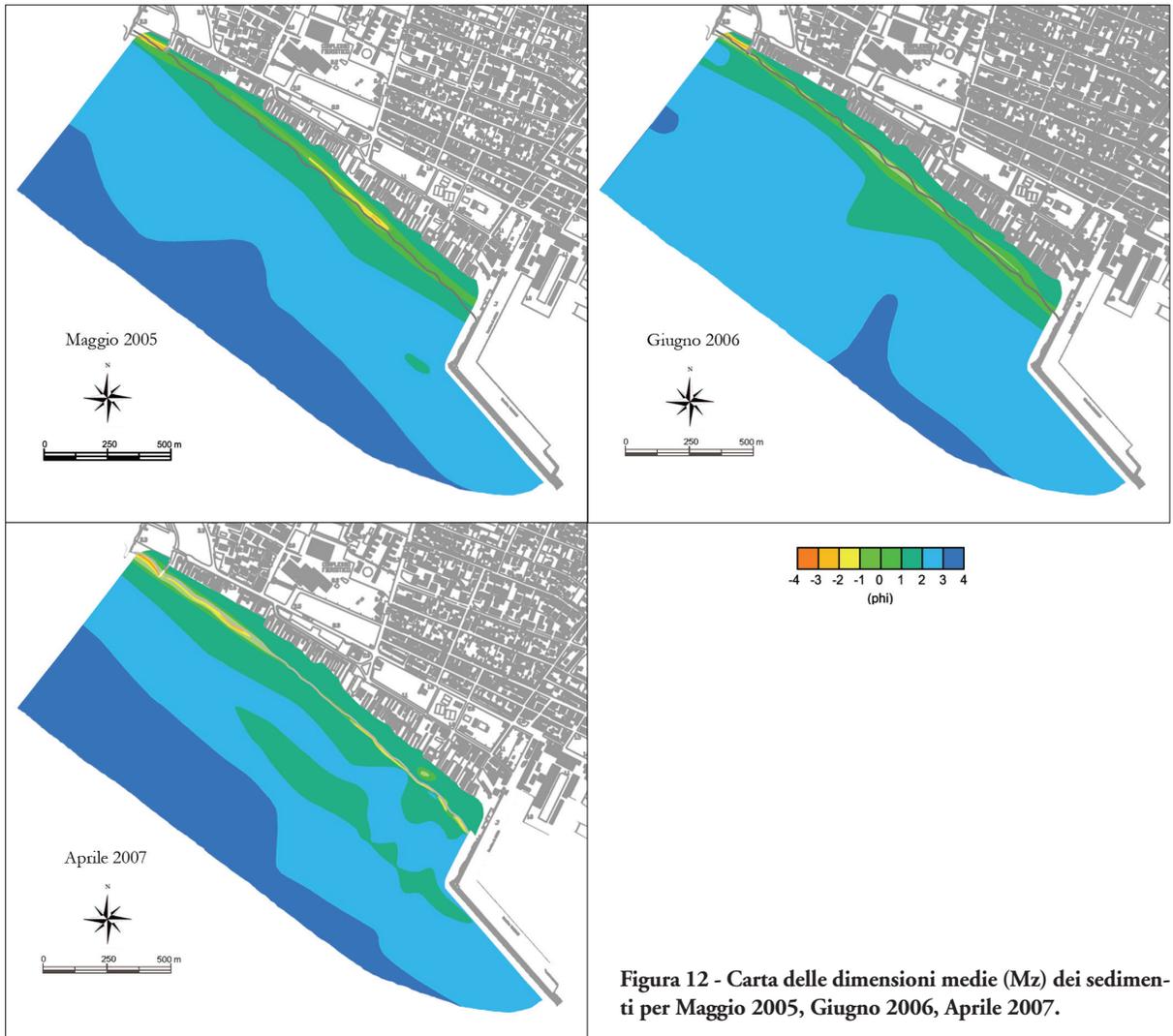


Figura 12 - Carta delle dimensioni medie (M_z) dei sedimenti per Maggio 2005, Giugno 2006, Aprile 2007.

Nel Giugno 2006, pochi mesi dopo il ripascimento, la frequenza di questa classe aumenta in modo evidente sulla spiaggia emersa e nella fascia più prossima a riva di quella sommersa. Le percentuali più elevate si riscontrano nella zona di versamento, mentre procedendo verso sud si registrano valori progressivamente minori. Significativo è il fatto che sulla battigia della zona di versamento si abbiano valori percentuali della frazione 1.5 phi superiori rispetto a quelli del sedimento versato: ciò può essere il risultato dell'immediata perdita delle frazioni più fini in questa zona attiva del profilo, che si sta ancora evolvendo sui materiali appena versati.

Nell'Aprile 2007 si ha una riduzione della frequenza della classe 1.5 phi nell'area di ripascimento, conseguente alla graduale miscelazione con i sedimenti nativi, mentre la percentuale aumenta nei tratti posti sottoflutto. Le variazioni rimangono modeste o nulle nei sedimenti di fondo più lontani da riva, a dimostrazione che le *sabbie medie* non vengono disperse molto al largo.

Il profilo lungo il quale si ha una frequenza maggiore di questa frazione granulometrica, sia prima che dopo il ripascimento, è quello posto immediatamente a nord del porto, dove la *sabbia media* si allontana da riva. Questa sembra che possa fluire lungo la diga foranea come dimostrerebbe

l'incremento della percentuale del nostro tracciante granulometrico che si registra nel Giugno 2006 nel primo campione antistante la struttura.

Conclusioni

Il ripascimento effettuato a Marina di Carrara con 71.000 m³ di sabbia media ha determinato inizialmente una espansione di circa 24 m della spiaggia emersa, ma il consistente flusso sedimentario diretto verso sud, che caratterizza la zona, ha comportato una rapida redistribuzione dei sedimenti. Diciotto mesi dopo la conclusione dei lavori, il settore che più si è avvantaggiato dell'intervento non è quello sul quale il ripascimento è stato effettuato, ma quello posto immediatamente più a sud.

Complessivamente il litorale si è accresciuto di 6.5 m, un valore modesto ma che va considerato alla luce della tendenza all'erosione alla quale questa spiaggia è soggetta da alcuni anni. Inoltre, le mareggiate intense che hanno colpito questo litorale nel periodo studiato avrebbero aggravato ulteriormente lo stato della spiaggia se non fosse stato effettuato il ripascimento.

Gli effetti positivi della rotazione dei moli guardiani della Fossa Maestra, che si sarebbero dovuti verificare nel settore posto immediatamente sottoflutto, sono stati minori delle attese, forse perché il loro prolungamento ha determinato una maggiore riflessione del moto ondoso.

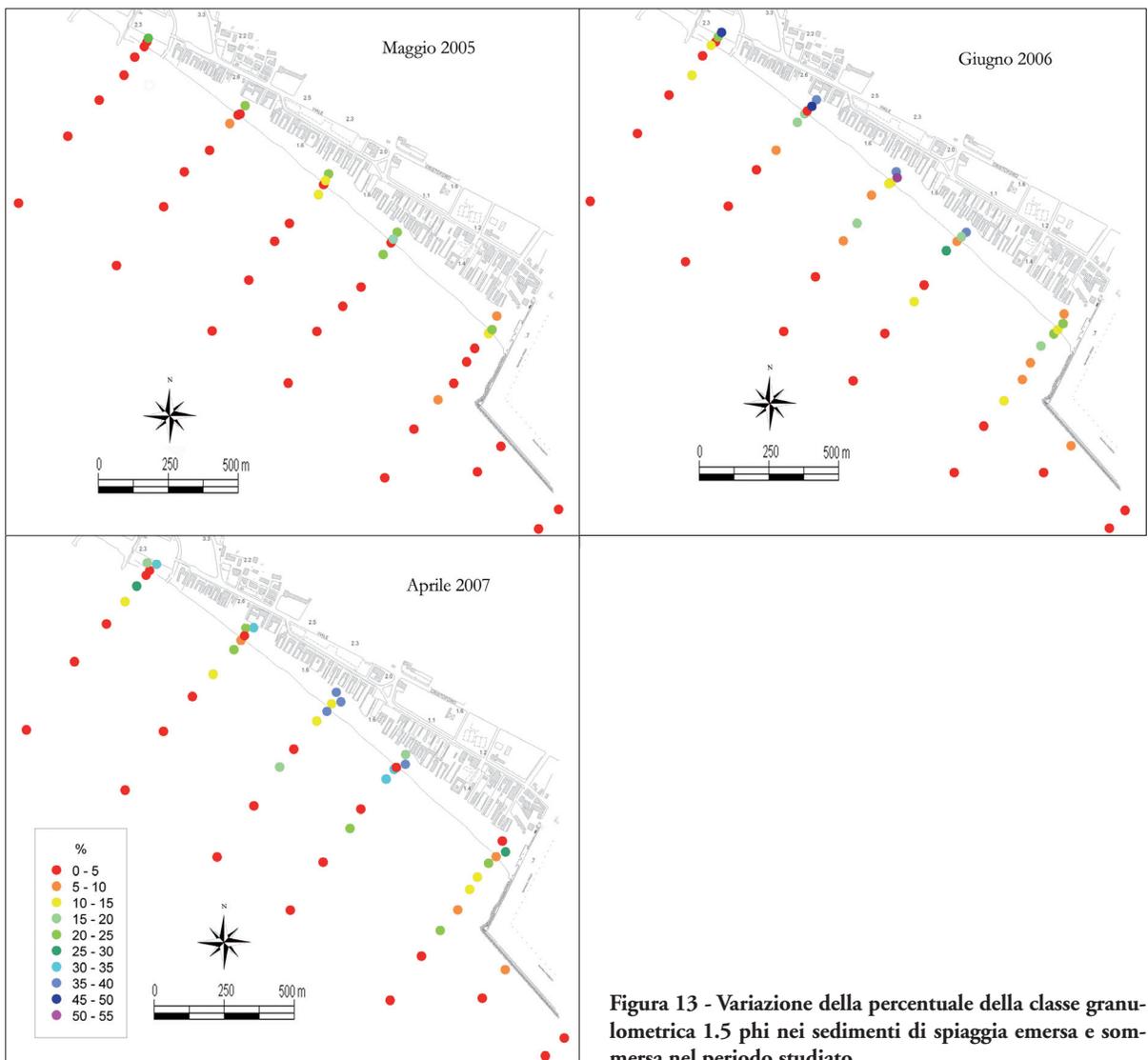


Figura 13 - Variazione della percentuale della classe granulometrica 1.5 phi nei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa nel periodo studiato.

L'intervento non ha determinato apprezzabili variazioni granulometriche della spiaggia, ma l'incremento percentuale della frazione 1.5 phi, che costituiva la classe modale dei materiali di ripascimento, ha consentito di confermare il flusso lungo riva dei sedimenti e la scarsa perdita verso l'esterno delle sabbie medie. Si è potuto identificare un flusso verso l'esterno solo in prossimità del porto, flusso che facilita lo spostamento delle sabbie dalla spiaggia di Marina di Carrara verso sud.

Ringraziamenti

Ricerca effettuata nell'ambito del Progetto BEACHMED-e OpTIMAL e del monitoraggio che il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze esegue su incarico del Comune di Carrara. Si ringrazia l'Autorità Portuale di Marina di Carrara per avere messo a disposizione i dati batimetrici ed ondametrici, quest'ultimi elaborati dal Prof. Leopoldo Franco del Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università degli Studi Roma Tre.

Bibliografia

- Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1976) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1519-1571.
- Albani D. (1940) - *Le spiagge della Toscana settentrionale dalla foce del fiume Magra ai Monti Livornesi*. In: Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane. II - Le spiagge toscane, 11-86, CNR, Roma.
- Beachmed (2004) - *Il Progetto Beachmed: "Recupero ambientale e manutenzione dei litorali in erosione con l'utilizzo di depositi sabbiosi marini"*, 3° Quaderno tecnico (Fase "C"), pp. 278.
- Chiabrera G., Corradi N. e Fierro G. (1980) - *Le barre della spiaggia sottomarina del litorale toscano (classificazione morfogenetica su base aerofotografia e rilievi batimetrici)*. In Atti dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere, Vol. XXXVII, pp.17.
- Cipriani L.E. e Pranzini E. (2008) - *Le ricadute del Progetto BEACHMED-e OpTIMAL sulle strategie di monitoraggio dell'erosione costiera in Toscana*, Atti Conv. Coste: Prevenire, Programmare, Pianificare, 15-17 Maggio, 2008.
- Dean R.G. e Yoo C. (1993) - *Predictability of beach nourishment performance*. In: *Beach nourishment engineering and management considerations*. A cura di D.K. Stauble e N.C. Krauss, ASCE, New York., pp. 86-102.
- Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, DEAM (2007) - *Stima delle profondità di chiusura lungo le coste toscane*, pp. 138.
- Folk R.L., Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. J.Sedim.Petrol., 27: 3-26.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Studi costieri, 10.
- Hallermaier R.J. (1977) - *Use for a calculated limit depth to beach erosion*. XVI Coastal Engineering Conf., pp. 1493-1512.
- Pranzini E. (1999) - *Un Indice di stabilità (Is) per la stima dell'idoneità dei materiali all'alimentazione artificiale delle spiagge*. Studi costieri, 1: 75-83.
- Pranzini E. (2001) - *Monitoraggio dell'intervento di difesa del litorale di Marinella di Sarzana*. Relazione inedita, Autorità di Bacino del Fiume Magra.
- Rinaldi M. (2005) - *Studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità*. Autorità di Bacino del Fiume Magra., Rel. Inedita, pp. 26.
- Sargentini M., Trambusti M., Cipriani L., Morelli F. e Regoli C. (2004) - *Il Piano Regionale di gestione integrata della costa*. In: *Erosione costiera*. Edifir, Firenze. pp. 7-20.
- Wright L.D., Short A.D (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis* Marine Geology, Volume 56, Issues 1-4: 93-118.
- Yasso W. (1965) - *Plan geometry of headland-bay beaches*. Journ. Geology, 73: 702 -714.

Manoscritto ricevuto il 7/2/2008, accettato il 1/7/2008.