

L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana)

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.
epranzini@unifi.it

Riassunto

Il lobo settentrionale del delta dell'Arno è in erosione fin dalla seconda metà dell'800 e fra il 1881 e il 2001 la linea di riva è arretrata di circa 1300 m. Alla fine del secolo scorso, nonostante che l'apice deltizio non fosse più prominente in mare, l'erosione procedeva ancora ad un tasso di circa 10 m/anno. Il Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, al cui interno è posto il delta dell'Arno, ha predisposto un progetto di difesa costiera che è stato realizzato fra il 2001 e il 2003. Il progetto si basa sulla realizzazione di nove corti pennelli, quattro dei quali estesi come setti sommersi; nelle tre celle meridionali è stato effettuato anche un ripascimento in ghiaia con una densità compresa fra 30 e 100 m³/m. Il confronto fra l'evoluzione della linea di riva del periodo precedente l'intervento (1993 ÷ 2001) e di quello successivo (2003 ÷ 2007), escludendo quindi l'espansione della spiaggia creata durante i lavori, ha messo in evidenza come la tendenza evolutiva del tratto protetto si sia invertita. L'analisi della risposta della spiaggia porta a pensare che il merito del successo dell'intervento sia da attribuirsi prevalentemente alla nuova spiaggia in ghiaia e ai setti sommersi, più che ai pennelli emersi. Il litorale posto sottoflutto ha risentito negativamente dell'intervento, ma l'incremento del tasso di erosione che si è qui verificato è assai minore della riduzione registrata nel tratto protetto. Globalmente, il tratto studiato ha visto una riduzione del tasso medio di arretramento della linea di riva.

Parole chiave: delta, erosione costiera, pennelli, setti sommersi, spiagge in ghiaia, valutazione dell'efficacia.

Abstract

The northern side of the River Arno delta has been experiencing severe erosion since the middle of the 19th century; shoreline retreated approximately 1300 m from 1881 to 2001. By the end of the last century, although the cusp was no longer protruding onto the sea, beach erosion rate was approximately 10 m/yr. The San Rossore Migliarino Massaciuccoli Regional Park, where the delta is located, carried out a shore protection project which was executed from 2001 to 2003. The project was based on the construction of nine short groins, four of which having also a submerged extension, and works of gravel nourishment in the three southernmost cells, with a density of 30 to 100 m³/meter. Comparing the local shoreline evolution before (1993 ÷ 2001) and after (2003 ÷ 2007) the project completion, therefore excluding the beach expansion induced by the fill, an inversion in the evolution trend is observed in the protected segment. The analysis of beach response indicates that the main merit of this success can be attributed to the artificial gravel beach and to the submerged groins, whereas the short groins have induced a limited benefit. Sectors located downdrift from the groin field experienced an increase in the erosion rate. An overall reduction in the erosion rate was observed in the coastal segment under study.

Keywords: delta, beach erosion, groins, submerged groins, gravel beaches, efficiency evaluation.

Premessa

Il delta del Fiume Arno si è formato in epoca storica a seguito del forte input sedimentario indotto dalla riduzione della copertura boschiva nel suo bacino idrografico che ha accompagnato lo sviluppo sociale ed economico della Toscana (Pranzini, 2007). L'influenza delle vicende umane sulle fasi di crescita e di erosione del delta è ben documentata (Pranzini, 2007), così come certe sono le cause del processo erosivo instauratosi dalla seconda metà dell'800: la contrazione delle superfici agricole, la costruzione di briglie e dighe lungo le aste fluviali e l'estrazione di inerti in alveo (Bartolini e Pranzini, 1979).

L'erosione è iniziata all'apice deltizio ed è andata progressivamente ad interessare tratti costieri sempre più ampi (Pranzini, 1989). Sul lobo meridionale del delta si era nel frattempo sviluppata Marina di Pisa, mentre quello settentrionale è rimasto praticamente disabitato fino ai nostri giorni. Dai primissimi anni del XIX secolo si è provveduto a costruire difese costiere a protezione dell'abitato fino alla situazione attuale, in cui i due chilometri di costa antistanti il paese sono difesi da 10 scogliere parallele pressoché continue, da una scogliera aderente in massi naturali e da alcuni pennelli che collegano le opere aderenti a quelle distaccate: ogni chilometro di costa è difeso da 2.3 chilometri di scogliere (Aminti et al., 2003).

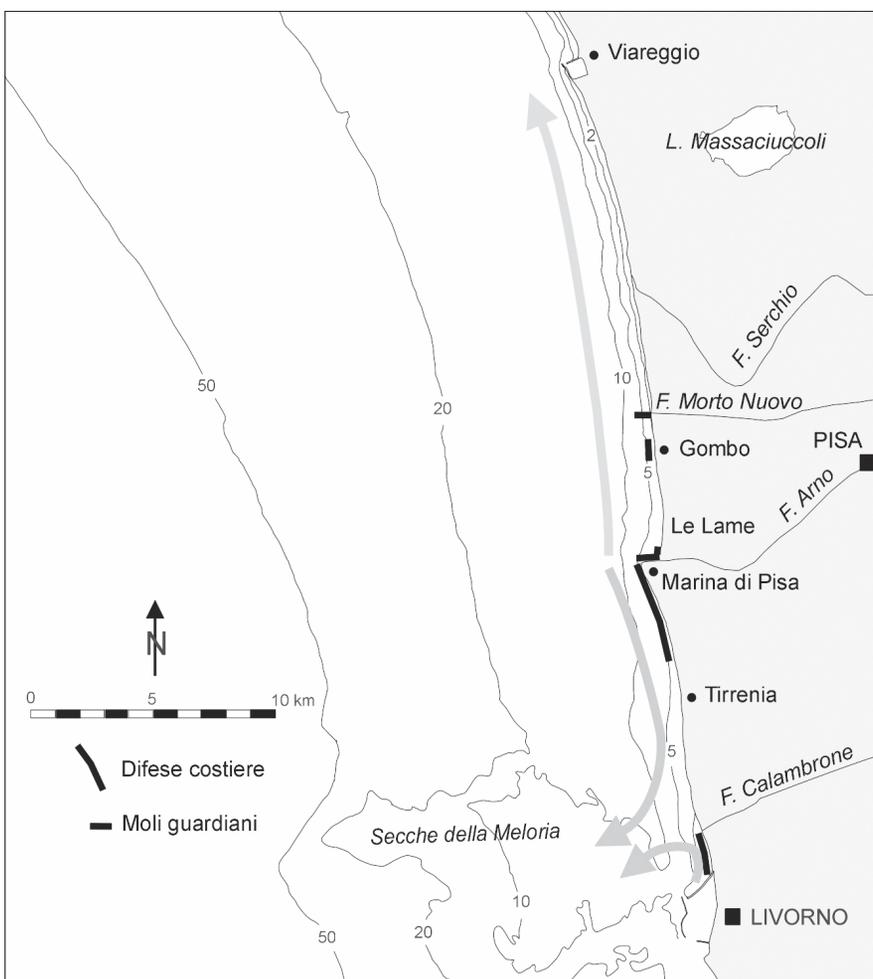


Figura 1 - Posizione dell'area di studio e direzione prevalente dei flussi sedimentari quale identificata da Cipriani et al. (2001).

spiaggia più prossima alla Villa Presidenziale, sulla quale l'erosione aveva fatto sentire pesantemente i suoi effetti. La risposta della spiaggia alla costruzione delle scogliere ed alle modifiche apportate nel 1985 è sta-

Se ciò ha determinato la stabilizzazione della linea di costa, non altrettanto è avvenuto sui fondali antistanti e al piede esterno delle scogliere parallele abbiamo profondità variabili fra i 5 e i 7 m.

L'assenza di insediamenti sul lobo settentrionale, sul quale si stendeva una Riserva Presidenziale, ha fatto sì che qui la linea di riva sia stata lasciata libera di arretrare, tanto che oggi la sua posizione, in prossimità della foce dell'Arno, è ben 1300 m più arretrata di quella del 1881.

Ciò ha determinato una asimmetria della foce fluviale (Fig. 1) che ha imposto la costruzione di un pennello in sponda destra per evitare che l'Arno sfociasse in una zona riparata dal "promontorio" di Marina di Pisa, con conseguenti problemi di insabbiamento della foce e difficoltà di smaltimento delle piene.

Fra il 1962 e il 1965 vengono costruite cinque scogliere parallele al Gombo (Fig. 1) a protezione della

ta studiata recentemente da Bowman e Pranzini (2003), che hanno messo in evidenza come queste abbiano innescato un processo di “up-drift erosion” mai descritto in letteratura.

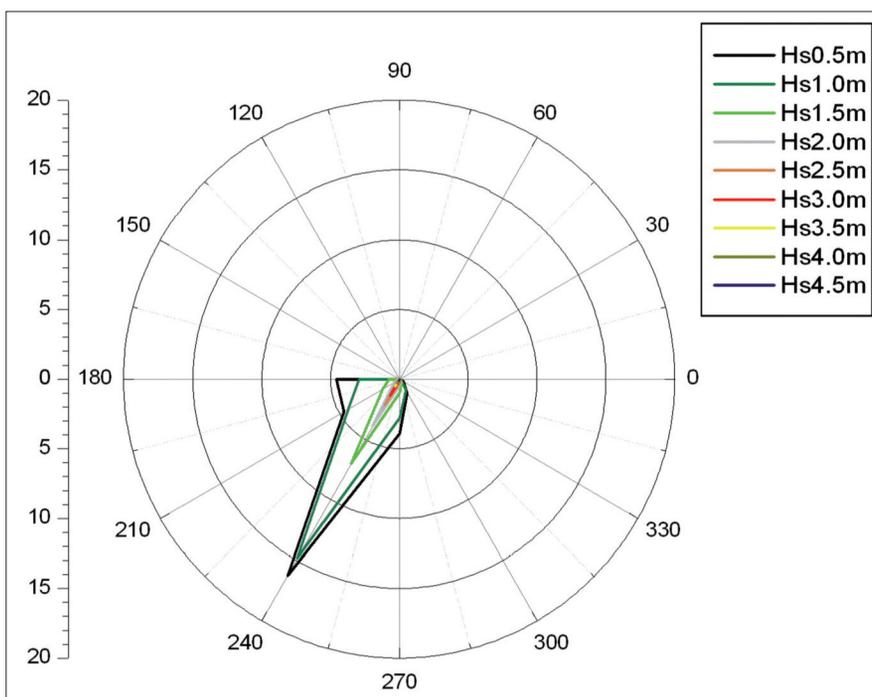
Altro elemento artificiale presente su questo tratto di litorale è la foce armata del Fiume Morto Nuovo (Fig. 1), un canale artificiale che assicura il drenaggio della pianura posta a nord di Pisa; questa struttura interrompe il flusso sedimentario diretto verso nord e protegge dall’erosione un breve tratto di litorale sopraflutto, ma incentiva l’erosione sottoflutto, dove il tasso di arretramento della linea di riva è ora di circa 5 m/anno (Cipriani et al., 2001).

La spiaggia de Le Lame, posta immediatamente a nord della foce dell’Arno, è stata soggetta ad un tasso di erosione compreso fra i 6 ed i 10 m/anno fra il 1938 e il 1993, valore che non è cambiato in modo significativo fra il 1993 e il 2001, nonostante che la costa non fosse più aggettante in mare.

La configurazione morfologica del delta vede numerosi cordoni di sabbia, vecchi *beach ridge*, decapitati dall’erosione costiera tanto che i bassi interdunali sono quasi ortogonali alla riva. Durante le mareggiate *set-up* e *run-up* favoriscono l’ingressione dell’acqua salata in superficie, e le vecchie “lame” di acqua dolce si sono trasformate in stagni salmastri, con la conseguente scomparsa dell’originaria vegetazione igrofila d’acqua dolce. Per porre un freno a questo processo, nel 1998 l’Ente Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli ha commissionato ¹ un progetto di difesa del litorale che è stato poi realizzato dal Parco stesso fra il 2001 e il 2003.

Esposizione al moto ondoso del litorale di San Rossore ²

Il litorale posto a nord della foce dell’Arno, dopo la completa erosione del lobo del delta, ha un orientamento Nord-Sud ed è quindi esposto ai mari del terzo e quarto quadrante. Le caratteristiche del moto ondoso al largo, relativamente al periodo 1 Luglio 1992 ÷ 31 Dicembre 2004, fornite da Metoffice, sono state propagate fino ad una profondità di 20 m tenendo conto di rifrazione, shoaling ed attrito. I dati, raggruppati per settori di 30°, sono riportati in Figura 2, dalla quale emerge una limitatissima dispersione direzionale del moto ondoso.



Mentre le calme rappresentano il 22.1% dei casi, la maggior parte degli eventi ha una provenienza da 240° (21.2%), cui seguono, con frequenze bassissime, i mari da 210° (2.1%) e quelli da 270° (1.9%). Considerando solamente le onde con Hs > 2 m, si nota come esse si verificano nel 5.4% del tempo e che ben nel 81.5% di questi casi esse provengono da 240°.

Figura 2 - Dispersione direzionale del moto ondoso calcolata sulla base dai dati Metoffice del periodo 1992 ÷ 2004 su di un fondale di 20 m al largo della zona di studio.

¹ Il progetto è stato redatto dal Prof. Ing. Pierluigi Aminti con la collaborazione, per la parte morfologica e sedimentologica, dello scrivente.

² I dati riportati in questo paragrafo sono tratti da uno studio che DEAM s.r.l. ha effettuato per il Dipartimento di Scienze della Terra nell’ambito del Progetto BEACHMED-e / OpTIMAL.

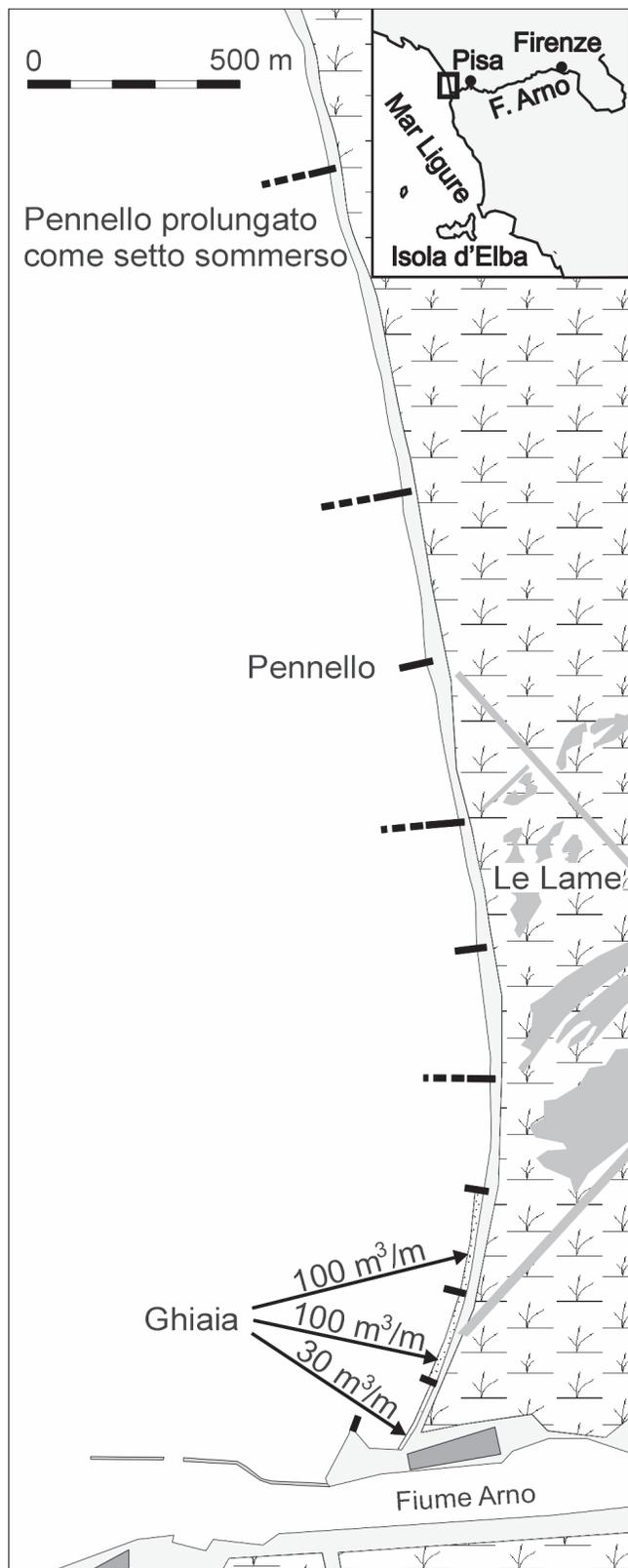


Figura 3 - Il progetto realizzato sulla spiaggia de Le Lame fra il 2001 e il 2003.

Con questa esposizione al moto ondoso, anche se questo tratto di litorale è schermato nei confronti dei mari da Libeccio dalle Secche della Meloria (Fig. 1), il trasporto litoraneo risultante è diretto verso Nord e stimato in circa $100.000 \text{ m}^3/\text{anno}$ (DEAM, 2007).

La profondità di chiusura, calcolata con la formula di Hallermeier (1978) e sulla base degli eventi registrati nei 12 anni di disponibilità dei dati Metoffice, è pari a 9.1 m, mentre quella stimata sulla distribuzione di Weibull per l'evento con periodo di ritorno cinquantennale è di 13.5 m. Nel 95% del tempo le onde non risultano in grado di modificare il profilo di spiaggia sotto alla profondità di 4.9 m.

Il progetto di difesa del litorale de Le Lame

Il progetto (Fig. 3) prevedeva la realizzazione di una scogliera semi-parallela, lunga 70 m, connessa alle difese di Bocca d'Arno e 10 pennelli in massi naturali, alcuni dei quali estesi come setti sommersi. I primi tre meridionali hanno una lunghezza di circa 60, mentre quelli più settentrionali arrivano ad essere lunghi 80 m; tutti hanno una testata che si spinge fino circa all'isobata dei 2 m. Quattro dei pennelli più lunghi sono estesi per altri 80-90 m come setti sommersi, fino a raggiungere l'isobata di circa 4 m (Fig. 4).

Il progetto prevedeva anche la realizzazione di una spiaggia in ghiaia con una densità di versamento pari a 30 m^3 per metro di spiaggia e la costruzione di una duna artificiale volta ad impedire la tracimazione negli eventi meteomarinari estremi. La granulometria di progetto per la ghiaia prevedeva dimensioni medie comprese fra i 15 e i 25 mm, accettando una coda estesa dai 10 ai 30 mm, e non riconoscendo in contabilità il materiale di dimensioni esterne.

Il ripascimento è stato effettuato con frammenti di marmo bianco provenienti dagli scarti delle attività estrattive dell'area apuana, un materiale utilizzato anche altri interventi realizzati di recente lungo la costa della Toscana settentrionale (Nordstrom et al., 2007).

Alcuni problemi sorti in fase di esecuzione dei lavori, come l'approfondimento dei fondali durante la costruzione dei pennelli e i danni creati dalle mareggiate alla pista di servizio, hanno imposto un ridimensionamento del progetto, con la riduzione del volume del ripascimento in ghiaia e l'abolizione del pennello settentrionale e della duna artificiale.



Figura 4 - Il tratto settentrionale dell'intervento in cui si vedono i pennelli VIII e IX prolungati in setti sommersi che raggiungono la zona in cui si muovono le barre. I lobi chiari visibili nella parte meridionale dell'immagine sono *washover fans* che si formano preferenzialmente in corrispondenza dei bassi interdulari.

compresa fra i 231 e i 374 m, sono delimitati dalle varie coppie di pennelli, che sono più vicini nel tratto meridionale e più distanziati in quello settentrionale; i settori 9, 10 e 11 dividono in tre parti uguali il tratto di litorale che si stende per 773 m fra il pennello n. 8 e il n. 9 realizzato nel 2003.

L'assorbimento dei 30 m³/m di ghiaia inizialmente versati nella prima cella meridionale, senza la formazione di una cresta di berma sufficientemente sviluppata, ha suggerito di concentrare il volume ancora disponibile sulle due celle adiacenti, fino a giungere ad una densità di versamento di circa 100 m³/m.

Fra i problemi registrati in fase di esecuzione, che hanno influito sul risultato finale, vi è il fatto che il tout-venant di cava utilizzato per la costruzione della pista è stato disperso durante le mareggiate e si trova tutt'ora sulla spiaggia con elementi grossolani non previsti nel progetto. Anche le dimensioni della ghiaia versata sono risultate superiori a quelle di progetto. I lavori si sono svolti tutti fra il 2001 e il 2002, ad eccezione della costruzione del pennello più settentrionale effettuata all'inizio del 2003.

Materiali e metodi

Lo studio dell'evoluzione del litorale sul lungo periodo si basa sul confronto fra la linea di riva del 1938 (dalla Carta delle linee di riva della Regione Toscana, 1989, in scala 1:5.000) ed una rilevata dal Dipartimento di Scienze della Terra nel 1993. La tendenza evolutiva del periodo precedente l'intervento è analizzata tramite il confronto delle linee del 1993, del 1997 (rilievo del Dipartimento di Scienze della Terra) e del 2001. Quest'ultima fa parte di una serie di tre rilievi eseguiti dalla Geostaff su incarico del Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli per il controllo dei lavori di riequilibrio della costa. Per l'analisi della risposta della spiaggia all'intervento sono stati utilizzati gli altri due rilievi Geostaff (2002 e 2003), uno effettuato nel 2005 dalla Geosystem per la Regione Toscana ed uno realizzato nel 2007 dalla GeoCoste appositamente per questo studio.

L'evoluzione subita dalla linea di riva negli intervalli di tempo considerati è stata analizzata suddividendo il tratto di litorale d'interesse in 21 settori di lunghezza variabile, ma omogenei al loro interno dal punto di vista delle opere di difesa che li interessano (Fig. 5). Il primo settore, lungo 197 m, è delimitato a sud della scogliera aderente posta a difesa di una caserma ed a nord dal primo pennello realizzato nel 2001. I successivi 7 settori, di lunghezza

I settori del tratto di costa non interessato dall'intervento (12 ÷ 21) hanno lunghezze variabili fra i 182 e i 388 m, ma sono omogenei al loro interno o per il tipo di difesa o per l'evoluzione che hanno subito negli ultimi anni.

È da segnalare che i vari settori escludono il breve tratto di spiaggia coperto dai pennelli in modo da non considerare come incremento areale della spiaggia ciò che in realtà è la superficie delle varie strutture.

Per ciascun settore e per ciascun intervallo di tempo è stata misurata la variazione areale della spiaggia emersa (m²) che, divisa per la lunghezza di ciascun settore, ha dato lo spostamento medio della linea di riva (m). Per normalizzare questi dati, riferiti ad intervalli temporali diversi, si sono calcolati i tassi di spostamento medio (m/anno).

Analisi dei dati

L'evoluzione del litorale prima dell'intervento

Per analizzare l'effetto delle opere è necessario fare riferimento a quanto accaduto negli anni precedenti e valutare quale sarebbe stata la tendenza evolutiva di questo litorale in assenza di interventi.

Fra il 1938 e il 1993 (Fig. 6a) tutto il litorale risulta interessato da un processo erosivo che raggiunge i valori massimi proprio sulla spiaggia de Le Lame, a nord di Bocca d'Arno, dove si registrano tassi di arretramento compresi fra i 5 e gli 8 m/anno (settori 1 ÷ 6). Fanno eccezione i settori 14 e 15, al Gombo, dove si risente l'effetto positivo del potenziamento delle difese parallele (Bowman e Pranzini, 2003), ma sottoflutto ad esse l'erosione è consistente e i valori che si leggono nella Figura 5a danno una visione limitata del fenomeno, diluendo l'arretramento su 55 anni, mentre esso ha iniziato a verificarsi fra il 1954 e il 1967.

Il processo erosivo si aggrava negli anni successivi (1993-1997; Fig. 6b) e nel settore 6 si superano i 15 m/anno; solo il settore n. 3 subisce un'erosione modesta, ma la perdita di spiaggia è consistente fino al Gombo, dove le scogliere continuano ad avere un effetto di stabilizzazione, anche se prosegue l'impatto negativo nel settore posto sottoflutto. Nei quattro anni che precedono l'intervento (1997 – 2001; Fig. 6c) tutta la costa è in arretramento, con tassi che a Le Lame si collocano fra 10 e i 15 m/anno. Fra il 1938 e il 1993, lungo i 2937 m di litorale (tolta la larghezza cumulata dei pennelli) sui quali verrà effettuato l'intervento (settori 1 ÷ 11) la linea di riva arretra in media di 245.8 m (4.50 m/anno); fra il 1993 e il 1997 arretra in media di 30.2 m (7.55 m/anno) e nei quattro anni successivi (1997 ÷ 2001) l'arretramento è di ben 33.9 m (8.48 m/anno).

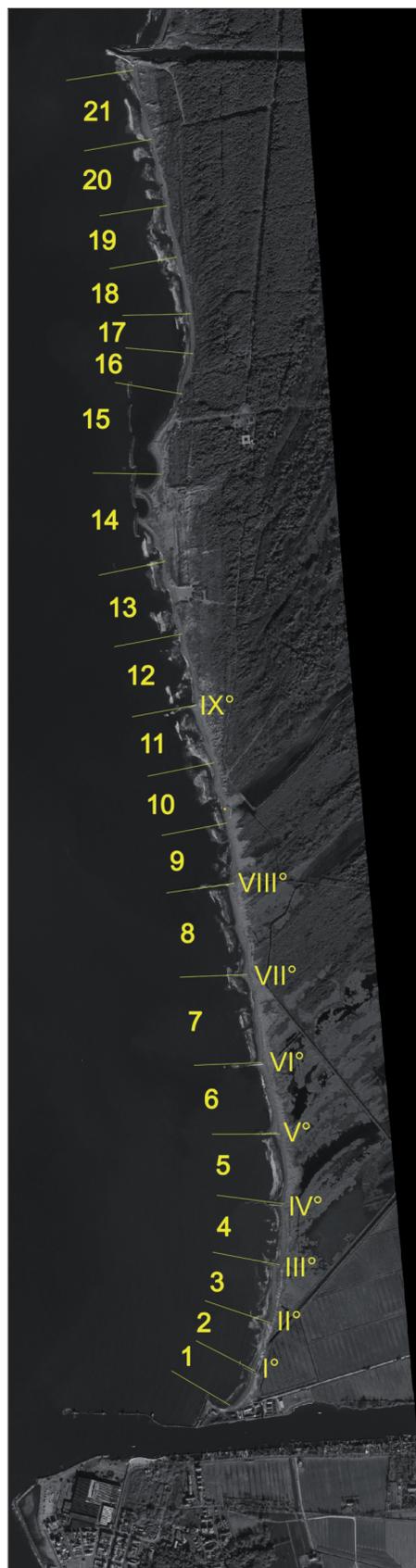


Figura 5 - Settori nei quali è stato diviso il litorale per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva. I numeri romani identificano i pennelli. Base immagine Quickbird del 01/07/2005.

Ciò che è sorprendente è che il tasso erosivo del litorale posto a nord di Bocca d'Arno si mantenga elevatissimo nonostante che l'aggetto della cuspidè deltizia sia stato ormai completamente eliminato. Si ritiene possibile che ciò sia correlabile non solo alla ridotta alimentazione da parte dell'Arno ed al fatto che il flusso sedimentario passa al largo di questo tratto, come indica la forma della barra sabbiosa presente al largo, ma anche ad un processo erosivo innescato dalla riflessione delle onde sulle opere foranee di Bocca d'Arno (Cipriani et al., 2001).

E' in questo contesto che si colloca il progetto di difesa del litorale realizzato dall'Ente Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli.

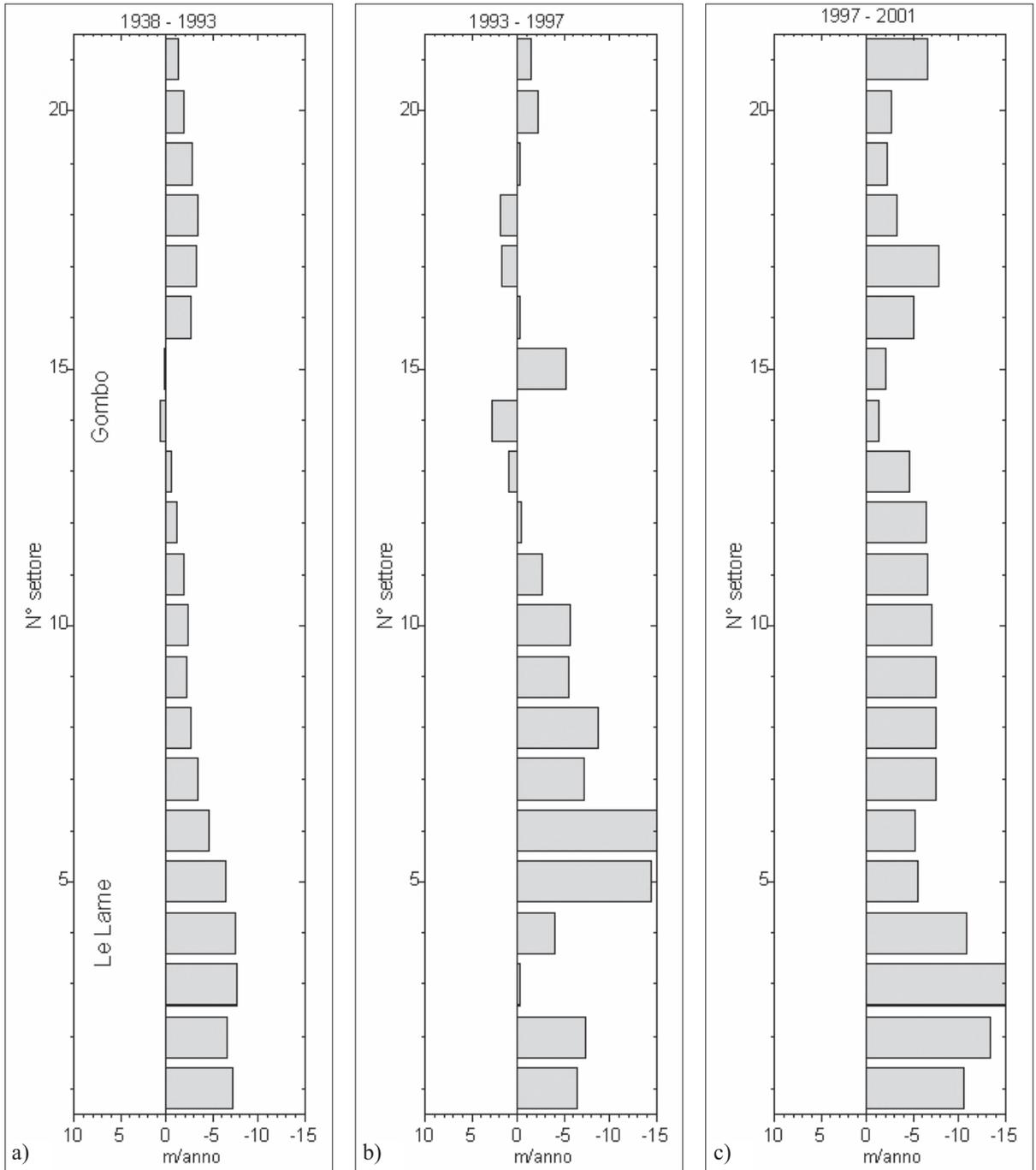


Figura 6 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1938 e il 2001.

L'evoluzione del litorale dopo l'intervento

I lavori che si svolgono fra il 2001 e il 2003 determinano importanti modificazioni al litorale, non solo per la costruzione dei pennelli e il versamento di circa 65.000 m³ di ghiaia, ma anche per la realizzazione della pista che consente alle macchine di muoversi lungo costa, non essendovi percorsi alternativi per raggiungere la base dei vari pennelli. Nel progetto originario questa avrebbe dovuto essere costruita con gli stessi sedimenti da utilizzare per il ripascimento, ma problemi legati alla sicurezza hanno comportato l'utilizzazione di materiali assai più grossolani e meno classati, che si ritrovano tutt'ora sparsi in un'ampia fascia in prossimità della riva.

La lettura della risposta immediata della spiaggia a questi lavori non è semplice, sommandosi l'azione diretta del cantiere ai primi effetti delle opere; inoltre la realizzazione dei pennelli si è diluita nel tempo, con quello più settentrionale costruito solo nel 2003.

Alcuni pennelli sono stati costruiti in parallelo, interrompendo la costruzione di uno per dare inizio a quella di un altro. In questo modo le mareggiate che trovavano l'opera incompleta creavano una buca alla testa del pennello, che doveva venire riempita con massi alla ripresa dei lavori. Anche ciò, insieme alle mareggiate che spesso hanno danneggiato la pista, ha determinato quell'incremento dei costi che ha portato alla non completa realizzazione del progetto.

Fra il 2001 e il 2003, nella zona dell'intervento, solo i settori alimentati con 100 m³/m di ghiaia (settori 2 e 3) registrano un deciso avanzamento della linea di riva (Fig. 7a) e le osservazioni sul posto indicano che la sabbia è spesso andata a coprire la ghiaia sulla battigia (Fig. 8). Nella zona settentrionale prevalgono i processi erosivi, fatta eccezione per il tratto posto a nord delle scogliere del Gombo (settori 16 e 17) che riceve i sedimenti provenienti dai tomboli in fase di smatellamento.

Nei due anni successivi (2003 ÷ 2005; Figura 7b) i settori 12 ÷ 17 e il 21 risultano in forte erosione, mentre tutto il tratto dell'intervento (settori 1 ÷ 11) subisce dinamiche alterne, ma con una tendenza generale alla progradazione della linea di riva (+0.42 m) sebbene nel settore 5 si verifichi una evidente erosione. Il litorale del Gombo continua a vedere una riduzione apprezzabile della spiaggia emersa, che dà luogo alle già descritte pulsazione del tratto posto sottoflutto (sette n. 19 in progradazione).

Fra il 2005 e il 2007 (Fig. 7c) tutto il tratto di litorale oggetto dell'intervento registra o una consistente progradazione o una erosione assai modesta, mentre il tratto compreso fra il Gombo e il Fiume Morto Nuovo risulta interessato da un processo erosivo di entità leggermente superiore a quella degli anni precedenti. Nel tratto in cui è stato effettuato il ripascimento in ghiaia si è formato un cordone che viene attaccato dalle onde durante gli eventi estremi (Fig. 9) ma che risulta quasi ovunque idoneo a prevenire la tracimazione delle onde nei terreni retrostanti. Ciò, in realtà, avviene solo in brevi tratti e dà luogo alla formazione di *washover fans* ghiaiosi (Fig. 10), non sempre ben identificabili perché ubicati in corrispondenza della vecchia pista del cantiere.

La crescita della spiaggia nei settori n. 20 e 21 è spiegabile alla luce dei lavori eseguiti sul pennello meridionale della foce del Fiume Morto Nuovo: la realizzazione di un martello in scogli per ridurre la riflessione delle onde sulla struttura che innescava una forte erosione alla radice dell'opera stessa (Fig. 11).

La valutazione dell'efficacia dell'intervento viene effettuata confrontando l'evoluzione subita dalla linea di riva fra il 2003 (fine lavori) e il 2007 con quella "attesa" in assenza di lavori, ossia quella che ha caratterizzato il litorale fra il 1993 e il 2001 (Fig. 12). È una procedura che penalizza i risultati raggiunti, dato che non vengono presi in considerazione gli incrementi di superficie determinati dal ripascimento del litorale, ma che ci consente di valutare se le tendenze evolutive della spiaggia sono state modificate dall'intervento.

Sebbene il tempo intercorso fra la fine dei lavori e l'ultimo rilievo sia oggettivamente esiguo (circa 4 anni), si ritiene che l'analisi possa essere considerata affidabile in considerazione della velocità dei processi che, con continuità, attaccavano questo litorale, determinando un'erosione che procedeva a tassi elevatissimi, che non trovano forse pari sulle coste italiane.

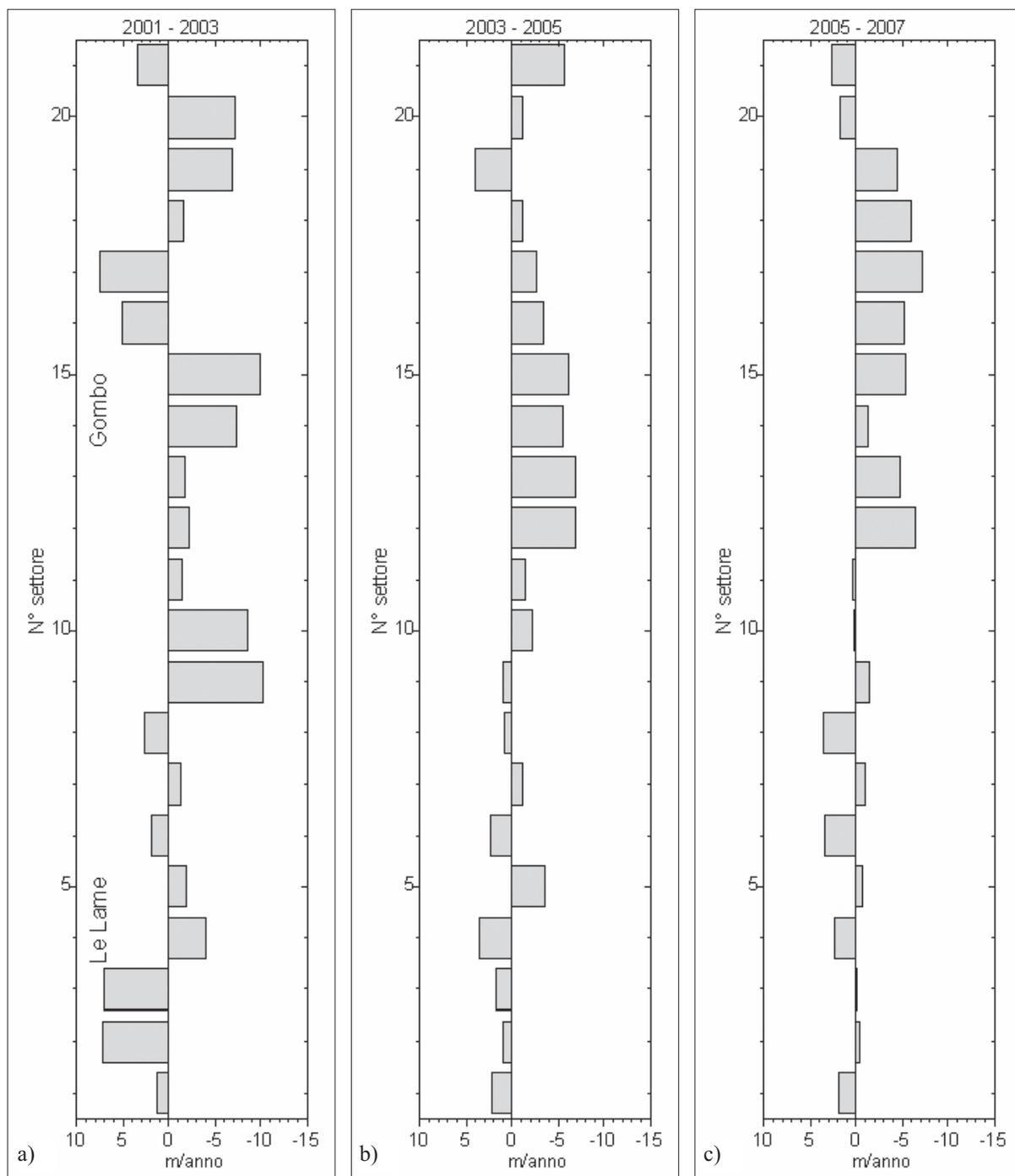


Figura 7 - Tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori calcolati per periodi biennali fra il 2001 e il 2007.

Confrontando il tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori per il periodo 2003 ÷ 2007, con quello “naturale” tenuto fra il 1993 e il 2001 (Fig. 12) si nota come nel tratto interessato dall’intervento si sia avuta una inversione delle tendenze o, comunque, una forte riduzione dell’erosione.

I risultati migliori sono stati ottenuti nei tratti in cui alle opere strutturali sono stati affiancati i ripascimenti in ghiaia (Settori n. 1, 2 e 3) e quelli posti sopraflutto ai pennelli prolungati con setti sommersi (Settori n. 4, 6, 8 e 11).

Al contrario, i tratti posti sottoflutto ai pennelli rimangono in erosione, sebbene tutti con tassi decisamente inferiori a quelli "naturali".



Figura 8 - Seconda cella con ripascimento in ghiaia nelle fasi di realizzazione (30 Ottobre 2001) e sei mesi dopo, a destra, quando parte della ghiaia è coperta dalla sabbia (24 Aprile 2002).



Figura 9 - Seconda cella dove la ghiaia forma un cordone che, in quasi tutte le condizioni meteomarine, impedisce la tracimazione (Foto del 31 1 2007).



Figura 10 - Washover fan formato dietro al cordone ghiaioso in un punto in cui si è avuta tracimazione (Foto del 31 1 2007).



Figura 11 - Erosione della duna alla radice del molo guardiano della foce del Fiume Morto Nuovo. La struttura, invece che favorire la deposizione sul lato posto sopraflutto, determina la riflessione delle onde e l'erosione della spiaggia. In lontananza si vede una cuspide che si posiziona nel punto di convergenza fra il flusso sedimentario normale (diretto verso nord) e quello inverso generato dalla riflessione (diretto verso sud).

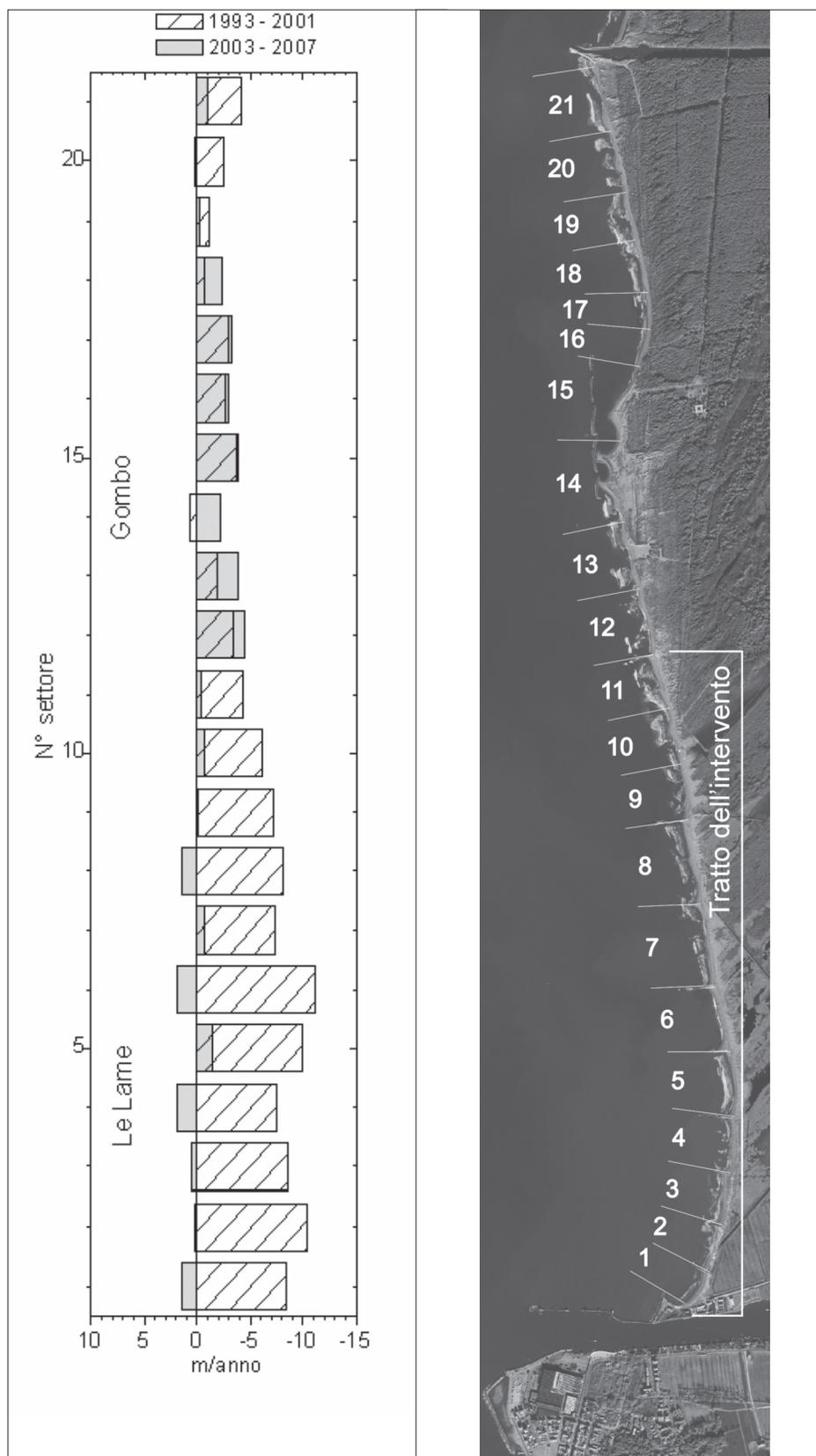


Figura 12 - Tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori calcolato per il periodo successivo alla conclusione dei lavori (2003 - 2007) confrontato con quello del periodo pre-lavori (1993 - 2001).



Figura 13 - Prima cella, in cui la densità di ripascimento è stata minore (alimentata con $30 \text{ m}^3/\text{m}$) e dove in superficie è presente quasi sempre solamente la sabbia che si è depositata a fine versamento.

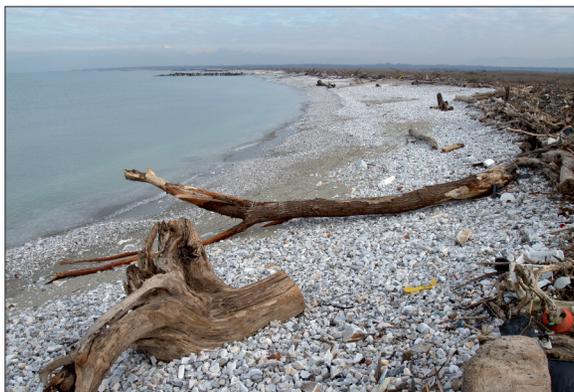


Figura 14 - Terza cella (alimentata con $100 \text{ m}^3/\text{m}$) in cui prevale l'affioramento di ghiaia.



Figura 15 - Le scogliere parallele del Gombo. A sinistra: prima e seconda scogliera riprese da nord verso sud. A destra: foto ripresa dalla seconda scogliera verso nord.

Sembrirebbe di poter affermare che la combinazione pennelli corti e ripascimento in ghiaia abbia dato una risposta decisamente migliore, sia in termini di stabilità della spiaggia che per l'assenza di impatti negativi sui tratti posti sottoflutto.

Purtroppo questi effetti positivi si accompagnano ad un incremento del tasso erosivo dei settori non protetti, dal Gombo al Fiume Morto Nuovo, che potrebbe essere letto come il normale effetto dei pennelli sui tratti di costa posti sottoflutto rispetto alla direzione del trasporto sedimentario.

In realtà l'evoluzione di quel tratto di litorale aveva già portato alla previsione dell'incremento del tasso erosivo ben prima della realizzazione dell'intervento (Bowman e Pranzini, 2001). Da quando le scogliere parallele del Gombo si sono collegate a riva con i tomboli, ossia subito dopo il loro potenziamento del 1985, si è notevolmente ridotto il flusso sedimentario che deve oggi passare al largo delle opere. Si genera così una *zeta bay* (Yasso, 1965; Silvester e Hsu, 1993) con le scogliere del Gombo quale *updrift point* e con la foce armata del Fiume Morto Nuovo quale *downdrift point*. L'approfondimento della spirale per l'erosione della spiaggia posta a nord delle scogliere determina il progressivo spostamento verso sud del punto di collegamento fra la spiaggia e le opere (Fig. 15) con lo sviluppo di una *zeta bay* sempre più ampia (Fig. 16).

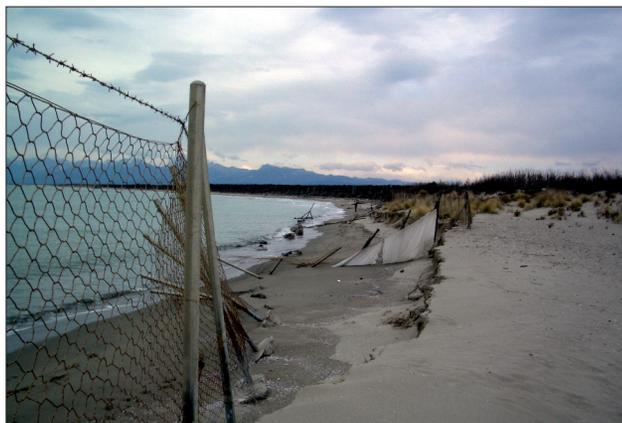


Figura 16 - Parte iniziale del tratto di litorale che collega il Gombo alla foce del Fiume Morto Nuovo: la recinzione che impedisce l'accesso alla Villa Presidenziale viene costantemente demolita nonostante che ogni volta venga ricostruita in posizione arretrata.

Conclusioni

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva del tratto di costa compreso fra la foce dell'Arno e quella del Fiume Morto Nuovo consente di affermare che l'intervento di difesa realizzato fra il 2001 e il 2003 in corrispondenza de Le Lame ha determinato una inversione di quel trend evolutivo che era in atto da più di un secolo.

L'espansione della spiaggia, o anche la sua sola stabilizzazione, dopo decenni di arretramento ad un tasso di circa 10 m/anno, ha un significato oggettivo anche se il quadro completo dei processi in corso non è definibile per l'assenza di dati batimetrici affidabili.

I piccoli pennelli associati al ripascimento in ghiaia del tratto meridionale e quelli prolungati come setti sommersi, diluiti fra i pennelli tradizionali, sembrano essere ben più efficaci di quest'ultimi.

La ghiaia risulta spesso totalmente o in buona parte coperta dalla sabbia sulla spiaggia emersa e, ladove il ripascimento ha raggiunto i 100 m³/m, si è formato un cordone ghiaioso che ostacola la tracimazione durante gli eventi meteomarinari più intensi. In alcuni punti, comunque, anche questo viene rotto e si ha la formazione di *washover fans* che disperdono la ghiaia verso l'interno. Ciò dimostra che la densità di versamento deve essere aumentata.

Il litorale non interessato dai nuovi lavori ha visto un incremento del processo erosivo, ma non è possibile stabilire se ciò sia da imputare all'effetto delle opere o a quella evoluzione che era già stata prevista in lavori precedenti ed innescata dal distacco degli elementi settentrionali delle scogliere parallele del Gombo e al conseguente approfondimento della *spiral bay* che si sviluppa sottoflutto al Gombo.

In ogni caso il bilancio netto di superficie ha visto una perdita di 238.000 m²/anno fra il 1993 e il 2001 e di soli 35.000 m²/anno fra il 2003 e il 2007, corrispondenti rispettivamente ad arretramenti di 5.2 e 1.5 m/anno, segno anche questo di un effetto "globalmente" positivo dell'intervento.

Ringraziamenti

Studio effettuato nell'ambito di una convenzione di ricerca in atto fra la Provincia di Pisa e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze. Alcuni dati sono stati prodotti nell'ambito del Progetto Interreg IIIc BEACHMED-e OpTIMAL e del P.R.I.N. 2004.

Bibliografia

- Aminti P.L., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2003) - *'Back to the beach': converting seawalls into gravel beaches*. In *Soft Shore Protection, Coastal Systems and Continental Margins Volume 7*, C. Goudas et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 261-274.
- Bartolini C. e Pranzini E. (1979) - *Le alterazioni del bilancio sedimentario dei litorali toscani*. Convegno sulla Difesa del suolo. Firenze, maggio 1979. 8 pp.
- Bowman D. e Pranzini E. (2003) - *Reversed response within a segmented detached breakwater - the Gombo case, Tuscany coast, Italy*. *Coastal Engineering*, 49: 263-274.
- Bowman D. e Pranzini E. (2001) - *Erosion within a segmented detached breakwater (Gombo Presidential Villa beach, Tuscany, Italy)*. Proc. 5th Medcoast Conf, Hammamet, Tunisia, pp. 1479-1487.
- Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. *Studi costieri*, 4: 119-156.
- Nordstrom K.F, Pranzini E., Jackson N. (2007) - *The marble beaches of Tuscany*. Geographical review (submitted).
- Pranzini E. (1989) - *A model for cusped delta erosion*. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE. Charleston, SC. *Coastal Zone '89*. Pp. 4345-4357.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. *Geomorphology*, 1-2: 125-132.
- Silvester R. e Hsu J.R.C (1993) - *Coastal stabilization. Innovative concepts*. PRT Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp 578.
- Yasso W. (1965) - *Plan geometry of headland-bay beaches*. *Journ. Geology*, 73: 702-714.

Manoscritto ricevuto il 5/5/2007, accettato il 21/1/2008.